

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUSTAVO COITINHO DAL MOLIN

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA
PARA A INSTALAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES NO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFRGS**

Porto Alegre

2018

GUSTAVO COITINHO DAL MOLIN

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE
PAINÉIS SOLARES NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA
UFRGS**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2018

GUSTAVO COITINHO DAL MOLIN

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE
PAINÉIS SOLARES NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA
UFRGS**

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Profa. Dra. Gladis Bordin

Prof. Msc. Igor Pasa Wiltuschnig

Dedico este trabalho a todos meus amigos, sem os quais não chegaria aonde cheguei.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmã, e familiares que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Ao Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro pela orientação, apoio e confiança.

Aos colegas do curso, pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante todos esses anos juntos.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste. É o que acontece com a maioria das pessoas.

Steve Jobs

RESUMO

Uma das principais características de nossa sociedade é o aumento da demanda por abastecimento energético. Uma das formas de se obter energia solar é através dos sistemas fotovoltaicos. Esses sistemas produzem energia elétrica a partir da conversão da luz solar, e o principal elemento desses sistemas são as células fotovoltaicas, feitas geralmente de silício. O trabalho em questão tem como objeto de estudo a geração fotoelétrica, seu dimensionamento e custos envolvidos de instalação para implementação do projeto no prédio da engenharia elétrica da UFRGS. Os resultados do estudo indicam que o valor médio de investimento por Watt, de R\$ 4,50, está condizente com o mercado atual, apontando que o valor deve estar abaixo de 5,01 R\$/Wp (IDEAL, 2018). Também indicam que o tempo médio de retorno do investimento é de 3,7 anos. Isso representa financeiramente um dos melhores investimentos possíveis do mercado, além de altamente seguro. Visando a total utilização da área disponível, é possível atingir geração mensal de até 11000 kWh, muito superior ao consumo, de 6000 kWh. Em relação aos impactos ambientais de um sistema fotovoltaico, observa-se que não há qualquer empecilho. Quanto aos critérios técnicos, o território brasileiro apresenta excelentes condições solares. O sistema fotovoltaico apresenta produção energética no período diurno, coincidindo com o período do pico de demanda de energia. Deste modo, o sistema apresenta-se como um forte auxílio aos sistemas de distribuição e, conseqüentemente, alivia o sistema de transmissão se todos o utilizarem.

Palavras-chave: Energias Renováveis; Geração Distribuída; Painel Fotovoltaico.

ABSTRACT

One of the main characteristics of our society is the increase in the demand for energy supply. One of the ways to obtain solar energy is through photovoltaic systems. These systems produce electricity from the conversion of solar light, and the main element of these systems are photovoltaic cells, usually made of silicon. This work has as object of study the photoelectric generation, its dimensioning and the costs involved for implementation of the project in the electrical engineering building of UFRGS. The results of the study indicate that the average investment value per Watt of R\$ 4.50 is consistent with the current market, which indicates that the value should be below 5.01 R\$/Wp (IDEAL, 2018). They also indicate that the average time of return on investment is 3.7 years. This represents financially one of the best possible investments in the market, in addition to being highly secure. Aiming at the full use of the available area, it is possible to reach monthly generation of up to 11000kWh, much higher than the consumption, of 6000kWh. In relation to the environmental impacts of a photovoltaic system, it is observed that there is no obstacle. As for the technical criteria, the Brazilian territory presents excellent solar conditions. The photovoltaic system presents energy production in the daytime period, coinciding with the period of peak energy demand. In this way, the system presents itself as a strong aid to the distribution systems and, consequently, relieving the transmission system if everyone uses it.

Keywords: Distributed Generation; Photovoltaic Panel; Renewable Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de aquecimento solar	15
Figura 2 – Tipos de energia no Brasil em Julho de 2017	16
Figura 3 - Tipos de sistemas fotovoltaicos	16
Figura 4 – Esquema do sistema solar implementado em uma residência	17
Figura 5 - Sistemas autônomos isolados	19
Figura 6 - Sistema autônomo híbrido	19
Figura 7 - Sistema fotovoltaico isolado – Resumo de atendimento a cargas	20
Figura 8 - Esquema Painel Solar Fotovoltaico	21
Figura 9 - Método de Czochralski.....	21
Figura 10 - Lingotes policristalinos	22
Figura 11 - Perdas entre a energia disponibilizada pelo sol e entregue à carga.	25
Figura 12 - Inversores individuais por módulo fotovoltaico.....	28
Figura 13 - Inversor centralizado.....	29
Figura 14 - Um inversor por cadeia	29
Figura 15 - Sistema de Compensação de Energia Elétrica.....	32
Figura 16 - Célula, módulo e Arranjo Fotovoltaico	34
Figura 17 - Ilustração do Plano de abertura Solar.....	37
Figura 18 - Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro.....	38
Figura 19 - Ilustração dos Solstícios e Equinócios no Hemisfério Sul.....	39
Figura 20 - Topologia de um Sistema Fotovoltaico e componentes de proteção	43
Figura 21 – (a) Presilha para telhas de argila e (b) Presilha para telhas de metal	44
Figura 22 - Módulos montado sobre o perfil de suporte	45
Figura 23 - Painéis fotovoltaicos montados sobre suporte horizontal	45
Figura 24 - Evolução dos preços dos módulos fotovoltaicos, em U\$/kW	48
Figura 25 - Localização do edifício, visão norte	53
Figura 26 - Irradiação Solar no Plano Horizontal.....	54
Figura 27 - Irradiação Solar no Plano Inclinado	54
Figura 28 - Planta-Baixa prédio da Eng, Elétrica.....	55
Figura 29 - Análise de sombreamento realizada no PVsyst para 16h horas do dia 23 de março	56
Figura 30 - Gráfico de fator de perda por sombreamento, braço SUL	57
Figura 31 - Gráfico de fator de perda por sombreamento, braço OESTE	57

Figura 32 - Gráfico de fator de perda por sombreamento, braço EXTRA	58
Figura 33 - Dados Anuais de consumo	59
Figura 34 - Geração em cada mês do ano	62
Figura 35 - Composição do custo total da instalação de um sistema fotovoltaico	65
Figura 36 - Preços de sistemas FV em 2018 por faixa de potência informados pelas empresas.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aproveitamento aproximado da radiação solar pelas células de silício cristalino	25
Tabela 2 – Eficiência dos diferentes tipos de células fotovoltaicas	26
Tabela 3 - Relatório de unidades consumidoras por classe de consumo	58
Tabela 4 - Informações do datasheet do inversor escolhido	64
Tabela 5 - Resumo dos orçamentos realizados	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	14
2.2	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	14
2.2.1	Energia solar fotovoltaica.....	14
2.2.2	Energia solar térmica	15
2.3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	16
2.3.1	<i>Grid-tie</i>	17
2.3.2	<i>Off-grid</i>	18
2.4	PAINEL SOLAR DE SILÍCIO (Si).....	20
2.4.1	Silício Monocristalino	21
2.4.2	Silício Policristalino	22
2.5	PAINEL SOLAR DE FILME FINO	22
2.6	PAINEL SOLAR HÍBRIDO – HJT	23
2.7	EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO	24
2.8	INVERSOR.....	26
2.8.1	Configurações.....	28
2.8.2	As Principais Características de um Inversor Solar (<i>Grid-Tie</i>).....	29
2.9	SISTEMA DE COMPENSAÇÃO E MARGEM DE GANHO	31
3	PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	33
3.1	NOMENCLATURA E ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS USUAIS	33
3.2	PARÂMETROS DE OPERAÇÃO	35
3.3	EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA O DIMENSIONAMENTO	35
3.4	AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR.....	36
3.5	SOLSTÍCIO E EQUINÓCIO	38
3.6	ESTIMATIVA DA DEMANDA	40

3.7	VIDA ÚTIL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	40
3.8	DIMENSIONAMENTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	40
3.9	PAINEL E ARRANJO FOTOVOLTAICO	42
3.10	PROTEÇÃO E ATERRAMENTO	43
3.11	ESTRUTURAS DE SUPORTE E ANCORAGEM.....	44
3.11.1	Suportes para telhado.....	44
3.11.2	Suportes Para Instalação Em Plano Horizontal	45
3.12	CABOS E CONEXÕES.....	46
3.13	ACOPLAMENTO DO PAINEL FOTOVOLTAICO E INVERSOR.....	46
3.14	ASPECTOS DE CUSTOS.....	47
3.15	NORMAS E REGULAMENTAÇÃO	49
3.16	IMPACTO AMBIENTAL	52
4	IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO.....	53
4.1	LOCALIZAÇÃO E TERRENO	53
4.2	ÁREA DE COBERTURA DISPONÍVEL.....	55
4.3	SOMBREAMENTO DA EDIFICAÇÃO.....	56
4.4	DISPONIBILIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR.....	56
4.5	CONSUMO E ANÁLISES DA INSTALAÇÃO	58
4.6	DIMENSIONAMENTO.....	62
4.7	ORÇAMENTOS.....	65
5	CONCLUSÕES	68
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais características de nossa sociedade é o aumento da demanda por abastecimento energético. A industrialização, o aumento dos veículos de transporte e até mesmo a agricultura e a vida urbana, fizeram crescer exponencialmente a dependência mundial sobre a geração de energia.

A preocupação mundial com o meio ambiente e preservação teve início no final século XX, através do mal e indiscriminado uso de matérias-primas de reservas naturais por parte das indústrias e empresas objetivando o lucro. A partir da década de 90 as indústrias começaram a utilizar o conceito de desenvolvimento sustentável, aprimorando o desenvolvimento capitalista, a expansão e maximização do lucro em um mínimo de tempo, porém, se preocupando com os recursos naturais (CRES e colab., 2012)

A poluição ambiental gerada pelo uso excessivo e incontrolável de combustíveis fósseis, falta de planejamento e segurança na planta hídrica, desastres ambientais como ocorrido na cidade de Mariana em Minas Gerais, lançamento de gases de efeito estufa na atmosfera, entre outros, faz a sociedade a nível mundial buscar soluções ambientais mais limpas através da aplicação de energias renováveis e sustentáveis.

Dentre as principais fontes de energia renováveis limpas, pode-se citar a biomassa, biocombustível, eólica, energia solar, hidroeletricidade, hidrogênio, maremotriz, entre outras.

Considerando o aumento relevante na população brasileira e conseqüentemente na demanda de energia elétrica necessária para suprir as necessidades básicas dessa população, se faz necessário cada vez mais novos investimentos neste ramo de atividade. Uma das alternativas mais utilizadas na geração de energia elétrica é a energia hidráulica. Principalmente por ser uma energia barata e, do ponto de vista da produção de resíduos, uma energia limpa.

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para se enfrentar os desafios do novo milênio. E quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia.

Utilizar a energia solar para a obtenção de eletricidade é uma forma de reduzir as emissões de gases do efeito estufa e, em muitos casos, impactos ambientais

ligados à construção de empreendimentos energéticos. Além disso, a flexibilidade de instalação nos mais diversos locais, principalmente integrada a construções em projetos de mini e microgeração residenciais, faz dela uma fonte com alto potencial de expansão no país, de forma a trazer benefícios para a rede elétrica nacional (SELO SOLAR, 2018).

Uma das formas de se obter energia solar é através dos sistemas fotovoltaicos. Esses sistemas produzem energia elétrica a partir da conversão da luz solar, com eficiências da ordem de 15%. O principal elemento desses sistemas são as células fotovoltaicas, feitas geralmente de silício. Um conjunto de células fotovoltaicas ligadas em paralelo, em série ou ambos, constituem um coletor ou painel fotovoltaico.

Este método de conversão energética apresenta como grandes vantagens sua extrema simplicidade, sua característica modular, os curtos prazos de instalação, o elevado grau de confiabilidade dos sistemas e baixa manutenção. Além disso, sistemas solares fotovoltaicos representam uma fonte silenciosa, não-poluente e renovável de energia elétrica bastante adequada à integração no meio urbano, reduzindo quase completamente as perdas por transmissão e distribuição da energia devido à proximidade entre geração e consumo. Outra vantagem expressiva é a descentralização da geração, ficando acessível a qualquer comunidade em qualquer local, por mais remota que seja.

Assim, o trabalho em questão tem como objeto de estudo a geração fotoelétrica, seu dimensionamento e custos envolvidos para implementação do projeto no prédio da engenharia elétrica da UFRGS, na necessidade de entender estes recursos que podem libertar da dependência dos combustíveis fósseis.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, normalmente a partir de fontes renováveis ou mesmo utilizando combustíveis fósseis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica (ANEEL, 2016b).

De forma geral, a presença de pequenos geradores próximos às cargas pode proporcionar diversos benefícios para o sistema elétrico, dentre os quais se destacam o baixo impacto ambiental; a melhoria do nível de tensão da rede e a diversificação da matriz energética.

Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada inferior ou igual a 75 kW, enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e inferior ou igual a 3 MW, para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes (ANEEL, 2016b).

Uma importante inovação trazida pela Resolução Normativa nº 482/2012 é o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Esse sistema permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria, armazenando esse excedente.

Quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) a ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário (para consumidores com tarifa horária) ou na fatura dos meses subsequentes, com limite de 60 meses. Há ainda a possibilidade de o consumidor utilizar esses créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão e caracterizada como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (condomínios), em local diferente do ponto de consumo (ANEEL, 2016b).

2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

2.2.1 Energia solar fotovoltaica

Objeto de estudo deste projeto de diplomação, esta tecnologia converte diretamente os raios solares em eletricidade. O constante avanço desta tecnologia

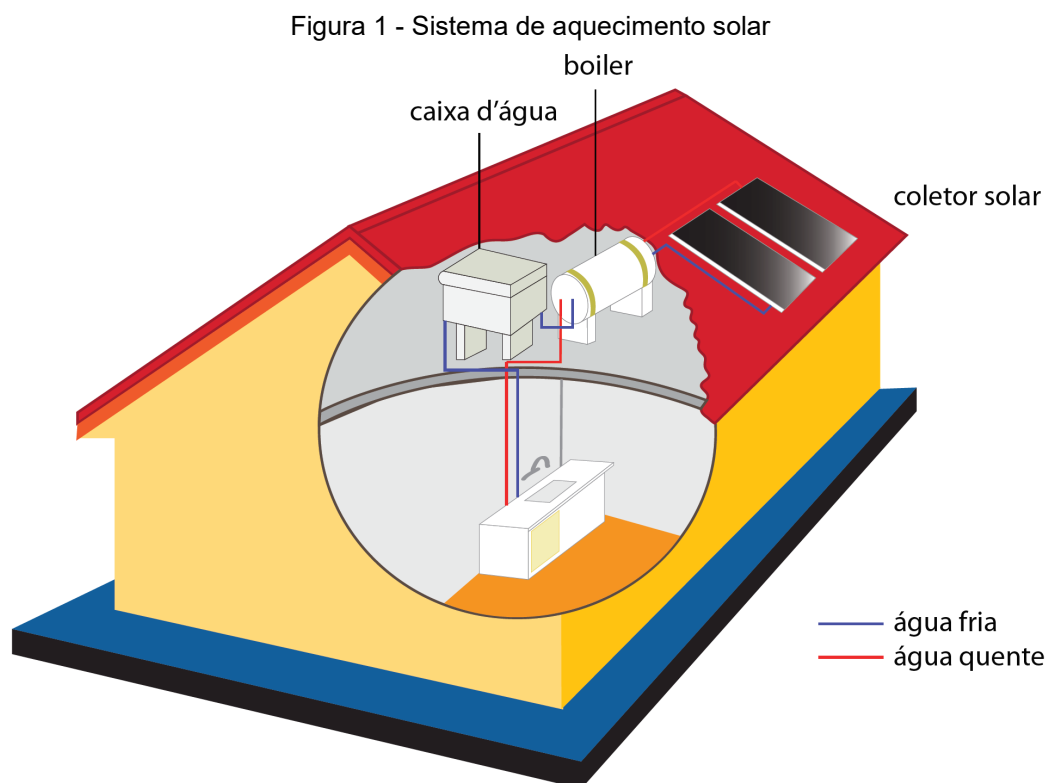
está proporcionando o aumento da capacidade de fornecimento de energia elétrica no mundo todo, permitindo que a energia solar fotovoltaica seja uma opção viável, de baixo custo e com manutenção mínima.

Os Painéis Solares normalmente são instalados em grupos chamados de sistemas ou *strings* fotovoltaicos. Os painéis solares fotovoltaicos são utilizados em casas, comércios ou indústrias, principalmente para gerar eletricidade e reduzir a fatura de energia.

2.2.2 Energia solar térmica

Outra forma de utilizar a energia solar é através de painéis solares térmicos, que usam o calor do sol diretamente para aquecer outro meio, geralmente água.

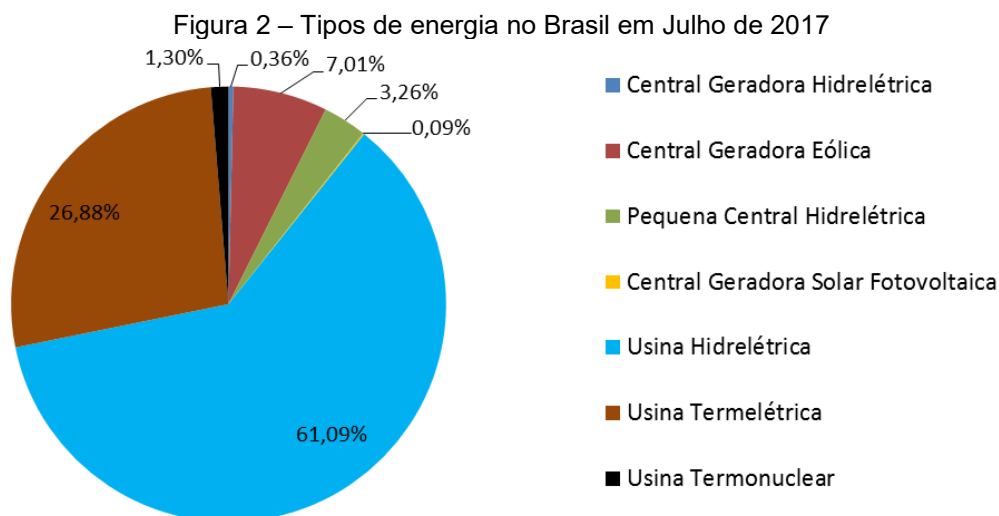
A energia solar térmica é normalmente usada para produzir água quente para uso doméstico ou industrial. Para os dias em que não há sol suficiente para esquentar a água necessária, os sistemas solares possuem um sistema secundário de aquecimento para auxiliar a atingir a temperatura ideal da água. De qualquer forma, são extremamente eficientes e reduzem em até 80% o consumo de energia relativo ao aquecimento da água. A Figura 1 mostra, de forma simplificada, um sistema de aquecimento solar residencial.



Fonte: SOUZA, 2016

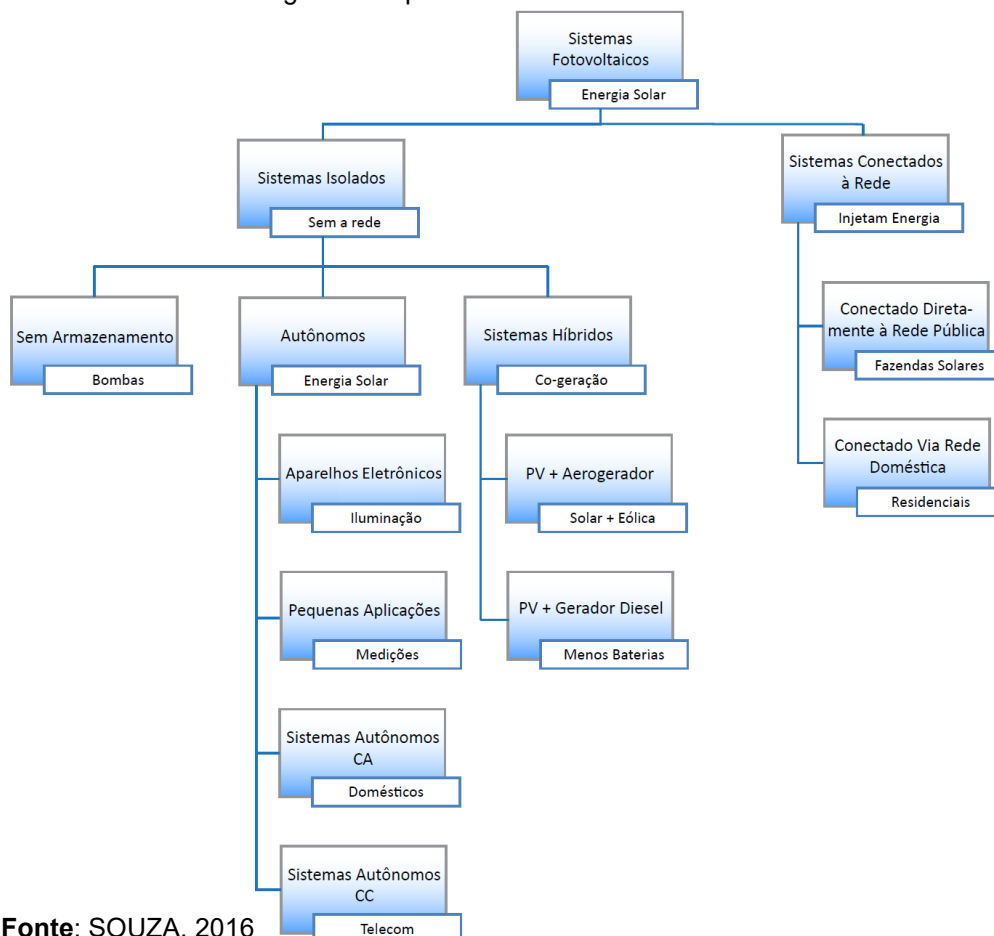
2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Um sistema de energia solar fotovoltaico, também chamado de sistema de energia solar ou, ainda, sistema fotovoltaico, é um sistema capaz de gerar energia elétrica através da radiação solar. Existem dois tipos básicos de sistemas fotovoltaicos: Sistemas Autônomos ou Isolados (*Off-grid*) e Sistemas Conectados à Rede (*Grid-tie*). A Figura 3 exemplifica esta divisão.



Fonte: PORTAL SOLAR, 2018

Figura 3 - Tipos de sistemas fotovoltaicos



Fonte: SOUZA, 2016

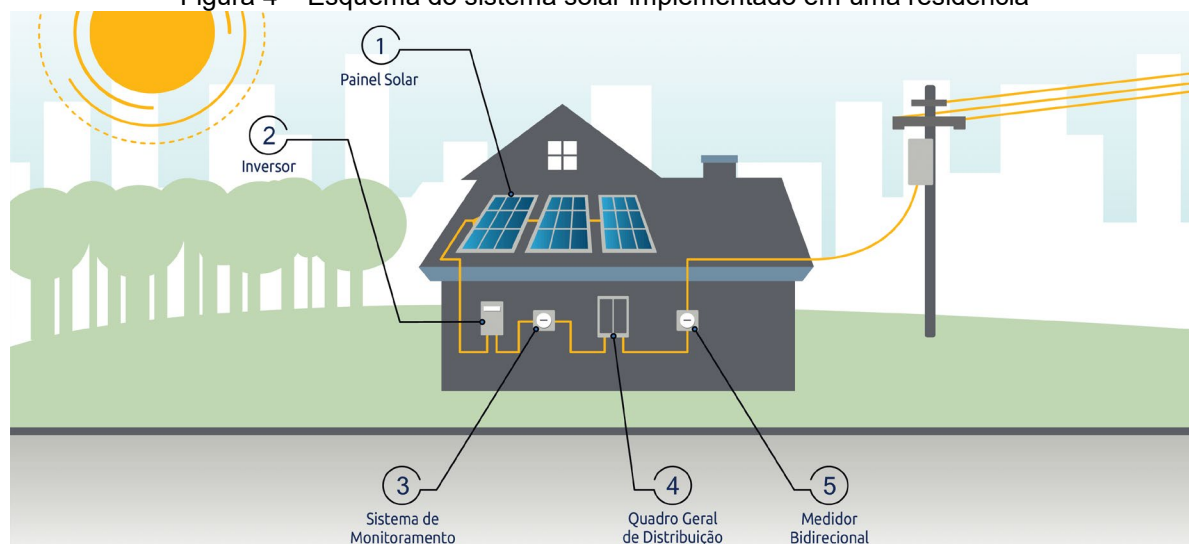
Um sistema fotovoltaico possui quatro componentes básicos:

- Painéis solares: fornecem a energia para o sistema. Podem ser um ou mais painéis e são dimensionados de acordo com a demanda necessária. São responsáveis por transformar energia solar em eletricidade.
- Controladores de carga: servem para evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria, aumentando sua vida útil e desempenho.
- Inversores: são responsáveis por transformar os 12 V de corrente contínua (CC) das baterias em 127 ou 220 V de corrente alternada (AC), ou outra tensão desejada. No caso de sistemas conectados, também são responsáveis pelo sincronismo com a rede elétrica.
- Baterias: Armazenam a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há incidência de sol nas placas.

2.3.1 Grid-tie

Conhecidos como sistemas conectados à rede, estes substituem ou complementam a energia elétrica convencional disponível na rede elétrica. São sistemas que não necessitam de armazenamento de energia, pois toda a potência gerada é entregue à rede instantaneamente. Estes sistemas se diferenciam quanto à forma de conexão à rede. A Figura 4 exemplifica os componentes do sistema conectado à rede.

Figura 4 – Esquema do sistema solar implementado em uma residência



Fonte: ELYSIA ENERGIA SOLAR, 2018

2.3.2 Off-grid

Conhecidos como sistemas autônomos, não são conectados à rede elétrica de distribuição. Os Sistemas autônomos são utilizados em locais remotos ou onde o custo de se conectar à rede elétrica é elevado. São utilizados em casas de campo, refúgios, iluminação, telecomunicações, bombeamento de água, entre outros. Os sistemas autônomos são divididos em:

2.3.2.1 Sistemas autônomos isolados

Consiste no sistema puramente fotovoltaico. Dentre os sistemas isolados, existem muitas configurações possíveis. As configurações mais comuns são:

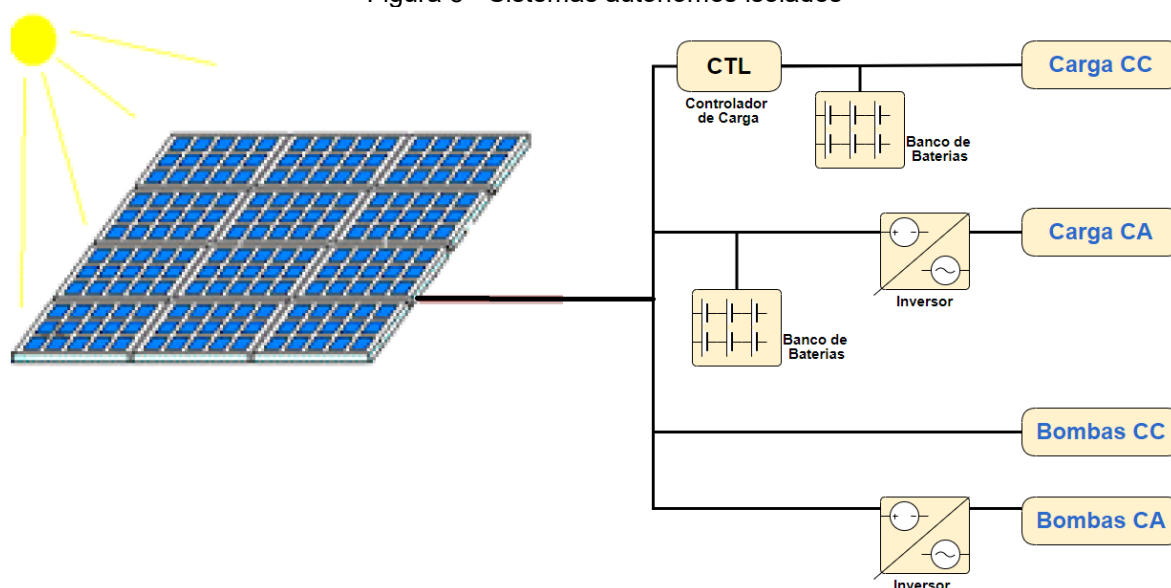
- Carga CC sem armazenamento: a energia elétrica é usada no momento da geração por equipamentos que operam em corrente contínua;
- Carga CC com armazenamento: é o caso em que se deseja utilizar equipamentos elétricos, em corrente contínua, independentemente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea. Para que isto seja possível, a energia elétrica deve ser armazenada em baterias;
- Carga CA sem armazenamento: da mesma forma como apresentado para o caso CC, pode-se usar equipamentos que operem em corrente alternada sem o uso de baterias, bastando, para tanto, a introdução de um inversor entre o arranjo fotovoltaico e o equipamento a ser utilizado; e
- Carga CA com armazenamento: para alimentação de equipamentos que operem em corrente alternada é necessário que se utilize um inversor. Um caso típico de aplicação destes sistemas é no atendimento de residências isoladas que possuem eletrodomésticos convencionais.

A Figura 11 exemplifica essas configurações.

2.3.2.1 Sistema autônomo híbrido

São sistemas onde a configuração não se restringe apenas à geração fotovoltaica. Em outras palavras, são sistemas que, estando isolados da rede elétrica, existe mais de uma forma de geração de energia, como por exemplo, gerador diesel, turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos. Estes sistemas são mais complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação para o usuário, conforme apresentado na Figura 6. Como as várias fontes atuam de forma complementar, a projeção do sistema torna-se mais confiável.

Figura 5 - Sistemas autônomos isolados



Fonte: ISOLADOS, 2008

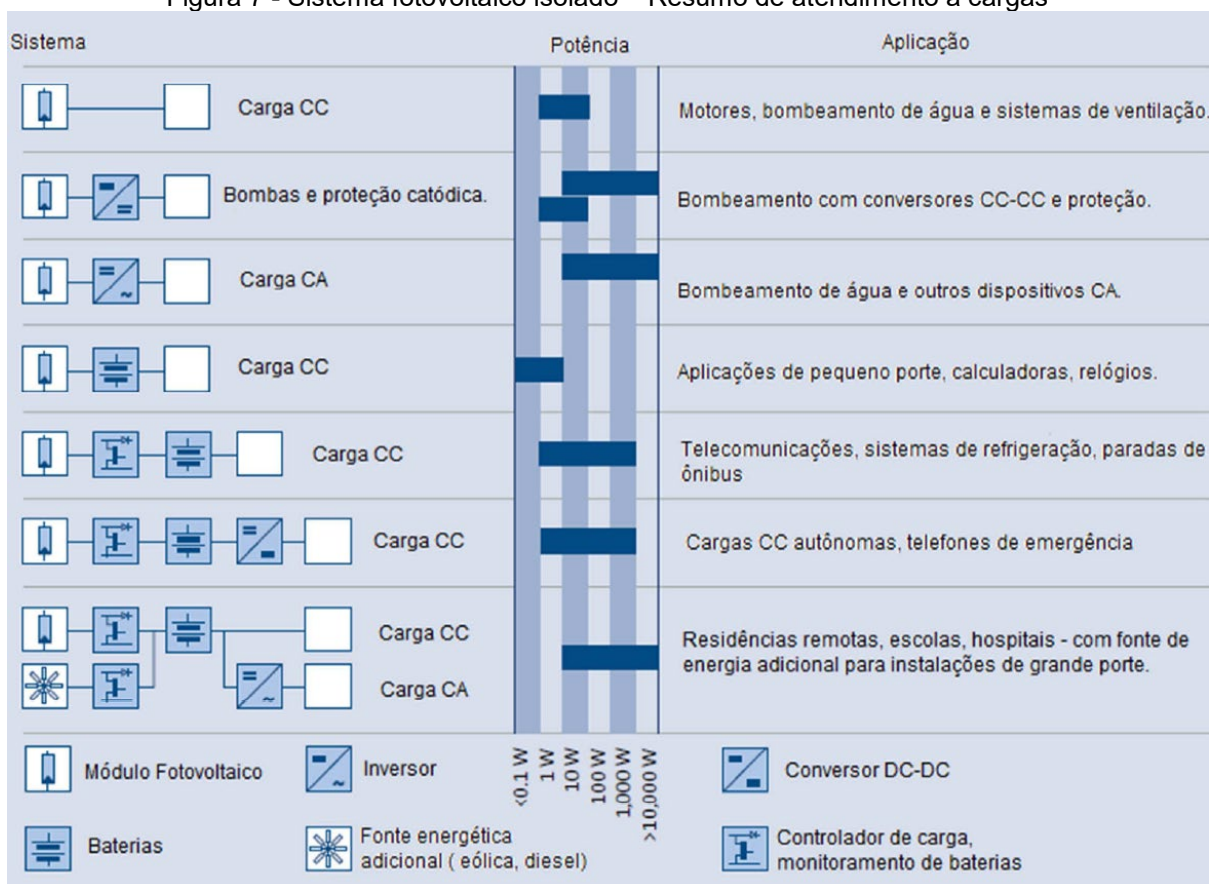
Figura 6 - Sistema autônomo híbrido



Fonte: ISOLADOS, 2008

A Figura 7 apresenta um resumo de possíveis configurações de sistemas fotovoltaicos isolados sem conexão com a rede pública de distribuição. São apresentados sete sistemas distintos com atendimento a cargas alimentadas por CC e CA; com fonte adicionais, com banco de baterias e controladores de carga (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

Figura 7 - Sistema fotovoltaico isolado – Resumo de atendimento a cargas

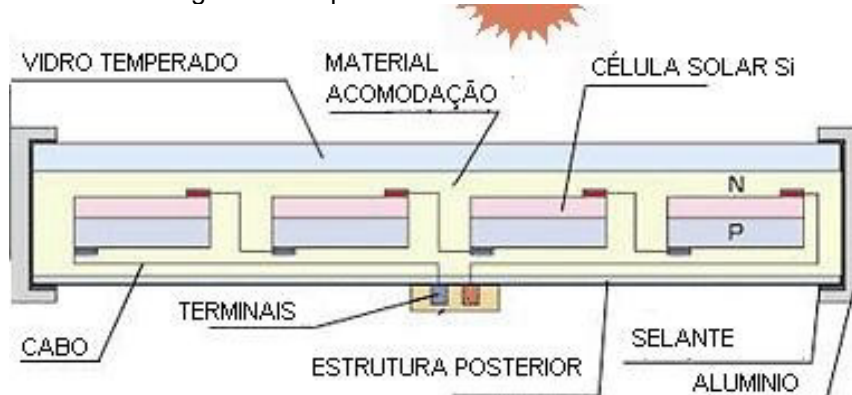


Fonte: REMMERS, KARL-HEINZ, 2014

2.4 PAINEL SOLAR DE SILÍCIO (Si)

O silício é muito comum na natureza, sendo menos abundante apenas que o oxigênio. Por isso, é também o tipo de painel mais comum no mercado atualmente, representando 80% dos produtos disponíveis. Entretanto, o silício está naturalmente combinado a outros materiais, e se apresenta como dióxido de silício e silicatos. Para a obtenção do silício em grau semicondutor, é necessário separar e purificar através de um processo de destilação fracionada. Após essa purificação, obtêm-se um cristal de silício com até 99,9999% de pureza. É justamente esse processo de purificação que onera a fabricação das células fotovoltaicas. A Figura 8 mostra os componentes principais de um painel fotovoltaico de Silício.

Figura 8 - Esquema Painel Solar Fotovoltaico

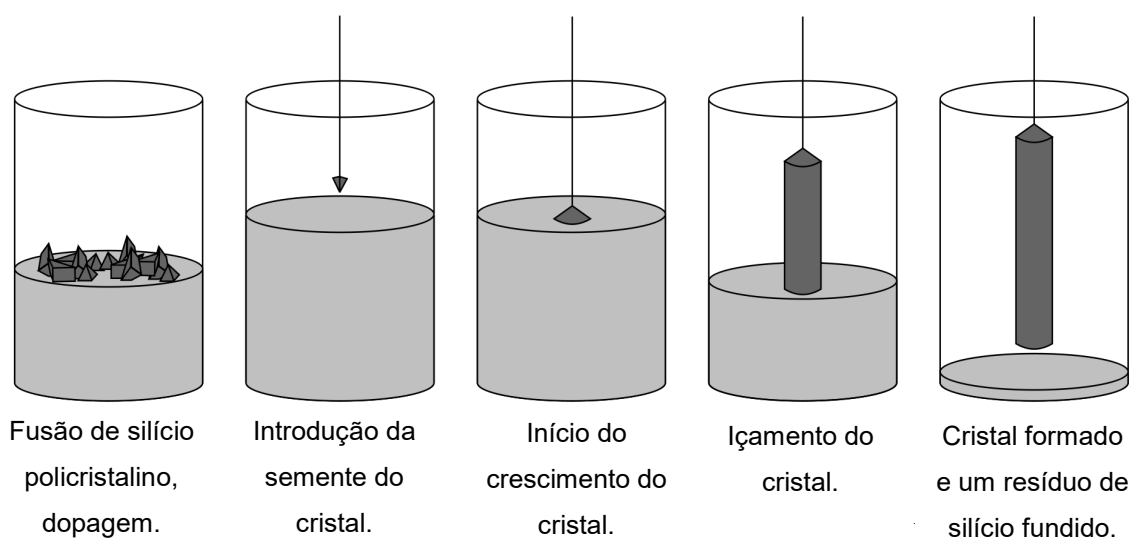


Fonte: SOL NA AMAZÔNIA, 2018

2.4.1 Silício Monocristalino

Uma das formas de se obter o cristal de silício é através do método de Czochralski. Neste processo, uma semente de cristal de silício é inserida numa caldeira e, enquanto o conjunto gira lentamente, essa semente é erguida. A semente de silício orienta os átomos, que se cristalizam em uma única formação cristalina (SOUZA, 2016). A Figura 9 mostra, de forma simplificada, este processo.

Figura 9 - Método de Czochralski



Fonte: WIKIPÉDIA, 2016

Para fabricar células solares para painéis solares monocristalinos, o silício é formado em barras e cortado em *wafers*¹. Como a célula é composta de um único

¹ Na microeletrônica, um *wafers* (ou bolacha) é uma fina fatia de material semicondutor, na qual microcircuitos são construídos pela dopagem, separação química com ácidos, e deposição de vários materiais. (WIKIPÉDIA, 2017)

crystal, os elétrons que geram um fluxo de corrente têm mais espaço para se movimentar. Como resultado, os painéis monocristalinos são mais eficientes que os equivalentes policristalinos.

2.4.2 Silício Policristalino

Painéis solares policristalinos também são feitos de silício. No entanto, em vez de usar um único cristal de silício, os fabricantes fundem muitos fragmentos de silício para formar os wafers do painel. Um dos processos de criação de silício policristalino mais utilizado é o de fundição de lingotes, onde o silício em estado bruto é aquecido no vácuo até uma temperatura de 1.500°C e depois resfriado até uma temperatura de 800°C. Nesse processo é utilizado menos energia, em comparação com o método de Czochralski. São criados blocos de silício de 40x40 cm com altura de 30 cm. O processo segue como o do silício monocristalino, com o corte, tratamento antirreflexo e criação dos contatos frontais (SOUZA, 2016).

Figura 10 - Lingotes policristalinos



Fonte: KITAGAWA SEIKI CO., 2018

Porque existem muitos cristais em cada célula, há menos liberdade para os elétrons se moverem. Como resultado, os painéis solares policristalinos têm classificações de eficiência mais baixas do que os painéis monocristalinos (ENERGYSAGE, 2017).

2.5 PAINEL SOLAR DE FILME FINO

Este tipo representa aproximadamente 20% do mercado atual. Para produzi-lo, o material semicondutor é aplicado em um substrato, geralmente vidro, através de deposição por vaporização, deposição catódica ou banho eletrolítico. Devido à alta absorção luminosa, camadas de menor espessura são suficientes para converter a luz solar em eletricidade. Além disso, esses materiais são mais facilmente dopados e requerem menores temperaturas para sua fabricação, o que, combinado com a

capacidade de automação para produção em larga escala, pode baratear o preço final dos módulos.

- **Silício amorfo (a-Si)**

O silício amorfo não possui uma estrutura cristalina, mas sim uma rede irregular. Com isso, se formam ligações livres que absorvem hidrogênio até a saturação.

A grande desvantagem das células de silício amorfo é a sua baixa eficiência, que diminui nos primeiros 6 a 12 meses de funcionamento, devida à degradação provocada pela luz, até atingir um valor estável.

- **Telureto de cádmio (CdTe)**

As células de telureto de cádmio são fabricadas sobre um substrato de vidro, com uma camada de óxido de estanho índio (OTI) como contato frontal, que é revestido com uma camada transparente de sulfeto de cádmio (CdS) do tipo N, e depois com a camada de telureto de cádmio (CdTe) do tipo P.

A tecnologia de fabricação do CdTe pode ficar ainda mais barata com o aumento da produção em escala. A desvantagem está na toxicidade do cádmio. O CdTe é um composto atóxico estável, mas pode apresentar um risco para o ambiente e a saúde na condição de gás. Felizmente o estado gasoso só ocorre durante a sua fabricação, em centros de produção controlados, e em incêndios.

- **Seleneto de Cobre, índio e gálio (CIS / CIGS)**

Diferentemente do silício amorfo, células CIS não são susceptíveis à degradação causada pela luz, mas apresentam problemas de estabilidade em ambientes quentes e úmidos. Por isso, os módulos fabricados com esse tipo de célula têm que ter boa selagem.

Os módulos CIS são uns dos mais eficientes, e é provável que a produção em massa torne os seus preços mais atrativos que os de silício amorfo. Infelizmente as reservas de índio estão cada vez mais reservadas à produção das telas *touch-screen* dos *smartphones* e *tablets*, comprometendo o uso desse material para a indústria fotovoltaica.

2.6 PAINEL SOLAR HÍBRIDO – HJT

Os painéis híbridos também chamados de Heterojunção são muito semelhantes aos painéis monocristalinos pelo processo de fabricação, exceto pelo fato de possuírem uma passivação com camada de Silício Amorfo e outras diferenças. Esta

tecnologia possui eficiência de aproximadamente 20%, além de operar muito bem altas temperaturas, o que é o ideal para esse tipo de produto. No Brasil este produto ainda não comercializado, mas devida a grande insolação do país e altas temperaturas, este seria o mercado ideal para o produto (PORTAL SOLAR, 2018).

2.7 EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Juntamente com o custo da energia por kWh produzido, o grau de eficiência dos sistemas fotovoltaicos é parâmetro fundamental de comparação entre as diferentes tecnologias de geração de energia fotovoltaica.

A eficiência dos painéis fotovoltaicos está ligada diretamente a dois parâmetros. O primeiro é a eficiência de conversão das próprias células fotovoltaicas. A maior parte da energia solar é perdida antes mesmo de ser convertida em eletricidade. O outro parâmetro é à disposição dos painéis em relação ao sol. A incidência solar sobre os painéis varia de acordo com a orientação do sistema, sua inclinação e nível de sombreamento sobre os painéis. (VITTI, 2006)

Em um sistema fotovoltaico completo, ainda existem outros três fatores que influenciam diretamente em sua eficiência: as perdas causadas pelo efeito da massa de ar atmosférica; as perdas nos sistemas de armazenamento de energia (baterias); e as perdas no inversor de frequência (VITTI, 2006). Todas essas perdas devem ser dimensionadas e consideradas na avaliação do sistema solar.

No Brasil, os módulos fotovoltaicos são avaliados/certificados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), onde o selo que atesta a classe de eficiência do módulo é concedido pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), que é um programa do governo federal executado pela Eletrobrás desde 1993 (PROCEL e ELETROBRAS, 2010). Em 2011 o INMETRO definiu os limites de eficiência separados por classes: A (Maior que 13,5%), B (de 13% a 13,5%), C (de 12% a 13%), D (de 11% a 12%) e E (Menor ou igual a 11%). A informação de eficiência pode vir ou não no catálogo de especificações do fabricante, senão, pode ser extraída através da Equação (1).

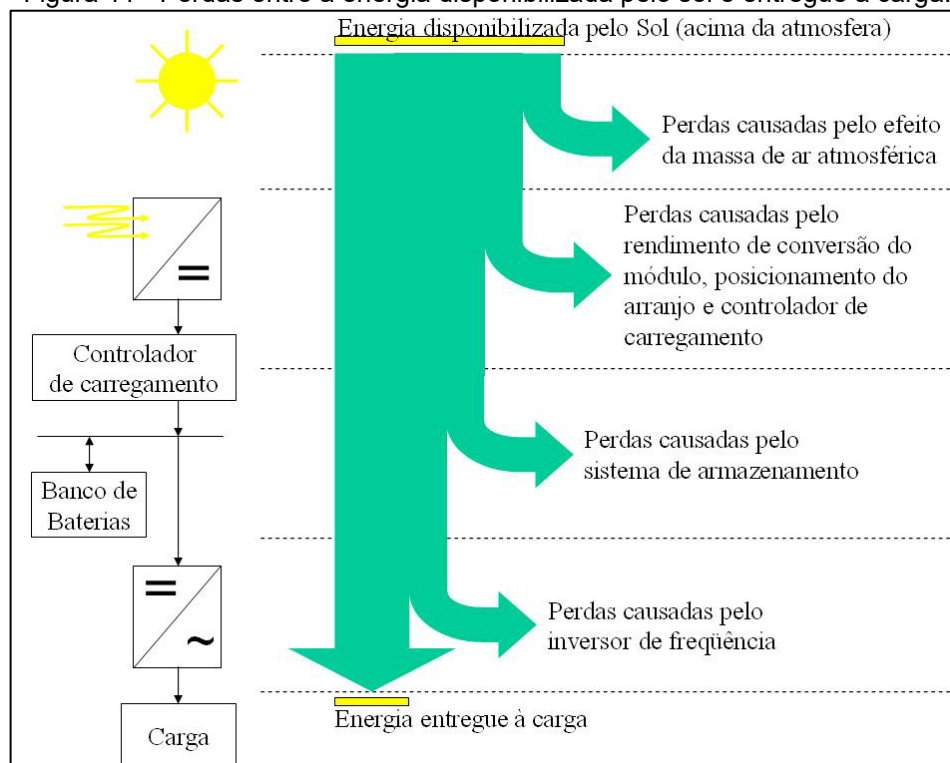
$$\eta_p = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_p * 1000} \quad (1)$$

Onde $P_{m\acute{a}x}$ é a potência máxima instantânea ou de pico do módulo [W] e A_p é a área do módulo [m²] calculada a partir das dimensões informadas no catálogo do fabricante. O valor 1.000 é inserido na expressão para representar a taxa padronizada

de radiação solar em condições de teste, a unidade é $[W/m^2]$ (GAZOLI e VILLALVA, 2015).

A Figura 11 ilustra as perdas entre a energia disponibilizada pelo sol e entregue à carga, a Tabela 1 quantifica as perdas da radiação solar pelas células de silício cristalino, e a Tabela 2 exemplifica a eficiência de diferentes tipos de células fotovoltaicas.

Figura 11 - Perdas entre a energia disponibilizada pelo sol e entregue à carga.



Fonte: VITTI, 2006

Tabela 1 – Aproveitamento aproximado da radiação solar pelas células de silício cristalino

Irradiação solar total	100%
Reflexão e sombreamento dos contatos frontais	-3%
Fótons com energia insuficiente na irradiância de ondas compridas	-23%
Fótons com energia excedente na irradiância de ondas curtas	-32%
Recombinação de elétrons	-8,5%
Gradiente elétrico, especialmente na região do campo elétrico	-20%
Resistência em série	-0,5%
Energia elétrica utilizável	= 13%

Fonte: SOUZA, 2016

Tabela 2 – Eficiência dos diferentes tipos de células fotovoltaicas

Material	Eficiência em laboratório	Eficiência em produção	Eficiência em produção em série
Silício Monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício Policristalino	19,8%	15%	13%
Silício Amorfo	13%	10,5%	7,5%
Telureto de cádmio	18,8%	14%	10%
Seleneto de Cobre	16,4%	10%	9%

Fonte: SOUZA, 2016

2.8 INVERSOR

Inversor é o componente responsável pela conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) gerando a tensão elétrica na frequência da rede local, com baixo teor de harmônicos e onda de forma senoidal. Conhecido como conversor CC-CA, é mencionado na literatura como PCU – *Power Conditioning Unit* (Unidade de Condicionamento de Potência). Os inversores de última geração são equipados com circuito microprocessados, visando otimizar a geração de energia elétrica com rápida atuação sobre as células dos módulos solares (RÜTHER, 2004).

A tensão elétrica de entrada de um inversor é determinada pelo número de módulos conectados em série formando uma cadeia, enquanto a corrente elétrica de entrada é determinada pelo número total de cadeias. Para potências inferiores a 4,6 kW, podem converter a energia CC em monofásica e a interligação com a rede de distribuição ocorre de maneira direta (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

A vida útil não acompanha a dos módulos fotovoltaicos, e a operação geralmente não apresenta falhas em até 8 anos de utilização. Após este período, manutenções usualmente serão necessárias. O local de instalação necessita ser limpo e ventilado, necessário para dissipar o calor gerado na conversão de energia (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

Segundo PINHO; GALDINO (2014), em se tratando de um edifício comercial onde diversas cargas são acionadas por partidas de motores elétricos (monofásicos e

trifásicos), surtos de corrente de cerca de 8x acima da corrente nominal devem ser suportados dentro de intervalos de tempo limítrofes (atualmente, a presença de chaves compensadoras atenua esse efeito, juntamente com os soft-starters). As principais especificações para inversores são: tensão de entrada CC, tensão de saída CA, faixa de variação de tensão aceitável, potência nominal, potência de surto, frequência, forma de onda e distorção harmônica, grau de proteção (IP), temperatura ambiente e umidade do local da instalação (PINHO e GALDINO, 2014).

A função anti-ilhamento também é executada pelo inversor, e é caracterizada pela desconexão imediata do sistema fotovoltaico da rede elétrica de distribuição, sempre que esta estiver sem energia, devido à falha ou manutenção.

Outra função importante do inversor para os sistemas fotovoltaicos é o Seguidor do Ponto de Potência Máxima (SPPM). Como a variação da temperatura ou da radiação fará com que o módulo opere em tensões e correntes diferentes das de máxima potência, o inversor deve medir continuamente as modificações na curva V-I, e atuar de modo a manter o gerador fotovoltaico operando na tensão de máxima potência. Alguns inversores possuem mais de uma entrada, podendo se instalar dois arranjos fotovoltaicos eletricamente diferentes ou com orientações diferentes (PINHO e GALDINO, 2014). Esse é ideal para o telhado em estudo, visto que pode ser utilizado apenas um inversor para os dois “braços” do prédio.

Os principais parâmetros na especificação de inversores para sistemas conectados à rede segundo PINHO; GALDINO (2014) são:

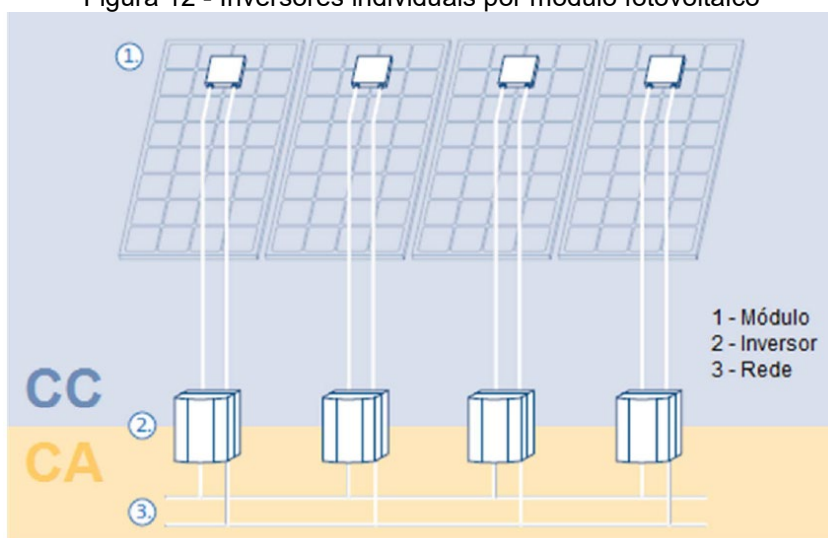
- Forma de onda e distorção harmônica (distorção harmônica inferior a 5%);
- Eficiência na conversão de potência;
- Potência nominal de saída;
- Tensão de entrada;
- Tensão de saída;
- Regulação da tensão;
- Frequência da tensão de saída;
- Fator de potência (deve ser próximo de 1); e
- Grau de proteção.

2.8.1 Configurações

Os inversores disponibilizados no mercado apresentam diversas faixas de operação de modo a fornecer diversas configurações possíveis visando otimizar cada projeto individualmente (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

Uma configuração possível é utilizar um inversor para cada módulo do sistema fotovoltaico, ajustando individualmente o ponto de máxima potência. Apesar do maior custo pelo número de inversores, há redução de custos com cabeamento e riscos de arco elétrico no lado CC, sendo cada inversor conectado em paralelo no lado CA. Este modelo é utilizado para sistemas com geração entre 3 e 5 kW, com consumo local e apresentado na Figura 12 (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

Figura 12 - Inversores individuais por módulo fotovoltaico

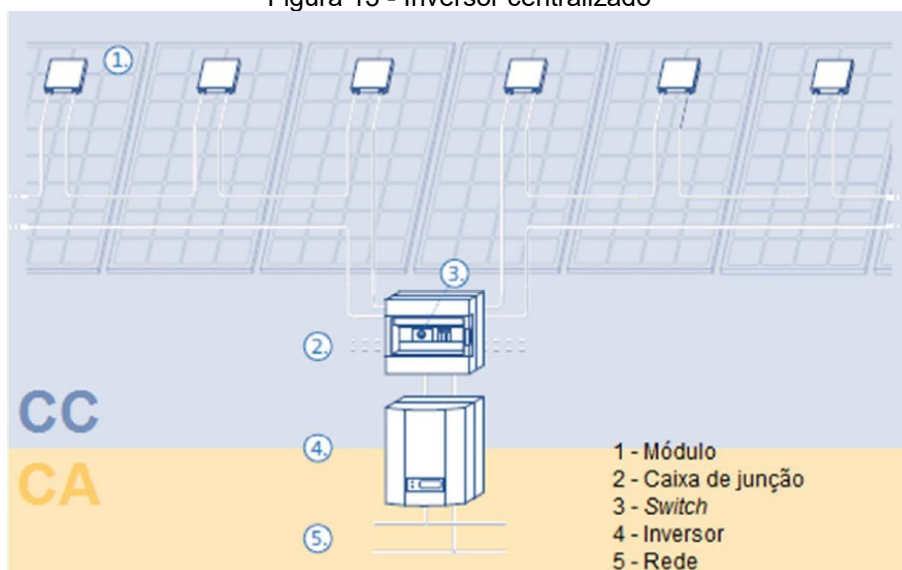


Fonte: REMMERS, KARL-HEINZ, 2014

Alternativamente, os módulos fotovoltaicos podem ser conectados em série formando cadeias conectadas a um switch, que servem como conexão a um inversor central. Esta configuração requer que todos os módulos estejam operando nas mesmas condições, ou seja, sem sombreamento e mesma luminosidade, e atende sistemas de pequeno e grande porte (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

A Figura 13 apresenta o modelo descrito com inversor central.

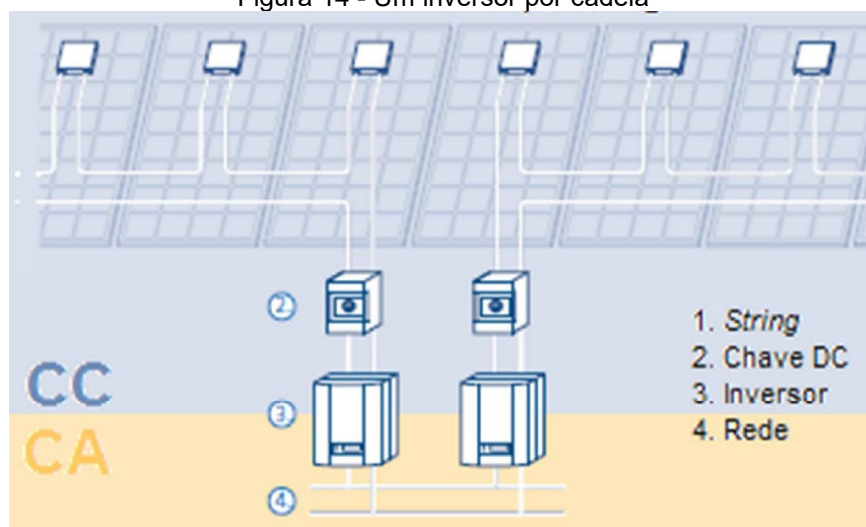
Figura 13 - Inversor centralizado



Fonte: REMMERS, KARL-HEINZ, 2014

A terceira configuração possibilita controlar o ponto de máxima potência de cada módulo sem conexão com os demais, ou seja, formando cadeias independentes. Deste modo, em caso da iluminação não ser idêntica a todos os módulos, o inversor destinado a ele atua independente dos demais, otimizando a geração (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014). O modelo é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Um inversor por cadeia



Fonte: REMMERS, KARL-HEINZ, 2014

2.8.2 As Principais Características de um Inversor Solar (*Grid-Tie*).

A maioria dos Inversores solares no Brasil são bastante confiáveis, mas nem todos. Para assegurar-se de que o inversor solar é confiável, seguem alguns fatos e informações que devem ser consideradas antes de fazer a escolha (PORTAL SOLAR, 2018):

- ***Inversor Solar sem transformador (Transformer-less) ou com transformador.***

O inversor solar sem transformador é um inversor mais leve, e gera menos calor (melhor para áreas fechadas) e tem reputação de ser mais eficientes no processo de conversão de CC para CA. No Brasil, entretanto, diversas distribuidoras exigem que se use inversores com transformador.

- ***Grau de Proteção contra água e poeira (IP) do Inversor Solar***

Apresentado na norma NBR IEC 60529 - Graus de proteção para invólucros de equipamentos elétricos (códigos IP). Isso é muito importante se o inversor solar for instalado em local aberto. Existem diversos graus de proteção, e o aconselhável para locais abertos é a partir de IP 55.

- ***Eficiência do Inversor Solar:***

A eficiência do inversor é medida em porcentagem, indicando o quão eficiente este inversor é em converter a energia solar de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA). A eficiência de um inversor solar para sistemas conectados à rede varia, sendo 94% a eficiência mínima aceitável (PORTAL SOLAR, 2018). Quanto mais alta a eficiência do inversor solar melhor.

- ***Possibilidade de conexão do Inversor Solar ao computador:***

O monitoramento do desempenho do sistema em tempo real, através de computadores em qualquer lugar do mundo, gerando gráficos e comparações. A maioria dos inversores solares já possuem um display onde é possível monitorar o desempenho do sistema, portanto, a conectividade ao computador pode ser dispensável.

- ***Garantia do Inversor Solar***

Todos os Inversores solares vêm de fábrica com garantia de 5 anos e a maioria dos fabricantes oferecem a opção para estender a garantia até 10 anos. Alguns inversores solares já vêm com uma garantia de 10 anos.

- ***Inversor Solar com Duplo Rastreamento (Dual MPPT):***

Para dadas condições ambientais de temperatura e nível de irradiação solar, os arranjos fotovoltaicos podem operar em diversos pontos de corrente, tensão e potência. No intuito de maximizar a eficiência do sistema, permitindo que trabalhe utilizando toda a sua capacidade, esforços são feitos no sentido de levar o arranjo solar a trabalhar em seu ponto de máxima potência (COLLARES, 2013).

O rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - do inglês Maximum Power Point Tracking) em um sistema fotovoltaico é controlado através do ajuste de algum grau de liberdade que desloque o ponto de operação sobre a curva $I \times V$. Para tanto, usualmente aplica-se o MPPT para ajustar o ciclo de trabalho (*duty cycle*) de um conversor C.C./C.C. alocado na saída do arranjo de módulos (COLLARES, 2013).

O duplo rastreamento permite que se tenha, no mesmo inversor, entrada de painéis voltados para dois lados diferentes.

2.9 SISTEMA DE COMPENSAÇÃO E MARGEM DE GANHO

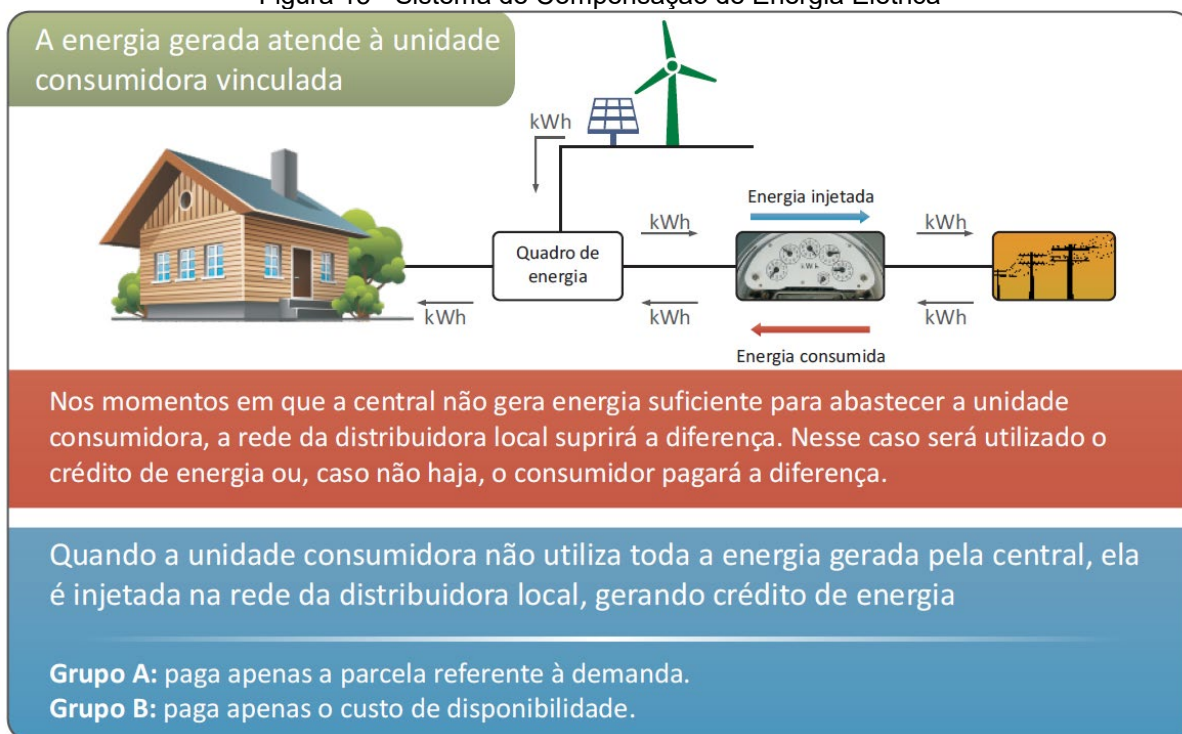
O sistema de compensação de energia elétrica no Brasil tem por base a medição de energia bidirecional, que deve permitir mensurar a energia gerada e a energia consumida, resultando num montante de energia a ser faturado dessa diferença. A Figura 15 ilustra esse procedimento.

Nesta análise de compensação deve entrar também a questão dos impostos cobrados sobre o consumo de energia elétrica. ICMS e PIS/COFINS incidem sobre a diferença entre o que foi consumido e o que foi gerado.

Vale ressaltar também que, por resolução, a energia injetada em determinado posto tarifário (ponta ou fora de ponta) deve ser utilizada para compensar a energia consumida nesse mesmo posto tarifário. Contudo, se houver excedente de geração, os créditos de energia ativa devem ser utilizados para compensar o consumo em outro posto tarifário e no mesmo ciclo de faturamento.

A Resolução Normativa nº 687/2015 aprimora a Resolução Normativa nº 482/2012, e um ponto alterado foi o art. 4º da RN. 482, que estabelece como limite de potência instalada de mini ou microgeração a demanda contratada (em kW) para uma unidade do Grupo A; ou, para o Grupo B, o resultado da multiplicação da corrente nominal do disjuntor de proteção geral da unidade consumidora (UC) pela tensão nominal dado em kVA (BÚSSOLO, 2018). Se a instalação possuir demanda superior ao limite estabelecido, deve ser solicitado junto a distribuidora o aumento de demanda disponibilizada.

Figura 15 - Sistema de Compensação de Energia Elétrica



Fonte: ANEEL, 2016a

Para fins de esclarecimento, os seguintes grupos de tensão são citados (COPEL, 2017):

- Grupo A: Unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômia²;
- Grupo B: Unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão superior a 2,3 kV e faturadas neste Grupo nos termos definidos por lei, caracterizado pela estruturação tarifária monômia³.

² Conjunto de tarifas de fornecimento constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável (alta tensão).

³ Tarifa de fornecimento de energia elétrica constituída por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa (baixa tensão)

3 PROJETO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para projetar um sistema fotovoltaico é necessário um profundo conhecimento da carga, suas características e perfil ao longo dos dias, como também das características da radiação solar incidente no local. O critério de dimensionamento pode ser o de menor custo, maximização da energia suprida (confiabilidade) ou uma combinação de ambos.

Em projetos de aplicação de pequeno porte, com potência instalada inferior à 75kW, o dimensionamento é mais simplificado, baseando-se nos valores médio das cargas e radiação solar. Existem para isto planilhas que orientam passo a passo o dimensionamento do sistema.

Para aplicações de médio e grande porte, onde os custos envolvidos são consideráveis – acima dos R\$ 200.000,00 – o projeto de um sistema fotovoltaico tem que ser baseado em métodos de cálculos mais complexos, onde faz necessário representar a carga e os níveis de radiação solar de forma casada, visando o dimensionamento ótimo do sistema, ou seja, o menor custo e níveis de confiabilidade desejados. Neste caso existem ferramentas computacionais que dimensionam o sistema fotovoltaico, em aplicações autônomas, híbridas e em conexão com a rede elétrica, de tal forma que cargas, radiação solar e sistema gerador são representados de uma forma mais detalhada, inclusive com a representação das perdas dos diversos componentes (FADIGAS, 2004).

3.1 NOMENCLATURA E ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS USUAIS

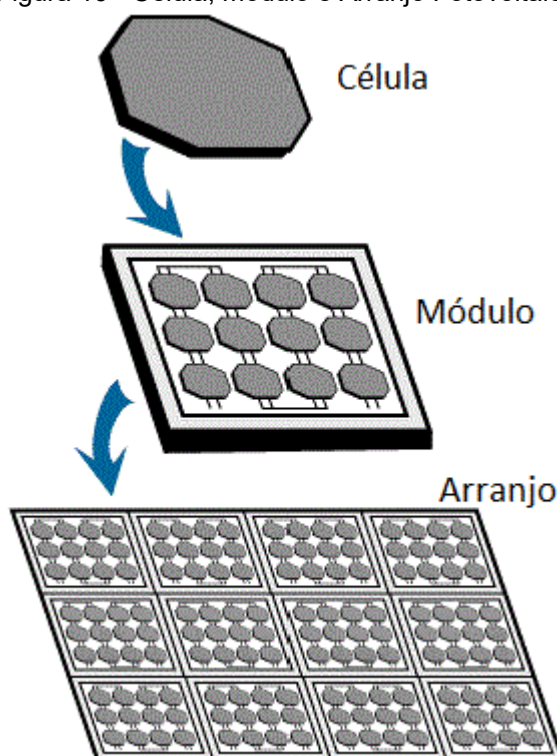
Através da NBR ABNT 10899 (Energia solar fotovoltaica – Terminologia), os mais diversos termos associados às nomenclaturas que por ventura possam aparecer no que se refere à energia solar fotovoltaica estão especificados. Têm-se alguns exemplos de termos recorrentes, que para fins de esclarecimento geral e não propagação de erros ou dúvidas, são explicitados:

- Módulo fotovoltaico – unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica;
- Potência de pico ou nominal – potência de saída (em watt-pico) de um gerador fotovoltaico sob condições padrão de ensaio;
- Sistema fotovoltaico – conjunto de elementos que geram ou fornecem eletricidade pela conversão da energia solar;

- Gerador fotovoltaico – corresponde a uma célula fotovoltaica, a um módulo ou a um arranjo fotovoltaico;
- Arranjo fotovoltaico – conjunto de módulos ou subarranjos fotovoltaicos mecânica ou eletricamente integrados, incluindo o suporte.

A Figura 16 esquematiza os componentes do arranjo fotovoltaico.

Figura 16 - Célula, módulo e Arranjo Fotovoltaico



Fonte: NASA, 2002

As duas principais grandezas elétricas que pode-se destacar de um módulo fotovoltaico, tensão elétrica e corrente elétrica, sofrem influência de duas grandezas térmicas: temperatura e irradiação solar. A primeira influencia a tensão elétrica fornecida pelo módulo, e obviamente, a potência elétrica, respeitando a seguinte relação: quanto mais baixa a temperatura, maior será a tensão elétrica, e quanto mais alta for a temperatura, menor vai ser a tensão elétrica. A irradiação solar, por sua vez, influencia a corrente elétrica gerada pelo módulo, consequentemente também influenciando a potência elétrica da seguinte maneira: quanto menor for a incidência luminosa, menor será a corrente elétrica fornecida pelo módulo (BÚSSOLO, 2018).

As principais especificações encontradas nos catálogos de fabricantes são, além das características de dimensão e peso:

- classe e gradação de potência;
- número de células;

- carga mecânica;
- tipo de tomada;
- tensão elétrica de circuito aberto;
- corrente elétrica de curto circuito;
- resistência à corrente inversa;
- coeficientes de temperatura para determinadas faixas de temperatura; e
- características térmicas e mecânicas para o módulo de conexões elétricas.

3.2 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

A performance de um sistema fotovoltaico é determinada por parâmetros que afetam diretamente seu rendimento. Radiação solar, temperatura dos painéis, sombreamento parcial, descasamento⁴ entre painéis de uma mesma cadeia, resistência dos condutores e estado de limpeza dos painéis são os principais parâmetros que influenciam na performance do sistema gerador fotovoltaico (RÜTHER, 2004).

3.3 EQUAÇÕES UTILIZADAS PARA O DIMENSIONAMENTO

Zomer (2010) salienta que existem diversas formas para se estimar a energia que pode ser gerada por um sistema fotovoltaico. Entre elas a Equação (2) se baseia na irradiação solar local, rendimento do sistema fotovoltaico e na potência instalada.

$$E = G * r * P_{cc} \quad (2)$$

Onde:

E = geração solar fotovoltaica (kWh/dia).

G = irradiação solar diária (kWh/m².dia).

r = rendimento do sistema inversor e conexões (0,8).

P_{cc} = potência do sistema em corrente contínua (KWp).

Segundo Zomer (2010), a potência total instalada pode ser obtida de duas formas, a primeira conforme a Equação (3):

$$P_{cc} = A * E_{ff} \quad (3)$$

Onde:

P_{cc} = potência instalada (KWp).

⁴ A incompatibilidade entre características de módulos acarreta a perda por descasamento (mismatch), onde as células de menor fotocorrente limita a eficiência global do módulo fotovoltaico, afetando o desempenho do sistema FV como um todo (ARAUJO; RANK; BUENO, 2016).

A = área disponível para integração dos módulos fotovoltaicos (m^2).

E_{ff} = densidade de potência (kWp/m^2).

Esta maneira de se obter o potencial é limitada, pois assume que não há nenhum espaçamento entre os módulos e que todos estão localizados no mesmo plano. A segunda maneira de se obter o potencial que poderá ser instalado é através da área livre para integração, considerando a dimensão dos módulos, seu espaçamento e reservando os espaços necessários para manutenção. Então, a partir da área disponível, se obtém o número de módulos que podem ser instalados, calculando-se a potência total instalada através da Equação (4) (ZOMER, 2010):

$$P_{cc} = n * Pot_{nom} \quad (4)$$

Onde:

P_{cc} = potência instalada (kWp).

n = quantidade de módulos fotovoltaicos que cabem em determinada área.

Pot_{nom} = potência nominal do módulo fotovoltaico (kW).

Para o dimensionamento dos fios condutores utilizou-se a Equação (5), obtida da NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão (ABNT, 2008).

$$S = 100 * \frac{2 * L * P * 0,0178}{V^2 * \Delta V} \quad (5)$$

Onde:

S = área da seção transversal dos condutores (mm^2).

L = comprimento do condutor (m).

P = potência (W).

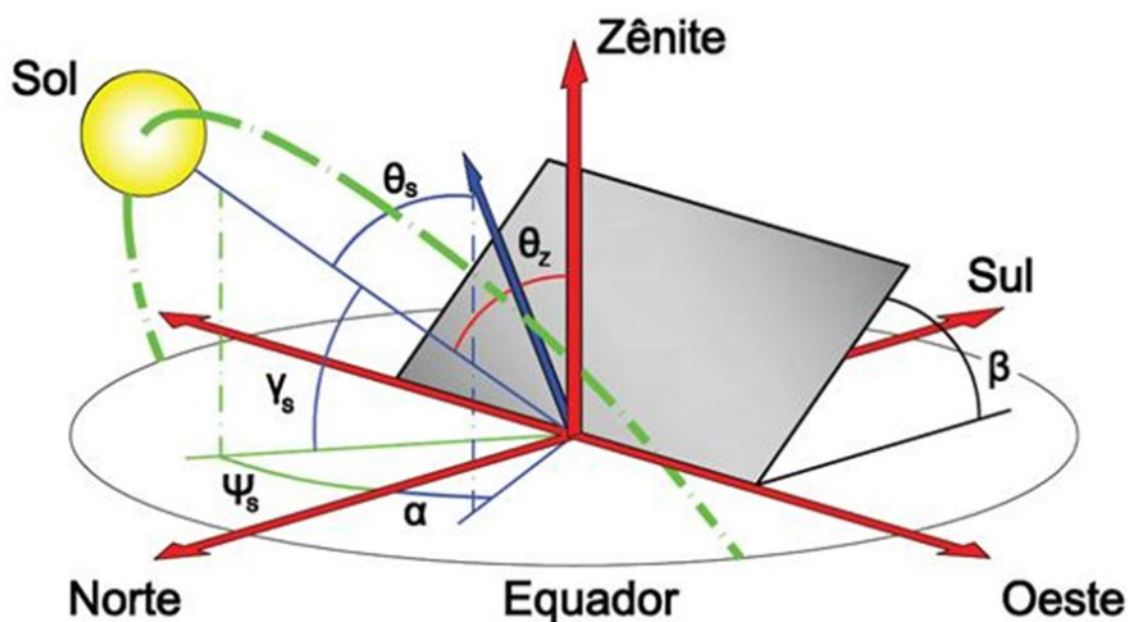
V = tensão de operação (V).

ΔV = queda de tensão admissível (%).

3.4 AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR

Em aplicações para suprimento de pequenas demandas, os módulos são instalados em posição fixa, orientados para o hemisfério norte (para módulos instalados no hemisfério sul) com inclinação segundo a latitude do local e perfil de demanda. Em projetos de maior porte, pode-se tornar viável economicamente instalar um sistema seguidor do movimento do sol de acordo com a hora do dia e com o dia do ano. A Figura 17 ilustra ângulo de posicionamento do sol com relação à abertura do plano do painel solar.

Figura 17 - Ilustração do Plano de abertura Solar



Fonte: USE2E, 2017

A corrente gerada pelo módulo é dada pela expressão $I = I_0 * \cos \theta$, onde I_0 é a corrente gerada com o ângulo de incidência do sol normal à superfície horizontal e θ é o ângulo de incidência do sol com relação à normal (FADIGAS, 2004). Normalmente, as estações meteorológicas fornecem a radiação solar total incidente do plano horizontal, assim sendo é necessário corrigir esta radiação no plano de abertura do painel.

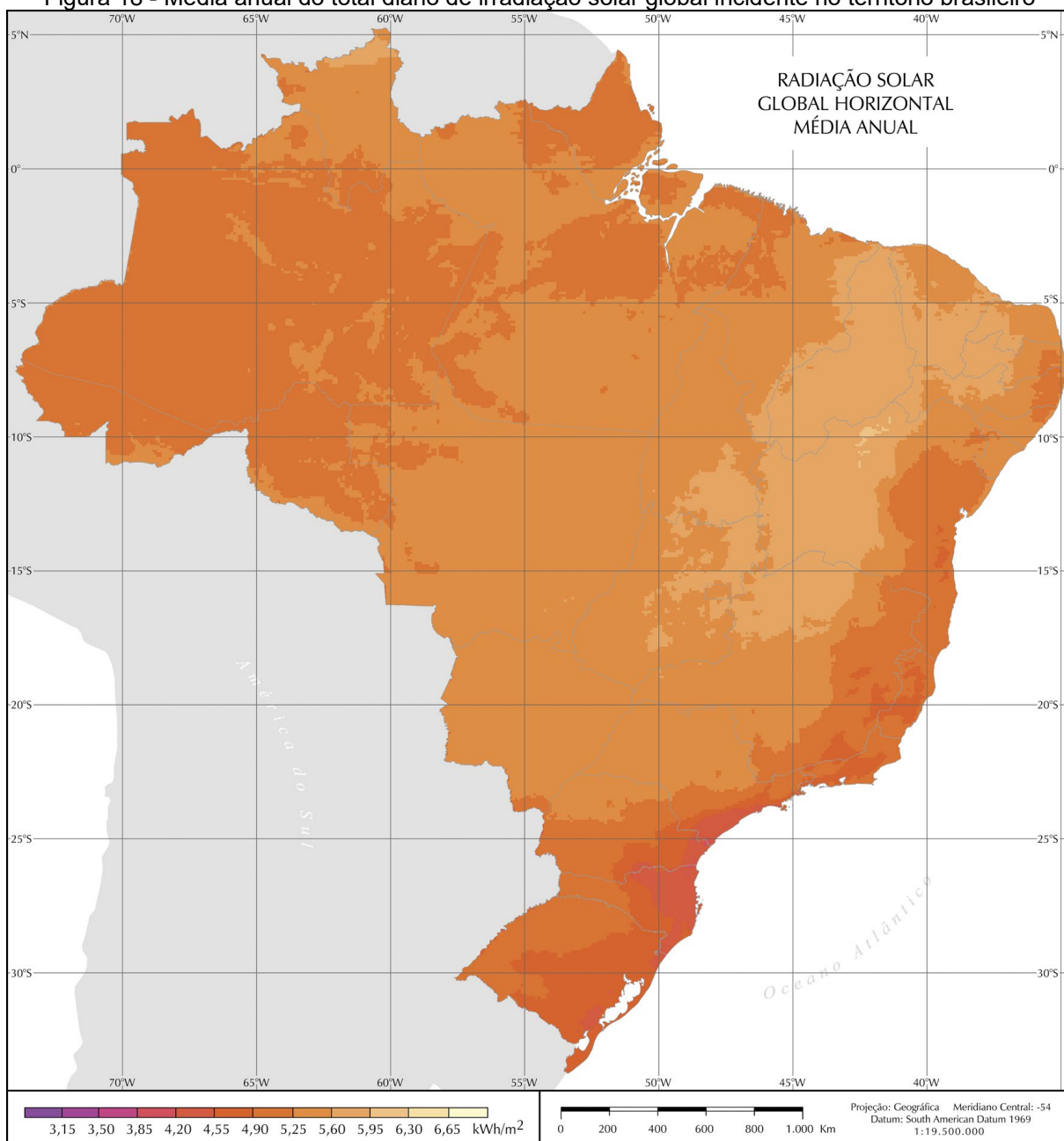
Portanto, como exemplo, supõe-se utilizar uma radiação solar horária de 5,6 kWh/m² no plano horizontal e inclinação segundo a latitude de Porto Alegre de 30° (painel direcionado para a linha do equador). A seguinte correção deverá ser feita para obter a radiação solar incidente no plano de abertura do painel.

$$\text{Radiação solar no plano de abertura} = 5,6 \text{ kWh/m}^2 * \cos 30^\circ \quad (6)$$

$$\text{Radiação solar no plano de abertura} = 4,85 \text{ kWh/m}^2 \quad (7)$$

Os dados de radiação solar também podem ser especificados em termos de densidade de potência (kW/m²), valor médio ao longo do dia, e energia acumulada ao longo de um dia em número de horas de sol pleno. A Figura 18 Representa a média anual do total diário de irradiação solar no território brasileiro.

Figura 18 - Média anual do total diário de irradiação solar global incidente no território brasileiro



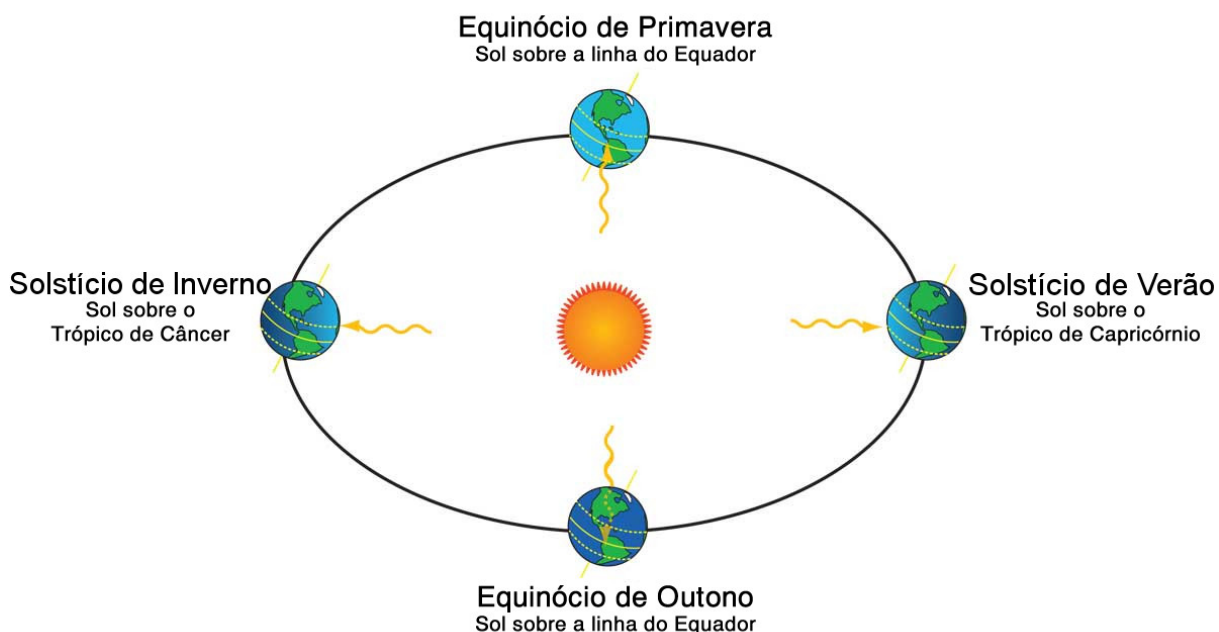
Fonte: PEREIRA et al., 2006

3.5 SOLSTÍCIO E EQUINÓCIO

A inclinação do eixo de rotação da Terra faz com que a incidência dos raios solares sobre os hemisférios sul e norte não seja homogeneamente distribuída no curso de uma translação. Sendo fixa a orientação do eixo de rotação, a porção da superfície terrestre mais voltada para o Sol vai gradativamente se alternando entre os hemisférios conforme o planeta percorre sua órbita. Ora a região austral da superfície está sujeita a uma maior insolação, ora a região setentrional (SILVA, 2018).

Existem quatro posições orbitais do planeta marcantes para a transição. Em dois pontos da órbita, os raios solares incidem igualmente sobre ambos os hemisférios, enquanto há outros dois em que cada hemisfério, respectivamente, atinge a máxima insolação. São eles os chamados solstícios e equinócios, eventos astronômicos que delimitam as estações do ano.

Figura 19 - Ilustração dos Solstícios e Equinócios no Hemisfério Sul



Fonte: SILVA, 2018

O solstício se caracteriza pela máxima incidência de raios solares sobre um determinado hemisfério e, conseqüentemente, pela mínima incidência sobre o outro. Por volta do dia 21 de dezembro, ocorre o solstício de verão no hemisfério sul. A insolação no hemisfério sul é máxima e o dia tem a maior duração do ano. Seis meses depois, por volta do dia 21 de junho, a situação se inverte: o hemisfério sul passa pelo solstício de inverno, data em que ocorre a noite mais longa do ano (SILVA, 2018).

A meio caminho entre dois solstícios, a Terra atinge um ponto de sua órbita em que os raios solares incidem perpendicularmente sobre a linha do equador, distribuindo-se igualmente entre os hemisférios. Ocorre então um equinócio. Os equinócios ocorrem por volta do dia 23 de março, equinócio de outono no hemisfério sul, e por volta do dia 23 de setembro, equinócio de primavera no hemisfério sul (SILVA, 2018).

3.6 ESTIMATIVA DA DEMANDA

Para dimensionamento do sistema de geração é preciso analisar as características da demanda, potência nominal, e perfis de consumo ao longo dos meses. A forma mais comum de se especificar uma carga é através do seu consumo diário de energia. Uma forma de avaliar a carga é através do produto do consumo nominal dos equipamentos, expressos em ampères, e do tempo de utilização em bases diária. O consumo pode também ser expresso em Watt-hora (Wh).

Outro fator importante na avaliação da carga é a determinação dos valores extremos de consumo (máximo e mínimo) para que os componentes possam ser dimensionados segundo as condições críticas de operação. Tensão nominal e características adicionais sobre os equipamentos completam a especificação da carga (FADIGAS, 2004).

3.7 VIDA ÚTIL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Quando instalados em ambientes em que o processo corrosivo não é agressivo como em zonas litorâneas, o envelhecimento dos módulos fotovoltaicos ocorre de forma lenta atingindo uma vida útil de 20 ou mais anos, sendo 30 anos o período mais comum ofertado pelos fabricantes em condições normais de utilização (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

Para sistemas fixos nas proximidades do Equador deve se considerar uma pequena inclinação para evitar o acúmulo de água sobre o módulo. A manutenção visando aumentar a vida útil do sistema e mantendo a eficiência de conversão energética consiste em evitar o acúmulo de impurezas que possam vir danificar e sombrear os módulos (TOSO, 2011).

Contudo, o processo de envelhecimento não ocorre apenas pela instalação estar submetida as intempéries do ambiente externo. A ocorrência de picos de tensão e correntes de fuga podem danificar, dependendo da intensidade e duração, permanentemente o sistema. O aterramento do polo negativo do sistema e cabeamento elétrico são itens importantes para evitar perdas e risco elétricos do sistema (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

3.8 DIMENSIONAMENTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

De posse dos dados meteorológicos e da expectativa de demanda de energia para o sistema, parte-se para o dimensionamento do painel fotovoltaico. Trata-se

também de um processo iterativo onde o projetista busca entre a escolha do modelo e o cálculo do número de unidades necessárias para um dado sistema, considerando aspectos como vida útil, confiabilidade e custo.

A escolha do tipo e do número de módulos fotovoltaicos a serem utilizados depende de uma série de fatores, dentre eles:

- tensão nominal do sistema;
- curva característica I x V do módulo;
- custo da área disponível para instalação;
- degradação da performance em função da temperatura ambiente e idade dos módulos; e
- custo e expectativa de vida para o módulo.

O processo de determinação da capacidade instalada dos módulos divide-se basicamente em duas partes: a primeira consiste na determinação da inclinação do arranjo e do mês crítico (de acordo com os dados estimados ou medidos de radiação solar para o local); e a segunda consiste na determinação do número de módulos (FADIGAS, 2004).

Os parâmetros mais importantes para o dimensionamento são:

- consumo calculado para a carga;
- radiação solar global no plano do painel;
- eficiência do banco de baterias; e
- perdas causadas por componentes adicionais.

A determinação da energia gerada pelo painel solar pode ser feita segundo a Equação (8) (FADIGAS, 2004).

$$Eg = \frac{Con}{\eta_I * \eta_F} \quad (8)$$

Onde:

Eg – Energia gerada pelo painel (kWh)

Con – Consumo diário de energia (kWh)

η_I – Eficiência do inversor (%)

η_F – Perdas na fiação (%)

Já a potência instalada pode ser calculada pela Equação (9) (FADIGAS, 2004).

$$P = \frac{Eg}{SP} \quad (9)$$

Onde:

P – Potência instalada em kW

SP – Horas máximas de radiação

Finalmente, a energia anual gerada pelo painel será dada pela Equação (10) (FADIGAS, 2004).

$$EG = P * FC * 8760 \text{ h/ano} * DI \text{ [kWh]} \quad (10)$$

Onde:

EG – Energia anual gerada (kWh)

FC – Fator de capacidade do sistema⁵ (%)

8760 – Número de horas no ano

DI – Disponibilidade do sistema⁶ (%)

A metodologia apresentada anteriormente é simplificada, e é a utilizada para dimensionar sistemas de pequeno porte. Tal metodologia, por se basear em valores médios dos componentes, muitas vezes conduz a um dimensionamento que maximiza a confiabilidade e eleva o custo final do projeto.

Existem também muitas maneiras mais adequadas para um dimensionamento ótimo do sistema. Por se tratar de metodologias que se utilizam de dados numa base horária, normalmente se utiliza de ferramentas computacionais baseadas nestas metodologias para simular o sistema.

3.9 PAINEL E ARRANJO FOTOVOLTAICO

Define-se painel fotovoltaico como sendo um conjunto de módulos fotovoltaicos. Um conjunto de painéis fotovoltaicos é um Arranjo Fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos mais comuns no mercado (silício cristalino) produzem entre 50 W e 375 W de potência, apresentando tensões elétricas máximas de até aproximadamente 40 V, chegando a fornecer 8 A de corrente elétrica por módulo (GAZOLI e VILLALVA, 2015).

Os módulos de filme fino podem oferecer em torno de 50 W a 110 W, apresentando tensões de saída de até 70 V. As correntes de saída são inferiores aos valores

⁵ O fator de capacidade de uma estação de geração de energia elétrica é a proporção entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a capacidade total máxima neste mesmo período.

⁶ A disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (ANEEL, 2005).

encontrados no módulo de silício cristalino, requerendo um número maior de conjuntos para alcançar a produção de energia necessária (GAZOLI e VILLALVA, 2015).

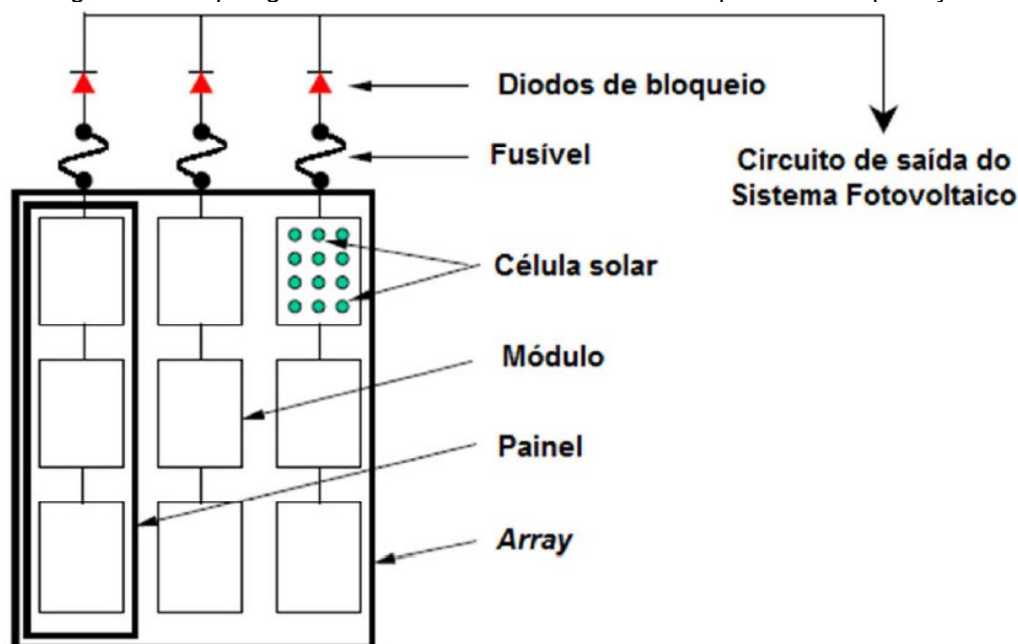
Quando a potência de um painel é muito grande, de tal maneira que as correntes elétricas geradas são demasiadamente grandes para os dispositivos de controle, é preferível subdividi-lo em painéis menores, que podem ser acomodados em uma estrutura única, e seus conectores serão levados a diferentes caixas de conexão, e daí para os dispositivos de controle correspondentes.

3.10 PROTEÇÃO E ATERRAMENTO

A utilização de fusíveis visa proteger os cabos contra sobrecorrentes e sobretensões que possam ocorrer. Além dos diodos de proteção nos painéis, diodos de bloqueio são utilizados para evitar a circulação de corrente reversa pelo sistema. Fusíveis também são instalados entre as baterias e o controlador de carga em caso de sistemas com armazenamento de energia (PINHO e GALDINO, 2014).

Os fusíveis e diodos de bloqueio são ilustrados na Figura 20.

Figura 20 - Topologia de um Sistema Fotovoltaico e componentes de proteção



Fonte: PTTRENERGY, 2013

É recomendado que usinas geradoras com potência acima de 10 kW sejam equipadas com para-raios. Em caso de já existência de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, o sistema fotovoltaico pode ser interligado a este sem a necessidade de um sistema de proteção exclusivo. A proteção dos módulos fotovoltaicos contra descargas atmosféricas deve ser extremamente eficiente, pois um arco elétrico em corrente contínua não se extingue como em corrente alternada

quando a curva senoidal cruza o eixo zero, podendo ocasionar danos ao sistema e provocar até mesmo incêndio (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

3.11 ESTRUTURAS DE SUPORTE E ANCORAGEM

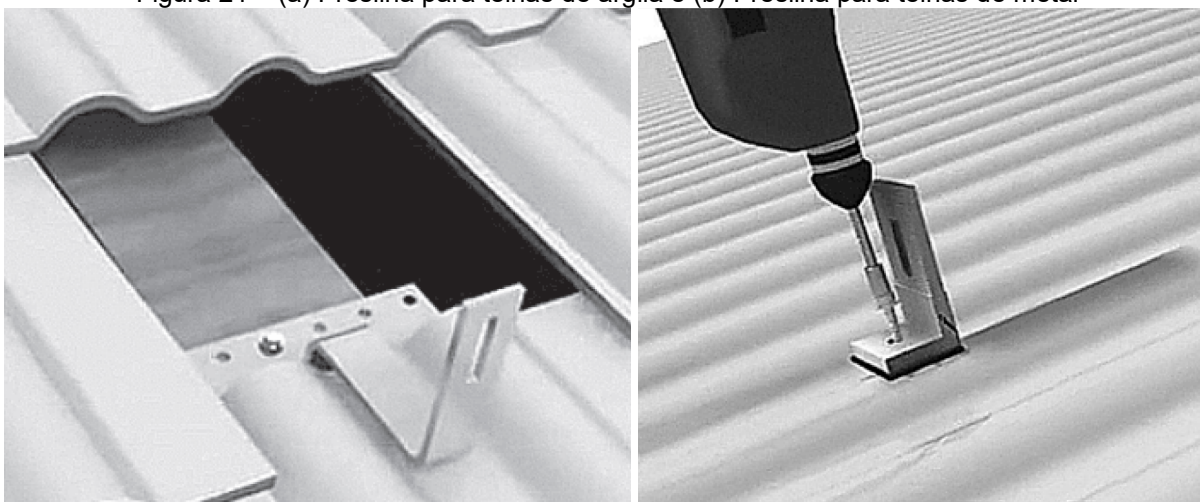
Tão importantes quanto os módulos fotovoltaicos, são as estruturas que os contêm. Para cada caso, há uma solução. No caso de telhados, deve ser verificado o tipo de telha ou de madeiramento – a estrutura que suporta o telhado. Nas instalações em plano horizontal deve ser verificada a altura mínima e também as cargas de vento que adicionam um esforço mecânico aos suportes e ancoragens.

Em todos os casos deve ser observada a correta orientação e inclinação do painel. A correta orientação permite captar o máximo de energia ao meio dia solar e horas próximas, que é o momento de maior concentração da radiação solar. A inclinação adequada permite a melhor captação durante o ano, compensando a menor irradiação nos períodos de inverno.

3.11.1 Suportes para telhado

Para fixar os módulos em telhados, é necessário instalar um perfil de suporte que pode ser afixado nas telhas (no caso de telhas metálicas) ou no suporte do telhado (no caso de telhas de cerâmica/argila ou concreto, conforme Figura 21. Em ambos os casos deve-se ter especial cuidado quando à impermeabilização, tanto pelo sistema fotovoltaico, quanto pela própria edificação.

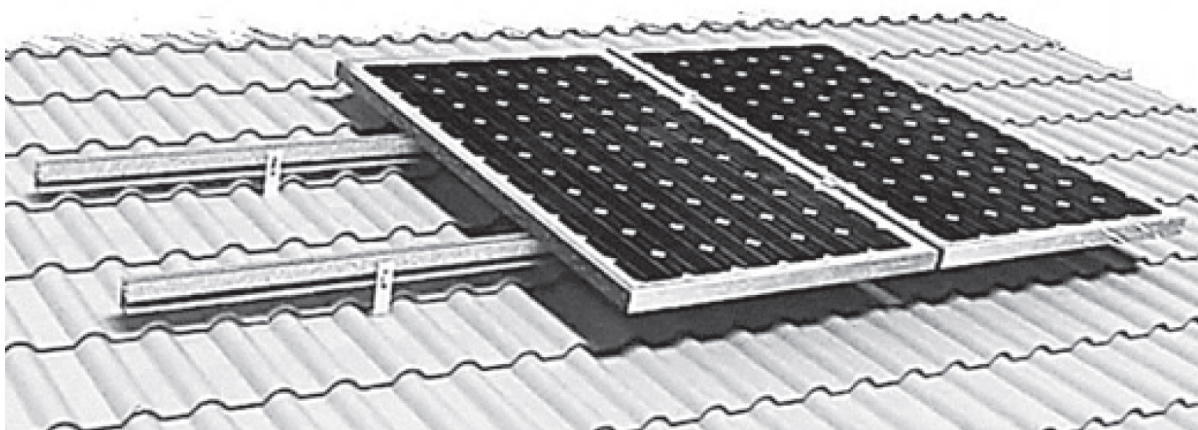
Figura 21 – (a) Presilha para telhas de argila e (b) Presilha para telhas de metal



Fonte: SOUZA, 2016

As presilhas são dispostas para receber o perfil de suporte que será dimensionado e posicionado de acordo aos módulos que comporão o painel fotovoltaico, como mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Módulos montado sobre o perfil de suporte



Fonte: SOUZA, 2016

3.11.2 Suportes Para Instalação Em Plano Horizontal

A construção do painel fotovoltaico no chão ou cobertura permite maior flexibilidade quanto à orientação e inclinação. É a escolha para grandes instalações, onde alguns cuidados devem ser tomados, principalmente quanto ao sombreamento.

Para instalação no chão, o painel deverá ter altura mínima de 30 cm, para evitar o sombreamento causado pelo crescimento de ervas, ou a sujeira na base dos módulos mais baixos, causada pelas gotas de chuva. Esses cuidados são especialmente importantes para os sistemas instalados em localidades remotas e/ou inóspitas.

Para painéis montados em cobertura, a altura mínima recomendável é de 5 cm. Isto é para permitir o escoamento da água da chuva, e a divisão da força do vento em duas componentes, o que diminui a carga de vento sobre o painel.

Figura 23 - Painéis fotovoltaicos montados sobre suporte horizontal



Fonte: PORTAL SOLAR, 2018

3.12 CABOS E CONEXÕES

Um número considerável de conexões elétricas é necessário para conectar módulos, conjuntos, arranjos, inversores, baterias, e qualquer outro dispositivo intermediário, podendo inclusive utilizar cabos com comprimentos consideráveis. Deve-se atentar para a utilização de cabos e conexões seguras evitando falhas, perdas e acidentes. Visando eliminar acidentes por curto-circuito ou falhas de aterramento deve-se atentar para a correta identificação dos polos positivo e negativo (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

O cabeamento pode ser dividido em lado CC e lado CA. No lado CC, são necessários apenas cabos individuais com um núcleo cada. Existem cabos desenvolvidos exclusivamente para sistema solar fotovoltaico, conhecidos como cabo solar. Estes cabos possuem algumas características gerais: alta resistência ao calor, ao frio, ao óleo, à abrasão, ao ozônio, ao ultravioleta, e ao tempo; melhor reação em caso de incêndio, baixa emissão de fumaça, livre de halogênio, retardador de chama; flexível, fácil de descascar, e mecanicamente robusto. (PINHO e GALDINO, 2014)

Após o inversor, no lado CA da instalação, o cabeamento terá três cabos individuais de núcleo único em caso de ligação monofásica, e cinco cabos em caso de ligação de trifásica. Todos os cabos destinados a sistemas fotovoltaicos devem ser resistentes à radiação ultravioleta, à ação da água e a altas temperaturas, admitindo perdas de no máximo 1% (REMMERS, KARL-HEINZ, 2014).

3.13 ACOPLAMENTO DO PAINEL FOTOVOLTAICO E INVERSOR

A escolha do inversor deve ser realizada de acordo com as características elétricas e a configuração do painel fotovoltaico para que toda a energia gerada pelo sistema seja enviada para a rede com a maior eficiência possível.

Os requisitos que devem ser verificados são os seguintes:

- A potência total do painel fotovoltaico deve ser menor que a potência de entrada máxima do inversor;
- A tensão de circuito aberto do painel deve ser menor que a tensão de entrada máxima do inversor;
- A tensão nominal do painel deve estar entre a faixa de tensões do seguidor de máxima potência do inversor;
- A corrente nominal do painel deve ser menor que a corrente máxima de entrada do inversor.

Com os painéis fotovoltaicos e inversores determinados, deve-se determinar as seções dos condutores, tanto do lado de corrente contínua, quanto no lado de corrente alternada. Isto é feito através da Equação (5).

3.14 ASPECTOS DE CUSTOS

Assim como qualquer outra fonte de eletricidade, o custo da energia gerada por células fotovoltaicas consiste essencialmente dos custos de capital, de operação, e de manutenção.

O custo de capital inclui o custo de aquisição do módulo, interconexão dos módulos em forma de painel ou arranjo, estrutura de sustentação, terra e fundações (para módulos instalados no solo), custo do cabeamento, reguladores de carga, dispositivos de chaveamento e inversores, baterias ou conexão à rede elétrica (FADIGAS, 2004).

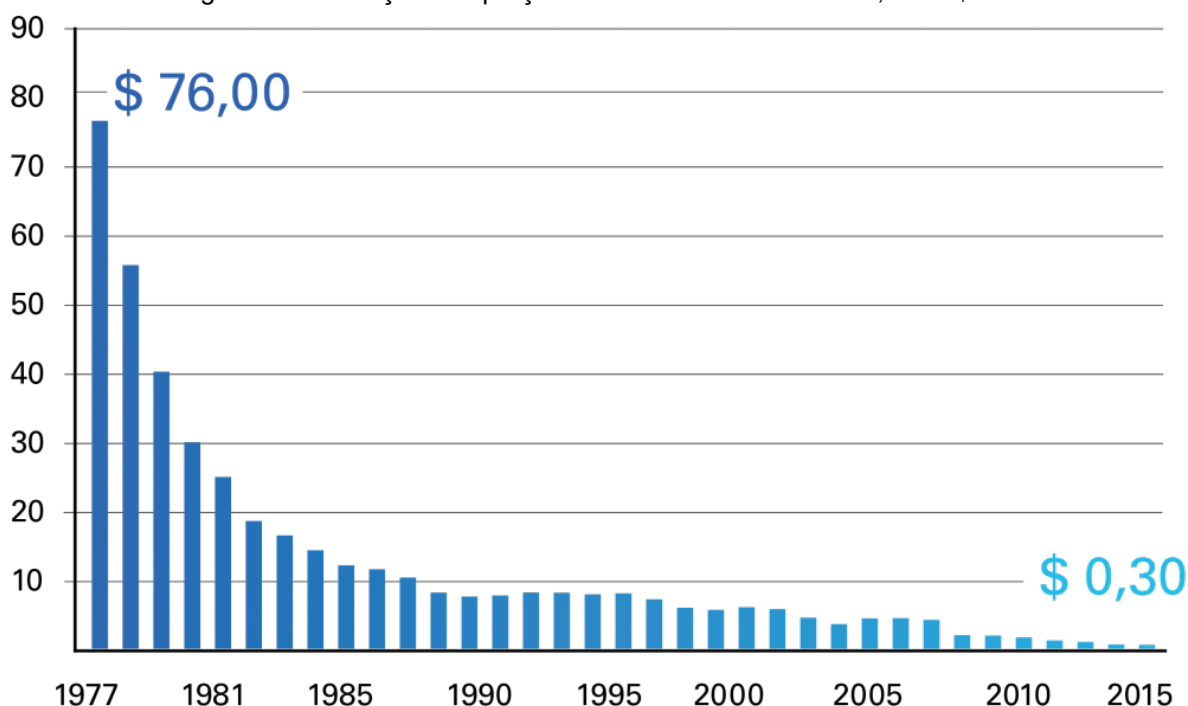
Embora o custo de capital ainda esteja relativamente alto, comparado a outras alternativas convencionais, o custo de operação e manutenção é muito baixo, visto que o sistema não possui partes móveis. Todavia, os módulos requerem uma limpeza periódica devido à acumulação de sujeira, principalmente quando instalados nas áreas urbanas.

Ventos fortes podem distorcer as estruturas de sustentação e a água da chuva pode causar corrosão nas partes metálicas. Além disso, a expansão e contração do painel, provocados pelas variações na temperatura ambiente, podem causar rachaduras, curto-circuitos e desconexões. Todos estes problemas podem ser resolvidos ou minimizados, com uma atenção especial à especificação do material e detalhamento do projeto.

Sistemas que utilizem baterias, requerem manutenção adicional devido a necessidade de checagem periódica dos terminais das mesmas (devido ao processo de corrosão) e de trocas da água destilada.

Embora o custo de um sistema fotovoltaico ainda esteja elevado, ele vem decrescendo ao longo dos últimos anos. Os avanços tecnológicos que promovem um aumento na eficiência de conversão energética e as melhorias nos métodos de produção industriais são os grandes responsáveis pela diminuição nos preços dos módulos fotovoltaicos. A Figura 24 mostra a evolução destes valores desde 1977 até 2015.

Figura 24 - Evolução dos preços dos módulos fotovoltaicos, em U\$/kW



Fonte: BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE, 2017

O custo de geração da energia elétrica depende, além dos custos de instalação, da quantidade de radiação incidente no local, da eficiência do sistema, do fator de disponibilidade (quantidade de horas no ano em que o sistema estará disponível), da taxa de desconto, do período de amortização, e do custo de operação e manutenção (O&M). O custo de O&M, não é de fácil obtenção, porém, as indústrias estimam em torno de 1% do custo de capital (FADIGAS, 2004).

Para se analisar o retorno do investimento, calcula-se o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o tempo de retorno do investimento. De acordo com Montenegro (2013), para análise do retorno de investimento também é necessário definir a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que é uma taxa de juros que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento, ou o máximo que uma pessoa se propõe a pagar quando faz um financiamento.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{F_{ct}}{(1 + TMA)^t} \quad (11)$$

Onde:

F_{ct} = fluxos de caixa anual

TMA = Taxa Mínima de Atratividade

t = número de ordem do ano de operação do sistema

Sobre o valor da tarifa sem impostos homologada pela ANEEL, incidem o imposto estadual ICMS e as contribuições federais PIS e COFINS. Após a inclusão desses impostos se tem a tarifa final de energia elétrica cobrada ao consumidor, definida pela Equação (12):

$$PF = \frac{PH}{1 - PIS - COFINS - ICMS} \quad (12)$$

Onde:

PF = preço final da tarifa (R\$/kWh)

PH = preço homologado (R\$/kWh)

PIS = Programa de Integração Social (%)

COFINS = Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (%)

ICMS = Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação (%).

3.15 NORMAS E REGULAMENTAÇÃO

O sistema de geração distribuída tem ganho incentivos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), pois possibilita a descentralização da geração de energia, acarreta em menores perdas no processo de transmissão pois os consumidores autogeradores podem atender às demandas próximas e ainda reduz as emissões de gases tóxicos na atmosfera, como no caso do uso de termoelétricas. Para o consumidor a geração distribuída está diretamente ligada à economia de gastos com energia, mas em muitos casos também está atrelada ao ideal de sustentabilidade (KALIKOSKI, 2016).

Fundamentada ao longo de encontros e fóruns estabelecidos principalmente pelo Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações (COBEI) e pelo Grupo Setorial de Energia Elétrica Fotovoltaica da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), a primeira Resolução Normativa – nº 482 – foi aprovada pela ANEEL em 17 de abril de 2012 (BÚSSOLO, 2018).

A Resolução Normativa (REN) 482, de 2012, estabelece as condições gerais para acesso de minigeração e microgeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica. Porém, a Resolução Normativa Nº 687, de 2015, alterou algumas das definições da REN 482 e

os módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da ANEEL (PRODIST).

Dentre as alterações fundamentais estão os conceitos de minigeração, microgeração distribuída e sistema de compensação, sendo:

Microgeração Distribuída central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

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, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2015).

Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (ANEEL, 2015).

Em outras palavras, a partir dessa regulamentação tem-se a possibilidade de qualquer cidadão brasileiro ou empresa instalar em seu telhado uma mini ou micro usina fotovoltaica e passar a ter crédito compensatório de energia elétrica. Atualmente, estão vigentes as seguintes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) relativas aos sistemas fotovoltaicos:

- NBR 10899 – Energia solar fotovoltaica, Terminologia;
- NBR 11704 – Sistemas fotovoltaicos, Classificação;
- NBR 16149 – Sistemas fotovoltaicos, Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição;
- NBR 16150 – Sistemas fotovoltaicos, Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, Procedimento de ensaio de conformidade;

- NBR 16274 – Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho;
- NBR IEC 62116 – Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica;

De uma forma geral, os principais documentos regulatórios referentes a este tema são (BÚSSOLO, 2018):

- REN 482/2012 – Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.
- REN 687/2015 – Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.
- REN 414/2010 – Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.
- REN 506/2012 – Estabelece as condições de acesso ao sistema de distribuição por meio de conexão a instalações de propriedade de distribuidora e dá outras providências.
- PRODIST – Módulo 3 – Estabelece as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso, ao sistema de distribuição, não abrangendo as Demais Instalações de Transmissão – DIT, e definir os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão, aplicando-se aos novos acessantes bem como aos existentes.
- FAQ ANEEL – Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012 – atualizado em 01/03/2016 – ANEEL.
- OFÍCIO CIRCULAR 0010/2017-SRD/ANEEL de 22/3/2017 – Esclarece questionamento de distribuidoras e consumidores a respeito da REN 482/2012.
- Nota Técnica 0056/2017 – SRD/ANEEL de 24/5/2017 – Atualiza as projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaica no horizonte 2017-2024.

- OFÍCIO ANEEL 0107.2016 – Esclarece questionamento sobre o limite de potência, se existe restrição de potência instalada por pessoa jurídica. Documento SIC nº. 48513.005927/2016-00.
- OFÍCIO ANEEL 0112.2016 – Esclarece questionamento sobre a não aplicação de fatores de ajuste de tarifas no caso de compensação de créditos de energia entre postos tarifários em níveis de tensão elétrica distintos. Documento SIC nº. 48513.005928/2016-00
- PARECER Nº. 00001/2017/PFANEEL/PGF/AGU – Esclarece a não permissão de habilitação ao Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI) de consumidor que produz geração distribuída.

3.16 IMPACTO AMBIENTAL

Sob o ponto de vista da operação de sistemas fotovoltaicos, é evidente que o impacto ambiental é muito menor do que os impactos causados por fontes convencionais, visto que o recurso utilizado na produção de energia é renovável, não emite poluentes líquidos ou gasosos e nem material radiativo. O uso direto da energia solar é vantajoso porque o equilíbrio térmico da Terra praticamente não é perturbado. A emissividade de cada painel pode ser ajustada de modo que o equilíbrio local ou total permaneçam basicamente inalterados (FADIGAS, 2004).

Desde que o sistema não tenha partes móveis, ele é seguro sob o ponto de vista mecânico e não emite ruído.

O impacto ambiental que ocorre no processo de fabricação das células também não é significativo. O material básico do qual a maioria das células são feitas, o silício, não é intrinsecamente nocivo (FADIGAS, 2004). Todavia, como qualquer outro processo químico, alguns cuidados devem ser tomados para assegurar que produtos utilizados no processo de fabricação não contaminem o ambiente local.

4 IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO

A metodologia empregada neste estudo desenvolveu-se com base em quatro fatores:

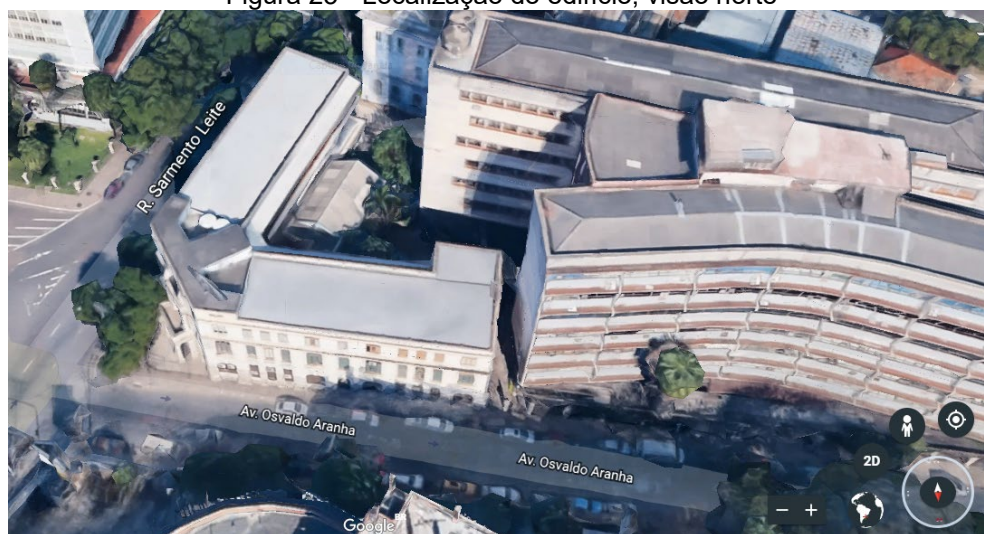
- 1) Área de cobertura útil para instalação de módulos;
- 2) Mapeamento solar para a região de estudo;
- 3) Dimensionamentos e levantamentos de dados pertinentes à instalação;
- 4) Realização de orçamentos no mercado

Para isso, levantou-se o fator 1 através dos estudos realizados nas plantas do edifício, o fator 2 através de *softwares* específicos para projetos da área, e o fator 3 através do estudo para um possível projeto de adequação visando redução dos custos na fatura de energia elétrica. O fator 4 é um levantamento de preços do mercado atual de geração fotovoltaica. Como premissas para o estudo, ressalta-se que os altos custos dos sistemas fotovoltaicos são viáveis e o custo de investimento é pago em poucos anos.

4.1 LOCALIZAÇÃO E TERRENO

O edifício em estudo é o prédio da Engenharia Elétrica da UFRGS, localizado na Av. Osvaldo Aranha, nº 103. O telhado do prédio desfruta de posição solar privilegiada, pois tem sua totalidade sem nenhum sombreamento pela maior parte do dia. Conforme a Figura 25, verifica-se através do Google Maps a existência de construção ao lado da edificação, influenciando de certa forma a quantidade de horas de sol que irradiam sobre o prédio.

Figura 25 - Localização do edifício, visão norte



Fonte: GOOGLE MAPS, 2018

A edificação possui área construída de 3.340 m² (SUINFRA, 2016). A altura é de aproximadamente 15 metros. Das plantas estudadas, nenhuma possui a altura precisa do edifício, sendo recorrido o uso de coordenadas geográficas a partir de um aparelho de GPS.

A partir das coordenadas geográficas do edifício obtidas no Google Maps, de 30°01'55.9"S e 51°13'14.6"O e do sistema *SunData* (CRESESB, 2018), o valor médio de irradiação solar no plano horizontal no local é de 4,43 kWh/m².dia, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 - Irradiação Solar no Plano Horizontal

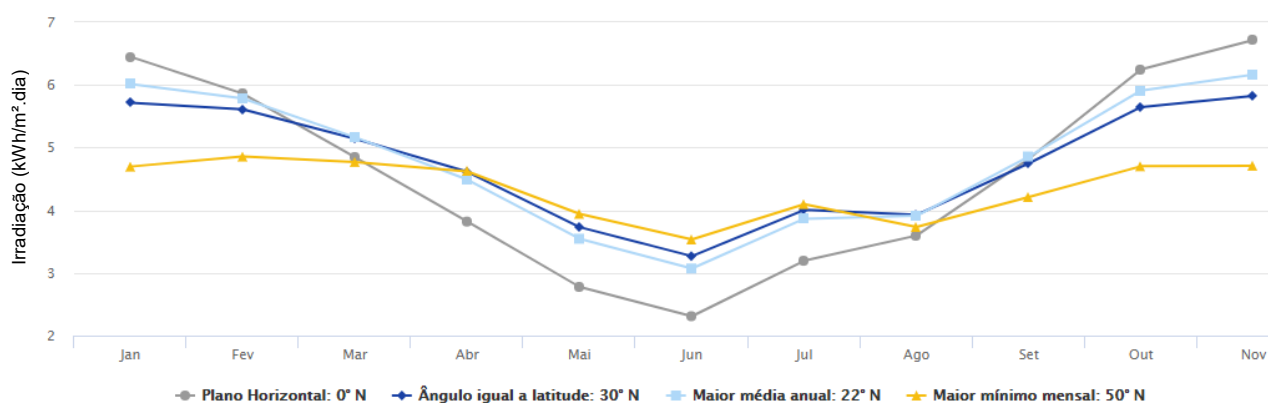


Fonte: CRESESB, 2018

O relatório gerado pelo sistema *SunData* também apresenta a irradiação solar para diferentes ângulos de inclinação do painel, conforme Figura 27. A partir desses dados, é facilmente verificável que a inclinação ideal das placas solares é de 22°N, situação em que a irradiação solar atingiria uma média de 4,67 kWh/m².dia (CRESESB, 2018).

Figura 27 - Irradiação Solar no Plano Inclinado

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	6,45	5,86	4,85	3,82	2,78	2,31	2,52	3,19	3,60	4,82	6,25	6,72	4,43	4,41
✓	Ângulo igual a latitude	30° N	5,72	5,61	5,14	4,61	3,73	3,27	3,50	4,01	3,93	4,75	5,65	5,83	4,64	2,56
✓	Maior média anual	22° N	6,01	5,78	5,17	4,49	3,55	3,07	3,30	3,86	3,91	4,86	5,91	6,17	4,67	3,10
✓	Maior mínimo mensal	50° N	4,70	4,86	4,77	4,62	3,94	3,53	3,75	4,10	3,73	4,21	4,70	4,71	4,30	1,32



Fonte: CRESESB, 2018

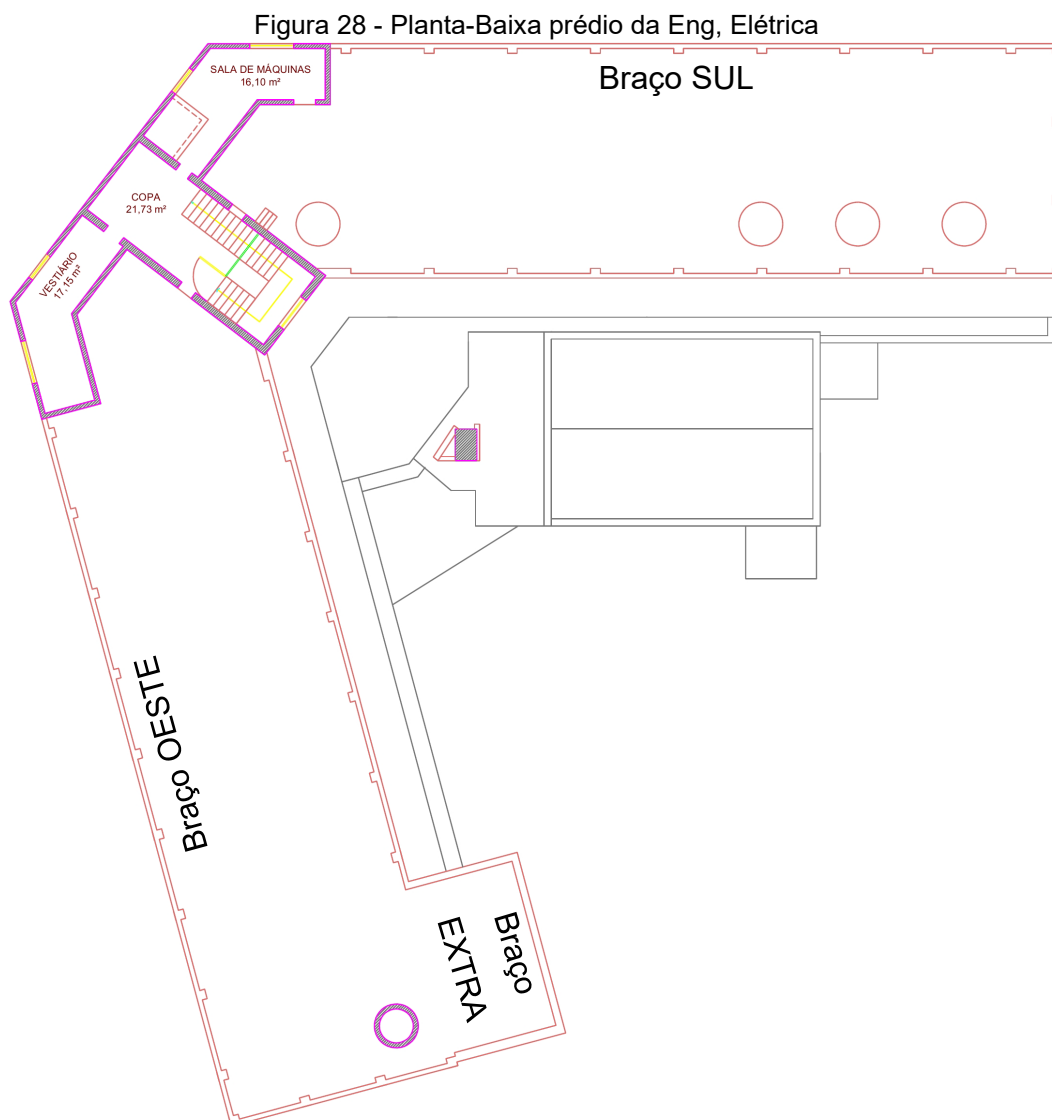
Devido à construção atual do telhado do prédio, não será economicamente viável utilizar a inclinação ideal, mas sim a inclinação real do telhado. Esta inclinação

é de 6°, para o Sul e para o Oeste (para cada “braço”). Um estudo detalhado da irradiação solar para este caso será relatado ao decorrer do trabalho.

4.2 ÁREA DE COBERTURA DISPONÍVEL

Para fins de estudo de instalação dos módulos, deve-se considerar a área do telhado, uma vez que independente da parte elétrica a ser estudada, o fator delimitador será a área disponível. Foi realizada uma inspeção no local, averiguando o tempo de incidência solar em cada parte do telhado, assim como a condição física do mesmo para a instalação dos painéis.

Através das plantas baixas do projeto, fornecidas pelo setor de patrimônio da UFRGS, as medidas de área foram levantadas. Os braços SUL e OESTE possuem áreas de 262 m² e de 288 m², respectivamente, conforme Figura 28.



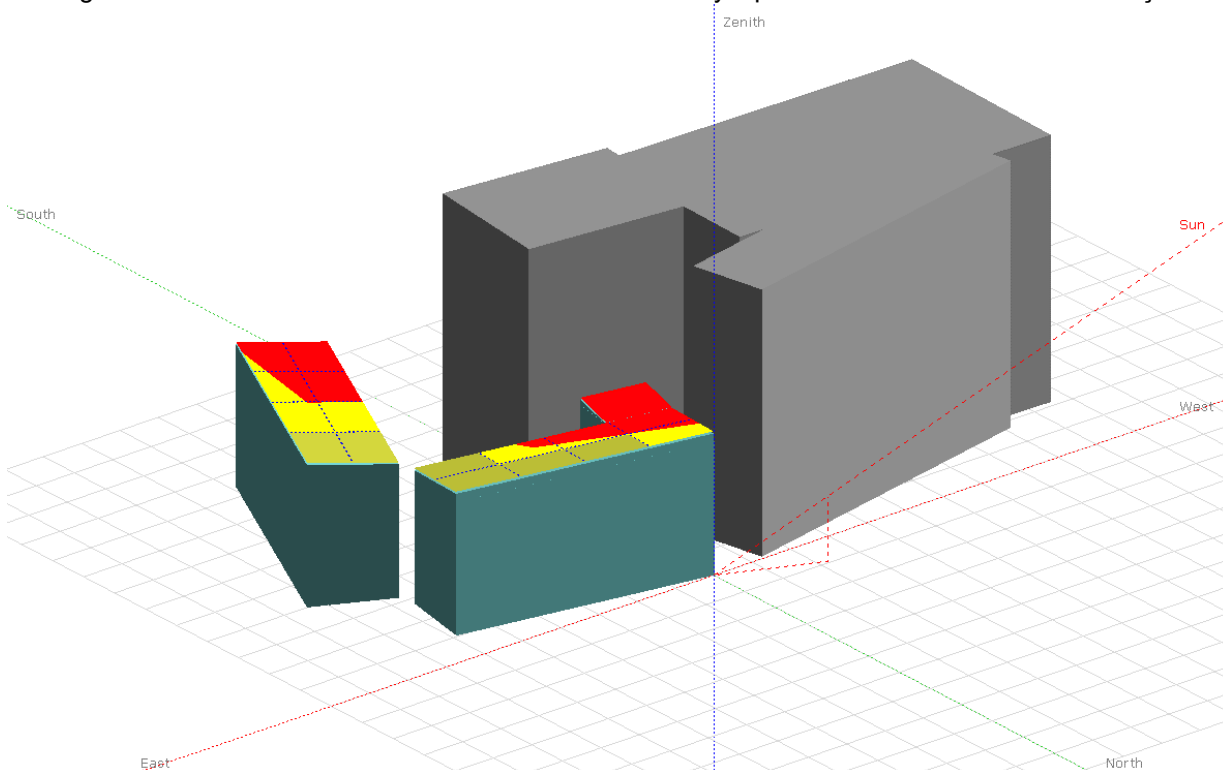
Fonte: SUINFRA, 2016

O valor total de área útil da edificação é de 550 m². A partir desse valor limitante se estima a quantidade de módulos e sua demanda instalada, valores que são calculados na próxima seção. O braço EXTRA, para efeitos gerais, pertence ao braço OESTE. Ele é nomeado diferente pois a inclinação do telhado é contrária ao braço OESTE. Isso só será relevante para análise de radiação incidente e disponibilidade de sol, no item 4.4 abaixo.

4.3 SOMBREAMENTO DA EDIFICAÇÃO

A análise foi feita para os quatro momentos mais relevantes do ano – os dois solstícios e os dois equinócios. Os resultados obtidos na análise foram úteis para não ter perigo de posicionar módulos em regiões com sombra. Nessa etapa do estudo que se optou pela total utilização do telhado, visto que só é sombreado no fim da tarde. A Figura 29 mostra a análise para o dia 23 de março.

Figura 29 - Análise de sombreamento realizada no PVsyst para 16h horas do dia 23 de março



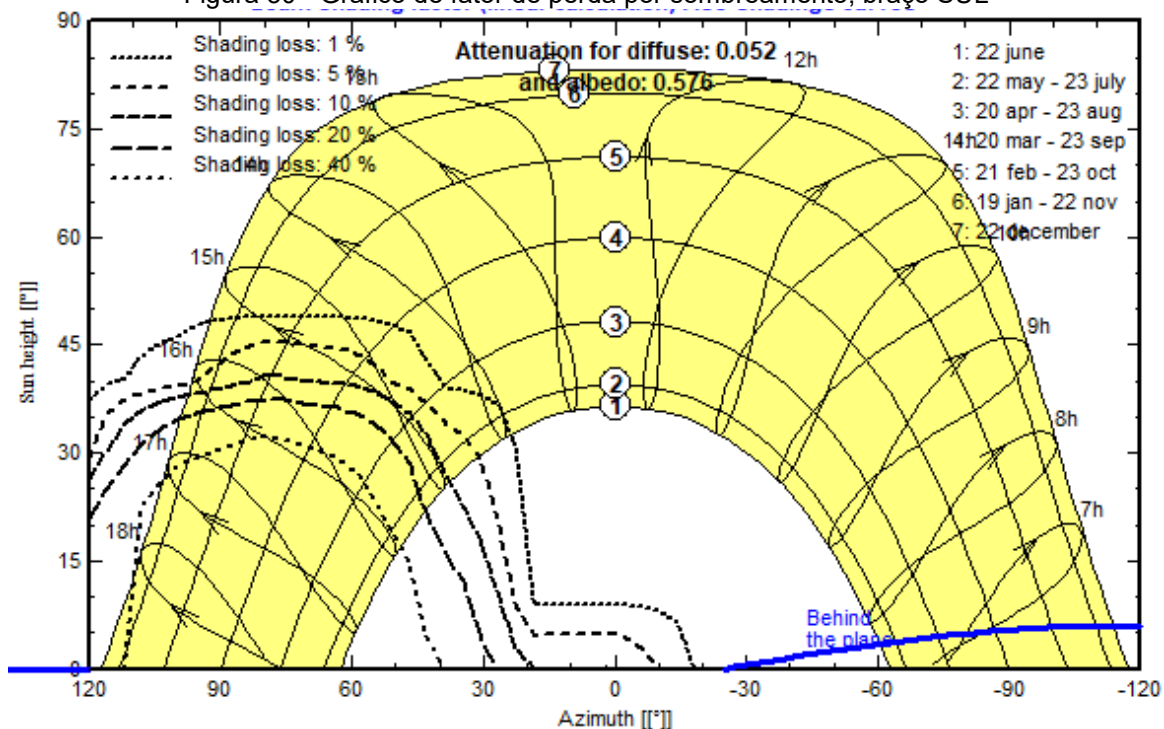
Fonte: elaborado pelo autor com o software PVsyst

4.4 DISPONIBILIDADE DE RADIAÇÃO SOLAR

Após ser definida a edificação que seria estudada para a incorporação do sistema fotovoltaico, simulou-se para o telhado da edificação a disponibilidade de

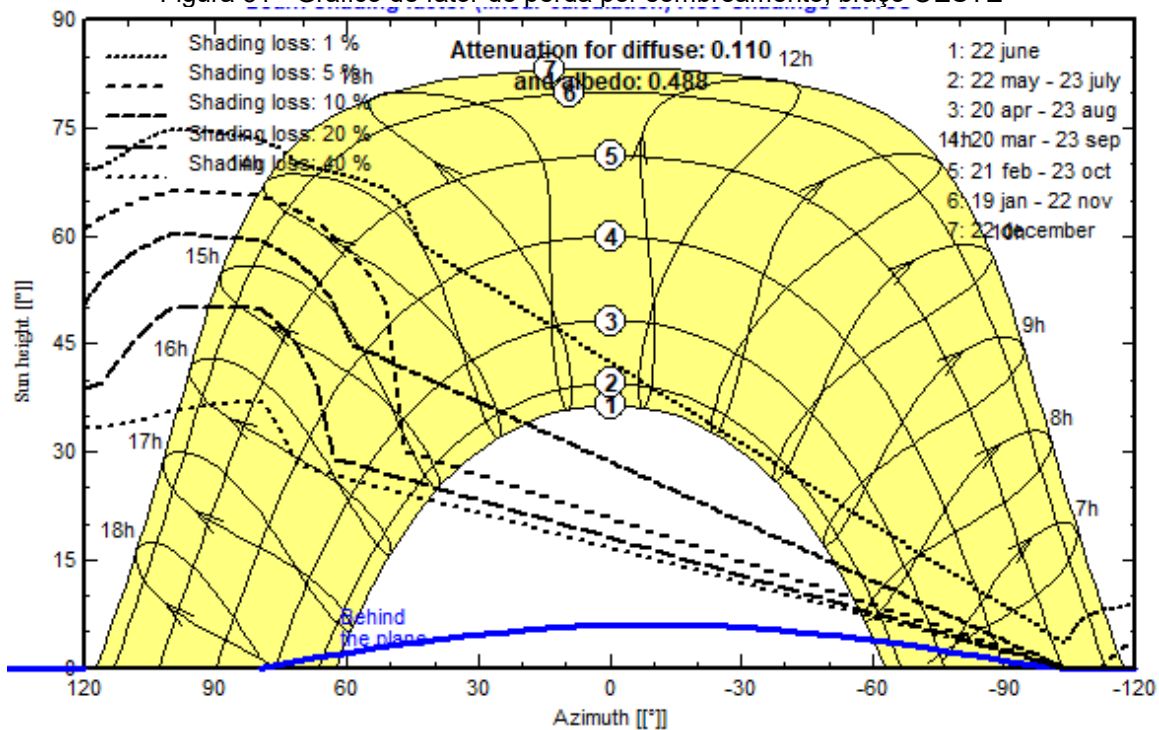
radiação solar recebida para as três superfícies do telhado, cada uma com inclinação correspondente. Os resultados são mostrados na Figura 30, Figura 31, e Figura 32.

Figura 30 - Gráfico de fator de perda por sombreamento, braço SUL



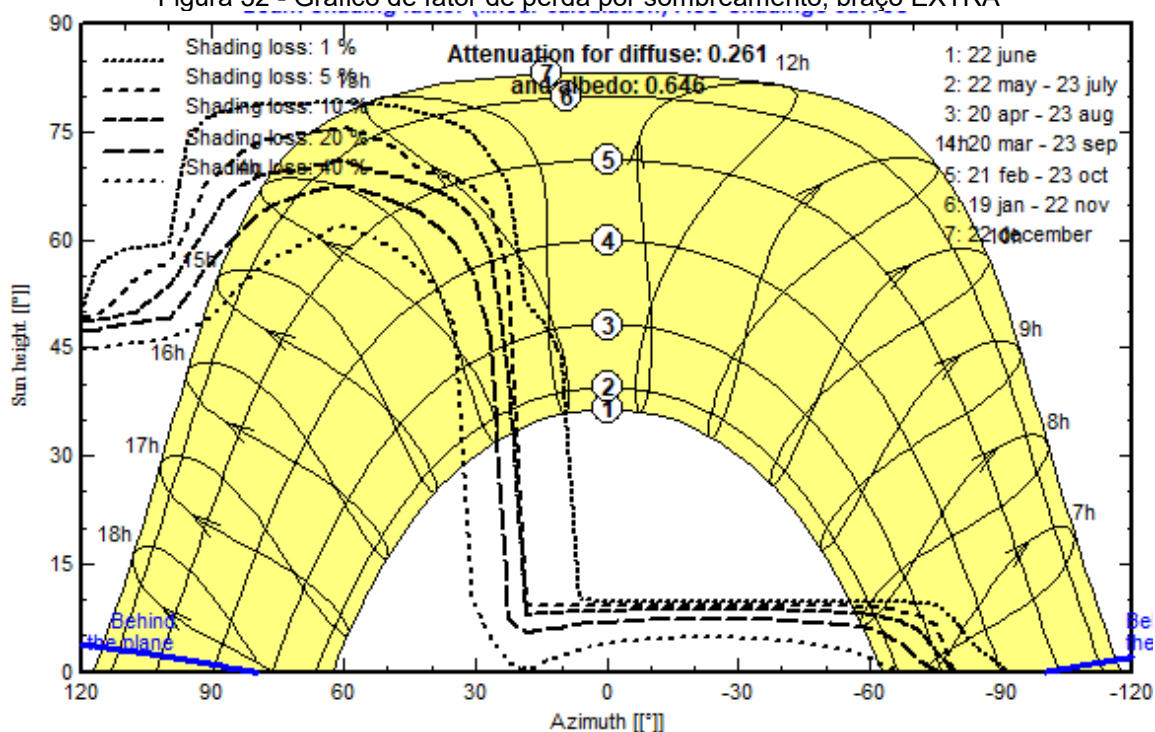
Fonte: PVSYST, 2018

Figura 31 - Gráfico de fator de perda por sombreamento, braço OESTE



Fonte: PVSYST, 2018

Figura 32 - Gráfico de fator de perda por sombreamento, braço EXTRA



Fonte: PVSYST, 2018

É fácil perceber que o braço SUL é o que recebe mais radiação durante o ano. Já os braços OESTE e EXTRA recebem luz do sol durante toda a manhã, mas à tarde sofrem com o sombreamento do prédio ao lado.

4.5 CONSUMO E ANÁLISES DA INSTALAÇÃO

O estudo se enquadra junto aos mais de 17 milhões de consumidores, conforme Tabela 3, classificados como Comercial, Serviços e Outras no Brasil (ANEEL, 2018), segundo maior número de Unidades Consumidoras atrás apenas das Residenciais.

Tabela 3 - Relatório de unidades consumidoras por classe de consumo - continua

Classe de Consumo	Consumo de Energia Elétrica MWh	Número de Unidades Consumidoras
Comercial, Serviços e Outras	18.810.781,21	17.242.786
Consumo Próprio	123.683,18	27.809
Iluminação Pública	3.890.537,80	301.840
Industrial	8.088.363,56	1.573.176
Poder Público	3.637.032,87	1.736.401

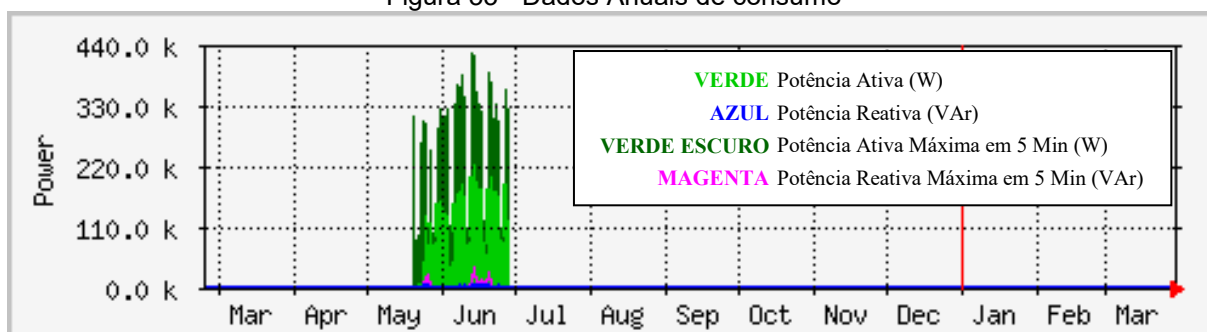
Tabela 3 - Relatório de unidades consumidoras por classe de consumo - continuação

Classe de Consumo	Consumo de Energia Elétrica MWh	Número de Unidades Consumidoras
Residencial	35.783.148,43	212.154.407
Rural	4.653.785,95	13.380.939
Rural Aquicultor	66.526,21	19.589
Rural Irrigante	1.497.060,25	634.298
Serviço Público (água, esgoto e saneamento)	2.912.104,69	289.069
Serviço Público (tração elétrica)	191.637,22	901
Totais	79.654.661,37	247.361.215

Fonte: ANEEL, 2018

Como não existe discriminação do consumo individual do prédio ou acesso à fatura de energia elétrica do mesmo, foi realizada uma estipulação de gasto baseado nos dados da Figura 33.

Figura 33 - Dados Anuais de consumo



Fonte: DELET, 2017

Este gráfico foi obtido através de um sistema de monitoramento de consumo instalado no prédio. Infelizmente, o sistema só funcionou por um curto período de tempo, e os dados são compilados e mostrados no gráfico. Em outras palavras, este gráfico representa toda a informação disponível sobre o consumo do prédio.

A partir do gráfico da Figura 33, estipula-se uma média diária de consumo ativo em dia de semana de 200kWh e, em fim de semana, 50kWh. Em um mês, o consumo é de aproximadamente 4.800kWh. Neste cenário consideram-se os valores médios, não significando que nunca haverá ultrapassagens de demanda, bandeiras tarifárias e custos com excedente reativo.

Os módulos considerados para estudo são baseados no fornecedor YINGLI SOLAR, que possui placas fotovoltaicas com potência de saída de mais de 300W (YINGLI SOLAR, 2018).

A Equação (13) fornece o número aproximado de módulos fotovoltaicos para o projeto.

$$n = \frac{E}{G * \eta * A} \quad (13)$$

Onde:

- n é o número de painéis;
- E é o consumo médio diário em kWh;
- G é a radiação média diária em kWh/m².dia;
- η é a eficiência do módulo;
- A é a área do módulo em m².

Considerando o modelo de 72 células com potência de saída de 335W e eficiência de 17,3%, seriam necessários 107 módulos para chegar-se ao valor de demanda da unidade. Como cada módulo possui área de 1,94 m², 107 módulos correspondem a 207m² de área. Conforme levantamento das áreas, o valor total encontrado através da planta foi de 550m², muito superior à necessária. Será considerada, portanto, a área de 550m² como parâmetro para determinação da potência instalada do sistema.

Este modelo se enquadraria melhor na edificação por sua propriedade de geração mais elevada. Dessa maneira, o número máximo teórico de módulos que podem ser instalados dentro da área disponível é de 283, resultando em uma potência instalada de 420kW. O rendimento deste modelo varia com a potência de saída, variando entre 16% e 17,3%. Considerou-se para o estudo o rendimento do módulo de maior potência, de 17,3% (classificação A segundo INMETRO).

Para dar sequência ao projeto, um componente fundamental para funcionamento da tecnologia é o Inversor. A qualidade de saída e o rendimento, que varia com a carga a ser alimentada, são decididos a partir dos estudos na sequência, e não somente com valores nominais que constam nos catálogos de fornecedores.

Assim, alguns parâmetros devem ser analisados para fins de projeto, como os surtos de corrente. Segundo PINHO; GALDINO (2014), em se tratando de um edifício onde diversas cargas são acionadas por partidas de motores elétricos (monofásicos e

trifásicos), picos de corrente de cerca de 8x acima da corrente nominal devem ser suportados dentro de intervalos de tempo limítrofes. As principais especificações para inversores, a serem contempladas na tabela do fornecedor escolhido, são: tensão de entrada CC, tensão de saída CA, faixa de variação de tensão aceitável, potência nominal, potência de surto, frequência, forma de onda e distorção harmônica, grau IP de proteção, temperatura ambiente e umidade do local da instalação (PINHO e GALDINO, 2014).

O fornecedor escolhido para o inversor é a SUNGROW, modelo SG80KTL, optada principalmente pela potência (80 kW) e pelo rendimento informado (98,9%) (SUNGROW, 2018), uma vez que a tensão de saída (230 / 400 V) será adequada pelo transformador de acoplamento obrigatório devido à potência do sistema instalado.

Para chegar-se em um número de inversores não dispondo da curva de carga por horas em um dia, analisaram-se as máximas demanda pelo gráfico da Figura 33. O maior valor de consumo registrado é de 430 kW. Conforme indica (PINHO e GALDINO, 2014), a potência do inversor deve ser capaz de suprir esse valor de demanda, portanto, se 1 inversor possui potência de saída nominal de 80kW (SUNGROW, 2018), seriam necessários pelo menos 6 inversores para atender a demanda máxima. Contudo, para os momentos de máxima demanda, se pretende suprir parte desta demanda através da rede externa. Assim, devido às configurações de desempenho dos inversores escolhidos (Rastreamento do Ponto de Potência Máxima), o número dessas unidades pode cair para menos da metade.

O recurso chamado de Rastreamento do Ponto de Potência Máxima (MPPT em inglês) busca garantir a máxima condição de operação dos módulos fotovoltaicos no que se refere à curva de desempenho V_{xI} indicada nos catálogos (BÚSSOLO, 2018). Isto se faz necessário uma vez que as condições de temperatura e radiação mudam aleatoriamente durante o funcionamento do inversor. Como o edifício de estudo possui sombreamentos apenas em módulos específicos no braço OESTE, é interessante mitigar estes pontos utilizando nesses locais um micro-inversor diretamente no painel solar, não onerando o desempenho dos outros módulos e inversores. O modelo escolhido possui um rastreador apenas, sendo bem mais leve (cerca de 80%) e provavelmente mais barato que os modelos de até 4 rastreadores.

Foram determinados os equipamentos para a situação estudada levando apenas em conta as características gerais de disposição espacial e desempenho/quantidade dos melhores componentes pesquisados.

4.6 DIMENSIONAMENTO

Quanto ao rendimento global do sistema, o mesmo pode ser calculado através dos resultados de perdas da simulação do PVSyst através da Equação (14) (KALIKOSKI, 2016):

$$\eta_g = \eta_p * \eta_i * \eta_a * \eta_{pe} \quad (14)$$

Onde:

η_{pe} é o rendimento ponderado pelas perdas elétricas, de valor 0,99;

η_a é o rendimento ponderado pelos arranjos (sombreamento, temperatura, etc.), de valor 0,91;

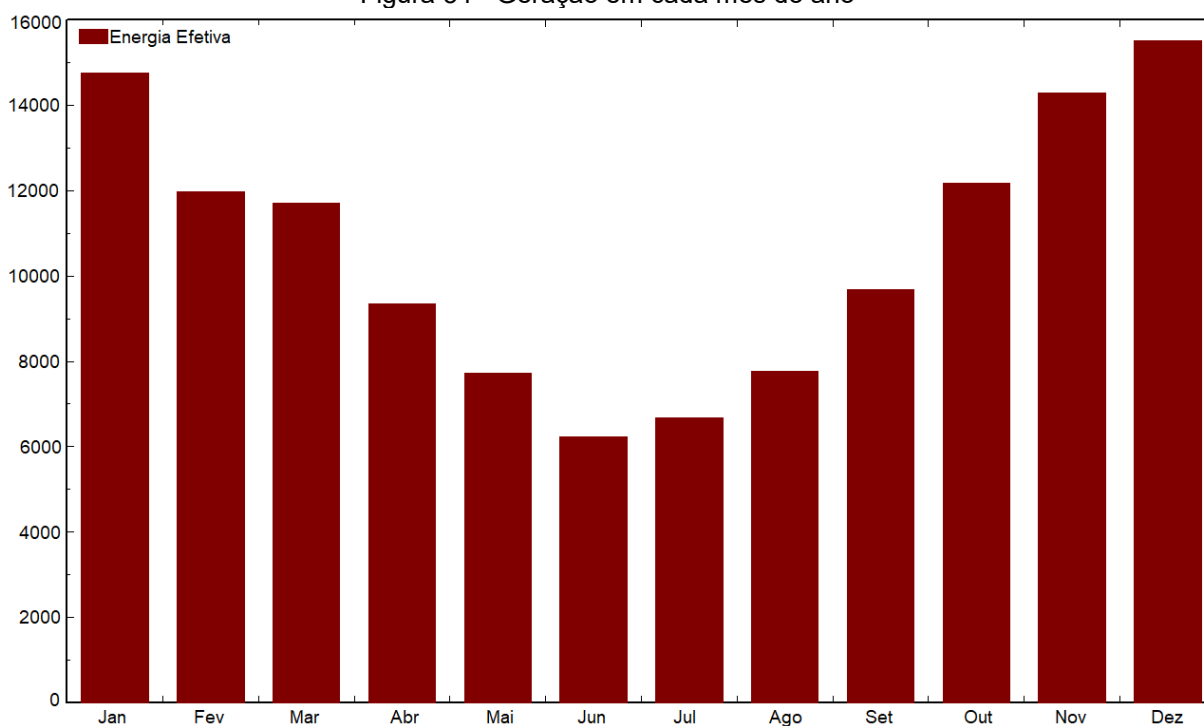
η_i é o rendimento ponderado pelos inversores, de valor 0,99 (do datasheet);

η_p é o rendimento ponderado pelos módulos, de valor 0,18;

η_g é o valor do rendimento global, sendo, portanto, igual a 0,16.

Através de simulação, chegou-se aos resultados de energia gerada ao longo do ano, com base nos parâmetros até então apresentados. Na Figura 34, é possível analisar uma geração de 125 MWh/ano, podendo observar a variação ao longo dos meses (PVSYST, 2018).

Figura 34 - Geração em cada mês do ano



Fonte: PVSYST, 2018

A estrutura da edificação, por possuir um carregamento adicional originário dos módulos e demais componentes, deve apresentar laudo emitido por um Engenheiro Civil liberando a execução, pela parte estrutural (e aerodinâmica), da obra devido ao carregamento imposto pelos módulos, inversores, vento e demais equipamentos de instalação. Para tanto, simulações (PORTAL SOLAR, 2018) resultaram em um valor médio de 15 kg/m², que na área total de 550 m² calculam-se cerca de 8.250 kg adicionados à estrutura.

O sistema deve ser classificado também, segundo rege o módulo 3 do PRODIST, nos respectivos níveis de tensão para conexão de micro ou minicentrais geradoras. O caso estudado seria classificado no nível de “Baixa Tensão / Média Tensão” por possuir potência instalada entre 76 e 150 kW (ANEEL, 2016a).

Tratando-se de um projeto de minicentral geradora, há a necessidade de transformador de acoplamento para transferência de potência entre a central geradora e o sistema de distribuição conforme indica (CEEE, 2014), pois a conexão deve ser feita em média tensão (MT). Esse transformador deve ser conectado em triângulo no lado primário e em estrela aterrada no lado secundário (padrão de conexão da rede CEEE-D).

Para dimensionamento dos condutores e demais elementos principais (dimensionado apenas cabo, disjuntor de entrada e fusível de proteção para transformador), o fator limitante devido à altura da edificação e à distância para a Subestação (SE) foi a queda de tensão. Para especificar o diâmetro do condutor com base na queda de tensão, devem ser analisadas as seguintes premissas (PASA, 2014) considerando as informações dispostas também no datasheet do inversor escolhido, conforme Tabela 4.

Com esses dados é possível calcular a seção do condutor, conforme Equação (15) (MAMEDE FILHO, 2017).

$$S_{\Delta V} = \frac{100 * \sqrt{3} * \rho * d * i}{\Delta V * V} \quad (15)$$

Onde:

$S_{\Delta V}$ é a seção do condutor calculada com base na queda de tensão (mm²)

ρ é a resistividade do material condutor (Ωm);

d é o comprimento considerado para o circuito (m);

i é a corrente elétrica informada no datasheet do inversor (A);

Tabela 4 - Informações do datasheet do inversor escolhido

Material do eletroduto	Ferro-magnético
Corrente de projeto	106 A
Queda de tensão admissível entre SE e QGBT	4%
Comprimento do circuito	100 m
Tensão entre fases	220 V
Resistividade do material condutor	1/56 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Fonte: SUNGROW, 2018

ΔV é o percentual de perdas admitido no trecho (%);

V é a tensão entre fases usada no circuito (V).

O valor tabelado mais próximo do encontrado foi de 50 mm².

O disjuntor dimensionado para os circuitos foi calculado partindo da premissa de que seu valor deve ser maior/igual do que o valor da corrente de projeto e menor/igual que a corrente máxima permitida pelo condutor, analisando também os fatores de correção para temperatura e de número de circuitos (PASA, 2014). Dessa maneira, para o cabo unipolar de 50 mm², de isolamento XLPE, temperatura ambiente de 40°C, método de instalação B1⁷ com 3 condutores carregados, corrente de projeto de 106 A e corrente máxima do condutor de 175 A, o disjuntor então deve ser tripolar de caixa moldada, curva B (pois possui grande comprimento de cabo até ponto de entrega), de valor nominal igual a 150 A.

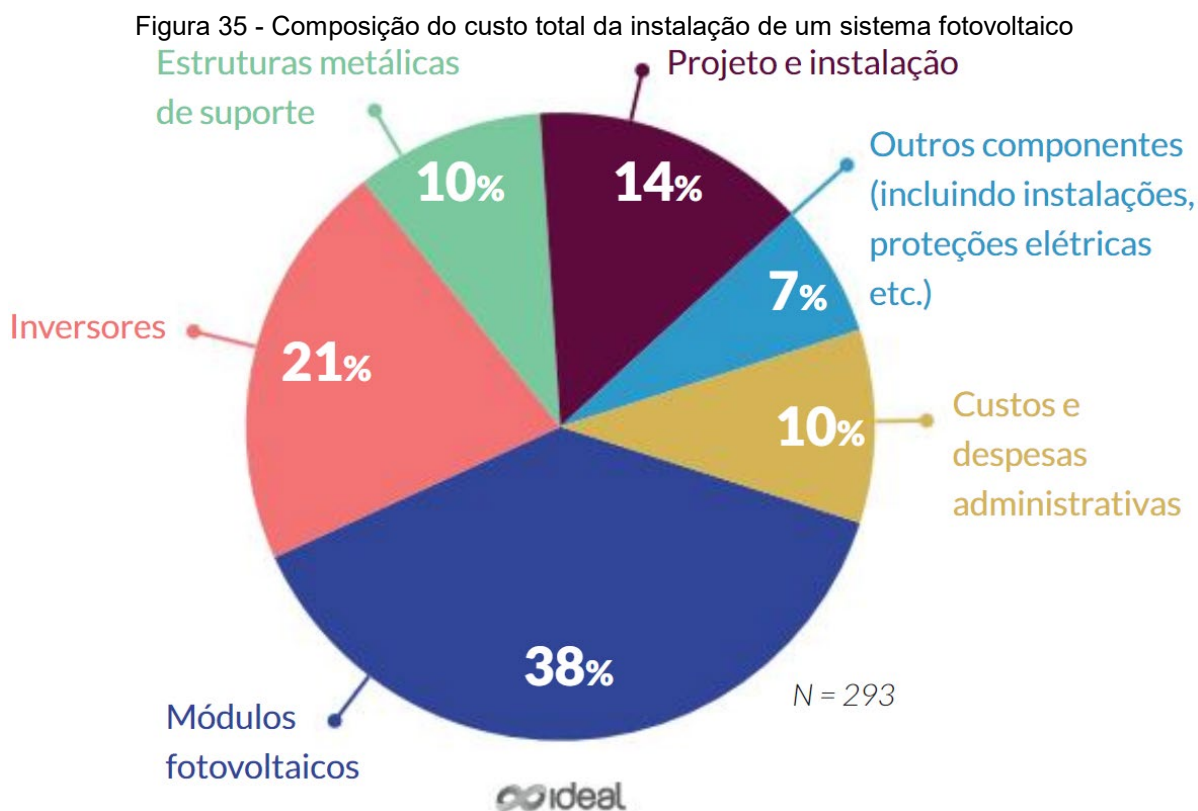
Para a proteção do secundário do transformador são necessários fusíveis NH (baixa tensão e alta capacidade de interrupção) de classificação (WEG, 2016) gL/gG (fusível de proteção de cabos e uso geral) que devem considerar a corrente de *inrush* do transformador. Segundo (MAÑANA e colab., 2018), a corrente de *inrush* pode ter amplitude de 8 até 10 vezes o valor da corrente nominal do transformador. Portanto, se a corrente nominal dada por 300 kVA dividido por 220 V e por raiz de três, é igual a 262,43 A por fase, tem-se que o fusível de proteção tabelado deva ser de 2 kA.

⁷ Segundo Tabela 33 — Tipos de linhas elétricas da ABNT NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão (ABNT, 2008).

4.7 ORÇAMENTOS

Nesta seção são abordadas as respostas de solicitações de orçamento realizadas junto a prestadores de serviços. A Tabela 5 resume estas informações.

No que tange à estratificação de custos de uma instalação (IDEAL, 2018) aponta-se que 38% do valor é composto pelos módulos fotovoltaicos, 21% referente aos inversores, 14% no que se refere ao projeto e instalação, 10% direcionados para as estruturas da instalação e cerca de 7% reservados para demais componentes da instalação, conforme Figura 35.



Fonte: IDEAL, 2018

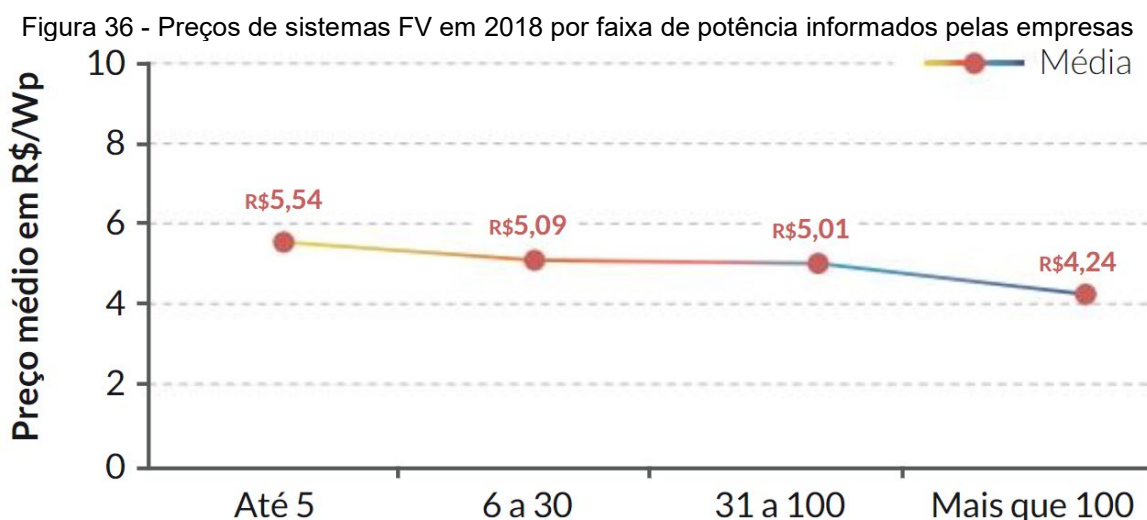
Tabela 5 - Resumo dos orçamentos realizados

Empresa	Potencia pico do sistema (kWp)	Potencia módulos (W)	Número de módulos	Potência do inversor (kWp)	Número de inversores	Tempo de retorno do investimento (meses)	Valor Total (R\$)	Investimento por Watt (R\$/Wp)
01	90,45	335	270	15	5	48	482.900	5,33
02	96,3	330	292	15	6	42	482.620	5,00
03	88	275	320	15	5	50	479.500	5,45
04	100,82	355	284	20	4	47	415.594	4,12
05	88,56	270	328	20	4	43	358.750	4,05
06	91,25	365	250	27	3	38	336.500	3,69
07	69,68	335	208	15	4	45	315.500	4,53
08	80,40	335	240	60	1	39	284.086	3,53
09	52,8	330	160	25	2	54	250.066	4,73
10	52	325	160	25	2	48	249.395	4,80
11	51,48	330	156	25	2	50	219.850	4,27
12	48,584	320	170	50	1	42	217.048	4,47
13	53,6	335	160	25	2	40	209.949	4,51

Fonte: o autor.

O nome das empresas foi ocultado por questões de direito autoral.

A primeira impressão é que o valor médio de investimento por Watt, de R\$ 4,50, está condizente com o mercado atual, conforme indica estudo (IDEAL, 2018), que aponta que para sistemas com potência de 31kWp a 100kWp, o valor deve estar abaixo de 5,01 R\$/Wp, como mostrado na Figura 36.



Fonte: IDEAL, 2018

Também é facilmente verificado que o tempo médio de retorno do investimento é de 45 meses ou 3,7 anos. Isso representa financeiramente um dos melhores investimentos possíveis do mercado, além de altamente seguro.

As empresas acabaram realizando em dois tipos de orçamentos:

- Orçamento para a utilização total do telhado, de 550M²;
- Orçamento para o consumo mensal do prédio, de 6000 kWh.

As empresas 01 a 08 da Tabela 5 fizeram o orçamento para a total utilização da área disponível, atingindo geração mensal de até 11000 kWh, enquanto as empresas 09 a 13 do mesmo quadro fizeram orçamento para geração de 6000 kWh. De qualquer forma, o tempo de retorno e o valor de investimento por Watt é muito semelhante para os dois casos.

Infelizmente nenhuma empresa dimensionou sua proposta com o inversor escolhido de 80 kWp, o que impossibilita uma comparação direta. Mas, ao observar a empresa 08, o uso de um único inversor de alta potência (60 kWp), assim como placas solares de alta potência (335W), geraram o menor custo global por Watt. Por outro lado, as empresas 01, 02, 03 e 07, que escolheram o inversor de menor potência (15 kWp), tiveram o maior custo por Watt.

5 CONCLUSÕES

O tema abordado neste trabalho é recente e diversas análises e estudos estão por serem feitos e comprovados. Aprofundamentos de conceitos e técnicas para determinados casos, específicos ou não, ainda carecem de detalhamentos atestados sejam por normas regulamentadoras, sejam por instruções técnicas ou afins. Já as normas existentes carecem de esclarecimentos, tanto que ofícios circulares e notas técnicas são lançadas de forma a sanar dúvidas pertinentes.

Em relação aos impactos ambientais de um sistema fotovoltaico, observa-se que não há qualquer empecilho. A preocupação em torno do local de instalação é quanto à área utilizada, sobre a luminosidade recebida diariamente, considerando os obstáculos naturais e artificiais que possam causar sombreamento e reflexão da radiação solar sobre o sistema, diminuindo sua eficiência.

Quanto aos aspectos econômicos, analisados através do estudo de caso, observou-se que o tempo de retorno do investimento, entre 3 e 4 anos (com base nas propostas comerciais recebidas) apresenta uma grande atratividade ao investidor. Um ponto de interesse para análise de redução de custos, que não foi abordado, mas já está aprovado na Câmara Municipal de Porto Alegre, é o chamado Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) Verde, pago por todo proprietário que tem a posse de um imóvel com alguma iniciativa sustentável na edificação, onde um sistema fotovoltaico corresponderia isenção de 100% do valor (FONTES, 2018).

Quanto aos critérios técnicos, o território brasileiro apresenta excelentes condições solares. O sistema fotovoltaico apresenta produção energética no período diurno, coincidindo com o período do pico de demanda de energia. Deste modo, o sistema apresenta-se como um forte auxílio aos sistemas de distribuição e, conseqüentemente, aliviando o sistema de transmissão. O surgimento de novas tecnologias, com possibilidade de fabricação em larga escala e aumento da vida útil dos componentes do sistema tende a disseminar ainda mais os sistemas fotovoltaicos no Brasil.

O projeto desenvolvido se mostrou satisfatório quanto ao seu dimensionamento e custos, dado que o sistema projetado seria capaz de suprir muito mais de 100% da energia consumida ao longo do ano e também pelo fato preço estimado para o projeto estar de acordo com levantamentos divulgados pelo instituto IDEAL, 5,00 R\$/Wp instalado.

Ademais, os resultados obtidos na simulação realizada também se mostraram satisfatórios, dado que todos os parâmetros de avaliação em todos os cenários indicaram a viabilidade do projeto.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Medidas de incentivo à autoprodução estão surgindo aos poucos, desde a isenção do ICMS para o excedente de energia, como aconteceu recentemente no Rio Grande do Sul, até os leilões de energia exclusivos à energia solar. Este é um mercado em plena expansão e as obras das usinas previstas tendem a fortalecer muito este nicho, pois incentivará a produção local dos equipamentos.

Neste trabalho não se considerou a TIR e sua relação com fundos de investimentos tradicionais como CDI e Tesouro Prefixado. Também não se levou em consideração a cobrança de ICMS sobre o excedente de energia gerada. Deixa-se, então, a sugestão de se fazer um estudo, no qual estime-se a quantia de energia tributada, baseado na resultante da comparação entre a produção horária e a curva de carga do consumidor ao longo do dia.

Uma análise mais ampla deve ainda contemplar os seguintes requisitos:

- Tendência do valor do kWh pago à distribuidora,
- Estimativa da inflação no período para análise do capital investido,
- Estimativa do custo de manutenção,
- Levantamento da variação da temperatura do local, visto que a eficiência do sistema depende de sua variação.

Outra sugestão seria um estudo de viabilidade para as demais fontes de produção abrangidas pela geração distribuída, como eólica e biomassa, comparando-as com os resultados obtidos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **ABNT NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2008
- ANEEL. **Acesso ao Sistema de Distribuição**. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, 2016a
- ANEEL. **Energia Solar**. Atlas da Energia Elétrica do Brasil, 2005.
- ANEEL. **Micro e minigeração distribuídas**. Cadernos Temáticos ANEEL, 2016b.
- ANEEL. **Relatório de unidades consumidoras por classe de consumo**. Disponível em: <http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampClasseCons.xlsx>. Acesso em: 4 jun 2018.
- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015**, 2015.
- BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. **New Energy Outlook 2017**, 2017.
- BÚSSOLO, Eduardo Kunz. **Aspectos da micro e minigeração fotovoltaica aplicados às edificações prediais**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2018.
- CEEE. **Acesso de Microgeração e Minigeração com Fontes Renováveis e Cogeração Qualificada ao Sistema de Distribuição**. 2014.
- COLLARES, Fábio Simim. **Comparação Quantitativa de Métodos de Paralelismo de Módulos Fotovoltaicos com a Rede Elétrica para Geração Distribuída Através do Controle de Conversores de Potência**. Journal of Chemical Information and Modeling, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.
- COPEL. **Tarifas de Energia da COPEL**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Fb2f4a2f0687eb6cf03257488005939b9>>. Acesso em: 3 jun 2018.
- CRES, E. P. N. e SPERS, V. R. E. e CAMARGO, S. H. C. R. V. **Sustentabilidade e a cultura organizacional**. 1ª edição ed.: Ottoni, 2012.
- CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 4 jun 2018.
- DELET. **Power Demand**. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/mrtg/dvme.html>>. Acesso em: 26 jan 2018.
- ELYSIA ENERGIA SOLAR. **Como funciona a Energia Solar**. Disponível em:

<<http://www.elysia.com.br/como-funciona-a-energia-solar/>>. Acesso em: 31 jan 2018.

ENERGYSAGE. **Monocrystalline vs. Polycrystalline Solar Panels**. Disponível em: <<https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>>. Acesso em: 3 abr 2018.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica - PEA –2420 produção de energia**. GEPEA – Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2004.

FONTES, Ruy. **Casas Sustentáveis e o Desconto do IPTU Verde: Sistemas Fotovoltaicos Também Já Participam do Benefício**. Disponível em: <<http://blog.bluesol.com.br/iptu-verde-e-energia-solar/>>. Acesso em: 20 jun 2018.

GAZOLI, Jonas Rafael e VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. 2. ed., 2015.

GOOGLE MAPS. **Google Maps**. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/@-30.0314871,-51.2209357,107a,35y,180h,45.02t/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 4 jun 2018.

IDEAL. **O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica**. v. 5, 2018.

ISOLADOS, Sistemas. **Componentes de um sistema fotovoltaico**. Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica, 2008.

KALIKOSKI, Vinícius Rodrigues. **Estudo De Viabilidade Técnica Para Sistema De Geração Distribuída Fotovoltaica Para Consumidor Do Grupo A4**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2016.

KITAGAWA SEIKI CO. **Solar panel related machinery**. Disponível em: <http://www.kitagawaseiki.co.jp/en/product_solar_bandsaw.html>. Acesso em: 3 abr 2018.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: 2017.

MAÑANA, Mario e colab. **Effects of Magnetizing Inrush Current on Power Quality and Distributed Generation**. 2018. E.T.S.I.I.T. University of Cantabria, 2018.

MONTENEGRO, Alexandre de Albuquerque. **Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil**. p. 177, 2013.

NASA. **How do Photovoltaics Work? | Science Mission Directorate**.

Disponível em: <<https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>>. Acesso em: 5 jun 2018.

PASA, Igor. **Aula 6 - Projeto Elétrico Básico IV**, 2014

PEREIRA, Enio Bueno e colab. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2006.

PINHO, João Tavares e GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, 2014.

PORTAL SOLAR. **Tudo sobre Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/>>. Acesso em: 24 abr 2018.

PROCEL e ELETROBRAS. **Critérios Para a Concessão Do Selo Procel De Economia De Energia a Sistemas E Equipamentos Para Energia Fotovoltaica**, 2010.

PTTRENENERGY. **Solar Photovoltaic Systems and Components**. Disponível em: <http://www.pttrenenergy.upc.edu/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&Itemid=35>. Acesso em: 23 maio 2018.

PVSYST. **PVsyst V.6.72**. Switzerland: PVsyst SA, 2018

REMMERS, KARL-HEINZ, Industrial Application. **Inverter, Storage and PV System Technology**, 2014.

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

SELO SOLAR. **Selo Solar**. Disponível em: <<http://www.selosolar.com.br/>>. Acesso em: 20 jun 2018.

SILVA, Lucas Henrique dos Santos. **Solstício e Equinócio - Astronomia - InfoEscola**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/geografia/solsticio-e-equinoicio/>>. Acesso em: 11 jun 2018.

SOL NA AMAZÔNIA. **Fotovoltaica**. Disponível em: <http://solnaamazonia.com.br/website/?page_id=2>. Acesso em: 5 jun 2018.

SOUZA, Ronilson Di. **Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica: Livro digital de introdução aos sistemas solares**. Bluesol, p. 114, 2016.

SUINFRA. **Instituto Eletrotécnico - Setor de Patrimônio Histórico**. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/patrimoniohistorico/instituto-eletrotecnico/>>. Acesso em: 4 jun 2018.

SUNGROW. **SG80KTL String Inverter**, 2018.

TOSO, G. **Fonti rinnovabili di energia**. Levrotto & Bella, 2011.

USE2E. **A importância da customização do seu projeto solar**. Disponível em: <<https://use2e.wordpress.com/2017/01/27/primeiro-post-do-blog/>>. Acesso em: 3 jun 2018.

VITTI, Diego. **Avaliação da Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos**. Universidade de Brasília Faculdade, 2006.

WEG. **Fusíveis aR e gL/gG tipo NH Contato Faca, NH Flush End e Diametral**. Jaraguá do Sul: Grupo WEG - Unidade Automação, 2016

WIKIPÉDIA. **Processo de Czochralski**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Processo_de_Czochralski>. Acesso em: 3 abr 2018.

WIKIPÉDIA. **Wafer (eletrônica)**. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Wafer_\(eletrônica\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Wafer_(eletr%C3%B4nica))>. Acesso em: 3 abr 2018.

YINGLI SOLAR. **YGE 72 CÉLULAS SÉRIE 2**, 2018

ZOMER, Clarissa Debiazi. **Megawatt Solar: Geração Solar Fotovoltaica Integrada A Uma Edificação Inserida Em Meio Urbano E Conectada À Rede Elétrica. Estudo De Caso: Edifício Sede Da Eletrosul, Florianópolis - Santa Catarina**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2010.