

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO ESTADO DO PARÁ
ESCOLA DE NEGÓCIOS TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Bruno Nazareno Barros e Silva

Ryan Augusto da Silva Sousa

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO
À REDE ELÉTRICA PROPOSTO À EMISSORA DE TELEVISÃO REDE BRASIL
AMAZÔNIA (RBA)

Belém

2018

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO ESTADO DO PARÁ
ESCOLA DE NEGÓCIOS TECNOLOGIA E INFORMAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Bruno Nazareno Barros e Silva

Ryan Augusto da Silva Sousa

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO
À REDE ELÉTRICA PROPOSTO À EMISSORA DE TELEVISÃO REDE BRASIL
AMAZÔNIA (RBA)**

Trabalho de Curso na modalidade Monografia, apresentado como requisito parcial para obtenção do grau em Bacharelado em Engenharia de Computação do Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA, sob orientação do Professor Dr. Manoel Jacinto Lopes Alves.

Belém

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)

Biblioteca do Cesupa, Belém - PA

Silva, Bruno Nazareno Barros e.

Dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica proposto à emissora de televisão Rede Brasil Amazônia (RBA) / Bruno Nazareno Barros e Silva, Ryan Augusto da Silva Sousa; orientação de Manoel Jacinto Lopes Alves, 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) – Centro Universitário do Pará, Belém, 2018.

1. Energia renovável. 2. Recursos energéticos. 3. Geração de energia. I. Sousa, Ryan Augusto da Silva. II. Alves, Manoel Jacinto Lopes (orient.). III. Título.

CDD. 23º ed. 621.31

Bruno Nazareno Barros e Silva

Ryan Augusto da Silva Sousa

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO
À REDE ELÉTRICA PROPOSTO À EMISSORA DE TELEVISÃO REDE BRASIL
AMAZÔNIA (RBA)**

Trabalho de Curso apresentado na modalidade monografia, apresentado como requisito parcial para obtenção do grau em Bacharelado em Engenharia de Computação do Centro Universitário do Estado do Pará – CESUPA.

Data da Defesa: 13 / 06 / 18

Banca Examinadora:

Prof. Orientador Dr. Manoel Jacinto Lopes Alves - CESUPA

Prof. MSc. Gandhy Yeddo da Rocha Aranha Júnior - CESUPA

Prof. MSc. Daniel Costa Rodrigues - UFPA

Belém

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças quando não tenho e enfrentar todas as dificuldades e vencê-las.

Agradeço aos meus pais por todo apoio, carinho e dedicação para que eu pudesse alcançar todos os meus objetivos, incluindo a minha graduação.

Agradeço a minha irmã Bruna Rafaela por me apoiar e ajudar nessa caminhada de graduação.

Agradeço ao meu irmão Renan Alves por me ajudar nessa caminhada de estudos.

Agradeço aos meus amigos de turma Paulo Sarmiento, Tiago Machado e Rafael Gouveia, pela grande ajuda no decorrer do curso e pela grande amizade que criamos nesses anos.

Agradeço especialmente ao meu amigo e dupla de TCC Bruno Barros, por ser meu companheiro de curso todos esses anos.

Agradeço ao professor Manoel Jacinto pela dedicação de passar os seus conhecimentos e por ser um excelente profissional na área de energia solar. Obrigado por me orientar durante todo este projeto, sua contribuição foi essencial.

Agradeço a todos os professores do CESUPA que passaram os seus conhecimentos e por mostrar que engenharia é uma área muito importante.

Ryan Augusto da Silva Sousa

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pois foi Ele que permitiu que tudo isso acontecesse e nos momentos difíceis através das orações foi Ele que me deu forças para continuar lutando pelo meu objetivo.

Agradeço a minha família, que esteve ao meu lado durante todo esse tempo do curso e foi meu alicerce sempre. Minha mãe que foi quem ouvia todos os meus desesperos e dizia para eu continuar que eu conseguiria concluir esta fase. Meu pai que junto comigo sempre lutou para que continuasse estudando e não pudesse parar. Aos meus irmãos, Gustavo e Rita de Cássia, que estavam ao meu lado para me apoiar e me ajudar em qualquer dificuldade.

Agradeço a todos os meus amigos que ajudaram durante o curso, diretamente ou indiretamente, em especial ao Tiago Machado, Paulo Sarmiento e Rafael Gouveia, que foram parceiros de trabalhos durante todos os semestres.

Ao meu grande amigo, Ryan Augusto, que juntos conseguimos a montagem deste trabalho de conclusão de curso, assim como em tantos outros trabalhos da faculdade.

Ao professor Manoel Jacinto, que esteve presente em todos os momentos para tirar as dúvidas sobre o projeto, não mediu esforços, disponibilizou tanto seu tempo quanto material para que este trabalho fosse montado, pela paciência que teve em momentos que não podíamos estar presentes.

Agradeço a todos os professores da instituição, que com seus conhecimentos contribuíram para a formação de cada um de nós.

Os nossos pais amam-nos porque
somos seus filhos, é um fato inalterável.

Nos momentos de sucesso,
isso pode parecer irrelevante,
mas nas ocasiões de fracasso,
oferecem um consolo e
uma segurança que não se
encontram em qualquer outro lugar.

Bertrand Russel

RESUMO

A necessidade pela implantação de fontes de energias renováveis vem se tornando maior, devido fortes secas que o país vem passando as reservas de água responsáveis por abastecer hidrelétricas, que em algumas épocas do ano tornam-se incapazes de suprir o abastecimento de energia elétrica de algumas cidades. Com base nisso, projetos de energia solar vem ganhando espaço no mercado e se tornado mais popular com o tempo. O maior empecilho com relação ao aderir um sistema deste tipo é o alto custo no investimento, porém o resultado financeiro começa a aparecer gradativamente com o passar dos anos, visto que este retorno virá com a abatimento do valor a ser pago na conta de energia. Projetar um sistema fotovoltaico para uma empresa que depende de alta demanda de energia elétrica requer de uma grande área necessária para a aplicação dos módulos, caso não esteja disponível um espaço grande o projeto poderá ser híbrido, onde a energia elétrica convencional irá trabalhar com a energia elétrica fotovoltaica.

Palavras-chave: Energia renovável. Energia solar. Sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

The need for the introduction of renewable energy sources is becoming greater, due to strong droughts that the country has been passing the water reserves responsible for supplying hydroelectric plants, which at some times of the year become unable to supply the electricity supply of some cities. Based on this, solar energy projects have been gaining ground in the market and have become more popular over time. The biggest drawback to joining a system of this type is the high cost of investment, but the financial result begins to appear gradually over the years, since this return will come with the reduction of the amount to be paid in the energy bill. Designing a photovoltaic system for a company that depends on high demand for electrical energy requires a large area required for the application of the modules, if a large space is not available the project could be hybridized, where conventional electric energy will work with the energy photovoltaic electricity.

Keywords: Renewable energy. Solar energy. Photovoltaic system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Telhado da área solar disponível ($A = 117,75 \text{ m}^2$) para o gerador FV proposto à Empresa TV RBA (Posição geográfica: <i>Latitude</i> = -1,431571 Sul, <i>Longitude</i> = - 48,455062 Oeste).....	18
Figura 2 - Pontos de solstícios e equinócios.....	20
Figura 3 - Ângulos formados a partir dos raios solares.....	21
Figura 4 - Relação entre o ângulo de incidência e a massa de ar.....	23
Figura 5 - Componentes da radiação solar.....	24
Figura 6 - Espectro da radiação solar incluindo detalhadamente da faixa visível humana.....	25
Figura 7 - Representação das estações do ano e do movimento da terra em torno do sol.....	25
Figura 8 - Radiação solar mensal média em Belém (PA).....	26
Figura 9 - Precipitação média mensal em Belém do Pará.....	27
Figura 10 - Representação de uma célula fotovoltaica.....	28
Figura 11 - Configuração de células solares.....	29
Figura 12 - Associação série de células fotovoltaicas.....	30
Figura 13 - Associação paralelo de N células fotovoltaicas.....	31
Figura 14 - Circuito equivalente básico para uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo)	31
Figura 15 - Símbolo de módulo fotovoltaico.....	32
Figura 16 - Representação esquemática da associação em série de n módulos fotovoltaicos.....	33
Figura 17 - Representação das curvas relativas a associação em série de três módulos fotovoltaicos.....	34

Figura 18 - Representação esquemática da associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos.....	34
Figura 19 - Representação das curvas referentes a associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos.....	35
Figura 20 - Representação esquemática referente a uma associação mista de módulos fotovoltaicos com diodos de bypass e de fileira.....	36
Figura 21 - Associação série paralelo de módulos fotovoltaicos com diodos de bloqueio.....	37
Figura 22 - Representação esquemática do módulo fotovoltaico sombreado.....	38
Figura 23 - Representação esquemática do módulo fotovoltaico sombreado com diodos de bypass.....	39
Figura 24 - Configuração de centrais fotovoltaicas com um (a) ou vários inversores (b).....	40
Figura 25 - Usina solar em Minas Gerais.....	41
Figura 26 - Sistema solar fotovoltaico on-grid.....	42
Figura 27 - Esquema de injeção de energia elétrica.....	43
Figura 28 - Índice solarimétrico na cidade de Belém (PA), especificamente, onde se localiza a empresa de TV RBA.....	46
Figura 29 - Área solar disponível ($A = 117,75 \text{ m}^2$), sem sombreamento, para o gerador FV proposto.....	47
Figura 30 - Módulo FV CS6U-325P <i>Canadian</i> de 72 células policristalino.....	54
Figura 31 - Inversor solar fronius aldo solar trifásico 220V Wlan/Lan/Webserver.....	56
Figura 32 - Forma de conexão do acessante (através de inversor) à rede de Baixa Tensão....	58
Figura 33 - Cabo solar <i>energyflex</i> br 0,6/1kV (1500 V DC)	59
Figura 34 - Instalação de inversores. A alimentação elétrica é em corrente contínua separada por polo positivo e negativo em eletrodutos diferentes.....	60

Figura 35 – Sistema de proteção com chave fusível para CC e conectores.....61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Informações técnicas do sistema solar FV.....	52
Quadro 2 - Equipamento e componentes do gerador FV.....	53
Quadro 3 - Dados técnicos do módulo fotovoltaico CS6U-325P canadian.....	55
Quadro 4 - Dados técnicos do inversor fronijs symo brasil de 12 kW.....	57

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Massa de ar
ART	Anotação de responsabilidade técnica
BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEP	Código de endereçamento postal
CRESESB	Centro de Referência para Energia e Eólica Sérgio Brito
FV	Fotovoltaica
HSP	Horas de sol pleno
IEC	Comissão eletrotécnica internacional
INMETRO	Instituto de metrologia do Estado do Pará
MPPT	Raizador do ponto de potência máxima
NBR	Norma Brasileira
PMP	Ponto de máxima potência
PROCEL	Programa nacional de conservação de energia elétrica
RBATV	Rede Brasil Amazônia de Televisão
SF	Sistema fotovoltaico
SFCR	Sistema Fotovoltaico conectado à rede
STC	Condições padrão de teste

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Theta
kWh	Quilowatt-hora
kWh/m ²	Quilowatt-hora por metro quadrado
kWp	Quilowatt pico
Si	Silício
W	Watt
Wh	Watt-hora
Wh/mês	Watt-hora por mês
α	Alfa
β	Beta
δ	Delta
ψ	Psi

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 MOTIVAÇÃO.....	18
1.2 OBJETIVO GERAL.....	19
1.3 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2 RECURSO SOLAR E CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	20
2.1 GEOMETRIA SOLAR.....	20
2.1.1 Ângulos da Geometria Solar.....	21
2.2 RADIAÇÃO SOLAR.....	22
2.3 CÉLULA SOLAR.....	27
2.3.1 Tipos de células.....	29
2.3.2 Associação série de células fotovoltaicas.....	30
2.3.3 Associação paralela de células fotovoltaicas.....	30
3 CONCEITOS BÁSICOS E CONEXÃO DE DISPOSITIVOS	
FOTOVOLTAICOS.....	33
3.1 LIGAÇÃO EM SÉRIE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	33
3.2 LIGAÇÃO EM PARALELO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	34
3.3 DIODO BYPASS.....	35
3.4 EFEITOS DE SOMBREAMENTO NO MODULOS FV.....	37
3.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE CONEXÃO À REDE.....	39
3.5.1 Grandes centrais.....	40
3.5.2 Produção distribuída.....	41
3.5.3 Inversor e Inversor central.....	41
3.5.4 Medidor de energia.....	42
4 CÁLCULO DO DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR	
FOTOVOLTAICO PROPOSTO À TV RBA.....	44
4.1 INTRODUÇÃO	44
4.2 PROCEDIMENTOS APLICADOS NO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FV.....	44
4.2.1 Potência mínima do inversor.....	49

4.2.2 Arranjo dos módulos.....	50
4.3 RECÁLCULO DO DIMENSIONAMENTO PARA INSTALAÇÃO DO GERADOR FV PROPOSTO.....	52
4.3.1 Instalações elétricas predial em baixa tensão (BT).....	57
4.3.2 Condutores.....	59
4.3.3 Proteção.....	61
4.3.4 Medidor de energia elétrica.....	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
6 REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão apresentados cálculos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) com o objetivo de alimentar uma demanda de aproximadamente 6% (i.e., carga de 02 (dois) elevadores) da empresa de Televisão Rede Brasil Amazônia localizada na cidade de Belém (PA).

De acordo com a Fotovolt (2016), durante os 40 anos da sua história, a indústria fotovoltaica global integra um ecossistema de energia no qual a demanda por instalações conectadas à rede é impulsionada por incentivos, enquanto a demanda por instalações fora da rede opera quase totalmente sob condições de mercado livre.

Segundo a Fotovolt (2015), a energia fotovoltaica (FV) é uma modalidade de geração elétrica bastante promissora em nível mundial e especialmente no Brasil, onde os índices de irradiação solar são altíssimos, segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, diariamente incidem de 4,25 a 6,5 kWh/m² no país.

A cada ano aumenta a participação de energia solar fotovoltaica (FV) na matriz energética brasileira e mundial. O sistema de compensação de energia, conhecido internacionalmente como *net metering*, tem contribuído para desenvolvimento do segmento solar FV no Brasil (FOTOVOLT, 2017).

1.1 MOTIVAÇÃO

Energias renováveis vêm ganhando mais espaço com o passar dos tempos na região Norte, onde é muito propensa ao sol, com isso aplicações que envolvem energia solar tornam-se uma vantagem para implementação de projetos.

A luz solar é uma fonte de energia limpa e, pode-se dizer infinita também, sendo assim não provoca poluição ao meio ambiente e pode ser aproveitado com bastante eficiência.

Como forma de ampliar o movimento sustentável foi proposto o desenvolvimento de um SFCR na empresa TV RBA visando equacionar seu consumo de energia elétrica da fonte geradora hidráulica, no caso maior geradora, com a da fonte geradora solar.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é a instalação de um SFCR no telhado da empresa TV RBA, localizada na Avenida Almirante Barroso nº 2190 (Marco), para alimentar uma carga de dois elevadores de consumo de energia mensal em torno de 2.700 kWh.

1.3 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A conta de luz tem pesado cada vez mais no bolso de clientes comerciais de médio e grande porte da região Norte, como no caso da TV RBA, onde um maior reajuste no período entre 2014 e 2017 da tarifa de energia elétrica ocorreu acumulando alta média de 44,04%, e com uma estimativa ainda maior para 2018 (Aneel).

Baseado nas informações da Aneel é proposto um trabalho aplicando uma fonte geradora de energia renovável que visa incentivar a empresa a fazer uso da tecnologia solar FV, na diminuição do valor de seu consumo de energia.

Na Figura 1, obtida do *Google Maps*, é ilustrada uma vista superior do telhado da empresa TV RBA, e destacado em vermelho os locais específicos onde serão instalados os módulos FV.

Figura 1 – Telhado da área solar disponível ($A = 117,75 \text{ m}^2$) para o gerador FV proposto à Empresa TV RBA (Posição geográfica: *Latitude* = -1,431571 Sul, *Longitude* = - 48,455062 Oeste).



Fonte: *Google Maps* (2018, online)

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por 4 capítulos, que são apresentados a seguir:

- O capítulo 1 apresenta a motivação, objetivos e identificação do problema do trabalho proposto.
- O capítulo 2 apresenta o recurso solar e células fotovoltaicas.
- O capítulo 3 apresenta conceitos básicos e conexão de dispositivos fotovoltaicos.
- O capítulo 4 é o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico proposto à TV RBA.
- O capítulo 5 é a consideração final do trabalho.

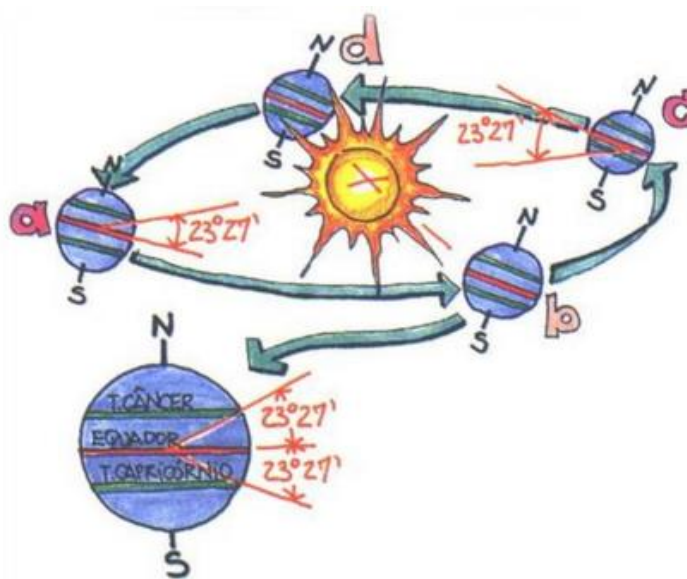
2 RECURSO SOLAR E CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

2.1 GEOMETRIA SOLAR

De acordo com Lamberts (2016), no movimento de translação, a Terra percorre sua trajetória elíptica em um plano inclinado de um ângulo constante de $23^{\circ}27'$ em relação ao plano do equador. Esse ângulo é que define a posição dos trópicos e faz com que os dois hemisférios terrestres recebam quantidades distintas de radiação solar ao longo do ano, caracterizando as estações pelos solstícios de verão e de inverno (*a* e *c*) e pelos equinócios de primavera e de outono (*b* e *d*) indicados na Figura 2.

A terra, em seu movimento anual em torno do Sol descreve uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade ($e \sim 0,017$). O seu eixo, em relação ao plano normal à elipse, apresenta uma inclinação de aproximadamente $23,45^{\circ}$ (GTES, 2014).

Figura 2 – Pontos de solstícios e equinócios



Fonte: Lamberts (2016, online)

Os solstícios consistem na época do ano em que o sol passa pela maior declinação boreal e maior parte do tempo próximo da linha do equador. No solstício de verão os dias são mais longos que a noite, quanto que no solstício de inverno acontece o contrário, as noites são mais longas que o dia. Os equinócios são épocas em que o dia e a noite são iluminados igualmente, durante esse período os dias e noites tem a mesma duração. Com base nisso, a declinação solar é calculada.

A declinação solar é o ângulo formado ao meio dia, em relação a linha do equador. Esse valor pode variar no decorrer do ano, entre $-23^{\circ}27' < \delta < 23^{\circ}27'$. A equação (1) mostra como calcular a declinação.

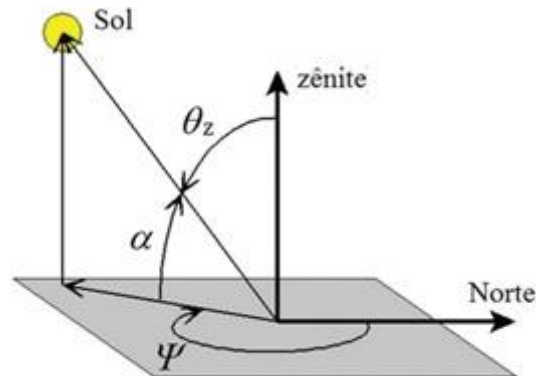
$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[\frac{360 \times (NDA - 80)}{365} \right] \quad (1)$$

, em que NDA corresponde ao n -ésimo dia do ano, por exemplo, se o NDA for dia 13 de fevereiro corresponde ao número 44°, ou seja, quadragésimo quarto dia do ano.

2.1.1 Ângulo da geometria solar

As relações geométricas entre os raios solares, que variam de acordo com o movimento aparentem do Sol e a superfície terrestre, são descritas por meio dos ângulos *zenital* (θ_z), *elevação solar* (α) e *azimutal do Sol* (ψ), os quais são ilustrados na figura 3 e definidos a seguir:

Figura 3 – Ângulos formados a partir dos raios solares.



Fonte: Adaptado de Campos e Alcantara (2016, p.573)

Ângulo Zenital (θ_z): ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local ou superfície vertical de edificação (Zênite).

Altura ou Elevação Solar (α): ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal. Tem a ver com a hora do dia. Por exemplo, ao nascer do sol sua altura é igual a zero, e ao meio dia o ângulo alcança os 90° .

Ângulo Azimutal do Sol (ψ): ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção norte-sul. O deslocamento angular é tomado a partir do Norte (0°) geográfico sendo, por convenção, positivo quando a projeção se encontra à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontra à esquerda (a Oeste) ($-180^{\circ} \leq \psi \leq 180^{\circ}$).

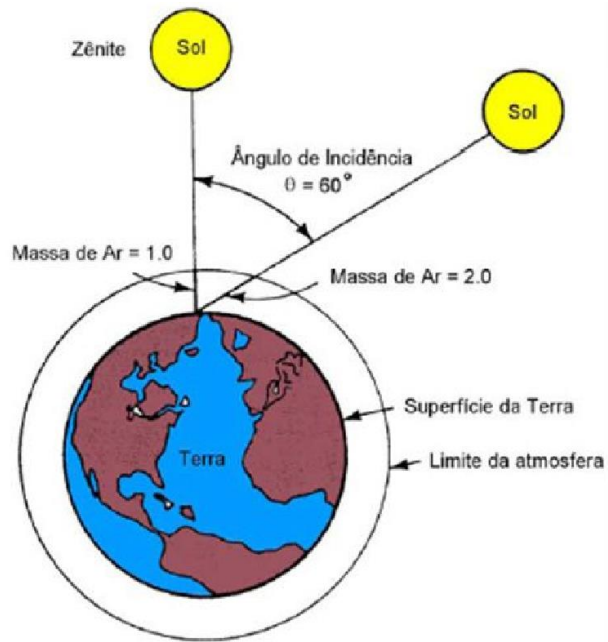
No hemisfério sul, a orientação ideal dos painéis solares é a voltada para o norte geográfico. Já no hemisfério norte, os mesmos seriam voltados para o sul geográfico. Independentemente da localização, os painéis solares devem sempre visar o caminho do sol. O azimute sempre será medido em relação ao norte geográfico, e não ao norte magnético.

A posição do sol ao longo do dia segue um caminho que depende da estação do ano, nascendo a leste e se pondo a oeste a qualquer época, atingindo as maiores altitudes no verão enquanto que no inverno ele alcança altitudes menores.

2.2 RADIAÇÃO SOLAR

A intensidade da radiação solar chega à terra é em torno de 1,3 kW/m² acima da atmosfera. A quantidade de radiação ao chão, no plano horizontal depende da localização geográfica, mas também das condições atmosféricas, assim como do período (estação) do ano. A atmosfera terrestre age como um filtro, que bloqueia uma parte dessa energia. Quanto mais espessa for a camada atmosférica a ser vencida, menor será a irradiância solar ao nível do solo. A camada atmosférica será mais ou menos espessa, de acordo à elevação do sol, no momento da medição. Essa espessura é medida através de um coeficiente chamado Massa de ar (AM – do inglês *air mass*). A massa de ar influencia através dos efeitos de absorção e dispersão, por isso, quanto mais elevado o sol estiver no céu, menores serão os efeitos da camada atmosférica (BLUE SOL, 2017).

Figura 4 - Relação entre o ângulo de incidência e a massa de ar.



Fonte: Blue sol (2017, online)

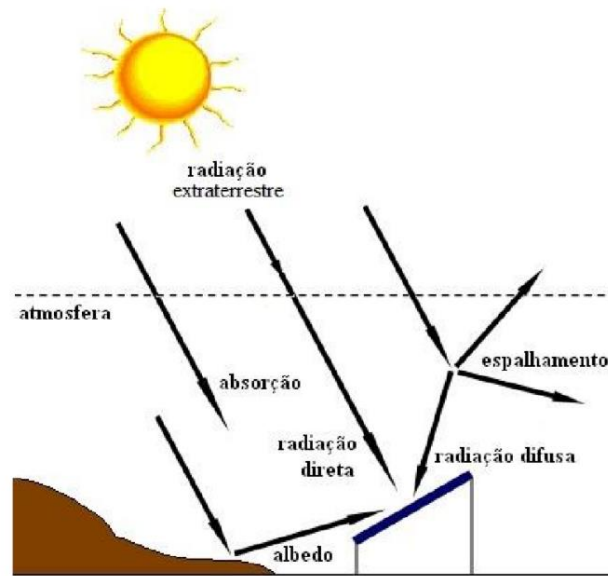
A relação entre o coeficiente AM, a altura solar (α) e ângulo zenital (θ_z) é:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

$$AM = \frac{1}{\sin \alpha} \quad (3)$$

Devido a esses fatores, a máxima irradiância que chega à superfície terrestre é em torno de 1 kW/m². A radiação que vem diretamente do Sol é chamada de radiação direta, ou seja, não sofreu nenhuma mudança de direção além da refração terrestre. A Radiação difusa é a radiação que vem após os raios solares mudarem de direção por causa de reflexão ou espelhamento na atmosfera. E, se a superfície estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos). O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de “albedo” (BLUE SOL, 2017).

Figura 5 – Componentes da radiação solar

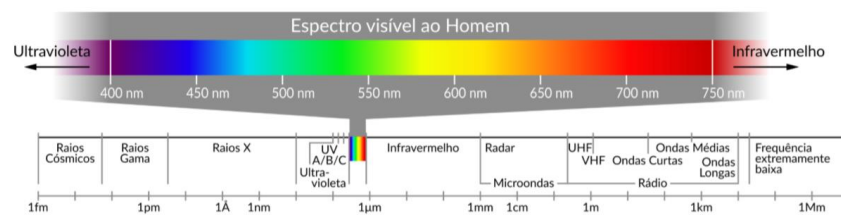


Fonte: Gtes (2014, p. 78)

Complementando o que já foi dito, antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera, devidas aos efeitos de absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes, além da espessura da camada atmosférica (AM), também, do ângulo zenital do sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.) e meteorológicas.

A energia irradiada pelo Sol sobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético, conforme ilustra a figura 6. Cerca de 81% da energia que chega ao Sistema Terra/Atmosfera está em uma faixa de comprimentos de onda que vai do visível ao infravermelho próximo. Essa energia alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos, com aplicação do conhecimento científico e tecnológico produzido pela sociedade (PEREIRA, 2017).

Figura 6 - Espectro da radiação solar incluindo detalhamento da faixa visível humana.



Fonte: Pereira (2017, p. 15)

A duração do dia está intrinsecamente relacionada com as estações do ano. Por convenção astronômica, as estações são determinadas pelos solstícios-momento em que o sol, durante seu movimento aparente na esfera celeste, atinge a maior declinação em latitude medida a partir do Equador – e os equinócios – instantes em que o Sol, em sua órbita aparente, cruza o Equador terrestre. O verão no hemisfério Sul ocorre quando o polo sul está voltado para o Sol. O inverno ocorre quando o polo Sul está voltando para a direção oposta à do Sol (PEREIRA, 2017).

Figura 7 - Representação das estações do ano e do movimento da terra em torno do sol

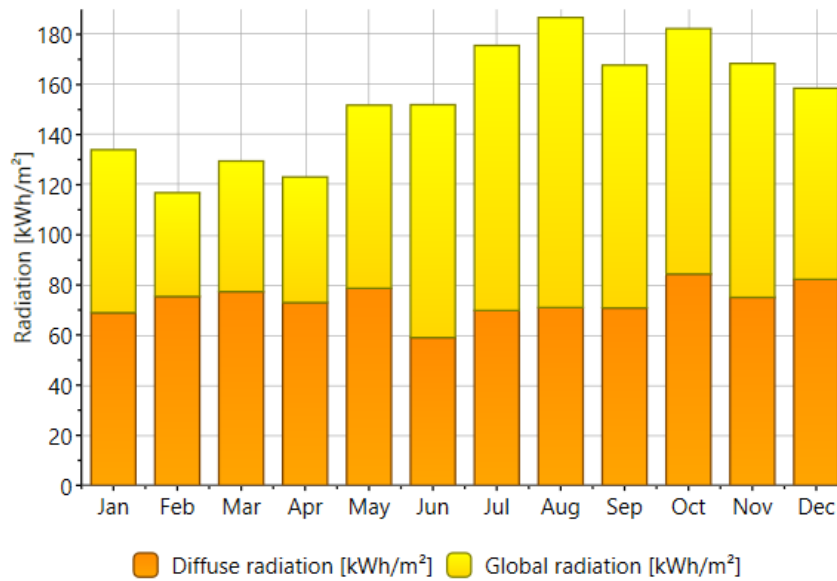


Fonte: Pereira (2017, p. 16)

Usando o software METEONORM foi realizado simulações com o objetivo de comparar a radiação incidente total entre as cidades de Belém (PA), Fortaleza (CE) e Macapá (AP).

Na figura 8 é indicada a radiação em KWh/m² na cidade de Belém durante 12 meses com a inclinação do módulo fotovoltaico de 12° graus na direção norte.

Figura 8 - Radiação solar mensal média em Belém (PA)

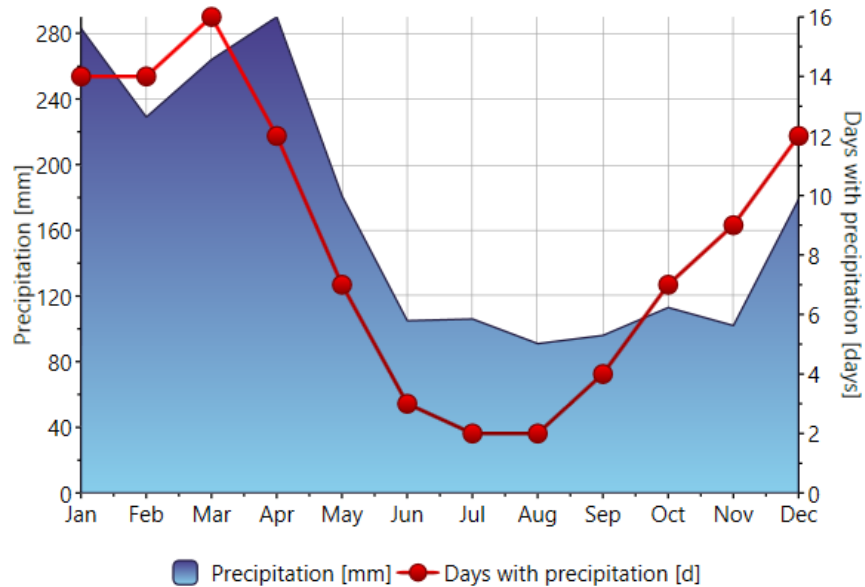


Fonte: Autores (2018)

A figura 8 ilustra a radiação solar durante os 12 meses, recebendo radiação difusa e global. A difusa é causada pelo espalhamento dos raios solares na atmosfera e a global é a radiação direta sem nenhuma reflexão ou refletida pelo solo que é chamada de albedo.

A média de radiação solar aumenta consideravelmente a partir do mês de julho a dezembro, sendo agosto o seu máximo devido as características climáticas da região analisada. Nesse período de maior radiação há pouca precipitação na região como indica a Figura 9. Da Figura 9, também, pode ser notado que a precipitação é maior no início do ano resultando baixa radiação solar.

Figura 9 - Precipitação média mensal em Belém do Pará



Fonte: Autores (2018)

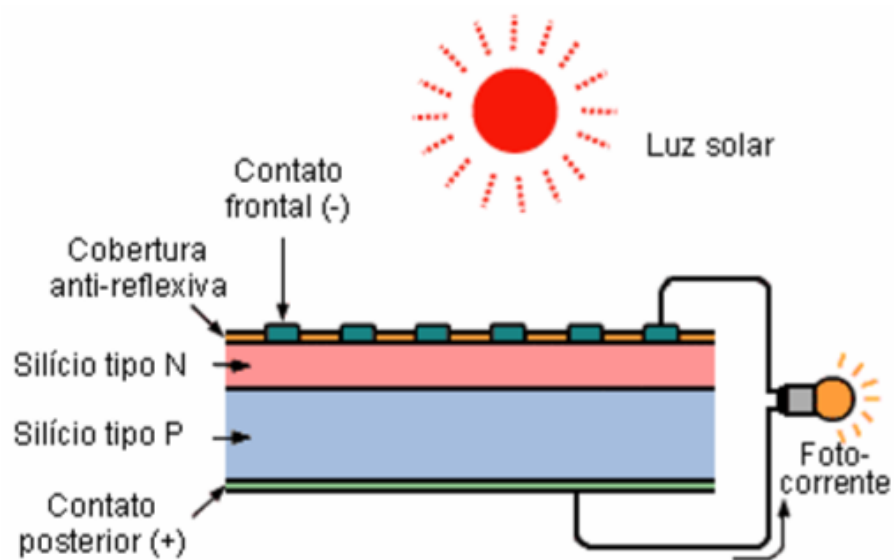
A escolha da cidade de Macapá foi devida estar sobre a linha do Equador. O gráfico da cidade de Macapá é bem semelhante ao de Belém por serem bem próximas, os maiores meses com a maior radiação são os mesmos nas duas cidades, sendo de julho a dezembro, porém na cidade de Macapá o mês com a maior radiação se encontra em outubro. Em Macapá nos meses de julho a dezembro mostra também uma baixa precipitação. Já, em Fortaleza, localizada na região Nordeste. Os resultados indicam que os meses com maior precipitação são os mesmos das cidades de Belém e Macapá, sendo de julho a dezembro, porém, a média mensal da radiação solar é maior que as duas cidades analisadas, sendo o mês de outubro com a maior média de radiação. A precipitação apresentou média bem menor do que as outras cidades, isso se dá por causa das condições climáticas da região nordeste.

2.3 A CÉLULA SOLAR

Uma célula fotovoltaica é um dispositivo semicondutor similar a um diodo de junção. De acordo com a forma em que os átomos do semicondutor estão estruturados, as células podem ser classificadas em cristalinas (subdivididas em monocristalinas e multicristalinas) e amorfas. Existem células constituídas tanto por elementos singelos (silício, germânico, selênio) como por ligas e compostos (arsênico de gálio, sulfeto de cádmio, telureto de cádmio, disseleneto de cobre e índio, etc.) Por ser o tipo mais comumente utilizado, este capítulo ater-se-á à descrição de células de silício monocristalino, mesmo porque os demais tipos de células fotovoltaicas

possuem comportamento elétrico semelhante. A figura 10 mostra a representação de uma célula fotovoltaica de silício monocristalino (PRIEB, 2002).

Figura 10 - Representação de uma célula fotovoltaica

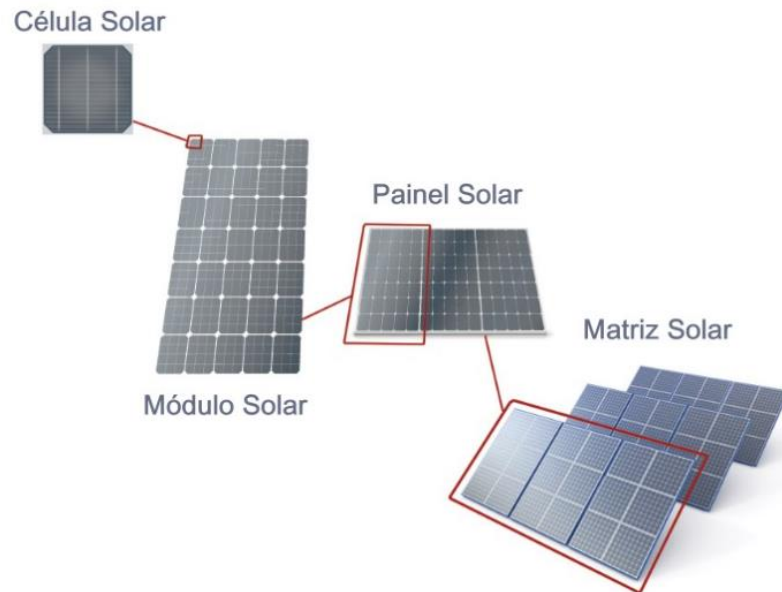


Fonte: Prieb (2002, online)

A célula solar é um componente eletrônico (Junção P-N) que converte a energia da luz solar em eletricidade (DC) usando o efeito fotovoltaico. As células geram corrente elétrica a partir de um fenômeno físico chamado efeito fotovoltaico. O efeito se dá através de semicondutores, sendo que o mais utilizado no caso de sistemas fotovoltaicos é o silício (Si).

A partir de várias células, um módulo solar é fabricado e, de um arranjo de módulos solares, é formado um painel solar e por fim, com vários painéis solares tem-se uma matriz solar.

Figura 11 - Configuração de células solares



Fonte: Portal energia (2015, online)

2.3.1 Tipos de células

Segundo Pinho et al. (2008) os tipos de células mais usadas em módulos fotovoltaicos são:

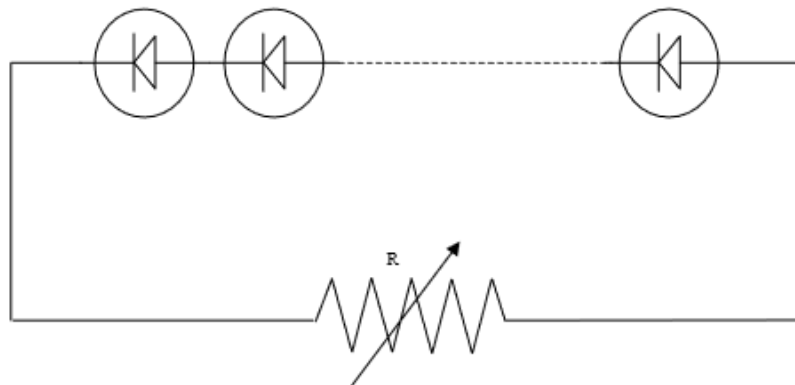
- **Células de Silício Monocristalino:** são atualmente as mais utilizadas comercialmente. O silício é o segundo material mais abundante na crosta terrestre e células fabricadas com esse material não apresentam problemas ambientais causados pela combinação por seus elementos constituintes, além de apresentarem elevada vida útil.
- **Células de Silício Poli ou Multicristalinas:** são constituídas de diversos cristais em contato entre si, dispostos de maneira não alinhada. Esse procedimento visa reduzir custos de fabricação, embora haja uma pequena perda de eficiência. Os avanços tecnológicos vêm reduzindo bastante as diferenças de custo e eficiência entre as células mono e policristalinas, sendo essas diferenças atualmente pouco perceptíveis.
- **Células de Silício Amorfo:** não apresentam qualquer ordenamento na estrutura dos átomos. Seus custos de material são reduzidos se comparados às células anteriores, porém apresentam eficiência também reduzida, com o máximo valor comercial atingindo 15% a 20%.

2.3.2 Associação série de células fotovoltaicas

De acordo com Hecktheuer (2001) a grande maioria dos módulos fotovoltaicos são montados para operarem com tensão nominal de 12 V. Dependendo do tipo de células que os constituem, apresentam mais ou menos células associadas em série. Entre os tipos de células que os constituem, apresentam mais ou menos células associadas em série. Entre os tipos de células mais utilizados estão a de silício monocristalino (módulos com 30 a 36 células), silício policristalino (geralmente módulos com 36 células) e silício amorfo (módulos de 27 ou 28 células).

Em sistemas fotovoltaicos é frequente utilizar-se componentes elétricos de consumo que apresentam tensões nominais de 12, 24 ou 48 V. As tensões de 24 V e 48 V são obtidas associando-se em série um maior número de células fotovoltaicas (HECKTHEUER, 2001).

Figura 12 - Associação série de células fotovoltaicas



Fonte: Hecktheuer (2001, p. 20)

Como principais características de uma associação em série, tem-se que a corrente que circula por uma célula é a mesma que circula pelas demais células associadas e a tensão, nos extremos da associação, é dada pela soma das tensões de cada célula (HECKTHEUER, 2001).

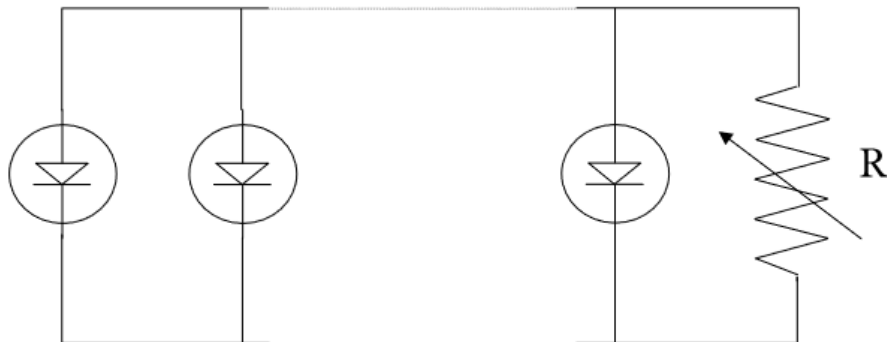
2.3.3 Associação paralelo e células fotovoltaicas

Segundo Hecktheuer (2001) os sistemas fotovoltaicos são projetados para atender às necessidades de tensão e corrente elétrica de uma determinada carga. A medida que esta carga vai aumentando, é exigida do sistema uma corrente elétrica de maior intensidade.

Para suprir esta necessidade de corrente, muitas vezes torna-se necessário associar-se módulos fotovoltaicos em paralelo, visto que a corrente que cada módulo individualmente pode fornecer ao sistema é da ordem de poucos Ampères (HECKTHEUER, 2001).

A figura 13 apresenta o circuito elétrico de N células fotovoltaicas, associadas em paralelo, fornecendo energia elétrica para um resistor de resistência elétrica variável.

Figura 13 - Associação paralelo de N células fotovoltaicas

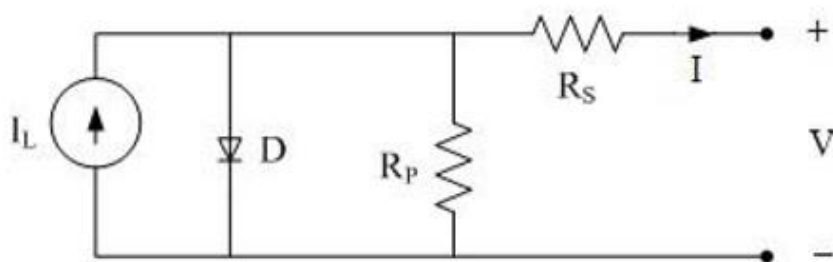


Fonte: Hecktheuer (2001, p. 26)

Entre as principais características de uma associação paralelo de células fotovoltaicas, tem-se que a corrente da associação é igual à soma das correntes que circulam por cada uma das células associadas e a tensão sobre todas as células (HECKTHEUER, 2001).

A Figura 14 apresenta o circuito equivalente para uma célula fotovoltaica, em que o diodo, D, representa a participação da junção **pn** no escuro, R_s e R_p representam resistência em série e paralelo.

Figura 14 - Circuito equivalente básico para uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo)



Fonte: Gtes (2014, p. 118)

Para as células fotovoltaicas de uso terrestre sem concentração de energia solar, a curva I-V é medida em condições-padrão de ensaio: irradiância de 1 kW/m^2 , espectro solar AM 1,5 e temperatura da célula fotovoltaica de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Para essa medição, geralmente, utiliza-se um simulador solar e um sistema de medição automatizado.

O módulo fotovoltaico é uma medida básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica. O símbolo da Figura 15 pode ser utilizado para representar um módulo fotovoltaico.

Figura 15 - Símbolo de módulo fotovoltaico



Fonte: Gtes (2014, p. 119)

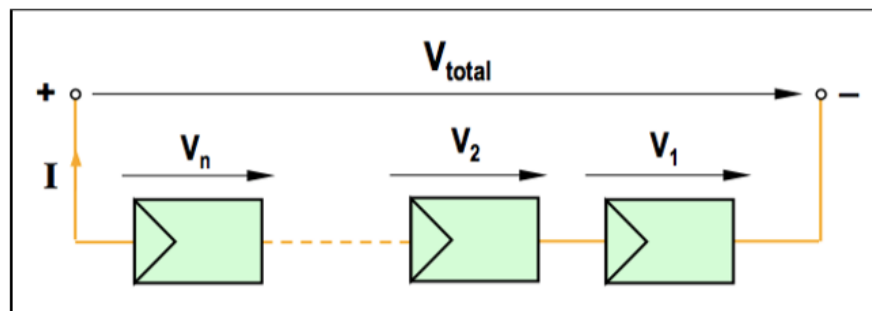
3 CONCEITOS BÁSICOS E CONEXÃO DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Módulos fotovoltaicos transformam irradiação solar em energia elétrica na forma de corrente contínua. Devido à baixa tensão e corrente dos módulos, os mesmos podem ser associados formando um arranjo fotovoltaico. Essa associação pode ser feita colocando-se os módulos tanto em série quanto em paralelo.

3.1 LIGAÇÃO EM SÉRIE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Nos módulos fotovoltaicos ligados em série caracteriza-se por serem ligados por fileiras. Nessa associação os módulos devem ser utilizados do mesmo tipo, para que não possa ter nenhum tipo de perdas de potência no sistema. A figura 16 ilustra uma associação em série de n módulos fotovoltaicos (CARNEIRO, 2010).

Figura 16 - Representação esquemática da associação em série de n módulos fotovoltaicos



Fonte: Carneiro (2010, p. 9)

De acordo com a figura 16, podem-se escrever as seguintes relações:

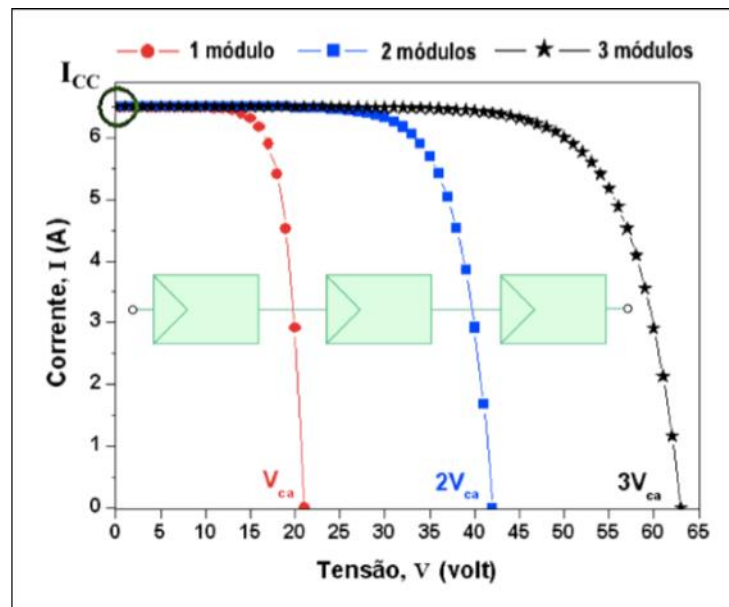
$$V_1 = V_2 = \dots = V_n = V \rightarrow V_{total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = n.V \quad (4)$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I \quad (5)$$

A associação em série de módulos fotovoltaicos permite obter tensões mais elevadas, mantendo a corrente do módulo.

A figura 17 ilustra a curva característica da corrente *versus* tensão referente a associação em série de três módulos fotovoltaicos em Condições Padrão de Teste (STC - *Standard Test Conditions*).

Figura 17 - Representação das curvas relativas a associação em série de três módulos fotovoltaicos



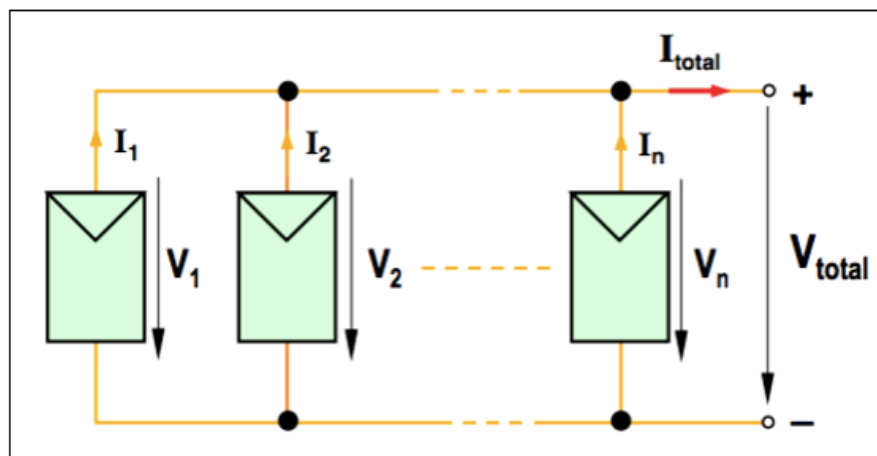
Fonte: Carneiro (2010, p. 10)

A corrente de curto-circuito (I) da associação de três módulos ligados em série mantém-se inalterada. No entanto, a tensão de circuito aberto (Volt) é três vezes superior.

3.2 LIGAÇÃO EM PARALELO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A ligação dos módulos em paralelo é usada quando se quer elevar o nível da corrente e manter a tensão estipulada pelo módulo.

Figura 18 - Representação esquemática da associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos



Fonte: Carneiro (2010, p. 11)

De acordo com a figura 18, podem-se escrever as seguintes relações:

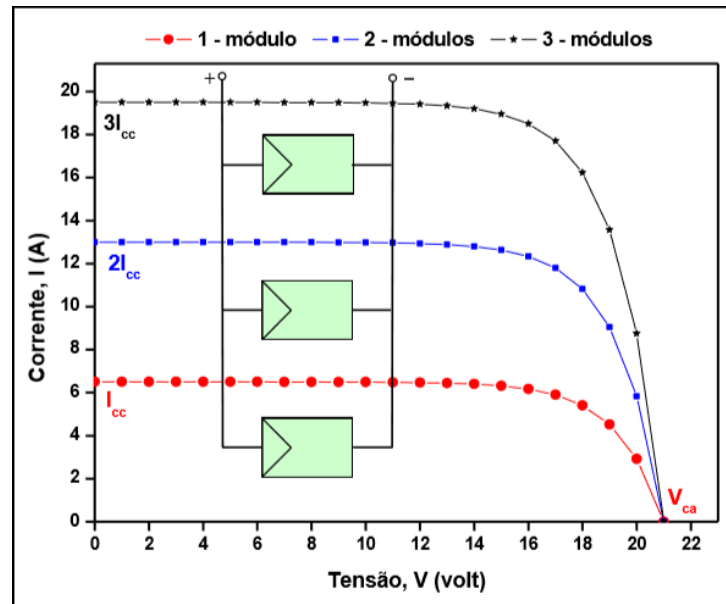
$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \rightarrow I_{total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = n.I \quad (6)$$

$$V_{total} = V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (7)$$

A associação em paralelo dos módulos permite obter correntes mais elevadas, mantendo-se a tensão do módulo.

A figura 19 ilustra a curva característica de corrente *versus* tensão referente a associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos em condições STC.

Figura 19 - Representação das curvas referentes a associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos



Fonte: Carneiro (2010, p. 12)

A tensão de circuito aberto (V_{oc}) da associação de três módulos ligados em paralelo mantém-se inalterada. Porém, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) é três vezes superior.

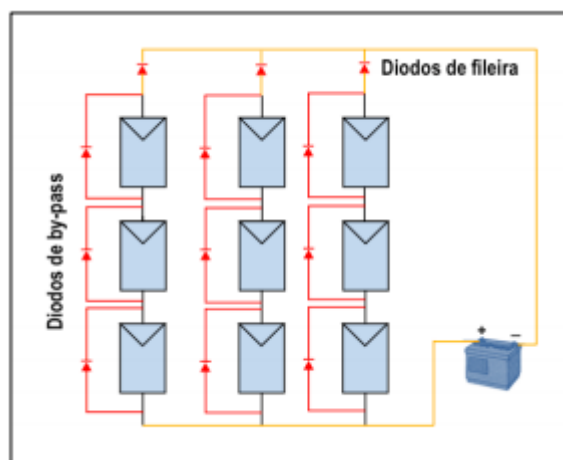
3.3 DIODO DE BYPASS

Em associações série de módulos fotovoltaicos, os mesmos estão sujeitos a funcionarem como carga para os demais módulos. Neste caso, corre-se o risco de se ter uma tensão negativa aplicada nos seus extremos que seja maior que a sua tensão de joelho (*breakdown*), ocasionando uma dissipação de potência exagerada sobre ele e, por consequência, provocando um aquecimento que pode causar danos ao módulo. Esta situação pode ocorrer devido a não

identidade ou por sombreamento de módulos. Nessas situações, ao conectar-se um diodo em anti-paralelo com os extremos dos módulos (diodo *bypass*), o mesmo ficará diretamente polarizado e, portanto, permitirá que a corrente circule por ele. Assim sendo, o módulo em questão não contribui na conversão da energia elétrica, mas, também não se comporta como carga para os demais módulos. Se os módulos forem idênticos e não estiverem sombreados, o diodo *bypass* ficará reversamente polarizado, não permitindo que por ele circule corrente. Esse diodo *bypass* deve ser capaz de conduzir toda a corrente gerada pela associação série e sua tensão limiar de condução deve ser a menor possível (HECKTHEUER, 2010).

Na prática, não são colocados diodos *bypass* em paralelo com cada um dos módulos associados, mas sim com grupos deles. A figura 20 ilustra como são ligados os diodos *bypass* em módulos fotovoltaicos (associações de n módulos em série) disponíveis no mercado (HECKTEUER, 2010).

Figura 20 – Representação esquemática referente a uma associação mista de módulos fotovoltaicos com diodos de *bypass* e de fileira.



Fonte: Carneiro (2010).

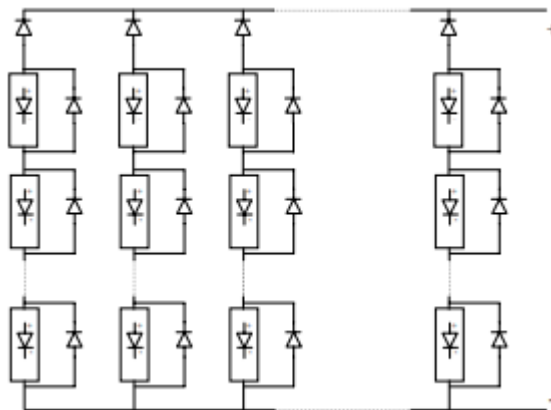
Os diodos de fileira, têm a função de evitarem curto-circuito e correntes inversas entre fileiras, em situações onde possam surgir avarias ou o aparecimento de tensões diferentes nas fileiras. (CARNEIRO, 2010)

Sistemas fotovoltaicos constituídos por várias fileiras em paralelo, cada qual podendo ser constituídos por n módulos associados em série, podem ser protegidos contracorrentes reversas das outras fileiras através de diodos de bloqueio conectados em série em cada um dos módulos. Essa corrente reversa é causada pela diferença de tensão das fileiras devido a situações

indesejadas já citadas anteriormente. A fileira que apresenta uma menor tensão fica sujeito a funcionar como carga para as demais fileiras. Desta forma, parte ou toda a corrente gerada pelas fileiras que apresentam maior tensão fluirá pela fileira de menor tensão, ocasionando um aquecimento nessa última fileira e perda de potência do sistema. O uso de diodos de bloqueio ligados em série com os módulos de cada fileira, conforme é ilustrado na figura 20, evitam o aparecimento de correntes reversas (HECKTEUER, 2010).

Os sistemas fotovoltaicos que utilizam um número maior de módulos a fim de obter-se valores de tensão e corrente apropriados para a aplicação desejada, em geral utilizam simultaneamente associações em série e em paralelo. Nestes casos, a proteção dos módulos é conseguida utilizando-se, também simultaneamente, os diodos de bypass e de bloqueio (HECKTEUER, 2010).

Figura 21 – Associação série paralelo de módulos fotovoltaicos com diodos de bloqueio



Fonte: Heckteuer (2010, online)

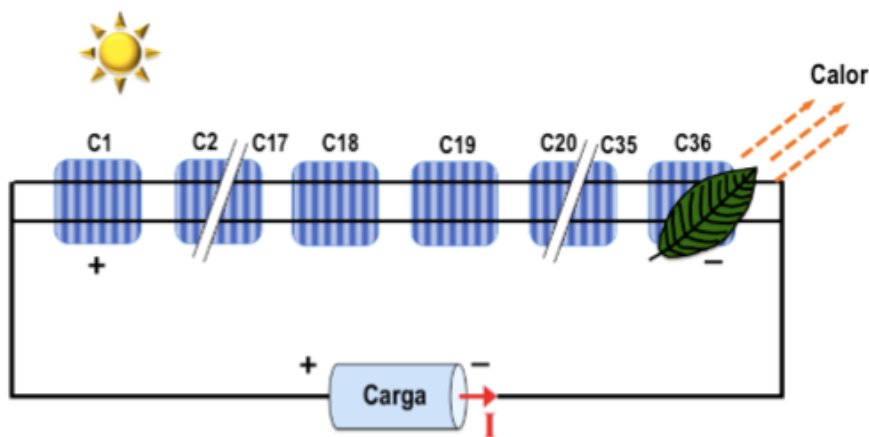
3.4 EFEITOS DE SOMBREAMENTO NO MÓDULO FV

Em SF instalados em ambiente urbano, é comum que a instalação venha sofrer algum sombreamento devido à presença de obstáculos nos arredores da instalação. O impacto que o sombreamento pode causar irá depender do tipo do módulo fotovoltaico, da configuração dos diodos de *bypass*, da configuração da *string* (fileiras de módulos conectados em série), da natureza da sombra, dentre outros fatores. No caso do sombreamento parcial do módulo, a perda de produção poderá ser proporcionalmente maior do que a área sombreada e, além da perda de energia por conta do sombreamento, ocorrerá perda por descasamento de corrente elétrica entre módulos de uma mesma *string* e perda por descasamento de tensão elétrica em *strings* paralelas dentro de um mesmo arranjo.

O sombreamento pode ocorrer de forma parcial ou total. No sombreamento parcial, somente parte de uma ou mais células do módulo fotovoltaico deixa de ser iluminada, implicando em uma redução, proporcional à área sombreada, da potência de saída. Este efeito ocorre devido ao fato de que em um módulo, geralmente, as células estão conectadas em série, assim a redução de geração de uma delas causará a redução no fluxo de corrente das demais. No caso do sombreamento total, a área de uma ou várias células é totalmente coberta, dessa forma, a geração de energia elétrica pode cair a zero (VICENTE, 2015).

Na eventualidade de ocorrer sombreamento do módulo na figura 22, por exemplo por meio da queda de uma folha sobre a célula C36, essa célula passará a estar inversamente polarizada (a tensão inversa pode ter um valor elevado), atuando assim como uma “resistência elétrica”. Nessa situação, ocorre conversão de energia elétrica em calor que eleva a temperatura (pontos quentes) para valores que, em alguns casos, conduzem à destruição do módulo (CARNEIRO, 2010).

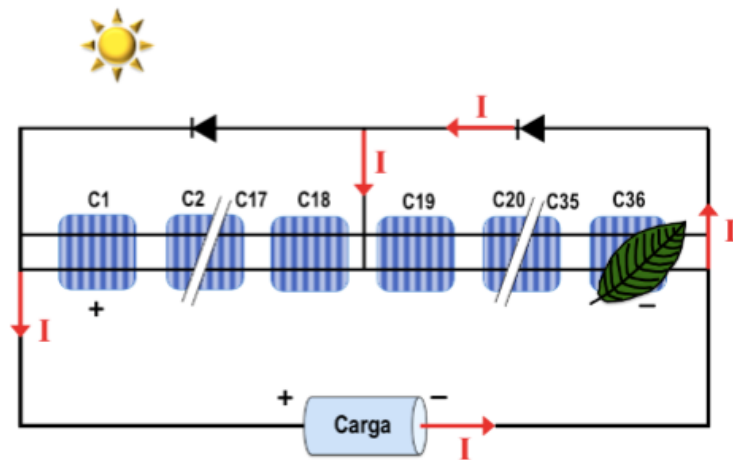
Figura 22 – Representação esquemática do módulo fotovoltaico sombreado



Fonte: Carneiro (2010, p.16)

Para prevenir a ocorrência de pontos quentes, a corrente deve ser desviada do módulo sombreado através da utilização de diodos de *bypass*. A inclusão desses diodos impede o aparecimento de tensões inversas elevadas nos módulos fotovoltaicos obscurecidas, permitindo assim que a fileira se mantenha em produção, embora diminuída. A figura 23 representa esquematicamente o módulo fotovoltaico contendo diodos de *bypass*.

Figura 23 – Representação esquemática do módulo fotovoltaico sombreado com diodos de *bypass*



Fonte: Carneiro (2010, p.17)

3.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE CONEXÃO À REDE

Sistemas Fotovoltaicos Conectado à Rede Elétrica (SFCR) é um gerador fotovoltaico, gerando energia elétrica à concessionária. Internacionalmente conhecido com *on-grid Photovoltaic System*, ou Sistema Fotovoltaico *on-grid* ou simplesmente Sistema *on-grid*.

Na composição básica de um SFCR tem-se os módulos solares (comumente chamados de placas solares) e pelo inversor interativo, que é conhecido internacionalmente como *grid-tie*. Além dos componentes básicos (módulos solar e inversor), existem os componentes de integração do sistema (chamados internacionalmente de *Balance of System* - BOS), que são as estruturas de fixação dos módulos fotovoltaicos e os componentes elétricos de proteção.

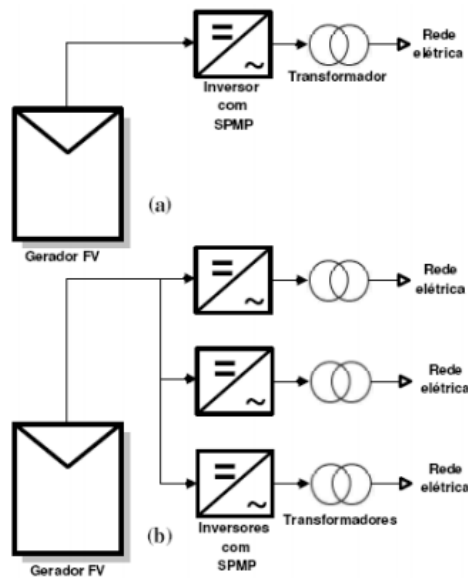
Um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) pode ser definido como um conjunto de equipamentos que permitem transformar energia solar em energia elétrica e intercambiar essa energia com a rede elétrica de alta ou baixa tensão, dependendo da aplicação. (MACÊDO, 2006)

Em relação aos SFCR existe dois tipos de instalações, as de grande porte que são usinas fotovoltaicas e as de médio e pequeno porte, que são feitas em edificações e que será descrita neste capítulo.

3.5.1 GRANDES CENTRAIS

De acordo com Câmara (2011) uma grande central fotovoltaica fornece potência à rede elétrica instantaneamente por meio de um ou mais inversores e transformadores. Esses sistemas utilizam inversores comutados pela rede para evitar a operação isolada, e em geral, são equipamentos com seguidor de ponto de máxima potência (SPMP).

Figura 24 – Configuração de centrais fotovoltaicas com um (a) ou vários inversores (b)



Fonte: Câmara (2011, p.32)

Com base na matéria do G1(2017) em Pirapora (MG), a maior usina fotovoltaica está sendo projetada. Com uma área equivalente a 1500 (mil e quinhentos) campos de futebol é pretendido gerar um aproximadamente 400 MW, sendo assim, fornecendo energia elétrica para 420.000 casa.

Figura 25 - Usina solar em Minas Gerais.



Fonte: G1 (2017, online).

3.5.2 Produção distribuída

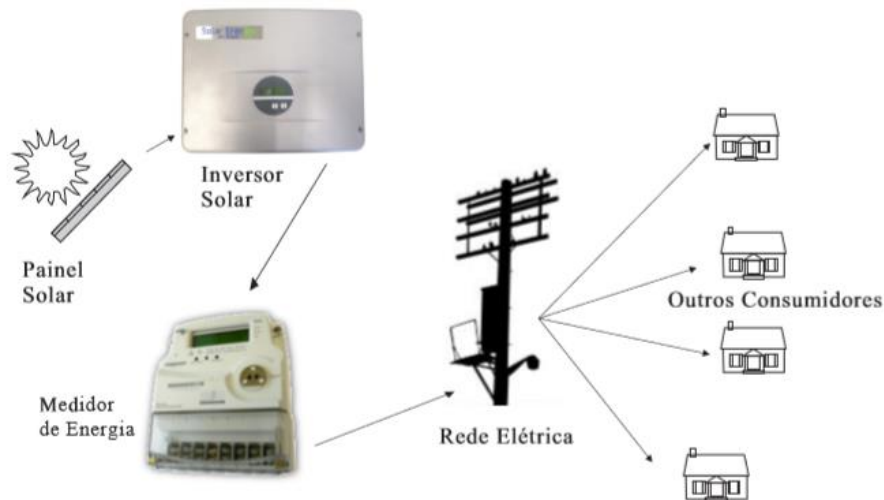
A chamada produção distribuída é constituída pelos módulos fotovoltaicos montados diretamente nas edificações ou em outros locais, tais como coberturas de estacionamentos, áreas livres etc. Essas edificações serão alimentadas pela energia elétrica produzida por esses módulos, através de um inversor cc/ca, concomitantemente com a rede elétrica de distribuição em baixa tensão na qual estão interligadas. Esse sistema de produção de energia elétrica geralmente está presente em residências e em pequenos comércios (LISITA JÚNIOR, 2005).

3.5.3 Inversor e inversor central

De acordo com Santos, Peão e Ferreira (2017) o inversor é um equipamento eletrônico responsável por converter a energia CC em CA. Devem formatar a onda com um baixo teor de harmônicas e em sincronismo com a rede. Assim como, dissipar no mínimo de potência para reduzir perdas de energia (apud CRAVEIRO, 1995).

No mercado há uma variedade muito grande de modelos diferentes de inversores solar, cada qual atendendo uma capacidade de energia diferente. Dependendo de onde será implementado o projeto, o(s) tipo(s) de inversor(es) mais adequado(s) para o sistema é escolha do projetista.

Figura 26 – Sistema solar fotovoltaico *On-Grid*.



Fonte: Solar Energy (2012, p. 2)

Os inversores centrais são comumente utilizados em sistemas fotovoltaicos com potência entre 20 e 400 kW. O inversor é conectado a um conjunto de painéis fotovoltaicos associados em paralelo, ou seja, a conversão é centralizada em um único inversor. A principal vantagem dessa configuração é a redução de custos enquanto a desvantagem está na confiabilidade, onde no caso de falhas do mesmo, toda a instalação fica comprometida. Essa configuração também não permite que o sistema de busca do PMP (ponto de máxima potência) seja independente para cada série de módulos. A figura 26 apresenta a configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor central, onde é representado o conjunto de módulos fotovoltaicos, os diodos de bloqueio de cada *string*, o inversor e a rede elétrica (RAMPINELLI; KRENZINGER, 2013).

3.5.4 Medidor de energia

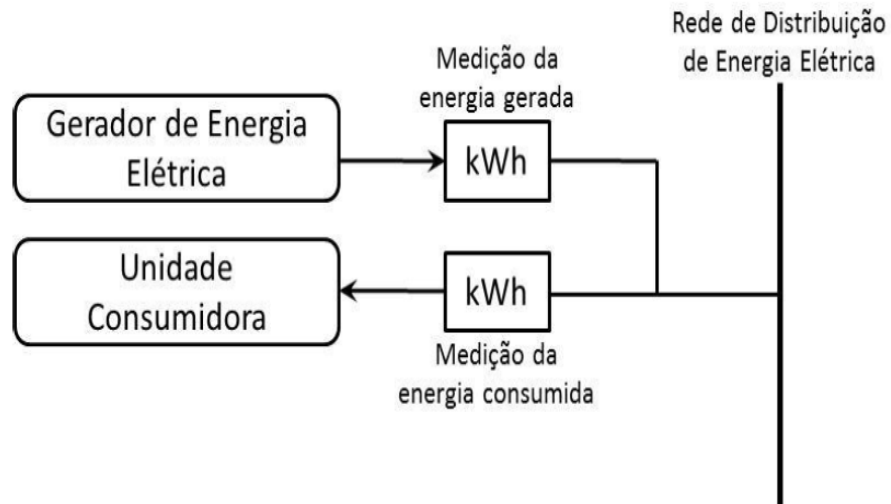
Para Enel (2016) o medidor é o componente responsável por registrar a energia recebida da distribuidora e a energia solar fotovoltaica que é injetada na rede elétrica.

Para uma instalação solar, é necessária a troca do medidor para um modelo com leitura bidirecional, pois quando o sistema de energia solar produz mais energia do que você precisa, o medidor literalmente gira para trás (ENEL, 2016).

A medição bidirecional pode ser realizada por meio de dois medidores unidirecionais, um para aferir a energia elétrica ativa consumida e outro para a energia elétrica ativa gerada, caso seja a

alternativa de menor custo ou haja solicitação do titular da unidade consumidora com microgeração ou mini geração distribuída (ANEEL, 2016).

Figura 27 – Esquema de injeção de energia elétrica.



Fonte: Aneel (2012, p. 1)

4. CÁLCULO DO DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PROPOSTO À TV RBA

4.1 INTRODUÇÃO

Para a elaboração de um sistema bem estruturado e para a realização de instalações eficientes do ponto de vista técnico e econômico, é de fundamental importância conhecer com detalhes conceitos relacionados à conversão fotovoltaica da energia solar, desde os básicos como aqueles relacionados à geometria solar e ao potencial solar, comuns a qualquer sistema de energia solar, até os específicos de sistemas fotovoltaicos (FV) conectados à rede elétrica (SFCR) atuando como geração distribuída nas mais diferentes aplicações e em suas possibilidades de integração as edificações.

A seguir é realizado os procedimentos para dimensionar o sistema solar FV ou sistema *Grid-Tie* proposto à Emissora de Televisão Rede Brasil Amazônia (RBA).

4.2 PROCEDIMENTOS APLICADOS NO DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FV

1º) Procedimento:

Solicite os valores das últimas 12 (doze) contas de energia elétrica do seu local do projeto. Os valores de seu consumo de energia são expressos pela grandeza dimensional de kWh/mês.

Nota 1: Entendendo a unidade de medida:

- (a) Quilowatt-hora (kWh) equivale a 1000 Wh ou $3,6 \times 10^6$ joules.
- (b) O watt-hora (Wh) é a medida de energia elétrica usualmente utilizada em eletrotécnica. 1 (um) Wh é a quantidade de energia utilizada para alimentar uma carga com potência de 1 watt pelo período de 1 (uma) hora. Também, 1 (um) Wh é equivalente a 3600 joules.
- (c) Uma lâmpada cuja potência é 100 W consome energia a uma taxa de 100 joules por segundo. Em 1 (uma) hora consome 360.000 joules ou, equivalentemente, 100 Wh. Se ficar acesa durante 10 horas, consumirá 1.000 Wh ou 1 kWh.
- (d) A unidade watt por hora (W/h) é usada para indicar “*consumo de energia por unidade de tempo*”.

2º) Procedimento:

Ao somar as últimas 12 (doze) medições de energia elétrica. Deve-se tirar a média destes valores.

- I. Para locais onde não haja 12 (doze) medições realizadas, poderá ser utilizada as últimas medições (ao menos 3 (três) medições), considerando possíveis variações de consumo sazonal ao longo do ano.
- II. Para locais que estão sendo projetados, esta informação pode ser obtida facilmente com o engenheiro eletricitista responsável pelo projeto elétrico.

No sistema proposto de microgeração FV à empresa de TV RBA, a potência elétrica (kW_p-quilo-wattpico) estimada foi calculada pela equação empírica em (1):

$$P (kW_p) = \frac{125x(1,015xA)}{1000}. \quad (8)$$

Em que,

P = potência elétrica estimada para o projeto em kW_p,

A = área do projeto sem sombreamento em m².

- III. Cálculo da potência elétrica (kW_p) estimada da(s) área(s) do(s) telhado(s):

A radiação solar é a energia proveniente do Sol. Ela se transforma em corrente elétrica (cc) através dos módulos fotovoltaicos. O aproveitamento da energia solar em eletricidade varia ao longo do ano e com a localização geográfica da edificação, estação do ano, inclinação dos módulos e de outros fatores.

As informações de endereço, latitude e longitude do local onde será instalado o gerador devem ser conhecidas, para identificar a radiação do local. Por exemplo, o aplicativo computacional *Google Maps* possibilitou os seguintes dados da Empresa TV RBA: Endereço – Av. Alm. Barroso, nº 2190, Marco, Belém – PA, CEP 66093-020; Latitude: - 1,431571 Sul; Longitude: - 48,455062 Oeste.

A orientação dos módulos leva em consideração a orientação horizontal, ou seja, se estão voltados ao norte, sul, leste ou oeste. No Brasil, assim como em todos os locais situados ao sul

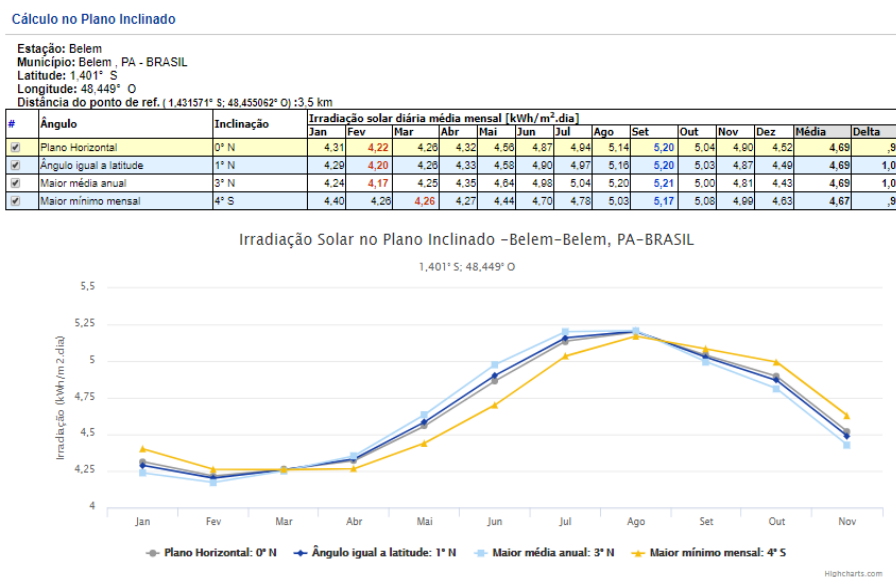
do Equador, os geradores solares fotovoltaicos devem ser orientados ao norte, para maximizar a energia coletada ao longo do ano.

A inclinação dos módulos está relacionada com o ângulo em relação à horizontal e geralmente pode ser considerada ótima quando possuir valor próximo ao da latitude local.

Neste dimensionamento, o cálculo da inclinação usado é o do CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito), que fornece os valores ótimos de inclinação e a radiação do local.

A figura 28 ilustra a irradiação solar diária média mensal para diferentes inclinações, como 0° N, 1° N, 3° N e 4° S, respectivamente, do plano horizontal, ângulo igual a latitude, maior média anual e maior mínimo mensal da Empresa TV RBA. Na empresa, o arranjo de módulos FVs será com inclinação de 10° S (isto é, $\beta = 10^\circ$ S).

Figura 28 - Índice solarimétrico na cidade de Belém (PA), especificamente, onde se localiza a empresa de TV RBA.



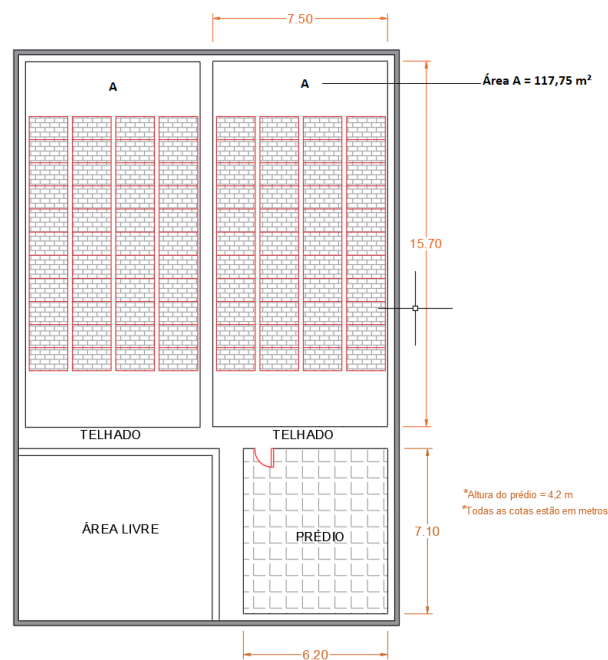
Fonte: Autores (2018)

A Figura 29 ilustra a disposição dos módulos FV na área do telhado da TV RBA que devem gerar energia solar fotovoltaica suficiente, por exemplo, para alimentar os dois elevadores que representam aproximadamente 6% do consumo de energia da empresa.

A instalação do gerador FV conectado à rede foi escolhido em uma área solar disponível, **A**, acima do 5º pavimento da edificação devido possuir incidência solar na maior parte do dia e não tem sombras provenientes de árvores, de tubulações de ventilação e de estruturas existentes.

O gerador FV está voltado para o Norte geográfico e os módulos têm inclinação igual à da latitude do município de Belém (PA). Na prática, as regiões Norte e Nordeste, devem ter inclinação β igual a 10° (dez graus). Isso para se obter a maior produtividade possível. Cabe aqui ressaltar que se trata de geradores conectados à rede, pois se fosse com sistema de acumulação, por meio de baterias, deveria ser a latitude mais 10° para se obter um aproveitamento melhor nos meses com menor incidência da radiação solar.

Figura 29 – Área solar disponível (**A = 117,75 m²**), sem sombreamento, para o gerador FV proposto.



Fonte: Autores (2018).

(a) Potência estimada para 1 (uma) área do telhado (A):

$$A = 117,75 \text{ m}^2$$

$$P(kWp) = \frac{125 \times (1,015 \times A)}{1000} \quad (9)$$

$$P(KWp) = 14,94$$

(b) Potência estimada para 2 (duas) áreas do telhado ($A_T = A + A$):

$$A_T = 117,75 \text{ m}^2 + 117,75 \text{ m}^2 \quad (10)$$

$$A_T = 235,5 \text{ m}^2$$

$$P(KWp) = \frac{125 \times (1,015 \times A_T)}{1000} \quad (11)$$

$$P(kWp) = 29,44$$

Nota 2: Para efeito de cálculo do sistema solar FV da TV RBA será usada a área A da empresa (isto é, 1 telhado), visto que, os dois telhados têm áreas iguais e contíguas.

3º) Procedimento:

As horas de sol pleno (HSP) é definida como o intervalo de tempo, em horas, em que se concentraria, ao longo do dia, uma hipotética radiância solar constante de 1000 W/m².

De acordo com o CRESESB, a taxa diária de insolação média anual para a região de Belém (PA) é de 5,05 kWh/m². dia. Isso quer dizer que a quantidade de radiação solar recebida é equivalente a um dia que tem 5,05 horas de incidência solar a 1000 W/m² (máxima radiação solar) e o resto do dia totalmente escuro, ou simplesmente, 5,05 HSP.

Informações básicas para o dimensionamento do sistema FV.

- (a) Considerando o sistema FV na cidade de Belém (PA), tem-se um índice solarimétrico igual a 5,05 kWh/m². dia.
- (b) Dias do mês consideradas igual a 30 (trinta) dias
- (c) Eficiência do projeto FV (inferência padrão) igual a 85% (perdas na geração e na transmissão de potência)

4º) Procedimento:

Cálculo do consumo de energia medido em 1 (um) mês e o número de módulos do sistema FV.

(a) Potência gerada diária (TV RBA) = $14.940 \times 5,05 = 75.447 \text{ Wh/dia}$

(b) Considerando a eficiência de 85%, tem-se = $(0,85) \times (75.447 \text{ Wh/dia}) = 64.129,95 \text{ Wh/dia}$

(c) Consumo em 1 (um) mês (isto é, 30 dias) = 1.923.898,5 Wh/mês = 1.923,9 kWh/mês

(d) Quantidade de módulos (N):

$$N = \frac{\text{Potência estimada}}{\text{Potência do módulo}} \quad (12)$$

$$N = \frac{14.940 \text{ Wp}}{325 \text{ Wp}}$$

$$N = 46$$

4.2.1 Potência mínima do inversor

O conversor estático CC-CA de potência para aplicações solares fotovoltaicas, comercialmente denominado de inversor solar, é um dispositivo eletrônico que converte a eletricidade em corrente contínua dos módulos em corrente alternada na mesma frequência e fase da rede elétrica. É importante verificar que o equipamento está certificado pelo INMETRO.

ABNT NBR 16.149:2013 – Estabelece as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica e estabelece seus requisitos.

ABNT NBR 16.150:2013 – Especifica os procedimentos de ensaio para verificar se os equipamentos utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia estão em conformidade com os requisitos da ABNT NBR 16.149.

ABNT NBR IEC 62.116:2012 – Fornece um procedimento de ensaio para avaliar o desempenho das medidas de prevenção de ilhamento utilizadas em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR).

Para dimensionar o inversor, deve-se levar em consideração o consumo de energia diário ($C_{diário}$) local e a quantidade de HSP. Além disso, faz-se necessário conhecer, ou estimar, a eficiência dos diversos componentes e perdas do sistema – módulos, inversores, cabos, sombreamentos. Neste trabalho, será estipulada uma eficiência global de 85%.

A potência mínima do inversor, que também pode ser considerada a potência mínima do gerador FV, é determinada pela equação (2).

$$P_{inv} > \frac{C_{diário}}{HSP \times n_{sombreamento} \times n_{inversor} \times n_{custos}} \quad (13)$$

Para os cálculos tem-se:

$$C_{\text{diário}} = 64,13 \text{ kWh/dia}$$

$$\text{HSP} = 5,05 \text{ kWh/dia}$$

$$(\eta_{\text{sombreamento}} \times \eta_{\text{inversor}} \times \eta_{\text{custos}}) = 0,85 \quad (14)$$

Resultando, então, na potência mínima do inversor solar FV conectado à rede elétrica, como:

$$P_{\text{inv}} > \frac{64,13 \text{ kWh/dia}}{\left(5,05 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}\right) \times (0,85)} = 14,94 \text{ kW} \quad (15)$$

4.2.2 Quantidade de módulos

A quantidade de módulos utilizados ($N_{\text{módulos}}$) varia em função da potência de cada módulo ($P_{\text{módulo}}$). Em virtude do custo unitário e da área utilizada, é recomendável a utilização de módulos comerciais de maior potência.

Atualmente, no mercado nacional está disponível para a venda módulos com máxima potência de 325 Wp. Logo, a quantidade de módulos pode ser calculada por:

$$N_{\text{módulos}} = \frac{P_{\text{inversor}}}{P_{\text{módulo}}} \quad (16)$$

O cálculo do número de módulos para o sistema FV, resulta em

$$N_{\text{módulos}} = \frac{14,94 \text{ kWp}}{325 \text{ Wp}} = 45,97$$

$$N_{\text{módulos}} = 46 \text{ módulos}$$

4.2.2 Arranjo dos módulos

De acordo com o previsto, a potência do inversor deve ser superior à do conjunto de módulos. Os módulos podem ser associados em série, formando fileiras ou *strings*.

A tensão terminal da cadeia de módulos consiste na soma da tensão de cada módulo. A tensão de circuito aberto ($V_{\text{oc-módulos}}$) da fileira de módulos deve ser inferior à máxima tensão suportada pelo inversor.

As fileiras de módulos podem ser combinadas em paralelo, formando arranjos solares. Neste caso, a corrente do arranjo corresponde à soma das correntes de cada fileira de módulos. A corrente de curto-circuito ($I_{sc\text{-fileiras}}$) do arranjo deve ser inferior à capacidade de máxima corrente do inversor.

Como uma fileira de módulos pode apresentar tensão diferente da outra por motivos construtivos ou sombreamento, é necessário inserir um diodo de fileira (ou diodo de potência) para evitar a circulação de corrente reversa nos módulos.

A quantidade de módulos em série ($N_{série}$) deve ser correspondente ao menor valor inteiro de cada relação entre a tensão máxima do inversor e a tensão total do circuito aberto ($V_{oc\text{-módulos}}$) dos módulos conectados em série.

$$N_{série} = \frac{V_{inversor}}{V_{oc\text{-módulos}}} \quad (17)$$

Pode ser necessário reduzir a quantidade de módulos em série para formar arranjos convenientes, ou seja, reduzir a quantidade de módulos nas fileiras para depois os conectar em paralelo. No entanto, é importante garantir uma quantidade mínima de módulos conectados em série e alcançar a tensão mínima de rastreamento MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) do inversor. No sistema FV da empresa de TV RBA será realizado um recálculo no dimensionamento com o objetivo de reduzir o número de módulos nas fileiras e, sendo apresentado posteriormente.

O cálculo do mínimo de módulos em série é dado por:

$$N_{série} = \frac{600 \text{ V (cc)}}{45,5 \text{ V (cc)}} \quad (18)$$

$$N_{série} = 13$$

E, para finalizar o dimensionamento do sistema FV é determinada a quantidade máxima de fileira de módulos em paralelo ($N_{paralelo}$). Essa quantidade é determinada pelo menor valor inteiro da relação entre a capacidade de corrente do inversor ($I_{inversor}$) e a corrente de curto-circuito ($I_{sc\text{-módulo}}$) da fileira de módulos

$$N_{paralelo} = \frac{I_{inversor}}{I_{sc\text{-fileiras}}} \quad (19)$$

O cálculo do número de fileira de módulos em paralelo, resulta em

$$N_{paralelo} = \frac{25 A (cc)}{9,34 A (cc)}$$

$$N_{paralelo} = 2$$

4.3 RECÁLCULO DO DIMENSIONAMENTO PARA INSTALAÇÃO DO GERADOR FV PROPOSTO

Um recálculo do dimensionamento para o Gerador FV proposto fez-se necessário para adequar os resultados teóricos obtidos anteriormente, com as especificações técnicas dos equipamentos e componentes de geração e proteção, respectivamente, para uso comercial

A seguir é indicado nos 2 quadros, o resultado do recálculo:

Quadro 1 - Informações técnicas do sistema solar FV.

Descrição do Arranjo FV
<ul style="list-style-type: none"> • Área mínima necessária – 88 m² • Peso sobre o telhado – 18 kg/m² (com estrutura) • 4 fileiras ligadas em serie de 11 módulos de 72 células Policristalino 325W em paralelo • Trilhos para fixação dos módulos em alumínio • Cabos solares com proteção UV de 6 mm • Conectores MC4 com proteção UV e resistência a amoníaco (conforme a DLG) 1500h 70C/70% RH, 750ppm • <i>String Box</i> de 1 ou 2 Entradas /1 Saída de 32 A 1000 V (composta por caixa especial com grau de proteção IP66, DPS, Chave Seccionadora e porta fusíveis com fusíveis

Fonte: Autores (2018)

O gerador de energia solar FV com potência diária de 14,30 kWp é composto por:

Quadro 2 - Equipamentos e componentes do gerador FV.

Qtd	Descrição do gerador de energia FV
1	Inversor solar fronius 4210051850 Symo Brasil 12.03M 208/240 Wlan/Lan/Webserver
44	Módulos solar Canadian 72 células policristalinos 6 polegadas 325 Wp
8	Multi-contact conector MC4 32.0016P0001-UR PV-KBT4/6II-UR acoplador fêmea
8	Multi-contact conector MC4 32.0017P0001-UR PV-KBT4/6II-UR acoplador macho
150	Metros cabo solar Nexans Energyflex BR 0,61/1kV (1500 V DC) preto – múltiplo 25 metros
150	Metros cabo solar Nexans Energyflex BR 0,61/1kV (1500 DC) vermelho – múltiplo 25 metros
2	<i>Strings Box</i> Ecosolys 1000V 32A 1 ou 2 entradas /1 saída com fusível
11	Kit Fixação dos perfis em cobertura para telha metálica
11	Estruturas Romagnole 411113 RS-228 perfil de alumínio par 4,15 m para 4 módulos

Fonte: Autores (2018)

A Figura 30 ilustra módulo FV CS6U-325P *Canadian* 72 células policristalino de 6 polegadas e potência de pico igual a 325Wp. Esse módulo solar é indicado para uso residencial e comercial. Também, possui os seguintes recursos: confiabilidade aprimorada com a tecnologia de célula de 5 barras, excelente eficiência do módulo de até 18,8%, excepcional desempenho de baixa irradiação maior que 96%, caixa de derivação IP67, resistência de longo prazo ao clima, carga de neve pesada de até 5.400 Pa e carga de vento de até 2.400 Pa.

Figura 30 – Módulo FV CS6U-325P *Canadian* de 72 células policristalino.



Fonte: *Google Imagens* (2018, online)

Os módulos FV utilizados no gerador proposto são de fabricação da *Canadian* e atendem às recomendações e normas técnicas internacionais e brasileiras. Estão homologados no Inmetro e possuem Selo A de qualidade no PROCEL. O módulo escolhido é o FV CS6U-325P com 325Wp de potência nominal. No quadro 3 apresenta-se os dados elétricos dos módulos que compõem o arranjo do gerador.

Quadro 3 – Dados técnicos do módulo fotovoltaico CS6U-325P *Canadian*.**Dados Elétricos: Módulo FV CS6U-325P *Canadian* de 72 células policristalino**

- Potência nominal máx. (P_{máx}) 325W
- Tensão operacional ideal (V_{mp}) 35V
- Corrente operacional ideal (I_{mp}) 8,78^a
- Tensão de circuito aberto (V_{oc}) 45,5V
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}) 9,34^a
- Eficiência do módulo 16,72%
- Temperatura operacional -40 °C ~ +85 °C
- Tensão máxima do sistema 1000V (IEC) ou 1000V (UL)
- Desempenho do módulo Tipo 1 (UL 1703) ou contra incêndio Classe C (IEC61730)
- Classificação máx. de fusíveis da série 15 A
- Classificação da aplicação Classe A
- Tolerância de potência 0 ~ +5W
- Peso bruto: 22,53 Kg
- Dimensão: 4cm x 98,2cm x 195,4cm (altura x largura x comprimento)

Fonte: Autores (2018)

Na Figura 31 é ilustrado um inversor *Fronius Symo Brasil* de 12 kW da nova geração *SnapINverter*. É um inversor transformador trifásico, com rendimentos mais elevados e a forma inteligente *Fronius PP-tracking*. É importante frisar que a escolha desse inversor para o projeto proposto foi de não utilizar um transformador externo. Com esse inversor se conecta à rede elétrica de 3 (três) fases, além de ser ideal para projetos comerciais, fito para rede 220V/127V. Seu *design* inovador SuperFlex fornece o máximo de flexibilidade na concepção do sistema, enquanto a montagem *SnapINverter* torna a instalação e manutenção mais fácil. Além disso, incluído nele, o pacote de comunicação com WLAN, gestão de energia e várias interfaces.

Figura 31 – Inversor solar Fronius Aldo Solar trifásico 220V Wlan/Lan/Webserver.



Fonte: *Google Imagens* (2018, online)

O sistema de conversão é composto por um conversor estático (inversor) modelo *Fronius Symo Brasil* de 12 kW. O conversor CC/CA utiliza um sistema idôneo de transferência de potência à rede elétrica de distribuição, em conformidade aos requisitos técnicos e normas de segurança. Os valores de tensão e corrente do dispositivo entrada são compatíveis com o gerador FV proposto, enquanto os valores de saída são compatíveis com os valores da rede ao qual está conectado ao gerador. No quadro 4 é mostrado as principais características do grupo conversor.

Quadro 4 – Dados técnicos do inversor *Fronius Symo Brasil* de 12 kW.

Dados de Entrada
<ul style="list-style-type: none"> • Potência FV recomendada (kWp) 9,5 – 15,5 • Max. Corrente do conjunto curto-circuito (MPPT 1/MPPT 2) 25.0 A/ 16.5 A • Faixa de voltagem MPP 300 – 500V • Faixa de voltagem operando 200 – 600V • Max. Tensão de entrada 600V • Tensão nominal de entrada 350V • Número de MPP 2
Dados de Saída
<ul style="list-style-type: none"> • Max. Potência de saída 11995 VA • Max. Corrente de saída 35,0 A • Max. Eficiência 97,0% • CEC Eficiência 96,5% • Conexão Grid (U ac,r) 3-NPE 208~240V (Trifásico 220V) • Frequência (fr) 60 Hz • Fator de distorção < 1,75% • Fator de potência 0 – 1 ind./cap.
Interfaces
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Wi-Fi*/Ethernet/Serial Wireless standard 802.11 b/g/n Fronius Solar web, SunSpec Modbus TCP, JSON/SunSpec Modbus RTU</i> • 6 (seis) entradas e 4 digitais I/Os – Gerenciamento de carga; sinalização, multiuso I/O • USB (A socket) <i>Datalogging</i> e atualização do inversor é possível via USB • 2xRS422 (RJ45 socket) – <i>Fronius Solar Net</i>, interface protocolo • <i>Datalogger e Webserver</i>: incluso

Fonte: Autores (2018)

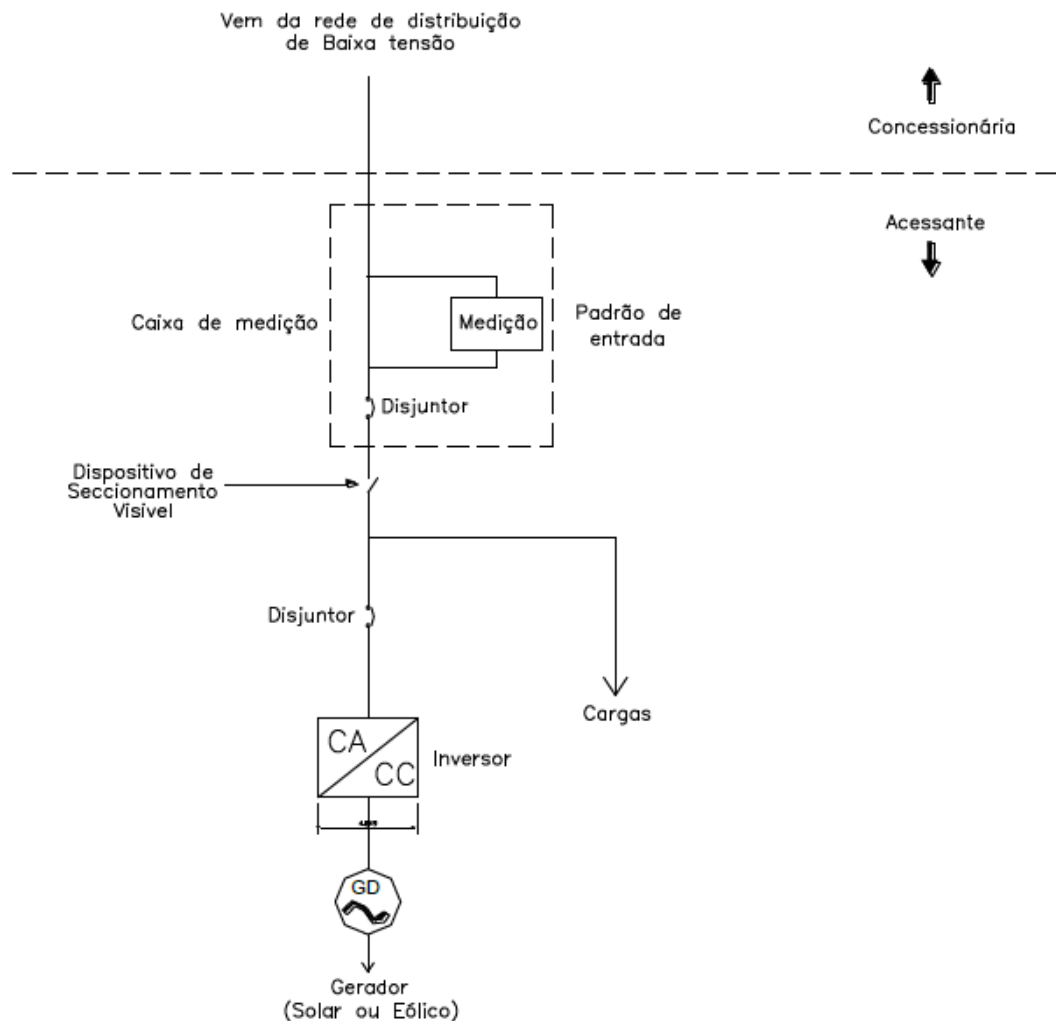
4.3.1 Instalação Elétrica Predial em Baixa Tensão (BT)

O sistema de instalação elétrica para integrar o gerador fotovoltaico, nova ou reforma, deve ser realizada por profissional capacitado e habilitado para atuar na área da eletricidade, ou seja, deve haver um responsável técnico para emitir a anotação de responsabilidade técnica (ART) e solicitar a aprovação do sistema na concessionária de energia local.

O processo de dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção deve estar de acordo com a ABNT NBR 5410:2014 – Instalações elétricas de baixa tensão. É importante observar as legislações da concessionária local, no caso da Celpa (do Grupo Equatorial), o código de obras do município de Belém (PA) e as normas específicas para microgeração.

A Celpa exige o preenchimento de uma “Solicitação de Acesso para Microgeração Distribuída”, em que devem ser preenchidas informações referentes ao microgerador. E, ainda, para conexão de geradores que utilizam um inversor como interface de conexão, tais como geradores eólicos, solares (caso proposto) ou microturbinas, deverão se basear conforme a norma técnica NT.31.020 (grupo equatorial) no esquema unifilar simplificado ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Forma de conexão do acessante (através de inversor) à rede de Baixa Tensão.



Fonte: Celpa (2015, p. 18)

4.3.2 Condutores

O processo de dimensionamento dos condutores do circuito resulta na determinação da seção padronizada (bitola) da fiação do circuito, de modo a garantir que a corrente calculada possa fluir pelos cabos por um tempo ilimitado, sem que ocorra superaquecimento.

É recomendável posicionar adequadamente os equipamentos do gerador fotovoltaico. Por exemplo, diminuir a distância entre os módulos e o inversor, a fim de reduzir o comprimento dos condutores que transportam energia em corrente contínua. Da mesma maneira, também diminuir a distância entre o inversor e quadro de distribuição de energia. A redução do comprimento resulta simultaneamente em menor custo de aquisição e redução de perdas ôhmicas de energia nos condutores.

A Figura 33 ilustra um cabo unipolar de potência flexível, com condutor de cobre estanhado, isolamento em HEPR e cobertura em PVC com resistência a UVB, pra tensões até 1 kV (1500 V DC).

Figura 33 – Cabo solar *energyflex* br 0,6/1kV (1500 V DC).



Fonte: *Google Imagens* (2018, online)

É importante lembrar que o cenário do projeto proposto está sujeito a uma mudança de temperatura bastante abrupta. Assim, o cabo solar *energyflex* é o indicado para as instalações elétricas fixas nos sistemas DC ou AC, ao ar livre, sujeito às intempéries. Esse cabo, também, atende requisitos de resistência UVB e de resistência à queima e, eles são fornecidos com um revestimento de cobertura especialmente formulado para atendimento aos requisitos das normas UL 2556 e IEC 60332-1. Devido ao revestimento especial dos condutores, os cabos são particularmente recomendados para garantir um melhor desempenho das conexões ao longo de toda sua vida útil, principalmente nas interligações de arranjos e módulos de conexão nos sistemas fotovoltaicos.

Quanto aos cabos que farão a condução da corrente contínua (CC) indicados na Figura 34, é necessário utilizar os que limitem ao máximo a queda de tensão e, para uma maior segurança das instalações, eles devem: ser unipolares; possuir duplo isolamento; estar separados por polos (positivo e negativo) e em eletrodutos diferentes; possuir caixas de passagem e de conexão, com boa vedação e isolamento, e também separada por polos; possuir isolamento que suporte temperatura elevadas.

Figura 34 – Instalação de inversores. A alimentação elétrica é em corrente contínua separada por polo positivo e negativo em eletrodutos diferentes.



Fonte: *Google Imagens* (2018, online)

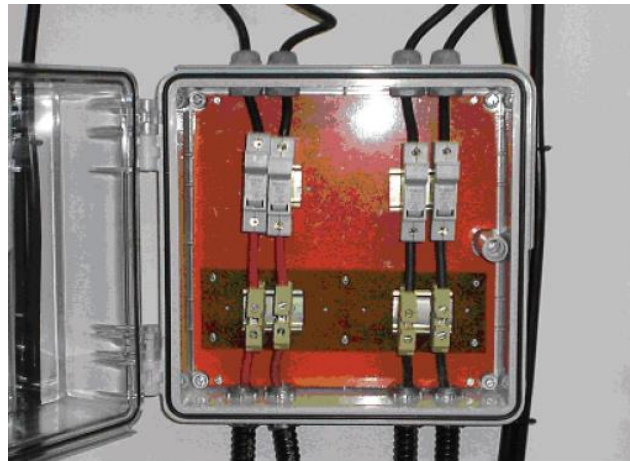
Os requisitos citados acima asseguram uma maior confiabilidade ao gerador FV, pois diminuem as chances de ocorrer curtos-circuitos entre os potenciais positivo e negativo decorrente de possíveis falhas. Além disso, ao se dimensionar esses cabos, não se pode esquecer que a temperatura dos módulos fotovoltaicos pode ultrapassar 50 °C e, nessas condições, pela norma NBR 5410, a capacidade de condução de corrente fica limitada a aproximadamente 40% daquela de 30 °C.

Quanto aos cabos que farão a condução da corrente alternada (CA), deve-se seguir o que determina também a norma NBR 5410 para instalações elétricas de Baixa Tensão.

4.3.3 Proteção

Após a passagem dos cabos em eletrodutos separados por polos (positivo e negativo), os condutores de corrente contínua (CC) devem chegar a uma proteção antes de serem conectados ao inversor como ilustra a Figura 35. Essa proteção serve para seccionar o circuito de alimentação em CC, seja para a manutenção ou para qualquer ajuste no inversor.

Figura 35 – Sistema de proteção com chave fusível para CC e conectores.



Fonte: *Google Imagens* (2018, online)

O elemento de proteção utilizado nessa posição, normalmente, é o fusível de CC visto na Figura 35, pois proporciona segurança ao usuário, quando instalado como chave seccionadora, e possui um custo bem mais baixos que os disjuntores de CC.

Um dos principais riscos das instalações elétricas é o de contato com as partes energizadas, que a NBR 5410 classifica como:

- a) *Contatos diretos* – que consistem no contato com as partes metálicas normalmente sob tensão (partes vivas).
- b) *Contatos indiretos* – que consistem no contato com partes metálicas normalmente não energizadas (massas), mas que podem ficar energizadas devido a uma falha de isolamento.

Os principais equipamentos necessários para a proteção do gerador solar fotovoltaico são:

I – Disjuntor termomagnético (DTM): protege os equipamentos e condutores elétricos de danos provocados por curtos-circuitos e sobrecargas elétricas.

II – Dispositivo de proteção contra surto (DPS): protege as instalações elétricas contra efeitos diretos e indiretos de descargas atmosféricas. Deve ser instalado um DPS CC antes do inversor e um DPS CA após o inversor.

III – Dispositivo seccionador visível (DSV): tem como função principal ser utilizado como chave de manobra, para quando for necessário desconectar manualmente o gerador FV da rede elétrica.

4.3.4 Medidor de Energia Elétrica

O sistema de medição deve atender as especificações idênticas às exigidas das demais unidades consumidoras conectadas no mesmo nível de tensão da concessionária Celpa, dotada adicionalmente de funcionalidade que permita medição bidirecional de energia elétrica (medição de consumo e de geração de energia). Outra coisa, em relação às instalações em BT, a medição bidirecional pode ser realizada por meio de dois medidores unidirecionais – um para aferir o consumo e o outro a geração de energia.

Os custos relativos às adequações necessárias do sistema de medição para implantação do sistema de compensação de energia elétrica são de responsabilidade do acessante, devendo ser ressarcidos à distribuidora Celpa. Após a adequação do sistema de medição, contudo, será da distribuidora a responsabilidade pela sua operação e manutenção, inclusive de eventuais custos de substituição ou adequação.

E, finalizando, o objetivo do comissionamento da instalação que é garantir que o gerador FV opere em condições satisfatórias em pleno funcionamento, de acordo com as normas de regulamentação e especificações do sistema FV.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho proposto consegue atender apenas com um lado A, que foi mostrado na figura 29, a demanda de 6% (seis por cento) da energia elétrica total utilizada pela empresa, isso é equivalente ao uso gasto pelos dois elevadores utilizados pelos funcionários. Enquanto que a energia gerada pelo outro lado pode ser direcionada para outro setor.

Área do local a ser instalada é consideravelmente boa, pois não há edificações para sombrear o gerador, isso faz com que a geração de energia não seja comprometida. De acordo com estudos feitos no local e informações obtidas por funcionários da empresa, o momento de sombreamento onde ficará instalado os painéis fotovoltaicos é em horário onde não há HSP, sendo assim não influenciará negativamente a geração.

No momento de dimensionamento solar, uma dificuldade foi encontrada em como fazer a instalação dos painéis fotovoltaicos, visto que seria instalado no telhado que fica sob a laje, porém o telhado é metálico e implica nas propriedades físicas dos cabos elétricos e pode acabar prejudicando-os, chegando a derreter e causar curtos-circuitos. Com isso foi estudada uma plataforma para apoiar os painéis, de modo que não ficasse tão próximo do telhado.

Como proposta futura, pretende-se utilizar um novo local para a instalação de um novo sistema fotovoltaico, ideal seria uma área grande na qual fosse possível construir uma usina solar, pois para a empresa RBA que utiliza de grande quantidade de energia elétrica a usina seria o mais apropriado. Com a construção de uma usina a demanda de energia poderia suprir uma porcentagem maior da empresa, assim diminuindo ainda mais os custos gastos com a convencional.

6 REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica.** 2016. 31 p. 2º Ed. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>>. Acesso em: 12 mai. 2018.

ANEEL, Agência Nacional de energia Elétrica. **Nota técnica nº 0129/2012-SRD/ANEEL. 2012.**

BLUE SOL. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica.** 2017. Disponível em: <<http://programaintegradadoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu%C3%A7%C3%A3o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

CÂMARA, Carlos Fernando. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** 2011. 68 f. Monografia (Especialização) - Curso de Formas Alternativas de Energia, Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. Disponível em: <<http://www.solenerg.com.br/files/monografia-Carlos-Fernando-Camara.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

CAMPOS, Mayara Soares; ALCANTARA, Linicius D. S. **Interpretação dos Efeitos de Tempo Nublado e Chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA Para Uso em Sistemas Fotovoltaicos.** Revista brasileira de meteorologia, São Paulo, v. 31, n. 4, supl. 1, p. 570-579, dezembro. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862016000500570&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 03 mai. 2018.

CARNEIRO, Joaquim. **Módulos fotovoltaicos: características e associações.** 2010. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/16961>>. Acessado em: 26 mar. 2018.

CSR, Energia Solar. **Sistema fotovoltaico conectado à rede - sfc / on-grid.** Disponível em: <<http://www.csrenergiasolar.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede---sfc-on-grid>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

ELEKTSOLAR INNOVATIONS. **Os painéis da JinkoSolar substituem os diodos by-pass por mppt por célula.** Disponível em <<https://eleksolar.com.br/os-paineis-otimizados-da-jinkosolar-substituem-os-diodos-bypass-por-mppt-por-celula/>>. Acessado em: 14 abr. 2018.

ENEL, Soluções. **Energia solar.** 2016. Disponível em: <https://www.enelsolucoes.com.br/wp-content/uploads/2016/11/enel_ebook_energiasolar_NOVEMBRO2016.pdf>. Acesso em: 13 mai. 2018.

FOTOVOLT. São Paulo: Aranda, v. 1, n. 14, 2015. Disponível em: <<http://www.arandanet.com.br/assets/revistas/fotovolt/2015/agosto/index.php>>. Acesso em: 14 mai. 2018.

FOTOVOLT. São Paulo: Aranda, v. 11, n. 24, 2017. Disponível em: <<http://www.arandanet.com.br/assets/revistas/fotovolt/2017/julho/index.php>>. Acesso em: 15 mai. 2018.

FOTOVOLT. São Paulo: Aranda, v. 7, n. 16, 2016. Disponível em: <<http://www.arandanet.com.br/assets/revistas/fotovolt/2016/novembro/index.php>>. Acesso em: 14 mai. 2018.

G1, Globo.com. **Conheça a maior energia solar da America latina, em Pirapora.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/negocios/noticia/usina-de-energia-solar-de-pirapora-inicia-producao-conheca.ghtml>>. Acesso em: 05 mai. 2018.

GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Cepel/Cresseb, 2014. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

HECKTHEUER, Lúcio Almeida. **Análise de associações de módulos fotovoltaicos.** 2001. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Cap. 4.

HECKTHEUER, Lúcio Almeida; KRENZINGER, Arno. **O Uso de Diodos de Bypass e de Bloqueio na Proteção de Sistemas Fotovoltaicos.** In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2000, 2000, Natal/RN, 2000. Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais/conem/2000/DC9754.pdf>>. Acessado em: 14 abr. 2018.

LISITA JÚNIOR, Orlando. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso de 3 kWp instalados no estacionamento do IEE-USP**. 2005. 81 f. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/teseORLANDO.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

MACÊDO, Wilson Negrão. **Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2004. 183p. Tese (Doutorado – Programa Interunidade de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-29112006-153307/pt-br.php>>. Acesso em: 03 fev. 2018.

PINHO, João Tavares et al (Org.). **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 394 f.

PORTAL ENERGIA. **Como funcionam as células solares – componentes e operações**. 2015. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/como-funcionam-celulas-solares-componentes-operacoes/>>. Acesso em: 27 mar. 2018.

PRIEB, César Wilhelm Massen. **Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos**. 2002. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2091>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

PEREIRA, Enio Bueno et al. Atlas brasileiro de energia solar. São José dos Campos: Atlas, 2. ed.2017. Disponível em:<http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf>. Acessado em: 27 mar. 2018.

RAMPINELLI, Giuliano Arns; KRENZINGER, Arno; ROMERO, Faustino Chenlo. **Descrição e análise de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos**. *Revista de ciências exatas e naturais*, v. 15, n. 1, p. 25-50, 2013. Disponível em: <<https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/viewFile/2428/2231>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

SANTOS, Daniel Barbosa dos; PEAO, Denise Beatriz de Melo Alexandre; FERREIRA, Edson Ribeiro. **Sistema fotovoltaico conectado à rede: estudo de viabilidade econômica na**

utilização em um site de telecomunicações. 2017. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017. Disponível em: <<http://bd.centro.iff.edu.br/handle/123456789/1966>>. Acesso em: 06 mai. 2018.

VICENTE, Paula dos Santos. **Reconfiguração de Painéis Fotovoltaicos Sombreados utilizando a Teoria dos Conjuntos Aproximados.** 2015. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/339>>. Acessado em: 07 abr. 2018.