



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica
Departamento de Engenharia Elétrica

PROJETO DE UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Campina Grande
2018

Italo Roberto de Oliveira Borja Rodrigues

PROJETO DE UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

*Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos
requisitos necessários para obtenção do grau
de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração Energia Fotovoltaica

Orientador:

Professor Edmar Candeia Gurjão

Campina Grande

2018

Italo Roberto de Oliveira Borja Rodrigues

PROJETO DE UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

*Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos
requisitos necessários para obtenção do grau
de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor Edmar Candeia Gurjão

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo Roberto e Jaqueline Ribeiro, à minha irmã, Paula Regina, às minhas avós Regina Maria e Margarida Ribeiro, à minha namorada, Ravel Pimenta, e à todos os familiares e amigos que torceram por mim nesta difícil caminhada.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, em quem me apeguei durante toda minha trajetória de vida e curso, por ter me dado forças durante toda minha trajetória me fazendo enxergar meus erros e corrigí-los para vencer esta caminhada.

Agradeço aos meus pais, Paulo Roberto e Jaqueline Ribeiro, que apesar da distância fizeram de tudo por mim, nunca me deixaram faltar nada, pelo contrário me deram suporte além do necessário. Se esforçando para me visitar, mesmo sabendo o quão ocupados são, mesmo eu falando que não fosse preciso se dispor ao cansaço para me visitar, eles faziam questão de vir e me dar um abraço, afinal um abraço dura, e muito. E à minha irmã por fazer parte da minha vida.

Agradeço à minha namorada, Ravel Pimenta, por me apoiar, incentivar, chamar atenção nos momentos necessários, ouvir meus planejamentos semanais de estudos e me ajudar a organizá-los. Por ouvir minhas ligações pós prova e mesmo não entendendo nada do que falava, escutava com atenção cada detalhe e perguntava se o professor não poderia considerar algo de algum erro cometido, para eu pensar à frente para as próximas. Por ter me acolhido assim como sua família em sua casa, aos sábados, domingos e o dia que fosse ou precisasse estariam lá para me acolher e ajudar no necessário. Assim como seu irmão, Caian Pimenta, que diversas vezes foi muito prestativo comigo independente da hora, dia ou lugar.

Agradeço à minha família por sempre se importar comigo e se preocupar como estou, seja nas mensagens ou nas ligações, me recordo de todos. E por sempre perguntarem quando voltarei para casa me fazendo sentir amado por todos eles.

Agradeço aos meus amigos, seja pelas horas de estudo, pelas ajudas, assim como pelos momentos de brincadeiras e alegrias, afinal sem elas não daríamos conta de tamanha carga diária no curso.

Agradeço aos professores que fizeram parte dessa caminhada e pelo conhecimento, dentre eles o professor Edmar Candeia por ter aceitado ser meu orientador e se mostrar sempre disposto a novas ideias e diálogos, mas deixando sempre a responsabilidade de realizar o trabalho, afinal engenheiros resolvem.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram seja dentro na vida acadêmica ou pessoal.

Resumo

No Brasil, a geração de energia fotovoltaica, devido à mudanças climáticas tem crescido, principalmente, nas regiões Sul e Sudeste. Com intuito de suprir o sistema da região como também comunidades isoladas da rede de energia elétrica. O presente trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido sob a perspectiva de futura da montagem de um sistema de microgeração fotovoltaica *off-grid*, para isso foi feito um projeto fotovoltaico para a iluminação do Bloco CJ da Universidade Federal de Campina Grande. Com intuito de estudar o sistema e adquirir dados do processo da produção de energia através da conversão da energia solar em energia elétrica, fotovoltaica. Este trabalho de conclusão de curso, em primeiro momento irá expor uma introdução teórica sobre o conhecimento necessário, seja de equipamentos ou fenômenos, para que se faça possível entendimento do projeto de microgeração fotovoltaica. Posteriormente, elaboração do projeto em si, para suprir uma carga de iluminação e uma breve comparação econômica caso o sistema seja modificado para instalação *on-grid*.

Palavras-chave: Painel solar, módulo, célula, fotovoltaico, *on-grid*, *off-grid*, bateria, controlador de carga, inversor de frequência.

Abstract

Photovoltaics is growing in south and southwest regions of Brazil, mostly due to our country's climatic changes characteristics, what can be used to supply isolated communities of the electricity grid and even the regional electrical system. The objective of this work is to present the design an off-grid photovoltaic microgeneration system that can supply the electrical energy to illuminate a block of the Federal University Of Campina Grande. It will be exposed an introduction about the theoretical background needed to make the understanding of the photovoltaic microgeneration project possible; later, it will be shown a project elaboration to supply a light load and a brief economic comparison if installed on-grid.

Keywords: Solar panel, module, cell, photovoltaic, on-grid, off-grid, battery, charge controller, frequency inverter.

Lista de ilustrações

Figura 1: Explosões na superfície solar.....	14
Figura 2: Ângulos de incidência da irradiação solar.	16
Figura 3: Ângulos de incidência da irradiação solar diante da orientação geográfica da célula.....	17
Figura 4: Composição da célula fotovoltaica.	18
Figura 5: Efeito fotovoltaico na célula fotovoltaica.....	19
Figura 6: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.....	20
Figura 7: Curva característica IxV de uma célula fotovoltaica.....	21
Figura 8: Painel fotovoltaico de silício monocristalina.....	22
Figura 9: Painel fotovoltaico de silício policristalina.....	22
Figura 10: Painel fotovoltaico de silício amorfo.....	23
Figura 11: Módulos de mesma capacidade ligados em série.	24
Figura 12: Módulos de mesma capacidade ligados em paralelo.....	25
Figura 13: Módulos de mesma capacidade ligados em série e paralelo.	26
Figura 14: Representação de um sistema off-grid.	28
Figura 15: Sistema fotovoltaico on-grid.....	29
Figura 16: Sistema híbrido.	30
Figura 17: Baterias conectadas em série.	32
Figura 18: Baterias conectadas em paralelo.	33
Figura 19: Baterias conectadas em série e paralelo.	33
Figura 20: Inversor de frequência 3 kW e 5 kW.....	34
Figura 21: Controlador de carga 50 A.....	35
Figura 22: Esquema ilustrativo de montagem do sistema fotovoltaico.....	36
Figura 23: Vista frontal e lateral direita do bloco CJ.	37
Figura 24: Vista frontal e lateral esquerda do bloco CJ.	38
Figura 25: Vista traseira e lateral direita do bloco CJ.....	38
Figura 26: Vista traseira e lateral esquerda do bloco CJ.	39
Figura 27: Vista dos painéis fotovoltaicos em relação a orientação geográfica.	43
Figura 28: Vista geográfica superior do Bloco CJ.....	44
Figura 29: Vista lateral da inclinação dos módulos fotovoltaicos com plano horizontal.	45
Figura 30: Ilustração da inclinação de módulos fotovoltaicos com plano horizontal.	45
Figura 31: Associação dos módulos fotovoltaicos.....	47
Figura 32: Dados datasheet do painel fotovoltaico.	48
Figura 33: Associação das baterias.	49
Figura 34: Chave disjuntor de transferência manual.....	51
Figura 35: Chave disjuntor de transferência automática.	52
Figura 36: Estrutura do projeto fotovoltaico no AutoCAD.	54
Figura 37: Legenda do projeto fotovoltaico no AutoCAD.....	54

Lista de tabelas

Tabela 1: Comparativo entre os tipos de células.	23
Tabela 2: Relação entre tipo fixação dos painéis com variação de temperatura.....	41
Tabela 3: Horas úteis de sol em Campina Grande.	46
Tabela 4: Relação de materiais sistema fotovoltaico Off-Grid.....	55

Lista de abreviaturas e siglas

A: Ampere.

Ah: Ampere-hora.

C: Celsius.

DPS: Disjuntor de Proteção Contra Surtos.

DTM: Disjuntor Termomagnético.

G: Irradiância.

H: Radiância.

h: Horas.

k: Quilo.

m²: Metro quadrado.

mm²: Milímetro quadrado.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PWM: Pulse Width Modulation.

S: *size*.

T: Temperatura.

t: Tempo.

V: Volt.

W: Watt.

Sumário

1. Introdução.....	13
2. Fundamentação Teórica.....	14
2.1 A Energia do Sol	14
2.2 Radiação e Irradiância Solar.....	15
2.2.1 A Radiação Solar do Painel Fotovoltaico	16
2.2.2 Orientação do Painel Fotovoltaico	16
2.3 Energia Solar Fotovoltaica	17
2.3.1 A Célula e o Efeito Fotovoltaico	18
2.3.1.1 Estrutura Interna da Célula Fotovoltaica.....	20
2.3.1.2 Tipos de Células Fotovoltaicas.....	21
2.3.1.3 Associação de Módulos Fotovoltaicos.....	23
2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos e a Geração Distribuída	27
2.3.3 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos	27
2.3.3.1 Sistemas <i>off-grid</i>	28
2.3.3.2 Sistemas <i>on-grid</i>	29
2.3.3.3 Sistemas Híbridos	30
2.4 Bateria	31
2.4.1 Associação de Baterias	31
2.5 Inversor de Frequência	34
2.6 Controlador de Carga	35
3. Projeto Sistema Minigeração Fotovoltaica	36
3.1 A Carga.....	37
3.2 Dimensionamento dos Sistema Fotovoltaico	40
3.2.1 Perdas no Inversor de Frequência.....	40
3.2.2 Perdas no Controlador de Carga.....	40
3.2.3 Perdas por Calor	41
3.2.4 Queda de Tensão	42
3.2.5 Orientação e Inclinação.....	43

3.2.6 Número de Painéis	46
3.2.7 Associação dos Painéis	47
3.3 Autonomia das Baterias.....	48
3.3 Inversor de Frequência	50
3.4 Controlador de Carga	50
3.5 Chave de Transferência	50
3.6 Proteção do Sistema Fotovoltaico	53
4. O Projeto.....	54
5. Lista de Materiais	55
Referências	57
Apêndice A - Links dos Equipamentos da Lista de Materiais.....	58
Apêndice B - Projeto de Microgeração Fotovoltaica	59
Anexo A – <i>Datasheet</i> do Módulo Fotovoltaico.....	60

1. Introdução

O Brasil vive um momento de crise hídrica que acaba por afetar cenário da produção energética no país, dando espaço para fontes alternativas. Recentemente essa matriz não estava suprindo sua demanda energética, por conta da crise hídrica que acaba por diminuir a geração das hidrelétricas. Essa geração é compensada através das termelétricas assim como pelas novas fontes, energia solar e eólica, esta última principalmente que já se encontra com uma maior potência instalada.

Portanto, é necessário se atentar ao surgimento de novas tecnologias, a possibilidade de explorar e conhecer um novo ambiente. Para isso pensamos no presente trabalho de conclusão de curso com objetivo de projetar e futuramente montagem de um sistema de microgeração fotovoltaica, para iluminação do Bloco CJ da Universidade Federal de Campina Grande, com o intuito de estudo e aquisição de dados do processo da produção de energia através da conversão da energia solar em energia elétrica, fotovoltaica.

Com isso, o presente trabalho apresenta a seguinte distribuição. O Capítulo 1 é de caráter introdutório, contextualiza a problemática. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica para entendimento do projeto e de seus componentes. O Capítulo 3 detalha o procedimento que foi feito o projeto de microgeração fotovoltaica. O Capítulo 4 é o projeto propriamente dito. O Capítulo 5 apresenta a lista de materiais que são necessários para o projeto, assim como uma comparação econômica.

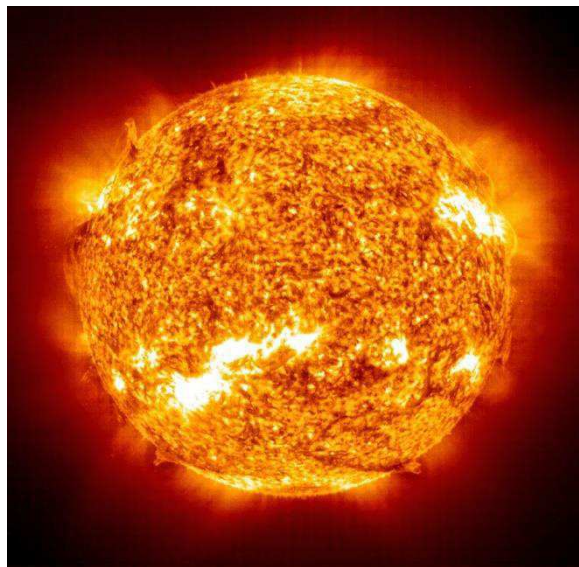
2. Fundamentação Teórica

Será feita revisão teórica sobre radiação, irradiação, células fotovoltaicas (seus tipos e associações), baterias, inversor de frequência e controlador de carga.

2.1 A Energia do Sol

Em 1926, o astrônomo inglês Arthur Eddington fez uma ousada sugestão sobre a origem da energia solar: ele só podia ser gerado por um reator nuclear. A comunidade científica se escandalizou porque se conhecia muito pouco sobre as reações atômicas. Algumas décadas mais tarde, porém, viu-se que a teoria estava certa. O plasma no núcleo do Sol sofre transformações semelhantes às que ocorrem na explosão de uma bomba de hidrogênio, e também como neste caso, passa a emitir radiação principalmente sob a forma de luz e calor. Essa radiação não é visível, pois ainda tem de atravessar as camadas externas. Estima-se que um raio de luz leve milhares de anos chocando-se com as partículas de plasma até emergir na superfície brilhante. A maior parte do trajeto, no caso do calor, é feita em forma de radiação, como ocorre com a luz.

Figura 1: Explosões na superfície solar.



<http://cultura.biografieonline.it/riferimenti/astronomia/>

A luminosidade, que é a potência que o sol produz, foi determinada e tão logo foi conhecida a distância do Sol à Terra, em 1673. As medidas mostram que cada metro quadrado na Terra recebe do Sol uma potência (energia/segundo) em 1400 watts, isto é, a potência recebida na Terra, determina-se a luminosidade do Sol em 4×10^{26} watts (Oliveira&Saraiva, 2017).

2.2 Radiação e Irradiância Solar

As fusões nucleares no interior do Sol transformam a sua massa em energia, que é irradiada em todas as direções.

- Irradiância Solar: é a potência da radiação solar por unidade de área. A irradiância é medida comumente expressada em quilowatts por metro quadrado (kW/m^2). A irradiância é um valor instantâneo, assim como a velocidade (fluxo de deslocamento) de um objeto em movimento.
- Radiação Solar: representa a quantidade de energia captada do Sol, em determinada área sob determinado período de tempo. Medido por quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m^2). A Radiação Solar determina a quantidade de energia que uma localidade recebe, e é o principal dado para o dimensionamento e avaliação de um sistema de captação da energia solar.

Com isso, a quantidade de Radiação Solar captada por uma determinada área, em um intervalo de tempo pode ser definido:

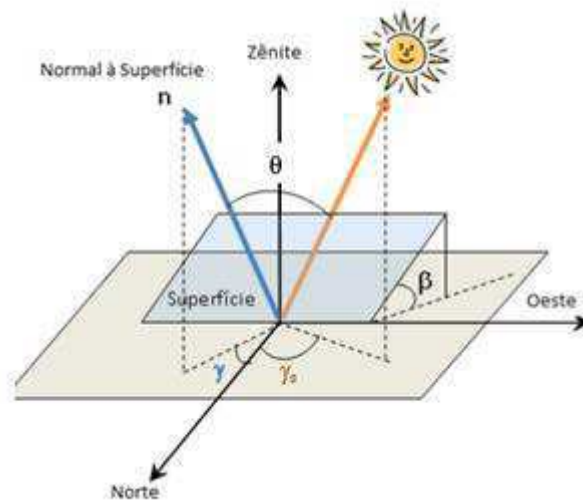
$$H = G \times S \times t$$

- H: radiação solar acumulada em kWh.
- G: irradiância solar em kW/m^2 .
- S: área de superfície do modulo em m^2
- t: tempo em horas.

2.2.1 A Radiação Solar do Painel Fotovoltaico

A Radiação Solar captada depende da Irradiância Solar, da área da superfície de captação, do tempo de exposição a Radiação Solar e do ângulo de incidência. O ângulo de incidência é o ângulo formado entre os raios solares e a reta, imaginária, normal a superfície de captação, para captação de mais energia. Quando o sol está a pino, os raios solares formam um ângulo de noventa graus com o solo. A normal corresponde a vertical direta, e os raios solares estão paralelos à essa reta. O ângulo de incidência nesse momento é zero, por isso tem-se a maior irradiância possível na localidade, o Sol fica a pino ao meio-dia-solar no verão. Mostrado na Figura 2:

Figura 2: Ângulos de incidência da irradiação solar.



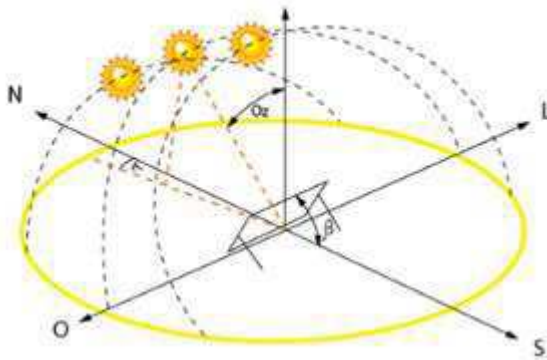
Fonte: hccengenharia.com.br/a-irradiancia-solar-no-rio-grande-do-sul-e-suficiente-para-gerar-energia-solar/grafico-3-inclinacao-das-placas-solares/

2.2.2 Orientação do Painel Fotovoltaico

Para que seja possível captar o máximo de radiação solar, um painel fotovoltaico deverá estar apontado na direção do equador. O Sol está sempre na faixa entre os trópicos de câncer e capricórnio. Sobre a linha do equador, o Sol estará metade do ano declinado para o

hemisfério Norte e na outra metade do ano declinado para o hemisfério Sul. Para obter o máximo de captação de radiação solar, no hemisfério Norte, o painel fotovoltaico deverá estar para o ponto cardinal Sul. No hemisfério Sul, o painel fotovoltaico será orientado para o ponto cardinal Norte, que é o nosso caso. Como na Figura 3:

Figura 3: Ângulos de incidência da irradiação solar diante da orientação geográfica da célula.



Fonte: hccengenharia.com.br/a-irradiancia-solar-no-rio-grande-do-sul-e-suficiente-para-gerar-energia-solar/grafico-3-inclinacao-das-placas-solares/

2.3 Energia Solar Fotovoltaica

As células fotovoltaicas, ou painéis solares como são mais conhecidos, são compostas de materiais semicondutores com propriedades específicas que possibilitam a conversão da luz solar em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. Este fenômeno físico ocorre quando a luz ou irradiação solar, fótons, incide sobre os painéis e há conversão da irradiação solar em eletricidade.

A estrutura física da célula é composta pela base superior – onde estão os contatos elétricos - da célula faz a captação da luz que possibilita coleta pela base inferior – onde estão os terminais elétricos – da corrente elétrica.

Basicamente, a célula fotovoltaica é composta por duas camadas, sendo uma rica em elétrons e outra com lacunas a serem preenchidas, formando a junção semicondutora. Dessa maneira quando a luz solar incide sobre a célula os fótons, partículas da energia solar, boa

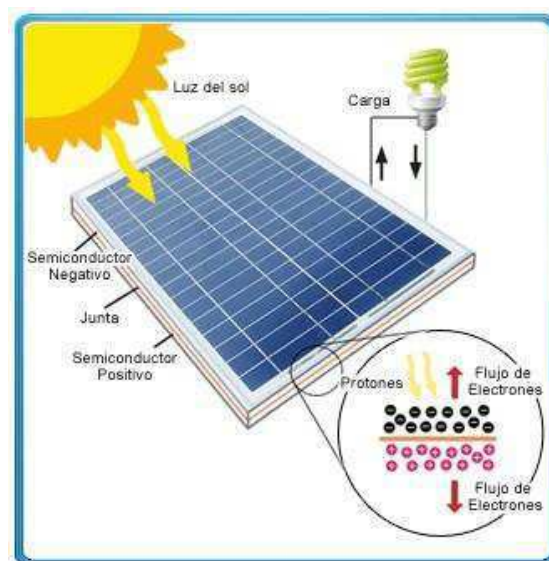
parte deles incidem sobre a célula excitando a camada rica em elétrons de modo possibilitando a mudança de elétrons entre as camadas gerando a eletricidade.

Portanto, os painéis solares são capazes de promover geração de energia elétrica na forma de corrente contínua, a partir da incidência da luz solar. Possibilitando a construção de gerações de energia elétrica sustentável e renovável, usando como único “combustível” a luz solar.

2.3.1 A Célula e o Efeito Fotovoltaico

As células fotovoltaicas são compostas por material condutor e um isolante, compondo por fim um material semicondutor. Mais especificamente, ela é composta por uma lâmina de silício, boro e fósforo. A parte com fósforo fica exposta ao sol (semicondutor negativo), na parte inferior da célula boro (semicondutor positivo) e entre elas a célula é composta por silício. Ainda são conectados contatos frontais e traseiros para conduzir energia elétrica convertida.

Figura 4: Composição da célula fotovoltaica.



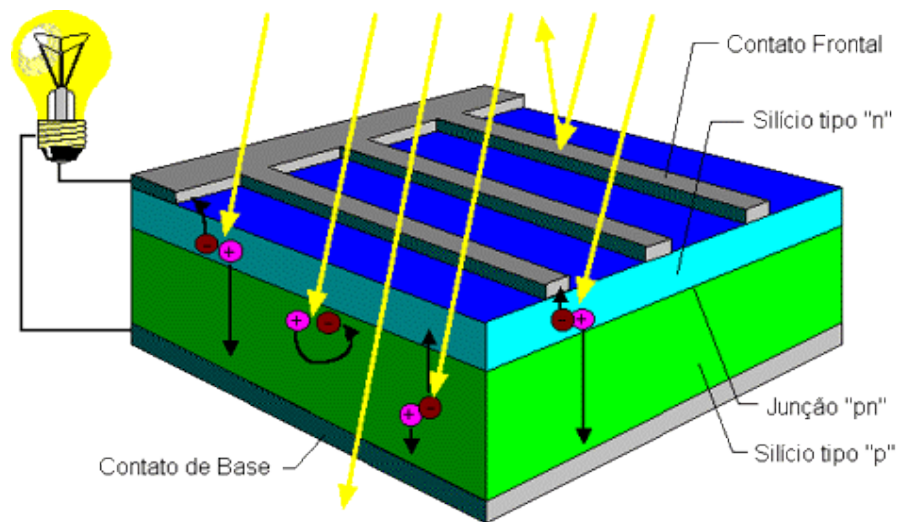
Fonte: CEPTEL

Na estrutura da célula forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício. Quando ocorre a incidência do feixe de luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com os elétrons da estrutura fornecendo-lhes energia, a partir da movimentação

dos elétrons. Devido ao campo elétrico gerado, os elétrons são orientados e fluem da camada positiva para negativa. Por meio dos contatos é conectado um cabo condutor que liga a camada positiva à negativa, por onde percorre o fluxo de elétrons, mais precisamente corrente elétrica. Enquanto houver incidência de luz na célula, haverá um fluxo de elétrons que varia de acordo a intensidade dessa luz.

Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos em um circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela, mais precisamente Efeito Fotovoltaico, exemplificado na Figura 5.

Figura 5: Efeito fotovoltaico na célula fotovoltaica.

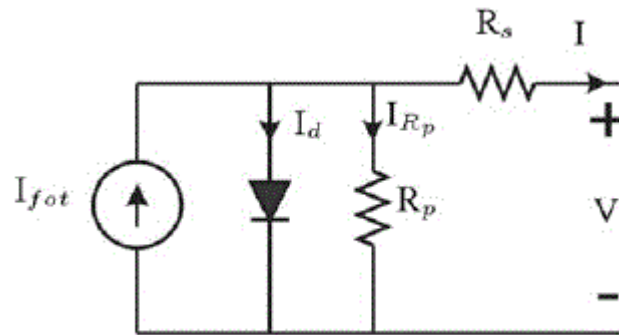


Fonte: SOUZA, 2016

2.3.1.1 Estrutura Interna da Célula Fotovoltaica

Abaixo tem-se o circuito equivalente simplificado, Figura 6, que representa o funcionamento interno de uma célula quando submetida à radiação solar:

Figura 6: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: sites.google.com/site/ciberneticajesus

Os parâmetros do circuito mostrado na figura, são:

- I_{fot} : corrente gerada pela incidência da radiação.
- I_d : corrente de saturação do diodo.
- I_{Rp} : corrente de fuga para terra.
- I : corrente nos terminais de saída.
- R_p : resistência *shunt*.
- R_s : resistência série.

Em condições fixas de temperatura e radiação, a característica de tensão e corrente do modelo da célula fotovoltaica é:

$$I = I_{fot} - I_d - I_{Rp}$$

A resistência série representa a resistência interna da célula fotovoltaica à passagem da corrente, que depende de diversos fatores, como: espessura da junção, quantidades de impurezas do material, resistência de contato.

Quando temos uma célula em funcionamento, exposta ao sol, podemos medir alguns parâmetros em seus terminais. Uma das medições feita é a tensão de circuito aberto, quando o módulo está em funcionamento sem nenhuma carga conectada. Portanto:

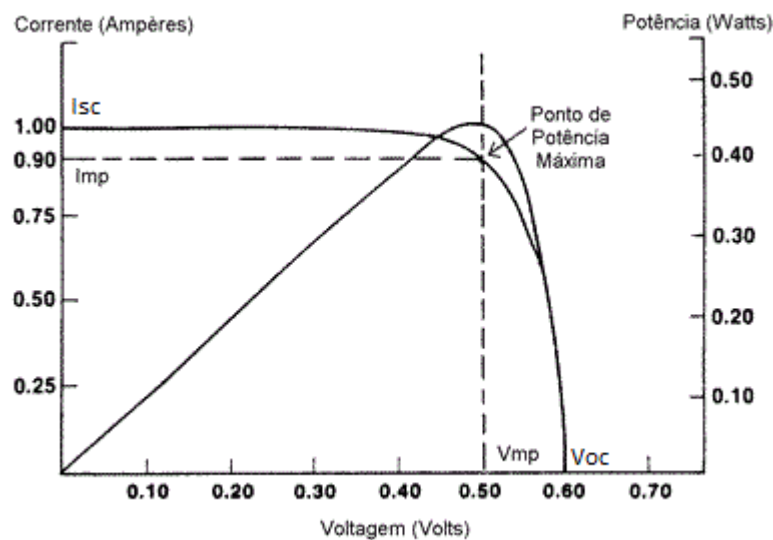
$$V_{oc} = V + (I \times R_p)$$

- V_{oc} : tensão de circuito aberto.

Outro parâmetro importante utilizado é a corrente de curto circuito. É medida colocando os terminais da célula em curto circuito, através de um amperímetro, quando a célula é exposta ao sol.

A representação da característica elétrica de uma célula normalmente é representada por uma curva $I \times V$, corrente *versus* tensão. Essa curva é encontrada através de medições para varias condições de operação e carga na célula, traçando assim a curva mostrada na Figura 7.

Figura 7: Curva característica $I \times V$ de uma célula fotovoltaica.



Fonte: www.solarbrasil.com.br/blog-da-energia-solar

2.3.1.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

Existem no mercado vários tipos de células fotovoltaicas, composta por diferentes materiais, projetadas com intuito de obter melhor eficiência e/ou menor custo. No entanto, as células de silício cristalizado são as mais utilizadas e são encontradas nas formas monocristalina, policristalina e amorfa.

- Silício Monocristalino: esta célula apresenta maior eficiência, através da utilização de silício e materiais semicondutores nas suas formas mais pura, chegando à 99% de pureza. Como na Figura 8:

Figura 8: Painel fotovoltaico de silício monocristalina.



Fonte: www.archiexpo.cn/cat/sheng-neng-yuan/qi-ta-guang-fu-dian-chi-guang-fu-mian-ban-AR-1733

- Silício Policristalino: o processo de produção da célula policristalina é semelhante ao da monocristalina, porém com menor rigor de controle de pureza, portanto menor eficiência e custo. Como na Figura 9:

Figura 9: Painel fotovoltaico de silício policristalina.



Fonte: www.paineisfotovoltaicos.com/policristalinos

- Silício Amorfo: o processo de produção da célula amorfa é bem simples e barato e existe a possibilidade de produção de células com grandes áreas. No entanto,

apresentam baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas e a alta taxa de redução da eficiência ao longo da vida útil. Como na figura 11:

Figura 10: Painel fotovoltaico de silício amorfo.



Fonte: www.lojadaspecas.com/pt

Por fim, uma comparação entre os tipos de células fotovoltaicas de silício.

Tabela 1: Comparativo entre os tipos de células.

	Mono	Poli	Amorfo
Rendimento(%)	18	16	8
Custo	Elevado	Médio	Baixo
Vida útil (anos)	20-40	20-40	15-25

Fonte: Próprio Autor.

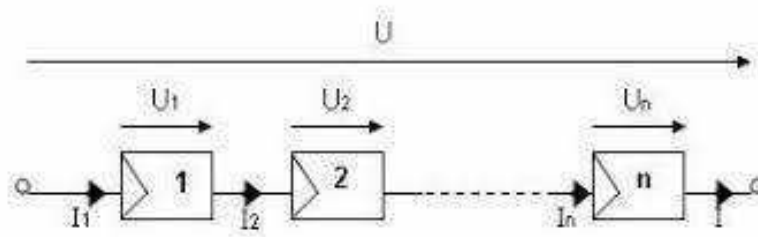
2.3.1.3 Associação de Módulos Fotovoltaicos

Para gerar todo o potencial energético necessário a uma aplicação qualquer é comum que seja feita associação de módulos formando um painel fotovoltaico, já que dificilmente um único módulo fotovoltaico será capaz de atender a demanda. Determinada pelos dispositivos de condicionamento de potência, isto é, controladores, inversores, baterias, de acordo com a sua forma de associação, os módulos fotovoltaicos têm a sua potência somada, não

importando a forma que eles se organizam, mas sempre seguindo as leis nas associações, série e paralelo.

- Associação em Série: nesta associação, também conhecida como *string* (ou malha), liga-se o terminal negativo do primeiro módulo ao terminal positivo do segundo módulo, e assim por diante, até que reste apenas o terminal positivo do primeiro módulo e o terminal negativo do último módulo. Mostrado na Figura 11.

Figura 11: Módulos de mesma capacidade ligados em série.



Fonte: ww.cresesb.cepel.br

Neste tipo de associação, as tensões dos módulos são somadas e a tensão final do conjunto será a soma das tensões individuais de cada módulo.

$$I_p = I_1 = I_2 = I_n$$

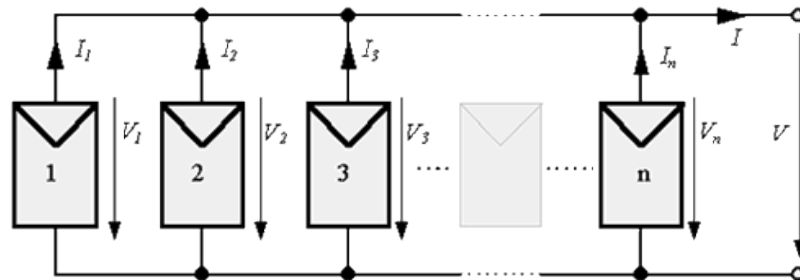
$$V_p = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

- V_p : Tensão total na saída do conjunto de módulos.
- V : Tensão de cada módulo.
- I_p : Corrente total na saída do conjunto de módulos.
- I : Corrente de cada módulo.

A corrente elétrica do conjunto será igual a menor corrente individual, ou seja, será a corrente do módulo de menor potência. Isto acontece porque o módulo com menor corrente absorve a corrente gerada pelo módulo de maior corrente, dissipando-a em calor, ou seja, provocando perdas. Portanto, não se deve associar em série módulos fotovoltaicos de diferentes capacidades.

- Associação em Paralelo: nesta associação conecta-se os terminais positivos de todos os módulos em um nó e da mesma maneira com os terminais negativos em outro nó. Mostrado na Figura 12:

Figura 12: Módulos de mesma capacidade ligados em paralelo.



Fonte: www.cresesb.cepel.br

Neste tipo de associação, a corrente do conjunto dos módulos será o resultado da soma das correntes individuais de cada módulo.

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

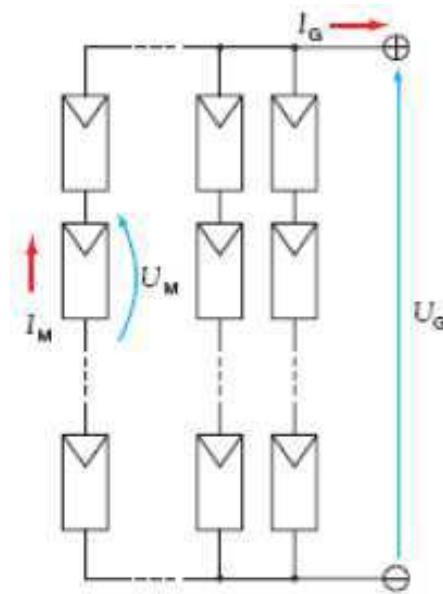
$$V_p = V_1 = V_2 = V_n$$

- V_p : Tensão total na saída do conjunto de módulos.
- V : Tensão de cada módulo.
- I_p : Corrente total na saída do conjunto de módulos.
- I : Corrente de cada módulo.

A tensão resultante do conjunto dos módulos, será a média das tensões individuais de cada módulo. Com isso ao ligar módulos de diferentes tensões em paralelo, aquele que tem menor tensão receberá a corrente gerada pelos módulos de maior tensão, atuando como carga resistiva consumindo corrente elétrica e dissipando-a em forma de calor, ou seja, provocando perdas. Portanto, não se deve associar em paralelo módulos de diferentes capacidades.

- Associação Mista: neste tipo de associação vão existir *strings* em paralelo, respeitando as mesmas condições dita anteriormente. Mostrado na Figura 13:

Figura 13: Módulos de mesma capacidade ligados em série e paralelo.



Fonte: energiadeactivacion.blogspot.com.br

Para associação série, módulos com mesmo nível de tensão, e paralelo mesmo número de módulos em cada *string* de modo a obter o mesmo nível de tensão. Nesta associação haverá tanto o aumento de tensão, proporcional ao número de módulos em série, quanto o de corrente, proporcional a quantidade de *strings* em paralelo.

$$I_p = I_{m_1} = I_{m_2} = I_{m_n}$$

$$V_p = V_{m_1} = V_{m_2} = V_n$$

- V_p : Tensão total na saída do conjunto de módulos.
- V_m : Tensão de cada malha.
- I_p : Corrente total na saída do conjunto de módulos.
- I_m : Corrente de cada malha.

Os módulos fotovoltaicos apresentam características diferentes entre si que podemos conhecer em seus datasheets, já que a corrente e ou a tensão podem diferir da padrão. Além de apresentarem valores importantes para dimensionamento da proteção do sistema como, corrente de curto circuito e tensão em circuito aberto. Destacam-se:

- Voltagem de circuito aberto (V_{oc})
- Corrente de curto circuito (I_{sc})
- Potência Máxima (P_{mp})
- Tensão em Máxima Potência (V_{mp})
- Corrente de Potência Máxima (I_{mp})

2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos e a Geração Distribuída

Os sistemas fotovoltaicos se encaixam em um tipo de geração denominada distribuída. Diferentemente do tipo de geração elétrica tradicional baseada em distribuidora e consumido, na geração distribuída se caracteriza por uma fonte de energia descentralizada conectada à carga ou à rede elétrica convencional, como será dito posteriormente. Como exemplo produção de energia elétrica por sistema fotovoltaico em telhados de residências, empresas ou produção de energia eólica, como os parques eólicos presentes no estado do Rio Grande do Norte, em Guaramaré, Areia Branca, dentre outros.

A geração distribuída, dentre suas vantagens, esta sendo como uma válvula de escape para a produção de energia elétrica convencional à base das usinas, hidrelétricas, termoelétrica, dentre outras. Auxiliando na geração em momentos de ponta do sistema, como mais uma alternativa de geração de energia elétrica ou diminuindo a demanda do sistema caso esteja produzindo diretamente para a carga.

Portanto é sabido que a geração distribuída tem crescido de forma expressiva atualmente, com a introdução de fontes renováveis (energia fotovoltaica, eólica, pequenas usinas hidrelétricas) proporcionam baixo impacto ambiental e vantagens à rede elétrica.

2.3.3 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Neste tópico será mostrado os tipos de montagens de sistemas fotovoltaicos, em relação à rede elétrica, possíveis de serem montados.

2.3.3.1 Sistemas *off-grid*

São sistemas que não dependem da rede elétrica convencional para funcionar, sendo possível sua utilização em localidades carentes de rede de distribuição elétrica para possibilitar suprimento específico de uma carga. Por isso também conhecido como sistema autônomo ou isolado.

Existem dois tipos de sistema autônomo: com armazenamento e sem armazenamento. O primeiro pode ser utilizado de forma armazenar parte da produção de energia elétrica fotovoltaica em baterias, como por exemplo é utilizado em algumas iluminações pública. Já o segundo, utilizado em bombeamento de água, apresenta maior viabilidade econômica por não utilizar instrumentos para o armazenamento de energia, baterias, que acabam por encarecer o sistema *off-grid*. Porém não é recomendado, já que em período de baixa produtividade de energia fotovoltaica, baixa radiação solar, o sistema sem armazenamento pode ficar sem funcionar. Sistema é representado pela Figura 14:

Figura 14: Representação de um sistema off-grid.



Fonte: jjenergiasolar.com.br/sistema-off-grid

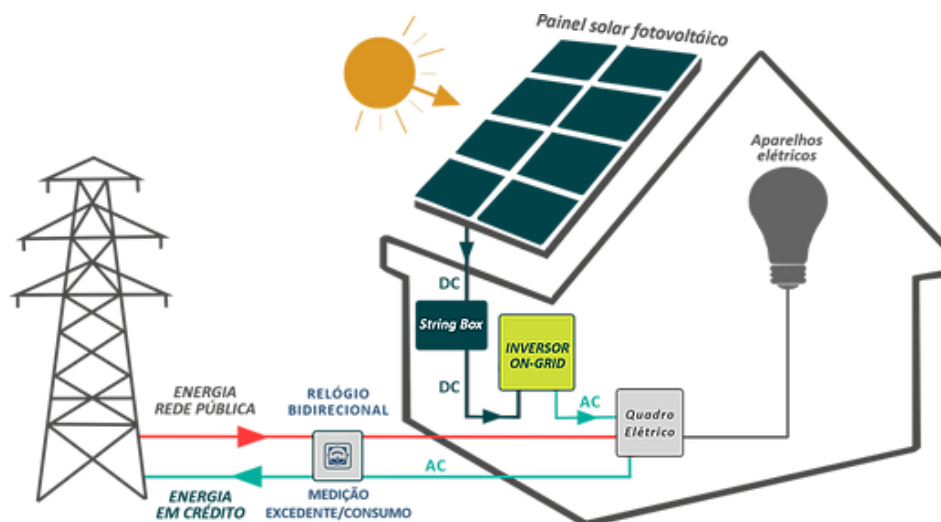
2.3.3.2 Sistemas *on-grid*

São sistemas que estão conectados à rede de distribuição de energia elétrica. São mais eficientes que os sistemas *off-grid* e dispensam a utilização das baterias e dos controladores de carga, o que faz com que tenham um preço mais baixo.

No sistema *on-grid*, por não possuir dispositivo de armazenamento, toda a energia produzida pode estar sendo consumida pela carga, por exemplo uma residência, e seu excedente sendo injetado na rede elétrica ou injetar toda produção de energia elétrica fotovoltaica para à rede convencional de energia elétrica. Para isso é necessário a instalação de um medidor de energia elétrica bidirecional, que faz a medição tanto da energia consumida pela carga quanto da energia injetada pela produção fotovoltaica.

Com isso é feita a compensação energética, produção *versus* consumo, em que quando a produção fotovoltaica superar o consumo seu excedente é convertido em crédito que poderá ser utilizado para compensar em datas futuras, até 60 meses para utilização dos créditos. Já quando o consumo superar a produção fotovoltaica a diferença desse consumo é cobrado normalmente de acordo tarifação da concessionária ao consumidor. Representado pela Figura 15.

Figura 15: Sistema fotovoltaico on-grid.



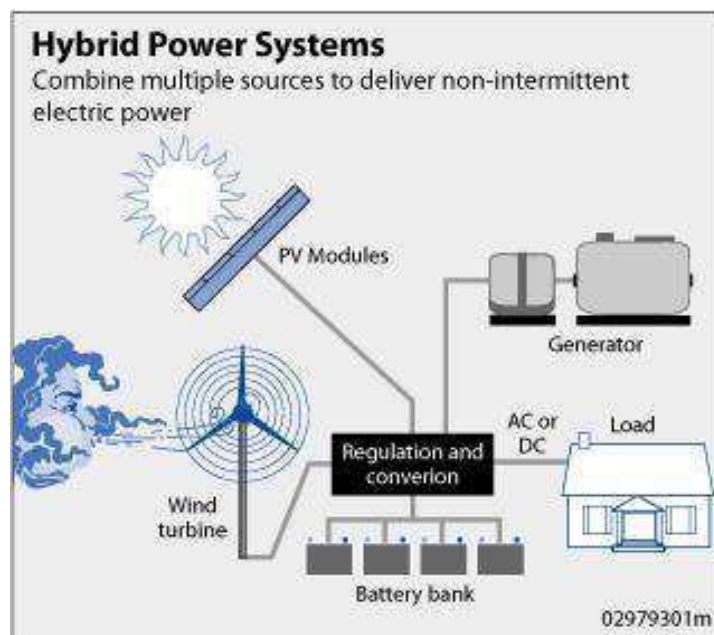
Fonte: www.allgreen-solar.com

2.3.3.3 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos se caracterizam pela associação de sistemas fotovoltaicos com demais fontes de energia. O seu maior benefício é proporcionar eletricidade gerada pelo sistema fotovoltaico, armazenada nas baterias, na privação de sol, em dias de baixa ou nenhuma, geração faça o suprimento da carga ou a através da outra fonte de energia. Os sistemas híbridos funcionam de modo a escolher a melhor fonte de suprimento da carga, podendo ser utilizado um sistema de controle, por exemplo em épocas de muita produção fotovoltaica utiliza-se dessa fonte já que as baterias estão carregadas, já em épocas de baixa produção utiliza da fonte alternativa que pode ser gerador à diesel enquanto as baterias aumentam sua carga.

Esse sistema é apontado como um sistema complexo, já que necessita integrar diversas formas de produção de energia elétrica, como motores à diesel ou gás, ou por geradores eólicos. Representado pela Figura 16:

Figura 16: Sistema híbrido.



Fonte: www.mechanism.ir/renewable-fossil-energy/renewable-energy/636-hybrid-renewable-energy-system

2.4 Bateria

As baterias são dispositivos eletroquímicos que entre os diversos tipos de sistemas são mais utilizadas naqueles isolados da rede elétrica, ou seja, *off grid*. São dispositivos responsáveis por fazer o armazenamento da energia elétrica gerada pelos módulos, com o intuito de suprir a demanda da carga na ausência da radiação solar e armazená-la quando não solicitada pela carga a fim de evitar desperdício de energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

Portanto são de extrema importância, já que a radiação solar tem característica variável durante o dia, além de não ocorrer nos períodos noturnos e é reduzida em dias nublados. Existem outros equipamentos capazes de realizar a função de armazenamento da energia, porém, a bateria ainda é utilizada em maior escala, devido à sua eficiência de funcionamento em relação as demais. A bateria é definida por:

(...) um conjunto de células ou vasos eletroquímicos, conectados em série e/ou paralelo, capazes de armazenar energia elétrica na forma de energia química por meio de um processo eletroquímico de oxidação e redução que ocorre em seu interior (PINHO & GALDINO, 2014, p.164).

São vários os tipos de baterias existentes, distinguindo-se devido às células empregadas, as quais influenciam diretamente na eficiência de armazenamento. Considerando o fato de que nem todos os modelos são economicamente viáveis, as baterias de chumbo-ácido são as mais utilizadas até hoje para os sistemas fotovoltaicos. Já que no sistema fotovoltaico deve-se empregar baterias com melhores capacidades em relação à: capacidade de ciclagem, maior eficiência energética, maior vida útil, pouca manutenção e baixo custo.

2.4.1 Associação de Baterias

Semelhante à associação de módulos fotovoltaicos acontece a associação de baterias, em série e paralelo:

- Associação em Série: para fazer esta associação, liga-se a terminal negativo da primeira bateria ao terminal positivo da segunda, e assim por diante, até que reste apenas o terminal positivo da primeira bateria e o terminal negativo da última que

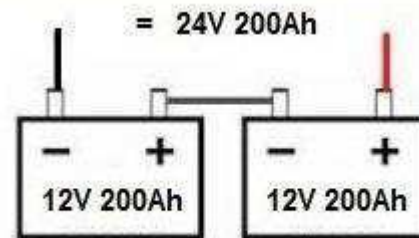
será conectada ao controlador de carga. Feita esta ligação, a capacidade final do banco de baterias será, como mostra a Figura 17:

$$I_p = I_1 = I_2 = I_n$$

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

- V_p : Tensão total do banco de baterias.
- V : Tensão de cada bateria.
- I_p : Corrente total do banco de baterias.
- I : Corrente de cada bateria.

Figura 17: Baterias conectadas em série.



Fonte: www.mpptsolar.com/pt/baterias-serie-paralelo

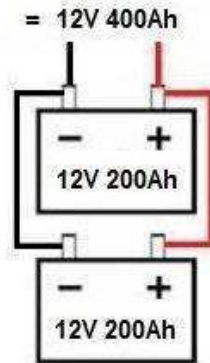
- Associação em Paralelo: nesta associação conecta-se os terminais positivos de todas as baterias em um nó e da mesma maneira com os terminais negativos em outro nó. Esta ligação resultará em uma capacidade final do banco de baterias igual à, como mostra a Figura 18:

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

$$V_p = V_1 = V_2 = V_n$$

- V_p : Tensão total na saída do conjunto de módulos.
- V : Tensão de cada módulo.
- I_p : Corrente total na saída do conjunto de módulos.
- I : Corrente de cada módulo.

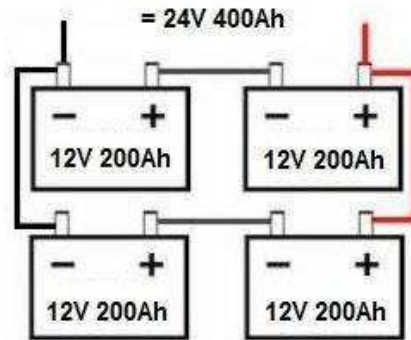
Figura 18: Baterias conectadas em paralelo.



Fonte: www.mpptsolar.com/pt/baterias-serie-paralelo

E por fim, associação conjunta de baterias, série e paralelo, mostrado na Figura 19:

Figura 19: Baterias conectadas em série e paralelo.



Fonte: www.mpptsolar.com/pt/baterias-serie-paralelo

2.5 Inversor de Frequência

Os inversores são dispositivos eletrônicos que transmitem energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (PINHO & GALDINO, 2014). A energia elétrica na saída dos módulos fotovoltaicos é em corrente contínua, o que inviabiliza a sua aplicação direta na maioria dos equipamentos que trabalham somente, em corrente alternada. Para a solução deste problema faz-se a utilização dos inversores, que são capazes de realizar a conversão desta tensão contínua para um valor de tensão alternada. Além disso, este equipamento é capaz de ajustar a frequência e nível de tensão gerada, para que o sistema possa fazer alimentação da carga ou ser conectado à rede elétrica convencional, *on grid*, de acordo com as normas vigentes estabelecidas pela ANEEL. Para selecionar o inversor adequado a ser utilizado em um sistema fotovoltaico os requisitos a serem analisados são: a potência do inversor, a forma de onda da carga e a de trabalho do inversor, assim como sua própria eficiência. Tem-se modelo de inversor de frequência mostrado na Figura 20:

Figura 20: Inversor de frequência 3 kW e 5 kW.



Fonte: ecoeletric.com.br

2.6 Controlador de Carga

Também chamado de regulador de carga, este componente é, geralmente, utilizado em sistemas *off grid*, ou seja, que empregam o uso de baterias para o armazenamento de energia. Os controladores de carga têm como principal função proteger os acumuladores, isto é, as baterias de sobrecargas do sistema. Além disso, se bem regulados, asseguram que o sistema opere em sua máxima eficiência, operam de modo a direcionar a produção de energia elétrica do sistema fotovoltaico para se armazenar nas baterias e fornece essa energia armazenada nas baterias à carga de acordo é solicitada pela mesma. Complementam a finalidade deste equipamento, quando ajustados corretamente, irão garantir o bom desempenho do sistema de baterias sob várias condições (carga, descarga e variações de temperatura). O princípio de funcionamento, da proteção da bateria através dos controladores de carga, consiste em impedir que ela sofra sobrecarga de tensão e prevenir que ela seja completamente descarregada. Já que ambas as situações acarretam desgaste e, conseqüentemente, diminuição da vida útil da bateria, por isso devem ser controladas (PINHO & GALDINO, 2014). Como modelo mostrado na Figura 21:

Figura 21: Controlador de carga 50 A.

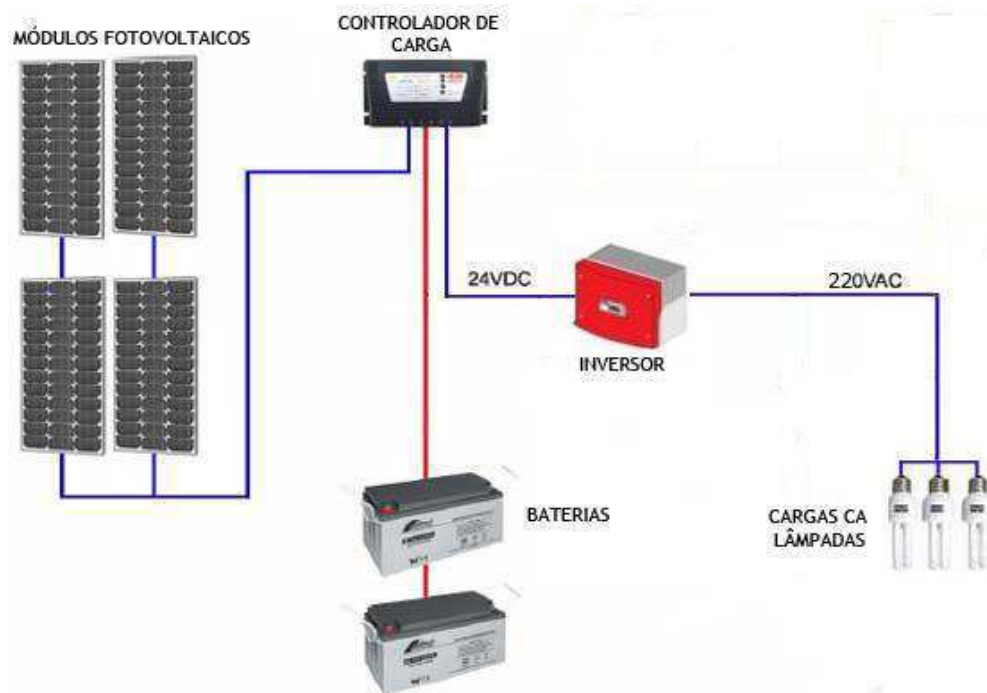


Fonte: www.fangpusun.com

3. Projeto Sistema Minigeração Fotovoltaica

Após conhecido os equipamentos presentes no projeto é necessário entender como é feita sequência de ligação entre eles. Como ilustrado na Figura 22:

Figura 22: Esquema ilustrativo de montagem do sistema fotovoltaico.



Fonte: <https://www.pinterest.pt/>

Através da imagem podemos visualizar mais facilmente como se dá a disposição dos equipamentos do sistema. Partindo do ponto da geração, os módulos fotovoltaicos, são conectados em série com o controlador de carga, este por sua vez, tem conectado em paralelo nas suas entradas as baterias, para armazenamento da energia produzida pelos módulos. Por fim o inversor de frequência que inverte a tensão em corrente contínua das baterias para tensão em corrente alternada. Que por sua vez vai ao seu destino final, no caso do projeto as lâmpadas de LED.

Tendo as informações necessárias dos equipamentos e suas respectivas funções, é possível iniciar o projeto e dimensionamento de geração fotovoltaica. Este vai ter finalidade de suprir a iluminação externa do Bloco CJ da Universidade Federal de Campina Grande, seguindo os passos recomendados.

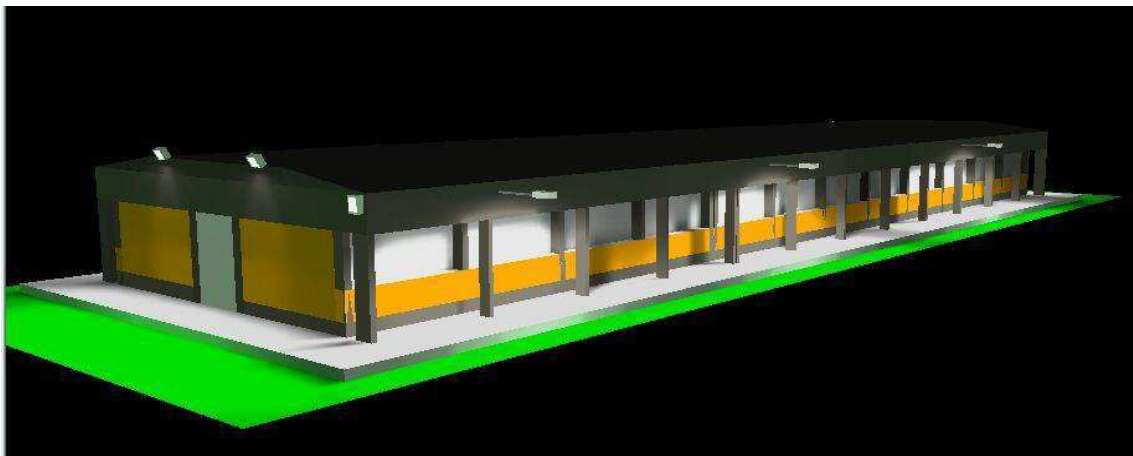
3.1 A Carga

No processo de projeto de um sistema seja ele fotovoltaico ou não, para suprir uma carga o projetista deve, inicialmente, conhecer as características da carga. Como no caso das lâmpadas: horas de funcionamento, consumo, potência instalada, distância, dentre outros aspectos que podem ser relevantes ao seu projeto.

A escolha da carga para o projeto foi feita a partir da visualização da área externa do Bloco CJ e feita a contagem dos pontos de luz já existentes, já que não queríamos colocar mais pontos de luz, que são 11. A partir disso, foi feito uma análise das lâmpadas e refletores de LED existentes no mercado, constatando que cada ponto a uma potência de 30W (watts) de potência era suficiente para uma iluminação satisfatória.

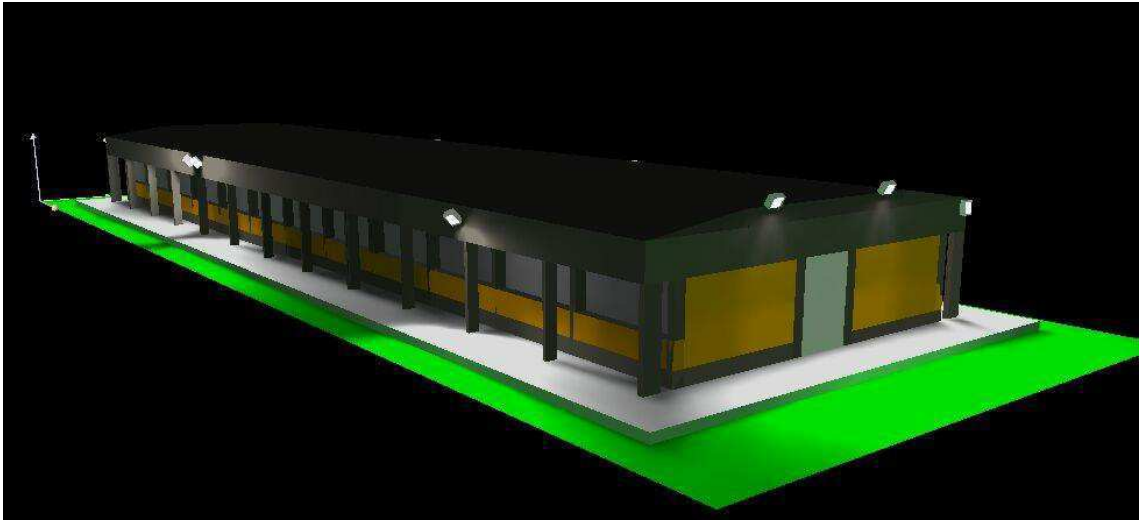
Foi disponibilizado, por Jefferson de Albuquerque, membro pesquisador do LabMet – Laboratório de Metrologia de Campina Grande, o projeto luminotécnico do Bloco CJ para ilustração dos pontos de luz e o resultado que buscamos de iluminação. Mostrado nas figuras abaixo:

Figura 23: Vista frontal e lateral direita do bloco CJ.



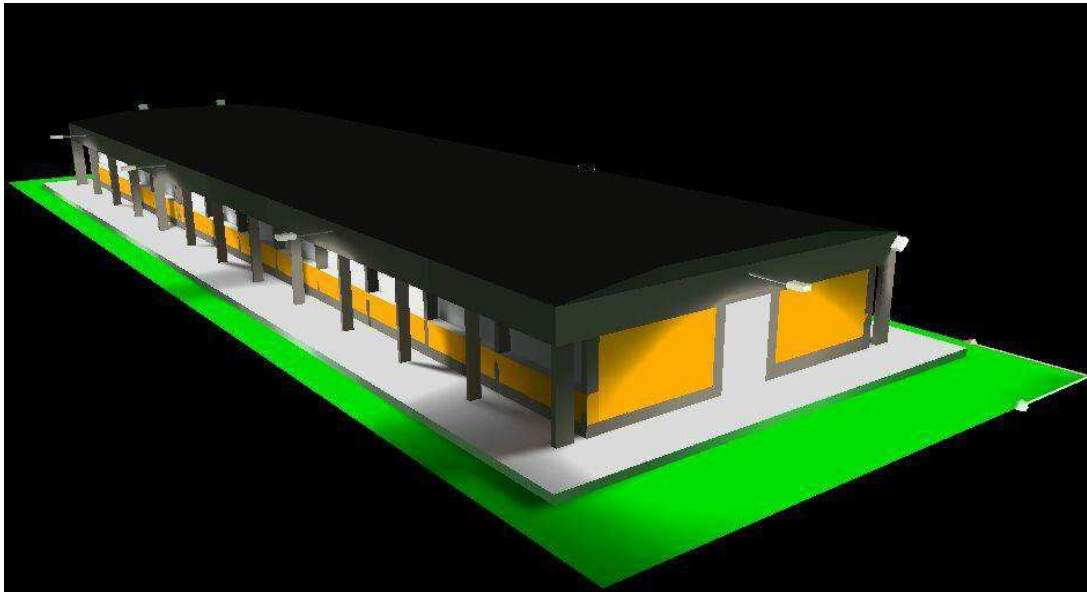
Fonte: Autor Jefferson de Albuquerque.

Figura 24: Vista frontal e lateral esquerda do bloco CJ.



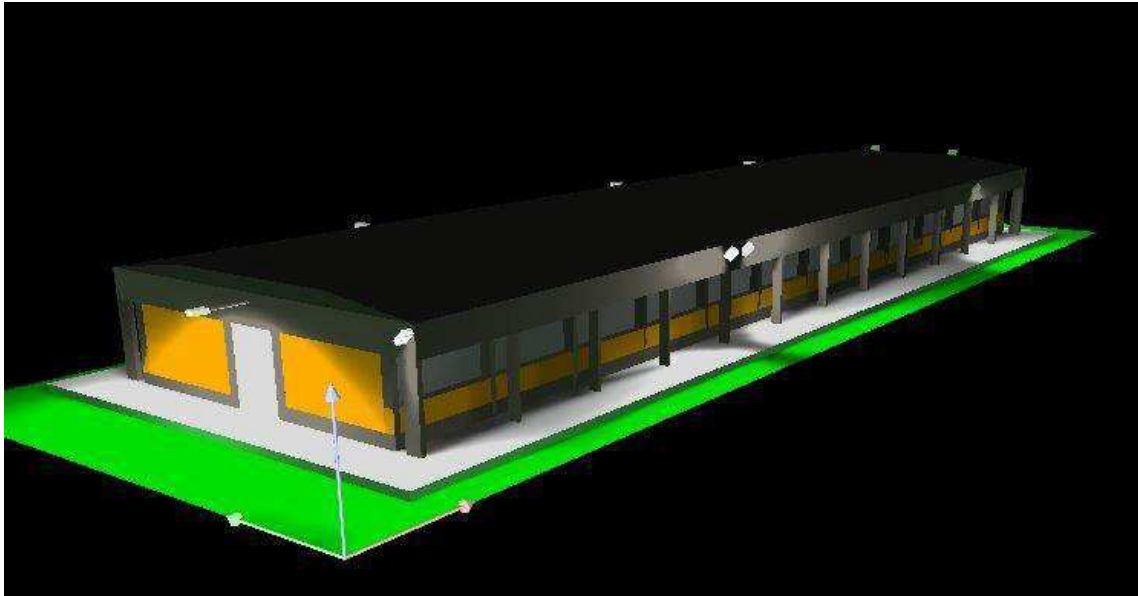
Fonte: Autor Jefferson de Albuquerque.

Figura 25: Vista traseira e lateral direita do bloco CJ.



Fonte: Autor Jefferson de Albuquerque.

Figura 26: Vista traseira e lateral esquerda do bloco CJ.



Fonte: Autor Jefferson de Albuquerque.

Portanto nossa carga será composta por 11 pontos de luz de 30W (watts).

$$D = 11 \times 30 = 330W$$

Sabendo a função dessa carga, que é iluminação da área externa do Bloco CJ, ou seja, a carga será acionada apenas à noite. Supondo que as lâmpadas serão ligadas às 17:30h e desligadas às 5:30h do dia seguinte, ficando ligada no período da noite e por doze horas. Resultando em um consumo de:

$$Consumo = 330 \times 12 = 3960 W/dia$$

Considerando o fator de potência para iluminação 0.92, a carga total vai demandar uma potência aparente de:

$$S = \frac{330}{0,92} = 358,70 VA$$

Assim como, a carga em funcionamento solicitará do controlador de carga uma corrente de:

$$I = \frac{358,70}{220} = 1,63 A$$

Com isso, tem-se algumas informações sobre a carga a ser alimentada pelo sistema fotovoltaico.

3.2 Dimensionamento dos Sistema Fotovoltaico

Para fazer o dimensionamento dos painéis de modo a suprir satisfatoriamente as doze horas de funcionamento da carga, sem sobredimensionar o sistema fotovoltaico a ser projetado, deve se atentar em alguns fatores: as perdas dos equipamentos, perdas por temperatura, queda de tensão e posicionamento correto dos módulos fotovoltaicos a fim de aproveitar ao máximo as horas de sol diárias.

3.2.1 Perdas no Inversor de Frequência

No mercado existe mais de um tipo de inversores de frequência; onda senoidal modificada e onda senoidal pura. O inversor de onda senoidal pura apresenta maior eficiência, apesar de ser mais caro ele apresenta eficiências de até 97%. No projeto foi considerado o uso de um inversor de onda senoidal pura com eficiência de 96%.

3.2.2 Perdas no Controlador de Carga

Assim como os inversores de frequência, existe mais de um tipo de controlador de carga; o PWM (Pulse Width Modulation) que é modulação por largura de pulso e o MPPT (Maximum Power Point Tracking). O controlador de carga PWM, trabalha através de um duty cycle que nem sempre fará a transferência de energia da bateria para a carga de modo eficiente. Já o controlador de carga MPPT trabalha por meio de varredura buscando o ponto de maior eficiência para se fazer a transferência de energia, chegando a ser 75% mais eficiente que o controlador de carga PWM. No projeto foi considerado o uso de um controlador de carga MPPT de eficiência 97%.

Uma questão interessante é que para sistemas fotovoltaicos *on-grid*, compensação da produção de energia dos painéis direto na rede, não se faz necessário o uso de controladores de carga.

3.2.3 Perdas por Calor

A temperatura tem bastante influência sobre a eficiência da produção energética das placas fotovoltaicas. Pois em seu funcionamento, a medida em que a temperatura aumenta ocorrem perdas durante a conversão de energia solar em energia elétrica. Sendo fator importante, a temperatura ambiente média do local em que vai ser instalado o sistema fotovoltaico e em que tipo de estrutura vai ser instalado, como telhado, solo, laje.

Sabendo disso, ao projetar o sistema fotovoltaico é necessário fazer a compensação do fator temperatura, prevendo por cálculo as perdas por temperatura. Já que, se não levarmos em condições as perdas por temperatura, assim como os outros tipos de perdas, o sistema pode acabar subdimensionado e não atendendo de forma satisfatória a carga. Considera-se, após feita as medições em laboratório, o valor de 25° C como sendo a diferença média positiva de temperatura entre as células fotovoltaicas e o meio ambiente em que os módulo fotovoltaicos serão instalados, ou seja, ΔT .

Tabela 2: Relação entre tipo fixação dos painéis com variação de temperatura.

Tipo de fixação:	ΔT
Estrutura totalmente elevada (solo)	22° C
Laje ou telhado (com espaço/inclinação)	28° C
Sobre telhado	29° C

Fonte: Próprio autor.

Para o cálculo da temperatura de compensação para potência de pico, temos a seguinte equação:

$$T = T_{amb} + (\Delta T - T_{ref}) \text{ } ^\circ \text{C}$$

- T: temperatura considerada para o cálculo das perdas.
- T_{amb} : temperatura média ambiente do local onde vão ser instalados os módulos fotovoltaicos.
- ΔT : diferença de temperatura entre as células fotovoltaicas e a temperatura ambiente, de acordo a estrutura de fixação e ventilação.
- T_{ref} : diferença de temperatura entre as células fotovoltaicas e a temperatura ambiente calculada em laboratório.

Através do Climate-Data.org, que fornece dados climáticos de várias cidades mundiais, foi visto que a temperatura média de Campina Grande é de 23 ° C e sabendo que o sistema será instalado no telhado do Bloco-CJ com espaço para ventilação, temos:

$$T = 23 + (28 - 25) = 26 \text{ } ^\circ \text{C}$$

Para finalização do cálculo das perdas é necessário ver o datasheet do módulo fotovoltaico a ser utilizado e identificar qual seu coeficiente de temperatura. No caso da utilizada no projeto é de $-0.407 \frac{\%}{^\circ \text{C}}$, portanto:

$$\text{Perdas} = 26 \times (-0,407) = -10,582\%$$

A partir disso como foi dito anteriormente podemos fazer a compensação de potência do sistema para suprir as perdas. É importante lembrar que o arrefecimento da parte traseira dos módulos fotovoltaicos influencia na diminuição desse calor sobre as placas. Como a possibilidade de instalação dos módulos fotovoltaicos sob uma fixação mecânica que permita “costas livres”, espaço entre os módulos e o local instalado, possibilitando que o vento auxilie no resfriamento natural das células fotovoltaicas. Melhorando assim o rendimento dos módulos fotovoltaicos, já que como vimos as perdas por temperatura são bem expressivas.

3.2.4 Queda de Tensão

A queda de tensão é uma questão muito presente na engenharia de potência, assim como em projetos, por conta da distância da conexão da fonte de energia às cargas, feita por cabos. Já que é uma propriedade inerente à condução de energia elétrica, por ocasionar choque de elétrons em seu caminho que conseqüentemente ocasionam algumas perdas de energia que são dissipadas em forma de calor, também conhecido como efeito Joule, portanto a tensão que chega a carga não é a mesma que sai da fonte geradora. Portanto, foi feito o cálculo da queda de tensão para projeto em questão, a fim de decidir qual secção de cabo utilizar e se será necessário fazer troca dos que estão sendo utilizados. Admitindo utilização de cabos de cobre e uma distância de 50 metros para carga mais distante, temos:

$$\Delta V = \frac{1}{\beta} \times \frac{1}{\varnothing \times V^2} \times (P \times d) = 0,0356\%$$

- β : coeficiente de condutividade térmica do cobre.
- \varnothing : sessão do cabo.
- V : tensão de alimentação do circuito.
- P : potência da carga a ser calculada a queda de tensão.
- d : distância de cabo do quadro de distribuição à carga.

Portanto:

$$\Delta V = \frac{1}{58} \times \frac{1}{1,5 \times 220^2} \times (30 \times 50) = 0,0356\%$$

Como a carga é baixa e a queda de tensão calculada foi de 0.0356%, para a um cabo de cobre de 1,5mm² (milímetros quadrados), ou seja, a queda de tensão é satisfatória.

3.2.5 Orientação e Inclinação

Para proporcionar o aproveitamento máximo da radiação solar nos painéis fotovoltaicos é necessário fazer o estudo de orientação geográfica, para aproveitar as horas de sol por toda passagem leste-oeste. Assim como a inclinação ideal para fornecer um aproveitamento dessa radiação, como também uma inclinação para queda de água da chuva, possibilitar ventilação por trás dos módulos, dentre outros fatores. Como mostra Figura 27:

Figura 27: Vista dos painéis fotovoltaicos em relação a orientação geográfica.



Fonte: www.optpower.com

Para fazer esse posicionamento geográfico dos painéis fotovoltaicos, deve-se levar em consideração a disposição do Sol. Sobre a linha imaginária do Equador, o Sol nasce metade do ano declinado para o hemisfério norte e outra metade do ano para o hemisfério sul. Para obter a captação máxima de radiação solar, no hemisfério sul como nosso caso, os painéis fotovoltaicos devem estar voltados para o hemisfério norte.

Figura 28: Vista geográfica superior do Bloco CJ.



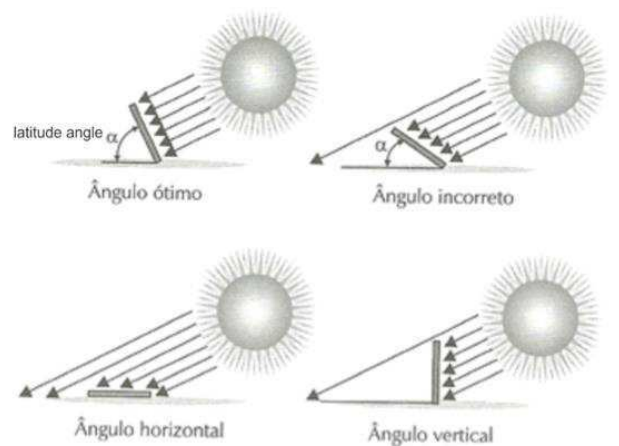
Fonte: Google Maps.

A inclinação ideal para melhor captação solar dos módulos fotovoltaicos varia de acordo a latitude do local a ser instalado o sistema fotovoltaico. De acordo a equação abaixo:

$$\alpha = 3,7 + (0,69 \times \varphi)$$

- α : inclinação em graus, em relação ao plano horizontal.
- φ : latitude em graus, do local.

Figura 29: Vista lateral da inclinação dos módulos fotovoltaicos com plano horizontal.



Fonte: solconnecta.com.br

Através do Google Maps pôde ser obtida a localização geográfica do Bloco CJ, que é latitude $-7,21^\circ$ e longitude $-35,91^\circ$. Portanto:

$$\alpha = 3,7 + (0,69 \times 7,21) = 8,675^\circ$$

Figura 30: Ilustração da inclinação de módulos fotovoltaicos com plano horizontal.



Fonte: cleancanarianenergy.com

Com isso, chegamos ao resultado da orientação e inclinação dos módulos fotovoltaicos.

3.2.6 Número de Painéis

Após calcular as informações acima, características e potência da carga, perdas no sistema fotovoltaico a serem compensadas, é possível calcular o número de painéis necessários para fazer alimentação satisfatória da carga.

Em um sistema *off-grid* é necessário que o sistema faça alimentação da carga por todo período de utilização. Como dito anteriormente, as lâmpadas ficarão em funcionamento por doze horas e sabemos que elas constituem uma potência de 330W, portanto:

$$Demanda = 330 \times 12 = 3960W/dia$$

Para saber a potência das placas fotovoltaicas a serem utilizadas, deve-se levar em conta as horas úteis de sol, irradiação solar diária média, do local a ser instalado. Com a informação das horas de sol média anual em Campina Grande, fornecida pelo Centro de Referências para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB), mostrada na Figura 31.

Tabela 3: Horas úteis de sol em Campina Grande.

Localidades próximas																					
Latitude: 7,21° S																					
Longitude: 35,9° O																					
#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]													Média	Delta		
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out			Nov	Dez
<input checked="" type="checkbox"/>	Campina Grande	Campina Grande	PB	BRASIL	7,201° S	35,849° O	5,7	5,55	5,67	5,77	5,23	4,63	4,06	4,16	4,90	5,49	5,75	5,99	5,76	5,25	1,93

Fonte: www.cresesb.cepel.br

Com isso, tem-se a informação que a cidade de Campina Grande fornece uma média diária de 5,25 horas de sol úteis. Portanto:

$$Potencia = 3960 \div 5.25 = 754.3 W$$

A potência calculada para o sistema ideal seria 754.3W, ou seja retirando as perdas, porém sabe-se que existem as perdas como visto anteriormente e elas precisam ser compensadas.

- Perdas inversor de frequência: 4%
- Perdas no controlador de carga: 3%
- Perdas por temperatura: 10.582%

A potência mínima do sistema a ser instalada para suprir a carga:

$$Potencia = \frac{754.3}{0.8242} = 915.2 W$$

Como as placas disponíveis são de 260W:

$$Numero\ de\ placas = 915.2 \div 260 = 3.52$$

Já que não é possível usar um número fracionado de placas, para suprir a carga serão utilizados quatro módulos fotovoltaicos:

$$Potencia\ do\ sistema = 260 \times 4 = 1040 W$$

$$Potencia\ real\ do\ sistema = 1040 \times 0.8242 = 857.17 W$$

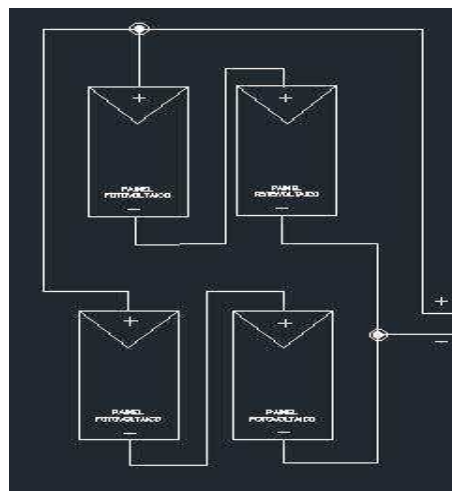
Após retirada das perdas o sistema tem potência de 857.17W, maior que 754.3W que é a potência a mínima necessária para suprir a carga.

Com tudo isso, estão reunidas as informações necessárias para montagem do restante do sistema de acordo a produção das placas fotovoltaicas.

3.2.7 Associação dos Painéis

Para uma associação de quatro módulos fotovoltaicos, 6.6m², a partir de pesquisa e estudo de mercado para ver disponibilidade de controladores de carga que suprissem, foi escolhido uma associação mista; paralelo de duas placas em série, como na Figura 32.

Figura 31: Associação dos módulos fotovoltaicos.



Fonte: Próprio autor.

Tanto a tensão quanto a corrente de saída da associação dos painéis será o dobro, portanto nos dados do *datasheet* deve-se levar em consideração para projeto o valor de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito. A partir dessas informações, mostradas na Figura 33, é possível projetar controlador de carga para o sistema fotovoltaico.

$$I = 2 \times 8.95 = 17.9 \text{ A}$$

$$V = 2 \times 37.72 = 75.44 \text{ V}$$

Figura 32: Dados datasheet do painel fotovoltaico.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS		
STC rated output (P_{mp})*	255 Wp	260 Wp
Rated voltage (V_{mp}) at STC	30.66 V	30.88 V
Rated current (I_{mp}) at STC	8.33 A	8.43 A
Open circuit voltage (V_{oc}) at STC	37.48 V	37.72 V
Short circuit current (I_{sc}) at STC	8.85 A	8.95A

Fonte: Datasheet módulo STAVE_CHSM6610 260W.

Em posse dos dados calculados acima, é obtido a potência do sistema que possibilita dimensionamento do inversor de frequência, bem como da corrente e tensão de saída das placas para escolha do controlador de carga.

3.3 Autonomia das Baterias

No sistema fotovoltaico *off-grid* se faz necessário a utilização de bancos de baterias, para armazenar a produção dos painéis e manter a carga em funcionamento, já que não há pretensão de fazer utilização da rede elétrica. Para sistemas *on-grid* não se faz necessário a utilização de baterias.

Para o projeto em questão, as baterias precisam armazenar a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos, que foi projetada para suprir de modo satisfatório a demanda diária da carga. Foi visto que os quatro módulos fornecem uma potência de 1040 W, mas ainda temos há perdas no caminho.

$$Potencia\ real = 1040 \times 0.8242 = 857.17 \text{ W}$$

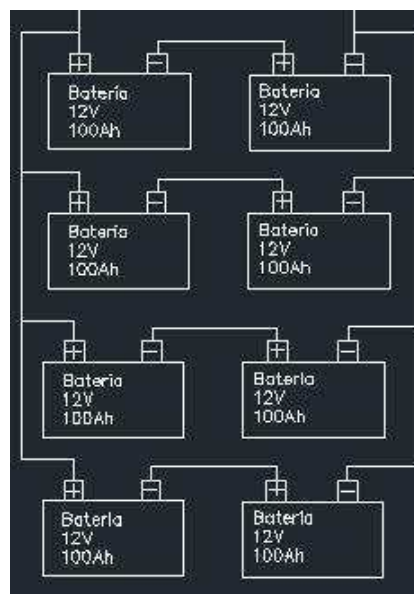
Como a produção diária do sistema fotovoltaico é de 5.25 horas úteis;

$$Energia = 857.17 \times 5,25 = 4500Wh$$

Como foi escolhido trabalhar com equipamentos em tensão de 24 V(volts), se fez necessário a utilização de baterias de 12 V associadas em série e paralelo, mostrada na Figura 34.

$$Corrente da bateria = 4500 \div 24 = 187,5 Ah$$

Figura 33: Associação das baterias.



Fonte: Próprio autor.

Para fazer o armazenamento da produção do sistema fotovoltaico as baterias escolhidas, tem configuração genérica e comum no mercado, com capacidade de 100 Ah (ampere hora) cada e tensão de funcionamento 12 V. Nesta configuração, obtem-se taxa de descarregamento das baterias de:

$$Td = 187,5 \div 800 = 23,43 \%$$

Portanto, a taxa de descarregamento não é alta garantindo assim uma vida útil aceitável para o conjunto de baterias.

3.3 Inversor de Frequência

Para dimensionar o inversor de frequência é preciso atentar a potência do sistema fotovoltaico, sendo o inversor de frequência capaz de fazer a inversão de toda potência nele demandada. Portanto, deve ser escolhido um com potência maior ou igual a potência real do sistema, no caso 857,17 W. Mas também, não é sensato sobredimensionar demais, recomenda-se adotar uma margem acrescida não maior que 20% da potência instalada.

Para o projeto, foi escolhido um inversor de 1000 W, já que supre as condições do sistema e é mais facilmente encontrado no mercado, e tensão de funcionamento 24 V para 220 V (tensão de funcionamento dos equipamentos).

3.4 Controlador de Carga

Em sistemas *on-grid* não se faz necessário a utilização de controlador de carga.

Para dimensionar o controlador de carga é necessário levar em consideração alguns fatores:

- Tensão de saída dos módulos fotovoltaicos.
- Corrente de saída dos módulos fotovoltaicos.
- Tensão de operação do sistema.

Como visto anteriormente, a tensão de saída dos módulos é de 75,44 V e a corrente 17,9 A (ampere) e o sistema está operando em 24 V.

Controlador de carga para satisfazer as condições de operação do sistema tem que suportar na sua entrada mais que 77,44 V e 17,9 A, portanto foi escolhido para o sistema um controlador que suporte 100 V na sua entrada e 50 A com tensão de operação do equipamento de 24 V.

3.5 Chave de Transferência

No projeto optou-se por ter a possibilidade de alterar a alimentação da carga entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica. Foi solicitado o uso de uma chave de transferência, como mostrada na Figura 35, para isso temos várias opções:

- Chave de transferência manual: Será utilizada uma chave de transferência específica para sistemas de geração extra, que permite a troca da fonte de alimentação da rede elétrica para a fonte secundária, no caso sistema fotovoltaico. Podendo fazer a troca da alimentação sem risco de as duas ficarem ligadas à carga.

Especificações:

- Tensão nominal: 220V
- Corrente nominal: 63A
- Bipolar
- DIN Curva C
- Capacidade de interrupção de corrente: 6kA

Figura 34: Chave disjuntor de transferência manual.



Fonte: Mercado Livre (Modificada).

A corrente nominal poderia ser menor, mas a presença do disjuntor do quadro de distribuição do Bloco CJ já faz a proteção do circuito de iluminação, logo não se faz tão necessária a utilização como proteção mas como chave.

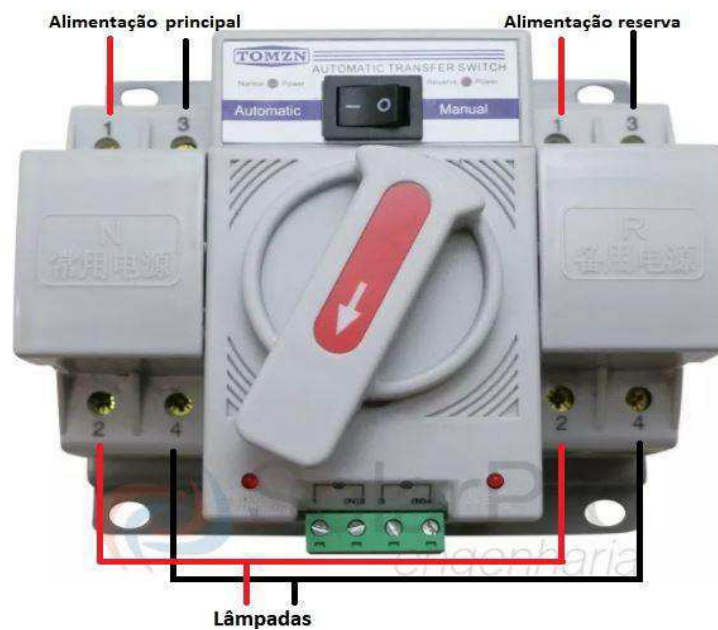
- Chave de transferência automática: a chave de transferência automática, como mostrada na Figura 36, normalmente tem as duas opções, operar manual ou deixar no modo automático. Neste modo deixamos ligado a alimentação da carga pelos módulos

fotovoltaicos, caso a tensão de alimentação baixe, ou seja, baterias descarregando, a chave identifica e automaticamente faz a transferência da alimentação para a rede elétrica.

Especificações:

- Tensão nominal: 230V
- Corrente nominal: 63A
- Bipolar
- DIN Curva C
- Capacidade de interrupção de corrente: 6kA

Figura 35: Chave disjuntor de transferência automática.



Fonte: Mercado Livre (Modificada).

Existe também a possibilidade de fazer a chave de transferência automática com a utilização de contactor, atenção para necessidade de intertravamento, e relé temporizador.

3.6 Proteção do Sistema Fotovoltaico

Para que seja feita proteção do sistema fotovoltaico de modo satisfatório, deve-se proteger os cabos e dispositivos. No lado de corrente contínua foi colocado fusível, na saída dos módulos fotovoltaicos, de 25 A que faz a proteção dos cabos de 4 mm² e do controlador de carga que suporta até 50 A e também um disjuntor DPS (dispositivo de proteção contra surtos) para proteção contra sobretensões, como descargas atmosféricas. No lado de corrente alternada um disjuntor DTM (disjuntor termomagnético), na saída do inversor, de 20 A para proteger o cabo de 2,5 mm² e DPS para proteção contra sobretensões. Assim como um disjuntor DTM no quadro de distribuição do Bloco CJ para proteção do circuito de iluminação 1,5 mm².

Especificações do DPS:

- Tensão nominal: 230 V
- Capacidade de descarga: 20 kA
- Monopolar

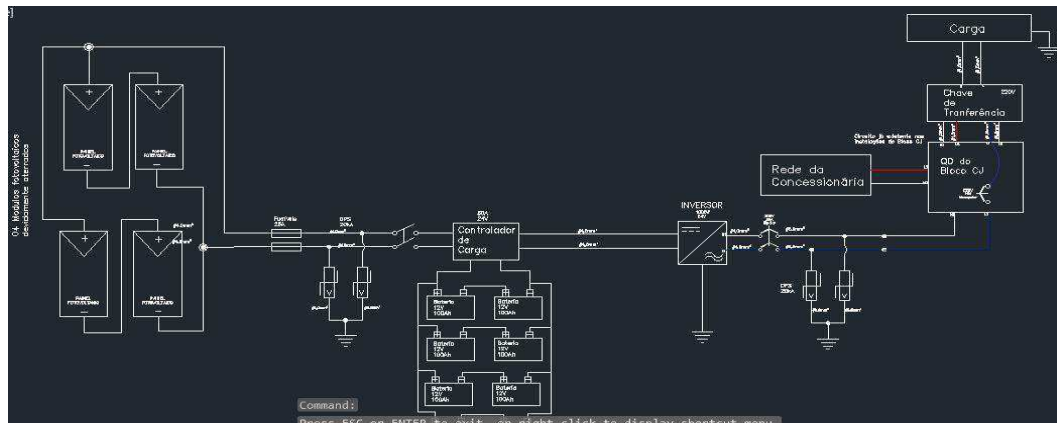
Especificações do DTM:

- Tensão nominal: 230V
- Corrente nominal: 10A
- Monopolar
- DIN Curva B
- Capacidade de interrupção de corrente: 6kA

4. O Projeto

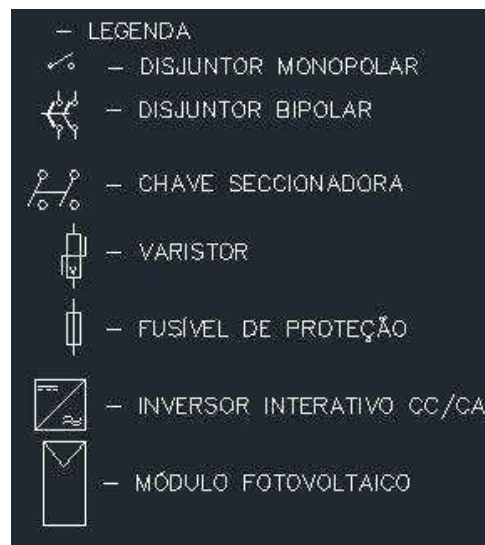
A seguir imagens referente ao projeto do sistema fotovoltaico dimensionado no trabalho de conclusão de curso:

Figura 36: Estrutura do projeto fotovoltaico no AutoCAD.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 37: Legenda do projeto fotovoltaico no AutoCAD.



Fonte: Próprio Autor.

5. Lista de Materiais

Abaixo é apresentada a lista de materiais com os equipamentos especificados acima para o projeto e preço médio de mercado para os mais expressivos.

Tabela 4: Relação de materiais sistema fotovoltaico Off-Grid.

Equipamento	Preço médio de mercado (R\$)
Controlador de carga MPPT 24V 30A	796,00
8x Bateria 12V 100A	2.392,00
Inversor de frequência 1000W 24-220V	1.155,00
Inversor de frequência 2000W 24-220V	1.500,00
Chave de transf. manual 2p 220V 63A	99,90
Chave de transf. automática 2p 230V 63A	299,90
10m Cabo solar preto com proteção UV 4mm ²	-
10m Cabo solar verde com proteção UV 4mm ²	-
10m Cabo solar verde com proteção UV 6mm ²	-
Conector (par) MC4 4mm ²	-
2x Grampo de aterramento	-
4x Abraçadeira de cabos	-
2x Jumper de aterramento	-
6x Clip de aterramento	-
Estrutura metálica para montagem	-
Fusível 25A	7,90
Porta fusível	35,00

2x DPS Classe II 20kA 230V	50,50
Disjuntor DIN 20A 250V Monopolar	8,00

Fonte: Próprio Autor.

Com a lista de materiais vemos que alguns equipamentos possuem valor expressivo no projeto. Para o sistema fotovoltaico on-grid, conectado na rede, pode-se eliminar o custo do controlador de carga, baterias e chave de transferência, economizaria no mínimo 3.287,90 reais o que tornaria o sistema mais barato e mais viável economicamente. Sem contar que a retirada desses equipamentos também reduziriam as perdas, contudo melhor eficiência na produção da energia elétrica fotovoltaica.

Referências

- [1] VILLALVA, Marcelo Gradella. *Energia Solar - Conceitos e Aplicações*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.
- [2] COSTA, Louelson A.L. de Azevedo; ALVES, Luciando Francisco Sousa; GOMES, Ruan Carlos Masques. *Micurso de Painéis Fotovoltaicos*. 2017.
- [3] PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014
- [4] JHUNJHUNWALA, Ashok. *The People's Grid*. 2017.
- [5] NASCIMENTO, C. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2014. 23 f.
- [6] CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA; CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, RJ: Especial 2014.
- [7] ASTRONOMIA & ASTROFÍSICA, Kleper S. Oliveira Filho, Maria F. Oliveira Saraiva, 2017.
- [8] <http://www.aneel.gov.br/>
- [9] [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar(3).pdf)
- [10] <http://www.cresesb.cepel.br/>
- [11] <https://pt.climate-data.org/>

Apêndice A - Links dos Equipamentos da Lista de Materiais

<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-726570539-controlador-carga-50a-mppt-paineis-solares-fangpusun-10050- JM>

<http://www.fangpusun.com/mppt-solar-charge-controller>

<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-874151561-bateria-heliar-100ah-12v-livre-de-manutenco- JM>

<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-975624095-bateria-gel-100ah-som-automotivo-estacionaria-nobreak-usada- JM>

<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-844391076-chave-transferncia-manual-127v-220v-63a-monofasica-gerador- JM>

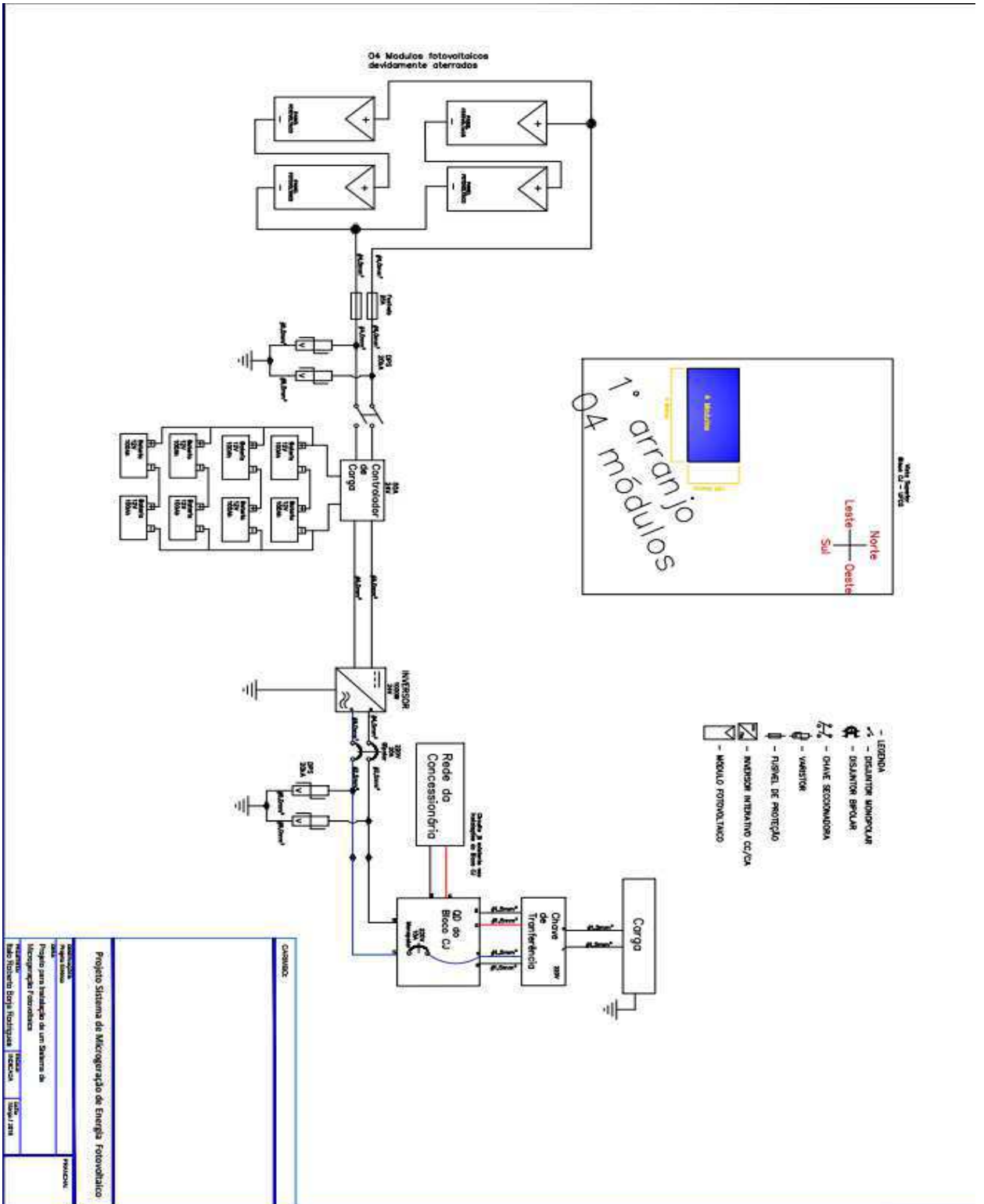
<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-858106899-chave-de-transferncia-automatica-2p-63a-230v-promoco- JM>

<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-844361958-inversor-conversor-1000w-24v-220v-onda-senoidal-pura-com-lcd- JM>

<http://ecoeletric.com.br/produtos/inversores/>

<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-967889093-inversor-conversor-senoidal-pura-2000w-24v-220v- JM>

Apêndice B - Projeto de Microgeração Fotovoltaica



Anexo A – Datasheet do Módulo Fotovoltaico

For Global Market



STAVE™ 255W~275W

5BB-Polycrystalline PV Module
CHSM6610P Series
CHSM6610P/HV Series

CHSM6610P max system voltage 1000V standard
CHSM6610P/HV max system voltage 1500V standard

Tier 1
Blomberg

No.1
PHOTON

MunichRe
Insured

DNV GL
2017 TSS
Performance

10-year Warranty for Materials and Processing
25-year Warranty for Extra Linear Power Output
(1st year 2.2%, 2nd-25th years 0.7% / year)



97.50%
350W
300W
250W
200W
150W
100W
50W

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

80.70%

KEY FEATURES

- +5W OUTPUT POSITIVE TOLERANCE**
Guaranteed 0~+5W positive tolerance ensures power output reliability.
- INNOVATIONAL 5-BUSBAR CELLS**
Reduces the cell series resistance and internal stress, decreases the risk of micro-crack and improves the module output.
- Anti PID RESISTANCE**
Excellent PID resistance at 96 hours (@85°C /85%) test, and also can be improved to meet higher standards for the particularly harsh environment.
- EXCELLENT MECHANICAL LOAD CAPABILITY**
Certified to withstand: snow load (6000 Pa) and wind load (3600 Pa).
- HIGHER RELIABILITY AND DURABILITY**
Effectively deals with harsh environments, such as sand, salt mist and ammonia resistance.
- PASSED HAIL TEST**
Certified to hail resistance: ice ball size (d=45mm) and ice ball velocity (v=30.7m/s).
- LOW-LIGHT IRRADIANCE**
With the deep textured ARC glass and cell surface texturing process, achieve the excellent performance at the haze, cloudy days and other low light conditions.

Optional: Black frame designed for the certain projects and applications (e.g. residential rooftop and so on)

COMPREHENSIVE CERTIFICATES



First solar company which passed the TUV Nord IEC/TS 62941 certification audit.

A CHNT COMPANY



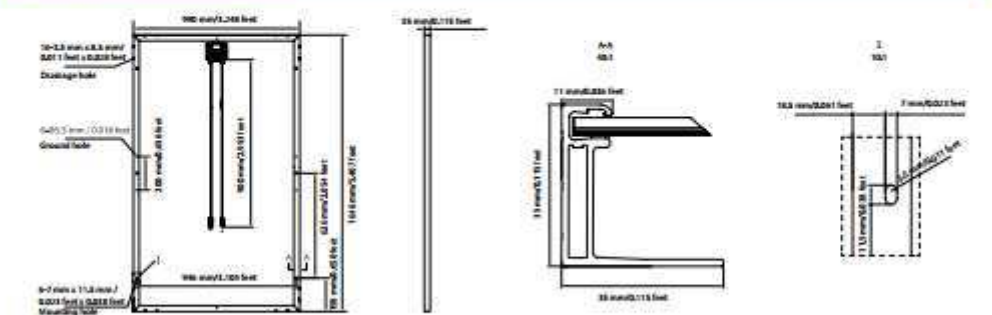
ELECTRICAL SPECIFICATIONS					
STC rated output (P_{max}) ¹	255 Wp	260 Wp	265 Wp	270 Wp	275 Wp
Rated voltage (V_{mp}) at STC	30.66 V	30.88 V	30.92 V	31.08 V	31.12 V
Rated current (I_{mp}) at STC	8.33 A	8.43 A	8.58 A	8.70 A	8.85 A
Open circuit voltage (V_{oc}) at STC	37.48 V	37.72 V	37.87 V	38.00 V	38.45 V
Short circuit current (I_{sc}) at STC	8.85 A	8.95A	9.18 A	9.45 A	9.52 A
Module efficiency	15.6%	15.9%	16.2%	16.5%	16.9%
Rated output (P_{mp}) at NOCT	191.3 Wp	195.0 Wp	198.8 Wp	202.5 Wp	206.3 Wp
Rated voltage (V_{mp}) at NOCT	27.73 V	27.94 V	27.98 V	28.12 V	28.15 V
Rated current (I_{mp}) at NOCT	6.90 A	6.98 A	7.10 A	7.20 A	7.33 A
Open circuit voltage (V_{oc}) at NOCT	34.24 V	34.46 V	34.60 V	34.71 V	35.13 V
Short circuit current (I_{sc}) at NOCT	7.45 A	7.54 A	7.73 A	7.96 A	8.02 A
Temperature coefficient (P_{mp})			-0.407%/°C		
Temperature coefficient (I_{sc})			+0.049%/°C		
Temperature coefficient (V_{oc})			-0.310%/°C		
Normal operating cell temperature (NOCT)			43±2°C		
Maximum system voltage (IEC/UL)			1000V _{ac} or 1500V _{ac}		
Number of diodes			3		
Junction box IP rating			IP 67		
Maximum series fuse rating			15 A		

¹ Measurement tolerance: ±1-3%
 STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, AM=1.5
 NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient Temperature 20°C, AM=1.5, Wind Speed 1m/s

MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Outer dimensions (L x W x H)	1648 x 990 x 35 mm 64.88 x 38.98 x 1.38 in
Frame technology	Aluminum, silver / black anodized
Module composition	Glass / EVA / Backsheet (white)
Front glass thickness	3.2 mm / 0.13 in
± Cable length (IEC/UL)	900 mm / 35.43 in
Cable diameter (IEC/UL)	4 mm ² / 12 AWG
± Maximum mechanical test load	6000 Pa
Fire performance (IEC/UL)	Class C (IEC) or Type 1 (UL)
Connector type (IEC/UL)	MC4 compatible

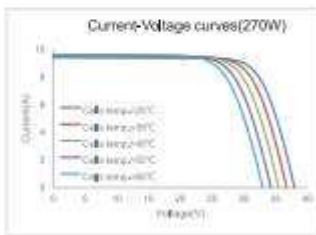
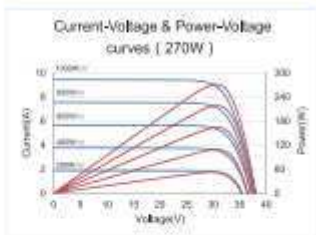
[±] Option: 900(+)/900(-) mm or 1000 mm for defined projects in advance.
[±] Refer to Astronergy crystalline installation manual or contact technical department.
 Maximum Mechanical Test Load=1.5*Maximum Mechanical Design Load.

MODULE DIMENSION DETAILS



© Chint Solar (Zhejiang) Co., Ltd. Reserves the right of final interpretation, please contact our company to use the latest version for contract.

CURVE



PACKING SPECIFICATIONS

± Weight (module only)	18.3 kg / 40.34 lbs
± Packing unit	31 pcs / box
Weight of packing unit (for 40'HQ container)	616 kg / 1358 lbs
Number of modules per 40'HQ container	868 pcs

[±] Tolerance: ±1.0kg
[±] Subject to sales contract.