



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

# Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para Alimentar um Sistema de Produção de Hidrogênio Eletrolítico

**Melyna Candice Silva Simões**

Campina Grande, Paraíba

Setembro/2017

Melyna Candice Silva Simões

Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para  
Alimentar um Sistema de Produção de Hidrogênio  
Eletrolítico

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

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.  
Orientadora

Campina Grande, Paraíba  
Setembro/2017

Melyna Candice Silva Simões

Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico para  
Alimentar um Sistema de Produção de Hidrogênio  
Eletrolítico

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

Aprovado em        /        /

Professor Célio Anésio da Silva, D. Sc.  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientadora

Campina Grande, Paraíba  
Setembro/2017

Dedico este trabalho à minha mãe, minhas irmãs e minha avó Regina (*in memoriam*), exemplos de força, coragem, humildade e perseverança.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças durante todo o período universitário, não me deixando esmorecer, desanimar ou até mesmo desistir.

Agradeço à minha mãe Socorro, heroína que me deu todo amor, apoio e incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. Às minhas irmãs, Maetê e Morganna, que junto com minha mãe, contribuíram na minha criação. Ao meu pai, Maciel, que tem me dado totais condições de estudos e me apoiou durante esta caminhada. E a Junior que sempre esteve ao meu lado nesta reta final me auxiliando, sendo sempre compreensivo e paciente.

À Universidade Federal de Campina Grande, ao seu corpo docente e à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica, em especial Adail e Tchai, que propiciaram meu desenvolvimento pessoal e profissional, sendo sempre prestativos.

À minha orientadora, professora Núbia Silva Dantas Brito, por me proporcionar grandes oportunidades de aprendizado, pela paciência, auxílio e por todas as correções, desafios e incentivos realizados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Célio Anésio da Silva, por participar deste processo de conclusão de curso, mostrando-se sempre solícito.

Agradeço aos meus colegas do Grupo de Sistemas de Potência e em especial: Hotoniones, Caio, Marcus e Darlanny. Agradeço também, a Thiago Lira e Renata Guedes.

Agradecimento especial aos grandes amigos que a UFCG me propiciou, Ramayana, Gleuber, Sabryna, Cinthya, que pelas adversidades da vida não puderam estar comigo nesta reta final, mas foram mais que essencial, foram anjos nesta caminhada; como também aqueles que estão comigo nesta conclusão, Laysa. Agradeço por todas madrugadas de estudo, tempos de convivência e companheirismo.

Agradeço a todos os amigos que fizeram parte desta conquista, desde os amigos mais antigos aos mais novos, mas não menos importantes. Enfim, a todos que sempre estiveram comigo me auxiliando e me ajudando.

Este trabalho não seria possível sem a colaboração de todos vocês. Muito obrigada!

*“Se caíste, ergue-te e anda. (...)  
Regressa aos teus deveres e esforça-te a cumpri-los. (...)  
O futuro te espera... Segue e confia em Deus”*

Chico Xavier.

# Resumo

Este trabalho apresenta o estudo e dimensionamento de um sistema de captação de energia solar que está sendo instalado no Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFREN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O sistema é do tipo fotovoltaico isolado (SFVI) e tem como finalidade, alimentar um sistema de produção de hidrogênio eletrolítico. O trabalho avalia o uso de um SFVI como fonte geradora de eletricidade, haja vista ser um dos insumos principais do processo de produção de hidrogênio eletrolítico e realiza ainda, o levantamento dos seus custos.

**Palavras-chave:** Sistema Fotovoltaico, Produção de Hidrogênio, Eletrólise, Instalações Elétricas.



# Abstract

This work presents the study and design of a solar energy capture system that is being installed in Laboratory of Renewable Sources of Energy (LABFREN) of the Federal University of Campina Grande (UFCG). The system is kind of the isolated photovoltaic type (SFVI) and it has purpose to feed a production system of electrolytic hydrogen. The project evaluates the use of one SFVI as a source of electricity, given that this is one of the main inputs of the electrolytic hydrogen production process, and also to conduct a survey costs.

**Keywords:** Photovoltaic System, Hydrogen Production, Electrolysis, Electrical Installations.

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Componentes da energia solar. ....	17
Figura 2.2 - SFVI típico.....	19
Figura 2.3 -Exemplo de uma curva característica de um módulo fotovoltaico. ....	21
Figura 2.4 - Processo de produção de hidrogênio via eletrólise da água. ....	26
Figura 3.1 - Diagrama esquemático do sistema de produção de hidrogênio do LABFREN.....	27
Figura 3.2 - Atuação do inversor/carregador disposto no LABFREN. ....	29
Figura 3.3 - Configuração do SFVI do LABFREN.....	29
Figura 3.4 - Irradiação solar média mensal da cidade de Campina Grande.....	31
Figura 3.5 - Estacionamento Solar. ....	33
Figura 3.6 - Associação dos módulos fotovoltaicos. ....	36
Figura 3.7 - Banco de Baterias - Caso 1: tensão igual a 36 V.....	38
Figura 3.8 - Banco de Baterias - Caso 2: tensão igual a 48 V.....	38
Figura 3.9 - Banco de Baterias - Caso 3: tensão igual a 60 V.....	39
Figura 3.10 - Esquema de conexão do controlador de carga proposto. ....	40
Figura 3.11 - Conexão dos inversores ao demais equipamentos do SFV. ....	42
Figura 3.12 - Diagrama unifilar do sistema de proteção.....	44

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Irradiação solar diária média mensal da UFCG em (kWh/m <sup>2</sup> dia). ....	30
Tabela 3.2 - Carga do Sistema de Produção de Hidrogênio (LABFREN).....	33
Tabela 3.3 - Orçamento do SFV LABFREN.....	47

# Lista de Abreviaturas e Siglas

Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AC	Corrente alternada
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
CT-INFRA	Fundo Setorial de Infraestrutura
DC	Corrente contínua
DPS	Dispositivos de proteção contra surtos
HS	Horas de sol pleno
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços
LABFREN	Laboratório de Fontes de Energias Renováveis
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
NBR5410	Norma Técnica ABNT - Instalações Elétricas de Baixa Tensão
PEM	<i>Proton exchange membrane</i>
RTS	Regime de Tributação
SFV	Sistema fotovoltaico
SFVC	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede
SFVH	Sistemas híbridos
SFVI	Sistemas fotovoltaicos isolados da rede
SPDA	Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

# Sumário

Agradecimentos.....	5
Resumo .....	8
Abstract .....	9
Lista de Figuras.....	10
Lista de Tabelas.....	11
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	12
Sumário .....	13
1 Introdução .....	15
2 Fundamentação Teórica .....	17
2.1 Energia Solar .....	17
2.2 Energia Solar Fotovoltaica .....	18
2.2.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI) .....	19
2.2.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados (SFVC) .....	20
2.2.3 Sistemas Híbridos (SFVH) .....	20
2.3 Componentes de um SFV.....	20
2.3.1 Módulo Fotovoltaico .....	21
2.3.2 Bateria.....	22
2.3.3 Controlador de Carga .....	23
2.3.4 Inversor .....	24
2.3.5 Dispositivos de Proteção.....	24
2.4 Dimensionamento de um SFV.....	25
2.5 Produção de Hidrogênio.....	25
3 Projeto de um SFV para o LABFREN.....	27
3.1 Estudo da Carga .....	27
3.2 Configuração do SFV.....	28
3.3 Levantamento dos Recursos Solares .....	30
3.4 Local de Instalação dos Painéis .....	32
3.5 Levantamento do Consumo de Energia Elétrica .....	33
3.6 Dimensionamento do SFV .....	34
3.6.1 Painéis Fotovoltaicos.....	34
3.6.2 Banco de Baterias.....	36
3.6.3 Controlador de Carga .....	39
3.6.4 Inversor .....	41
3.6.5 Sistema de Proteção e Cabeamento .....	42

3.6.6 Levantamento dos Custos .....	45
4 Conclusões.....	48
Referências Bibliográficas .....	50
Apêndice - Especificações dos Cabos.....	53

# 1 Introdução

O eminente esgotamento das fontes energéticas fósseis associado à crescente emissão de poluentes tem demandando a busca pelo uso de outras fontes energia. Neste cenário, o hidrogênio como vetor energético tem se destacado, devido a sua abundância no universo como fonte de energia renovável, inesgotável e não poluente (MEDEIROS & BOTTON, 2015). Devido à sua capacidade de se combinar quimicamente com a maioria dos elementos, o hidrogênio tem sido usado como um produto químico industrial em várias aplicações. Atualmente, uma linha de pesquisa de destaque explora o fato do hidrogênio poder produzir eletricidade e a eletricidade poder produzir hidrogênio, criando um ciclo de energia que é renovável e inofensivo para o meio ambiente (AIR PRODUCTS, 2017).

Neste contexto, a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), por meio da Chamada CT-INFRA/2007 aprovou a construção do Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFREN), no qual estão sendo desenvolvidas várias pesquisas, dentre elas, a produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água. Mesmo sendo um processo conhecido há aproximadamente dois séculos, demonstrada por Faraday em 1820, a eletrólise da água representa apenas 4% da produção mundial de hidrogênio. Suas principais vantagens são a alta pureza do hidrogênio obtido e simplicidade do processo (VIOLA, 2014).

A obtenção de hidrogênio via eletrólise da água requer uma fonte geradora de energia elétrica e para tornar a produção ainda mais sustentável, fontes renováveis, em especial, os sistemas fotovoltaicos têm sido utilizados. Todavia, a energia elétrica gerada por um sistema fotovoltaico tem comportamento intermitente e imprevisível, já que depende de vários fatores, tais como: variações dia/noite, condições climáticas, etc. Assim, para se ter o aproveitamento máximo da energia solar fornecida por um sistema fotovoltaico, o dimensionamento adequado dos equipamentos que o compõe deve ser realizado.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) insere-se nesse contexto, tendo como objetivos o estudo do sistema de produção de hidrogênio que está sendo concebido no LABFREN e a elaboração do projeto e dimensionamento do sistema fotovoltaico para supri-lo.

O relatório foi estruturado em 4 (quatro) seções, incluindo esta seção introdutória, conforme a seguir. Na seção 2 apresenta-se uma breve introdução sobre Energia Solar Fotovoltaica, componentes e dimensionamento de um sistema fotovoltaico e produção de hidrogênio. A metodologia desenvolvida é apresentada na seção 3 e logo em seguida, são apresentados e analisados os resultados obtidos. O trabalho é finalizado com as conclusões e referências bibliográficas.



## 2 Fundamentação Teórica

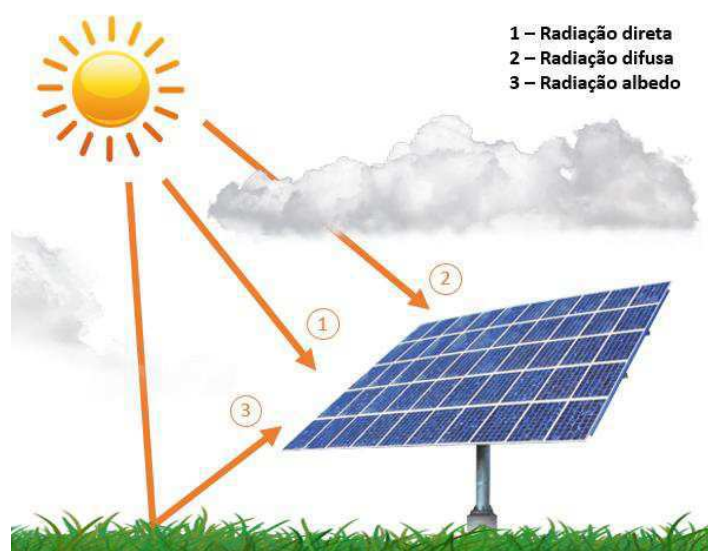
Apresenta-se nesta seção um resumo dos temas mais importantes para o desenvolvimento deste TCC.

### 2.1 Energia Solar

A energia solar provém da radiação emitida pelo Sol em direção à Terra, sendo composta das seguintes componentes (Figura 2.1) (CRESESB-CEPEL,2014):

- Radiação Direta: constituída por todos os raios que incidem diretamente no receptor em linha reta com o Sol;
- Radiação Difusa: luz solar recebida indiretamente. É proveniente de desvio e espalhamento nas nuvens, nevoeiro e outros obstáculos presentes na atmosfera.
- Radiação de Albedo: parte da radiação recebida pela superfície terrestre é reenviada para o espaço sob a forma de energia refletida.

Figura 2.1 - Componentes da energia solar.



Fonte: Autoria Própria.

A radiação solar que de fato incide em uma superfície incidente depende de: i) fatores astronômicos referenciados pela latitude e pela época do ano, em função do movimento de translação da Terra; ii) do estado de nebulosidade do local.

O termo radiação solar é usado de forma genérica e pode ser referenciado em termos de: i) fluxo de potência, ou seja, potência solar (W), denominado de “irradiância solar”; ii) energia por unidade de área, ou seja, nível de irradiação que atinge um plano de 1 m<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>), denominada: “irradiação solar”.

O processo de produção de energia elétrica a partir da energia solar pode se dar de duas formas:

- Heliotérmico: a irradiação solar é convertida inicialmente, em energia térmica e posteriormente, em energia elétrica;
- Fotovoltaico: a irradiação solar é convertida diretamente em energia elétrica, através do uso de células fotovoltaicas. Este é o foco deste TCC.

## 2.2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade, que ocorre devido ao chamado “efeito fotovoltaico”, que é o estabelecimento de uma tensão elétrica em um material semicondutor quando exposto à luz visível, fenômeno descoberto por Edmond Becquerel, em 1839. O sistema responsável por essa conversão é denominado de “célula fotovoltaica”. Para aumentar os níveis de tensão e corrente, várias células fotovoltaicas são conectadas em associações série-paralelo, constituindo assim o conjunto denominado de “módulo fotovoltaico”. A associação de vários módulos resulta no “painel fotovoltaico” (CRESESB-CEPEL, 2014), que constitui a unidade fundamental de um sistema fotovoltaico.

Embora abundante, a energia solar ainda é pouco utilizada para a produção de energia elétrica quando comparada com as fontes tradicionais de geração de energia elétrica. Este cenário, entretanto, vem mudando e segundo a Associação Brasileira de Energia

Solar Fotovoltaica (Absolar), a geração de energia solar fotovoltaica no Brasil atingirá o patamar de 1.000 megawatts (MW) de capacidade instalada até o fim do ano de 2017. O número representa um crescimento de 325% em relação à capacidade atual de 235 MW, suficiente para abastecer cerca de 60 mil residências, com até cinco pessoas em cada uma (O GLOBO, 2017).

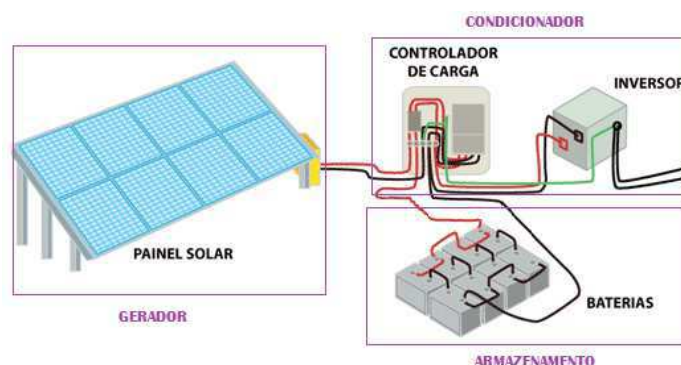
Os sistemas fotovoltaicos (SFV) podem ser classificados em três categorias conforme a seguir.

### 2.2.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI)

Também denominados de sistemas *off-grid*, caracterizam-se por não se conectarem à rede elétrica e são geralmente, construídos com um propósito local e específico. Tais sistemas têm sido aplicados em locais remotos, sendo a energia produzida armazenada em baterias que garantem o abastecimento em períodos sem sol. Os SFVI visam atender a consumo de energia elétrica específico, de modo que é fundamental a estimativa da demanda energética com precisão, para que o sistema produza a energia requerida (CRESESB-CEPEL, 2014).

Os SFVI típicos são constituídos pelos blocos gerador, condicionamento de potência e armazenamento, conforme mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 - SFVI típico.



Fonte: Adaptado de PORTAL ELETRICISTA (2017).

O bloco gerador contém os módulos fotovoltaicos, o cabeamento elétrico que os interliga e a estrutura de suporte. O bloco de condicionamento de potência contém o

inversor, controlador de carga, dispositivos de proteção, supervisão e controle. O bloco de armazenamento é constituído pelos acumuladores elétricos e/ou outras formas de armazenamento.

Nos SFVI é imprescindível o uso de dispositivos de armazenamento de energia para atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente. No mercado, existem diversas formas de armazenamento de energia, sendo a bateria eletroquímica o dispositivo mais utilizado.

### 2.2.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados (SFVC)

Também denominados de sistemas *on-grid* ou sistemas *grid-tie*, operam em conjunto com a rede elétrica da distribuidora de energia, substituindo ou complementando a energia elétrica convencional disponível na rede. Diferentemente do sistema anterior, o SFVC é empregado em locais já atendidos por energia elétrica e seu objetivo é gerar eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou até mesmo, eliminar o consumo de energia da rede elétrica (CRESESB-CEPEL, 2014).

Esses sistemas dispensam o uso de acumuladores, pois a energia produzida pode ser consumida diretamente pela carga ou injetada diretamente na rede elétrica convencional, para ser consumida pelas unidades conectadas ao sistema de distribuição.

### 2.2.3 Sistemas Híbridos (SFVH)

Caracterizam-se por disporem de mais de uma forma de geração de energia elétrica. Pode-se apresentar sob várias configurações e requer algum tipo de controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação do sistema.

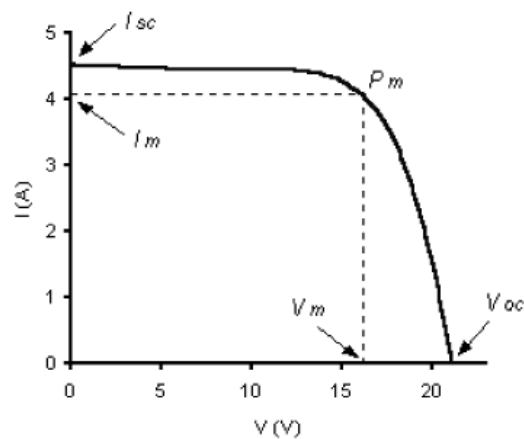
## 2.3 Componentes de um SFV

Apresenta-se a seguir um resumo dos principais componentes de um SFV típico.

### 2.3.1 Módulo Fotovoltaico

A unidade básica de um SFV é a célula fotovoltaica. Quando nela incide uma irradiação de  $1 \text{ kW/m}^2$ , uma célula típica tem a capacidade de produzir uma potência de  $1 \text{ W}$ , o que corresponde a uma tensão de  $0,5 \text{ V}$  e uma corrente contínua de  $2 \text{ A}$ . O seu desempenho é representado graficamente por uma curva característica ( $V \times I$ ), conforme mostrado na Figura 2.3, obtida para uma dada condição de irradiação, temperatura e área.

Figura 2.3 - Exemplo de uma curva característica de um módulo fotovoltaico.



Fonte: GARCÍA *et al.* (2002).

As características elétricas de um módulo fotovoltaico são representadas pelos parâmetros a seguir:

- Tensão Nominal: tensão padrão para a qual o módulo foi projetado;
- Tensão de Máxima Potência ( $V_m$ ): tensão máxima que o módulo pode fornecer, em seu ponto de máxima potência;
- Tensão em Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ): tensão máxima que o módulo fornece em seus terminais, sem a presença de uma carga (em vazio);
- Corrente em Máxima Potência ( $I_m$ ): corrente máxima que o módulo fotovoltaico pode fornecer a uma carga;
- Corrente de Curto-circuito ( $I_{sc}$ ): corrente máxima que o módulo fotovoltaico fornece, quando seus terminais estão em curto circuito. A corrente em curto circuito, geralmente é 5% superior à corrente máxima.;

- Potência Máxima ( $P_m$ ): produto da corrente elétrica gerada por um módulo variando de zero ao  $I_{sc}$  e a tensão entre os terminais variando de zero até  $V_{oc}$ , sob diferentes condições de irradiância e temperatura.

Algumas informações importantes a respeito dos módulos fotovoltaicos são apresentadas a seguir.

- Os fatores que mais influenciam nas características elétricas de um módulo são a intensidade luminosa e a temperatura das células;
- A corrente gerada nos módulos aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa;
- Aumento da temperatura na célula resulta em redução da eficiência do módulo;
- Para obter as potências comerciais, os fabricantes de módulos fotovoltaicos conectam as células fotovoltaicas entre si;
- O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser série e/ou paralelo, depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada;
- Na associação em série, chamada de “fileira” ou *string*, os módulos terão suas tensões adicionadas e a corrente será a média das correntes de cada módulo, não sendo aconselhável a associação de módulos de capacidades distintas;
- A associação em paralelo resulta em aumento da corrente, que será a soma das correntes individuais de cada módulo e a tensão será a média das tensões geradas.

### 2.3.2 Bateria

Também denominada de acumulador de carga, é o elemento responsável pelo armazenamento da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos. Nos SFVI, estes dispositivos devem ser usados para atender a demanda nos períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente. Baterias especificamente projetadas para SFV são, usualmente, mais caras, mas têm uma vida útil maior.

As tensões nominais normalmente utilizadas são: 12 V<sub>DC</sub>, 24 V<sub>DC</sub>, 48 V<sub>DC</sub> e 60 V<sub>DC</sub>. As tensões máximas e mínimas estão associadas aos equipamentos que serão conectados na saída da bateria e, normalmente, são da ordem de 10% acima e abaixo, respectivamente, da tensão nominal.

Nos SFV, a bateria recebe energia dos painéis, e posteriormente “entra” em processo de descarga quando cessa o fornecimento de energia dos módulos fotovoltaicos. Esse processo ocorre lentamente (e linearmente), porém, quando o valor da tensão final é ultrapassado, a tensão cai abruptamente e a bateria não consegue suprir a carga com a energia requerida.

A capacidade de uma bateria é definida como sendo a quantidade de eletricidade em ampères-hora (Ah<sup>1</sup>), representada pelo resultado da corrente (A) e o tempo de descarga em (h) até a tensão final de descarga ser alcançada, ou seja, é a taxa de corrente que uma bateria fornece durante um período de uma hora de utilização.

### 2.3.3 Controlador de Carga

O controlador de carga é o equipamento responsável por proteger a bateria (ou banco de baterias) contra cargas e descargas excessivas, reduzindo assim seu desgaste e aumentando a sua vida útil. Sua operação baseia-se no monitoramento da tensão da bateria e é instalado entre os módulos fotovoltaicos e as baterias.

O controlador de carga tem como funções: i) desconectar o gerador fotovoltaico quando a bateria atingir plena carga; ii) interromper o fornecimento de energia quando o estado de carga da bateria atingir um nível mínimo de segurança.

Os controladores de carga atualmente disponíveis no mercado utilizam a técnica de rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico, chamado de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) e desempenham um papel importante nos SFV,

---

<sup>1</sup>Um ampère-hora (Ah), consiste numa unidade prática descarga elétrica e pode ser definida como sendo igual à carga que percorre, durante uma hora, um condutor com intensidade de um ampere. Essa unidade é normalmente usada em medidas relacionado com processos eletroquímicos, como por exemplo, em baterias elétricas e indica a duração de uma bateria.

pois: i) maximizam a potência de um sistema para um determinado conjunto de condições; ii) maximizam a eficiência global do sistema; iii) garantem que os painéis operem no ponto de máxima potência, mesmo que sofram intermitências na geração, devido a mudança de intensidade de radiação solar, temperatura ou mudança de carga.

### 2.3.4 Inversor

Equipamento capaz de converter corrente contínua (DC) em corrente alternada (AC), sendo utilizado quando as cargas forem específicas de circuitos em corrente alternada. A corrente contínua pode ser proveniente de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos.

O inversor, assim como os demais equipamentos elétricos, possui características elétricas, como: potência, tensão de operação (DC/AC), modelo monofásico ou trifásico, eficiência, forma de onda. A potência do inversor deve ser a potência da carga máxima adicionada de uma porcentagem de segurança.

### 2.3.5 Dispositivos de Proteção

Sob determinadas condições de operação, uma célula fotovoltaica pode aquecer tanto, que o material semicondutor pode ser danificado pelo calor. Em tais casos, surgem os chamados “pontos-quentes” (*hot-spots*), que danificam o módulo permanentemente. Para evitar tais problemas, existem diversas alternativas, tais como:

- Diodos de derivação ou diodo de *by-pass*: são conectados de maneira inversamente polarizada em relação a um conjunto de células;
- Diodos de bloqueio, utilizados nas *strings* de módulos em série, para evitar que um módulo sombreado transforme a *string* inteira em uma carga;
- Caixas de conexões e terminais, que reduzem simultaneamente, a perda de energia e o risco de dano irreversível das células afetadas, oferecendo um caminho alternativo para a corrente e, assim, limita a dissipação de potência no conjunto de células sombreadas;



- Quadros de proteção e isolamento formados por dispositivos elétricos que promovem a proteção dos SFV, compostos pelos dispositivos de proteção contra surtos (DPS), chaves seccionadoras, fusíveis e/ou disjuntores.

## 2.4 Dimensionamento de um SFV

O dimensionamento de um SFV é o processo de ajuste entre a energia radiante recebida do sol pelos módulos fotovoltaicos e a necessidade de suprir a demanda de energia elétrica. O processo de dimensionamento de um SFV pode ser resumido nas etapas enumeradas a seguir.

1. Levantamento do recurso solar disponível no local da aplicação;
2. Definição da localização e configuração do sistema;
3. Levantamento de demanda e consumo de energia elétrica;
4. Dimensionamento da geração fotovoltaica;
5. Dimensionamento do sistema de armazenamento;
6. Dimensionamento do controlador de carga;
7. Dimensionamento do inversor;
8. Dimensionamento do sistema de proteção e cabeamento.

Além disso, é necessário o levantamento dos custos do investimento, ou seja, custos relativos à compra dos equipamentos, execução, aquisição de terras, etc.

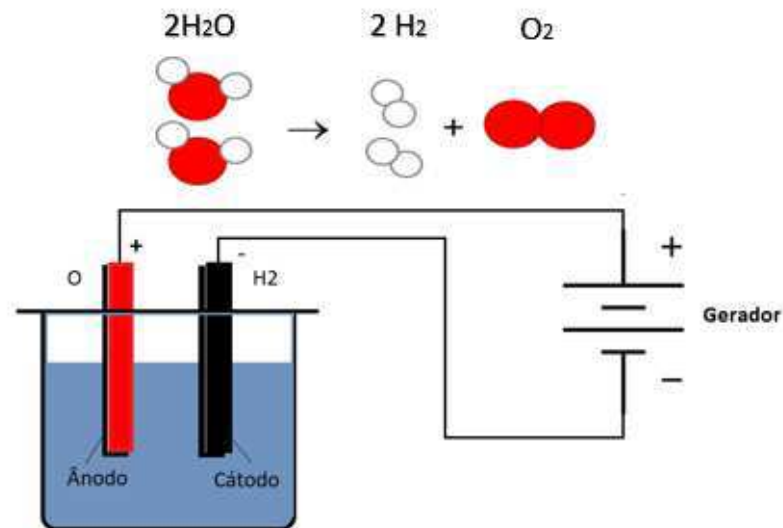
## 2.5 Produção de Hidrogênio

Atualmente, existem diversas tecnologias para a produção de hidrogênio, dentre as quais, destaca-se aqui a eletrólise aquosa. Resumidamente, eletrólise pode ser definida como um processo químico não espontâneo provocado pela corrente elétrica. A eletrólise aquosa, também denominada de “eletrólise da água”, é um processo de “quebra” da molécula da água, que ocorre por meio de reações químicas não

espontâneas, desencadeadas a partir da inserção de uma corrente elétrica por uma fonte externa de energia.

O eletrolisador é o dispositivo onde ocorre a reação eletroquímica de decomposição da água, ou seja, onde se produz o hidrogênio e o oxigênio, conforme a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Processo de produção de hidrogênio via eletrólise da água.



Fonte: Autoria própria.

Segundo LONGO (2008), uma tensão elétrica de 1,24 V entre os eletrodos imersos em uma solução aquosa é a tensão necessária para separar os átomos de oxigênio e de hidrogênio a uma temperatura de 25°C e uma pressão de 1,03 kg/cm<sup>2</sup>. A carga elétrica quebra a ligação química entre os átomos de hidrogênio e o de oxigênio e separa os componentes atômicos, criando partículas carregadas (íons). Os íons se formam em dois polos: o ânodo, polarizado positivamente, no qual o oxigênio se concentra e o cátodo, polarizado negativamente, que o hidrogênio se concentra (MEDEIROS & BOTTON, 2015).

Pode-se então concluir que o custo da eletricidade afeta diretamente o custo da produção de hidrogênio (SØRENSEN, 2005).

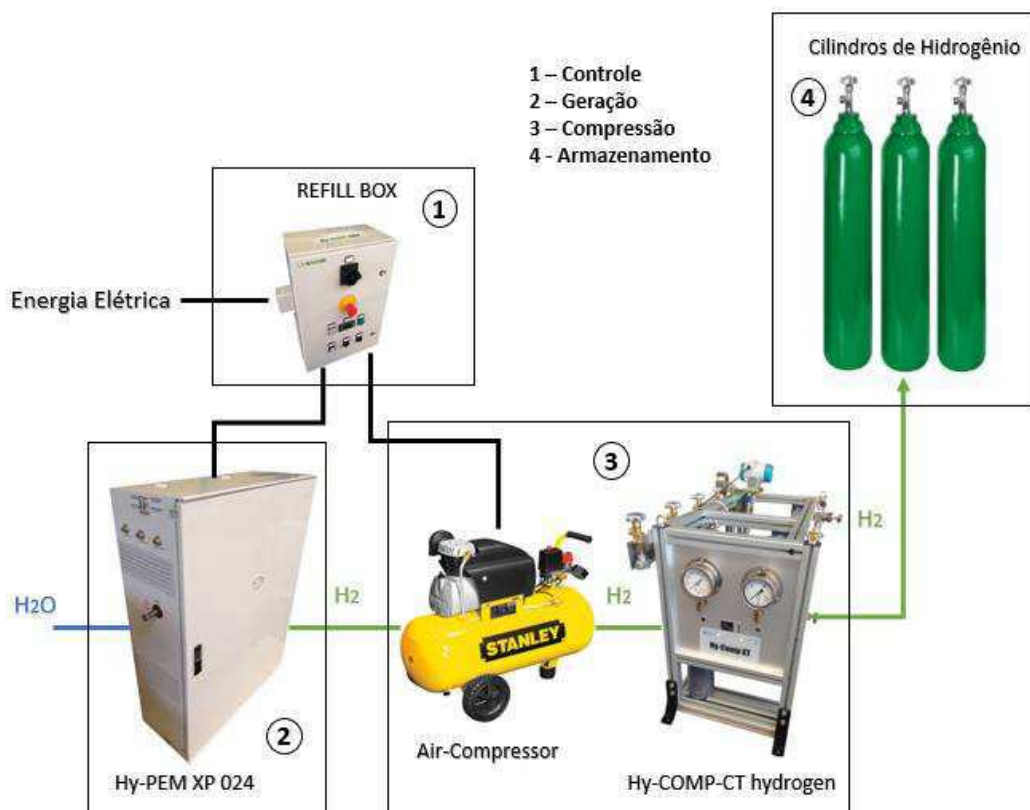
### 3 Projeto de um SFV para o LABFREN

Apresenta-se nesta seção a metodologia adotada na elaboração do projeto do SFV para o LABFREN.

#### 3.1 Estudo da Carga

A primeira etapa a ser realizada na elaboração de um projeto de um SFV é o estudo da carga que será suprida, que neste caso, será o sistema de produção de hidrogênio que está sendo construído no LABFREN, cujo diagrama esquemático é apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Diagrama esquemático do sistema de produção de hidrogênio do LABFREN.



Fonte: Autoria própria.

O sistema de produção de hidrogênio será constituído de:

- Gerador de hidrogênio modelo Hy-PEM XP 024;
- Um sistema de compressão de hidrogênio modelo Hy-COMP XT;
- Uma caixa de controle automático modelo Hy-Refill BOX.

O gerador de hidrogênio produzirá hidrogênio puro (e oxigênio como subproduto) pela eletrólise da água. O sistema de compressão eleva a pressão do hidrogênio produzido, o que permite armazenar o hidrogênio de forma segura.

Segundo o fabricante H2planet, o eletrolisador adquirido pelo LABFREN é do tipo de membrana PEM, com capacidade de produção 0,24 m<sup>3</sup>/h, utilizado principalmente para a produção de hidrogênio com energia proveniente de painéis fotovoltaicos. A potência consumida fixa é 2300 W, porém, no momento de partida, demanda uma potência maior de 3500 W.

O hidrogênio produzido será armazenado em cilindros, contendo gás comprimido e, portanto, requer compressor e vaso de pressão, logo possui o sistema de compressão que consome 1600 W de potência.

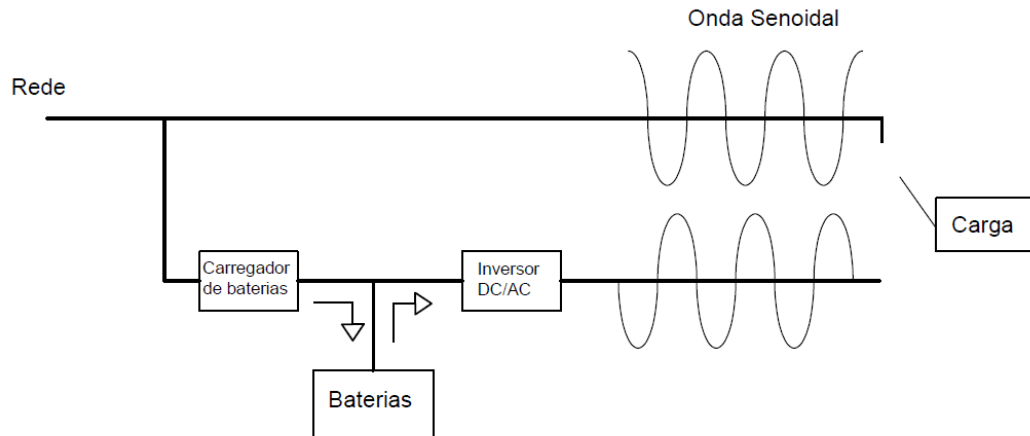
O sistema de produção de hidrogênio do LABFREN, opera com tensão de 220-240 V<sub>AC</sub> monofásico, de acordo com as especificações técnicas fornecidas pelo seu fabricante.

## 3.2 Configuração do SFV

Além dos equipamentos referentes ao sistema de produção de hidrogênio, o laboratório já dispõe de alguns equipamentos, tais como: módulos fotovoltaicos de silício policristalino, caixa de combinação, controlador de cargas, inversor/carregador. Após análise dos equipamentos, decidiu-se pela implantação de um SFVI, devido as características elétricas do inversor/carregador.

O inversor/carregador opera como retificador (AC/DC) e inversor (AC/DC), conforme a Figura 3.2. Para sua devida utilização inversora faz-se necessário a conexão de baterias, configurando o sistema fotovoltaico como isolado.

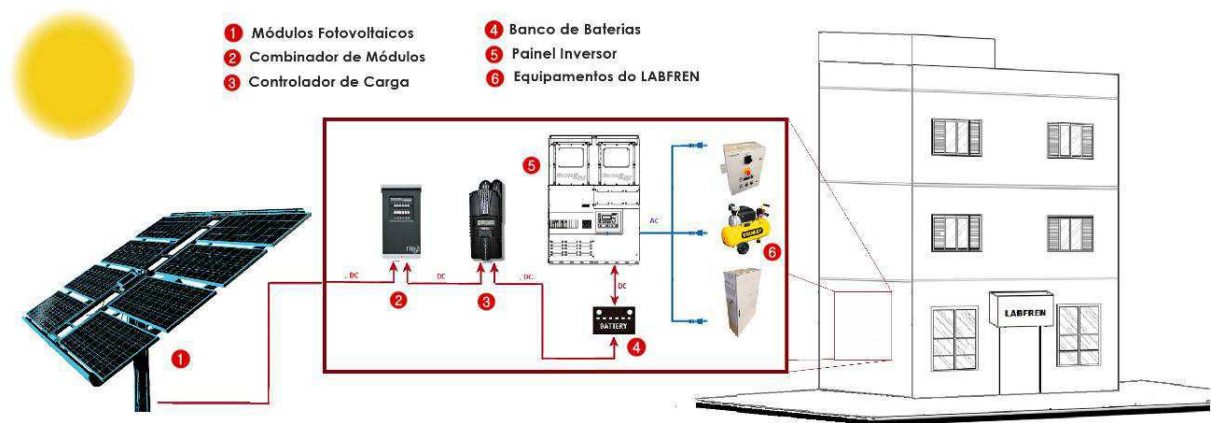
Figura 3.2 - Atuação do inversor/carregador disposto no LABFREN.



Fonte: Adaptado de IBEN (2017).

O diagrama esquemático do SFVI proposto é apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Configuração do SFVI do LABFREN.



Fonte: Autoria própria.

Uma caixa de combinação é instalada entre o arranjo fotovoltaico e o controlador, que adapta os condutores de saída do arranjo fotovoltaico, minimizando a quantidade e o comprimento dos cabos. O controlador de cargas é ligado ao banco de baterias que está devidamente conectado ao painel inversor que abrange as conexões entre os inversores e sistema de controle e proteção. A partir daí a energia fornecida ao inversor através das baterias é disponibilizada em sua saída já invertida, que alimenta as cargas.

### 3.3 Levantamento dos Recursos Solares

A próxima etapa consistiu em fazer o levantamento dos recursos solares disponíveis no LABFREN. Para isso, recorreu-se ao programa SunData<sup>2</sup>, que requer como entrada as seguintes informações:

- Local: Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba.
- Coordenadas geográficas: -7.212800, -35.907831.

Ao final, o programa forneceu dados referentes a irradiação solar diária média mensal (kWh/m<sup>2</sup>dia) para todos os meses do ano, dispostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Irradiação solar diária média mensal da UFCG em (kWh/m<sup>2</sup>dia).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
<b>Plano Horizontal</b>	5,47	5,39	5,31	4,83	4,42	3,86	<b>3,83</b>	5,08	5,22	5,89	<b>6,08</b>	5,69	5,09
<b>Ângulo = latitude (7°N)</b>	5,25	5,27	5,31	4,95	4,63	4,07	<b>4,02</b>	5,27	5,27	5,79	<b>5,85</b>	5,43	5,09

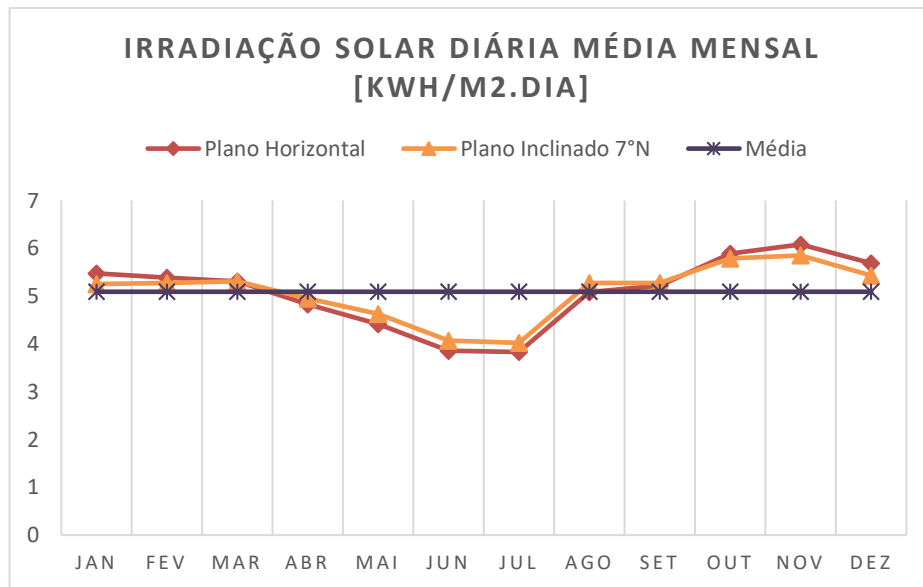
Fonte: SUNDATA (2017).

Os dados fornecidos têm como base a radiação solar incidente em planos horizontais, bem como em planos inclinados com ângulo igual à latitude<sup>3</sup>. De posse desses dados, obtém-se com o auxílio do *software* Excel a representação gráfica apresentada na Figura 3.4.

<sup>2</sup> O programa SunData desenvolvido pelo CRESESB/CEPEL, que tem como objetivo calcular a irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional, visando servir de suporte ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

<sup>3</sup> A latitude é a distância, em graus, de qualquer ponto da superfície terrestre em relação à Linha do Equador, ou seja, é o ângulo entre o plano do equador à superfície de referência.

Figura 3.4 - Irradiação solar média mensal da cidade de Campina Grande.



Fonte: Autoria própria.

Nas estimativas de produção de energia elétrica fotovoltaica, é comum se ignorar os efeitos da variação da irradiância em cada instante e considerar a variação em intervalos horários. Como existe uma grande linearidade entre a produção de energia elétrica e a irradiação horária, então utiliza-se o conceito de valor acumulado de energia solar ao longo de um dia, ou “número de horas de sol pleno” (*HS*) (FIGUEIRA, 2014):

$$\frac{\left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \times \text{dia}} \right]}{\frac{1000 \text{ W}}{\text{m}^2}} = \frac{\text{h}}{\text{dia}} \quad (3.1)$$

Sendo 1000 W/m<sup>2</sup> a maior irradiância solar. Isso permite o painel fotovoltaico atingir sua potência máxima.

De acordo com os dados da Figura 3.4, observou-se que o mês que apresentou o maior valor crítico de irradiância mensal em Campina Grande, foi o mês de julho, com valores de 3,83 h/dia e 4,02 h/dia, para planos que se encontram na posição horizontal ou inclinada 7° ao Norte, respectivamente.

### 3.4 Local de Instalação dos Painéis

A escolha do local onde os painéis fotovoltaicos serão instalados é determinante no seu desempenho, pois vários fatores podem afetar a eficiência do SFV, como por exemplo: ângulo e orientação dos painéis, presença de elementos de sombreamento ou superfícies reflexivas próximas, fontes de sujeiras, capacidade de troca de calor com o meio e ainda, elementos arquitetônicos.

Segundo o PORTALSOLAR (2017), normalmente o ângulo de inclinação igual a latitude é o melhor ângulo para se instalar um painel fotovoltaico, em que a parte frontal do painel deve ser direcionada para o Norte. No entanto, para latitudes iguais ou inferiores a  $10^\circ$ , adota-se o valor de  $10^\circ$ , visto que essa inclinação minimiza a obstrução por meio de poluentes derivados de possíveis fatores climáticos locais, como períodos de poeiras intensas ou de nevoeiro.

O local de instalação deve ser escolhido de modo que os efeitos do sombreamento sejam mínimos, ou seja, o mais distante possível de árvores e paredes. A instalação à nível do solo normalmente, não é indicada, pois pode provocar vários problemas, como por exemplo: ocupação de espaço, obstrução, intempéries, além de estar sujeito a atos de vandalismo.

No caso do LABFREN, sugere-se que os painéis sejam instalados de modo que se tenha um ângulo de inclinação de  $10^\circ$  ao Norte. Em relação ao local, podem ser instalados no teto do prédio, na passarela em frente ao prédio ou na cobertura do estacionamento. Esta última opção pode ser mais vantajosa visto que se integraria à arquitetura do estacionamento e localizar-se-ia em um local de pouco sombreamento em todas as épocas do ano, cuja sugestão é apresentada na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Estacionamento Solar.



Fonte: QDOQ (2017).

### 3.5 Levantamento do Consumo de Energia Elétrica

O próximo passo consistiu em fazer o levantamento do consumo de energia elétrica da unidade consumidora, ou seja, computar a energia elétrica consumida por cada equipamento do sistema a ser suprido pelo SFV. Para isso, fez-se uma estimativa de consumo dos equipamentos, multiplicando a sua potência e o seu hipotético tempo de operação, conforme discriminado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Carga do Sistema de Produção de Hidrogênio (LABFREN).

Carga	Tensão (V <sub>AC</sub> )	Potência Total (kW)	Operação (horas/dia)	Consumo de Energia (kWh/dia)
<b>Gerador Eletrolítico</b>	120-240	3,5	5	17,5
<b>Compressor</b>	230	1,6	3	5,1
<b>Total</b>	-	<b>5,1</b>	-	<b>22,6</b>

Fonte: Autoria própria.

Dado o horário de funcionamento do LABFREN: segunda-feira à sexta-feira, das 08h00 às 18h00, o sistema de produção de hidrogênio só irá operar cinco dias da semana, e, portanto, é necessário multiplicar o consumo obtido pela razão de dias que a carga atuará e a quantidade de dias da semana:

$$\text{Consumo} = 22,6 \times \left(\frac{5}{7}\right) = 16,14 \text{ kWh/dia.} \quad (3.2)$$

Além disso, devido as cargas serem supridas por tensões senoidais alternadas, o SFV requer um inversor. Como consequência, o consumo diário deve ser dividido pelo fator decimal representativo da eficiência média do inversor, que é fornecida pelo fabricante. No caso do LABFREN, 94%.

$$\text{Consumo}_{TOTAL} = \frac{16,14}{0,94} = 17,2 \text{ kWh/dia.} \quad (3.3)$$

Resultando, portanto, em um consumo de 17,20 kWh/dia.

## 3.6 Dimensionamento do SFV

Seguiu-se então, para a etapa de dimensionamento do SFV, o qual é apresentado a seguir.

### 3.6.1 Painéis Fotovoltaicos

Nesta etapa adotou-se o Método do Mês Crítico, que consiste em considerar o período do ano no qual as condições médias são mais desfavoráveis para o sistema. Esse método utiliza valores médios mensais de irradiação solar e da carga, considerando-se somente os valores do mês mais desfavorável na relação carga/irradiação, proporcionando um excesso de energia nos meses mais favoráveis (CRESESB-CEPEL, 2014).

Considerando-se que a carga do LABFREN é constante ao longo do ano, tomou-se como base o mês de pior irradiação solar no ano. Conforme seção 3.3, isso corresponde ao mês de julho, com valores de 3,83 h/dia e 4,02 h/dia de sol pleno. A potência dos painéis fotovoltaicos ( $P_{FV}$ ) é computada conforme Equação (3.2):

$$P_{FV} = \frac{\epsilon_c}{HS}. \quad (3.4)$$

Sendo:  $HS$  o número de horas de sol pleno no plano do painel fotovoltaico em seu pior mês, considerando o plano inclinado com ângulo igual à latitude;  $\epsilon_c$  o consumo de energia em kWh/dia. Substituindo os valores, tem-se:

$$P_{FV} = \frac{17,2 \text{ k}}{4,02} = 4,28 \text{ kW.} \quad (3.5)$$

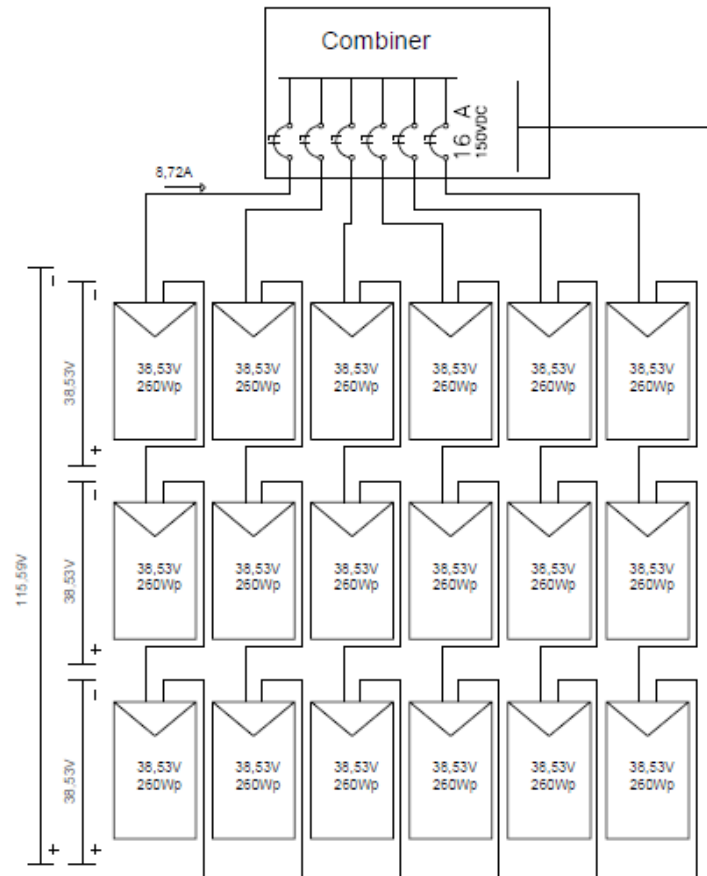
Os painéis fotovoltaicos disponíveis no LABFREN possuem as seguintes características elétricas:

- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ ): 38,53 V;
- Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ ): 8,72 A;
- Potência Máxima ( $P_m$ ): 260 W<sub>p</sub>;
- Tensão de Potência Máxima ( $V_{mp}$ ): 31,05 V;
- Corrente de Potência Máxima ( $I_{mp}$ ): 8,39 A;

Para uma estimativa inicial do número de módulos requeridos, dividindo a potência total dos painéis fotovoltaicos (4,28 Wp) pela potência máxima de cada módulo (260 Wp) conclui-se que 18 módulos fotovoltaicos são necessários para compor o sistema, que serão dispostos em série-paralelo. Respeitando a tensão e corrente máxima de entrada do controlador de carga e considerando a tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito dos painéis, a configuração proposta é composta de seis *strings* de três painéis, totalizando uma tensão de 115,59 V e 52,32 A (Figura 3.6).

Na saída dos painéis fotovoltaicos será instalado uma caixa de combinação. Nesta caixa estão os disjuntores de cada conjunto de painéis que protegerá as *strings* contra danos causados por curto-circuito e sobrecargas elétricas. Esta caixa comportará seis disjuntores DC, que serão dimensionados na seção 3.6.5.

Figura 3.6 - Associação dos módulos fotovoltaicos.



Fonte: Autoria própria.

### 3.6.2 Banco de Baterias

Para estimar a quantidade de energia a ser armazenada e o número de baterias que irá compor o banco, informações quanto ao consumo de energia em Ah/dia e capacidade do banco de baterias são requeridas. Logo, são calculadas conforme as Equações (3.5) e (3.6) (MOURA, 2017).

- Cálculo do consumo de energia em Ah/dia ( $\epsilon_{bat}$ ):

$$\epsilon_{bat} = \frac{\epsilon_c}{V_{bb} \times \epsilon_{bat}} \quad (3.6)$$

Sendo:  $\epsilon_c$  o consumo de energia em kWh/dia;  $V_{bb}$  a tensão do banco de baterias;  $\epsilon_{bat}$  a eficiência da bateria em porcentagem.

- Cálculo da capacidade do banco de baterias em Ah ( $C_{bb}$ ):

$$C_{bb} = \epsilon_{bat} \times \frac{A}{P_d} \quad (3.7)$$

Sendo:  $A$  a autonomia do sistema;  $P_d$  a porcentagem de descarga da bateria por dia.

As especificações para o processo de dimensionamento do banco de baterias foram realizadas conforme a seguir:

- Tipo de bateria a ser utilizado: chumbo-ácido;
- Eficiência da bateria: 90%;
- Profundidade de descarga diária: 50%;
- Autonomia total do sistema: 2 dias;
- Quantidade de energia fornecida diária: 17,20 kWh/dia;
- Temperatura média local: 30°C.

Quanto a determinação da tensão do banco de baterias, considerou-se diferentes tensões, afim de avalia-las posteriormente.

### Caso 1: Tensão igual a 36 V

$$\epsilon_{bat} = \frac{17,2k}{36 \times 0,9} = 530,86 \text{ Ah/dia.}$$

$$C_{bb} = 530,86 \times \frac{2}{0,5} = 2123,46 \text{ Ah.}$$

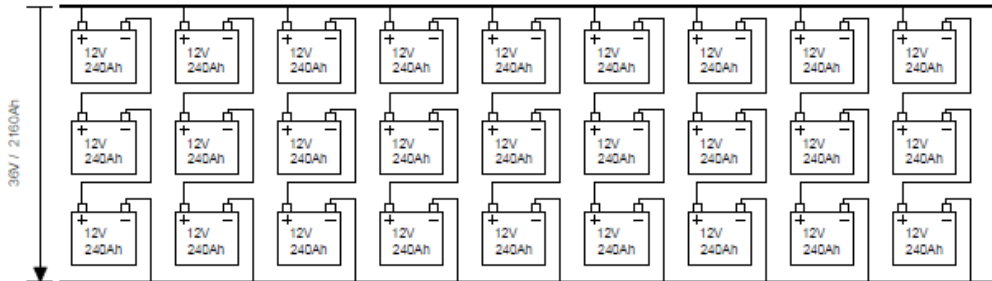
Após o cálculo da capacidade do banco de baterias, a determinação do número de baterias em paralelo realiza-se pela Equação (3.8). Já a combinação em série depende da tensão nominal do banco de baterias e pode ser obtida pela Equação (3.9) (CRESESB-CEPEL, 2014).

$$N^\circ \text{ de baterias paralelo} = \frac{C_{bb}}{C_{bateria}} \quad (3.8)$$

$$N^\circ \text{ de baterias serie} = \frac{V_{bb}}{V_{bateria}} \quad (3.9)$$

Considerando uma bateria com capacidade de 240 Ah e 12 V de tensão, tem-se nove baterias em paralelo, e três baterias em série, conforme a Figura 3.7. Formando um o banco de baterias composto por 27 baterias, totalizando um banco de 36 V/2160 Ah.

Figura 3.7 - Banco de Baterias - Caso 1: tensão igual a 36 V.



Fonte: Autoria própria.

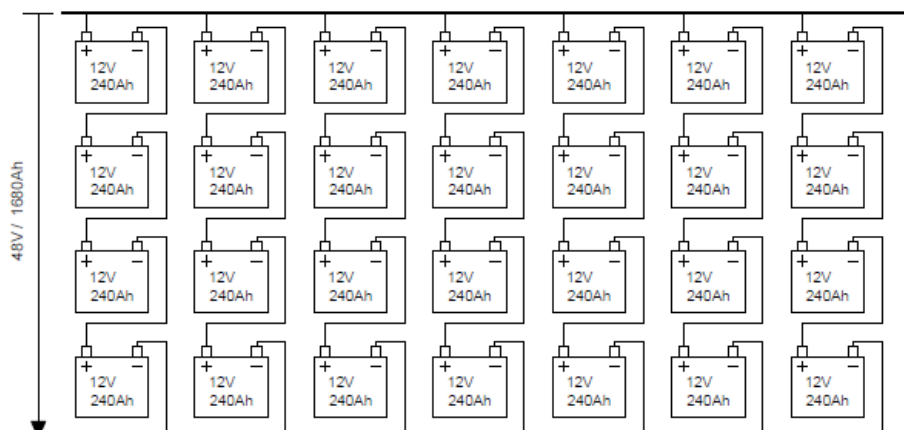
### Caso 2: Tensão igual a 48 V

$$\epsilon_{bat} = \frac{17,2k}{48 \times 0,9} = 398,15 \text{ Ah/dia.}$$

$$C_{bat} = 398,15 \times \frac{2}{0,5} = 1592,59 \text{ Ah.}$$

Conforme as Equações (3.2) e (3.3) e as características da bateria do caso 1, 12 V/240 Ah, tem-se sete baterias em paralelo, e quatro baterias em série, como apresentado na Figura 3.8. Formando um o banco de baterias composto por 28 baterias, totalizando um banco de 48 V/1680 Ah.

Figura 3.8 - Banco de Baterias - Caso 2: tensão igual a 48 V.



Fonte: Autoria própria.

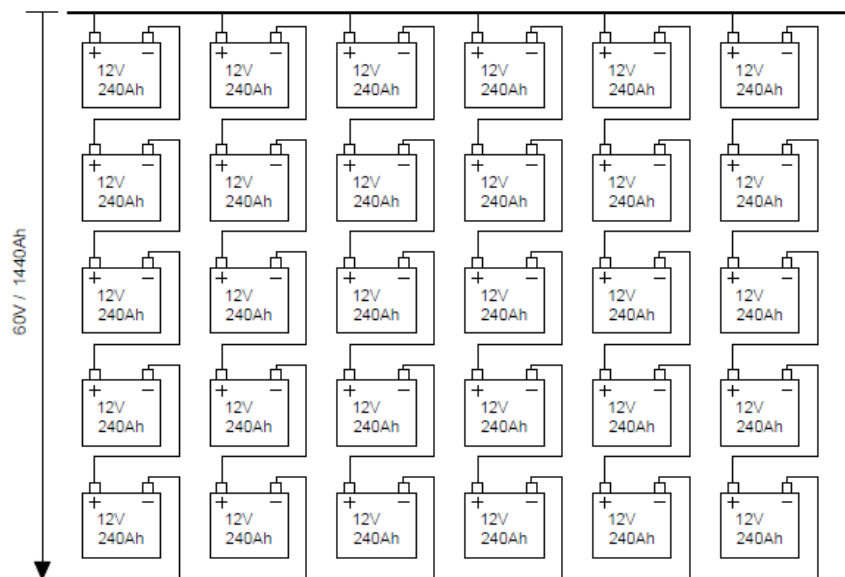
### Caso 3: Tensão igual a 60 V

$$\epsilon_{bat} = \frac{17,2k}{60 \times 0,9} = 318,52 \text{ Ah/dia.}$$

$$C_{bat} = 318,52 \times \frac{2}{0,5} = 1274,08 \text{ Ah.}$$

Conforme as considerações do Caso 2, tem-se seis baterias em paralelo, e cinco baterias em série, como apresentado na Figura 3.9. Formando um o banco de baterias composto por 30 baterias, totalizando um banco de 60 V/1440 Ah.

Figura 3.9 - Banco de Baterias - Caso 3: tensão igual a 60 V.



Fonte: Autoria própria.

### 3.6.3 Controlador de Carga

Neste caso é crucial analisar detalhadamente as especificações elétricas em relação aos limites máximos de tensão do sistema DC e dos níveis de corrente elétrica, tanto na entrada do painel fotovoltaico quanto na saída para as baterias.

A corrente do controlador deve ser igual ou superior a corrente máxima dos painéis fotovoltaicos, ou seja, a corrente de curto-circuito adicionada de um fator de segurança de 25%, caso o painel receba uma radiação maior que 1000 W/m<sup>2</sup> (CRESESB-CEPEL, 2014). A corrente máxima do controlador ( $I_c$ ) é dada pela Equação (3.10):

$$I_C = n \times I_{PV} \times 1,25. \quad (3.10)$$

Sendo:  $n$  o número de painéis em paralelo;  $I_{PV}$  a corrente de curto-circuito dos módulos fotovoltaicos.

Considerando a corrente máxima total do arranjo de painéis fotovoltaicos, tem-se:

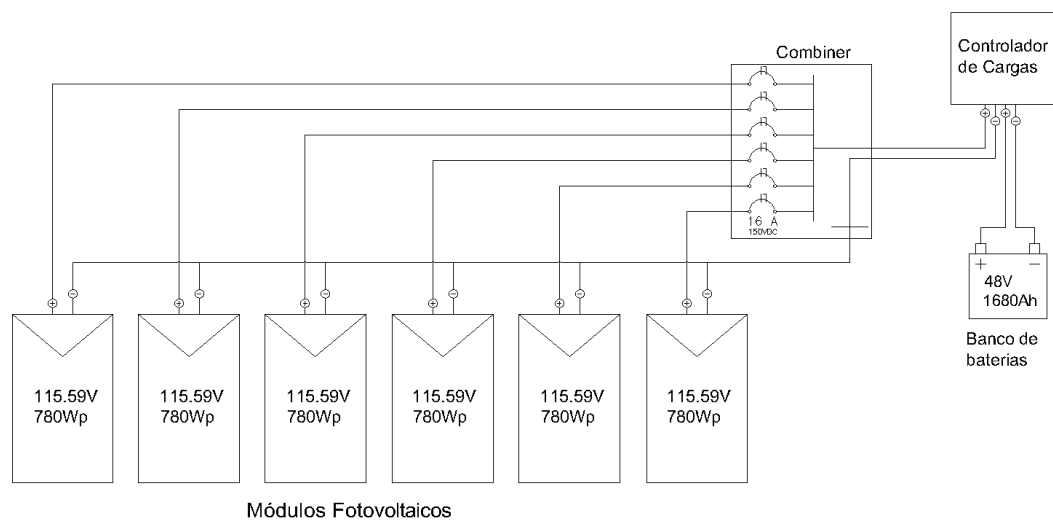
$$I_C = 6 \times 8,72 \times 1,25 = 65,40 \text{ A.}$$

O controlador de cargas disponível no LABFREN possui as seguintes características elétricas:

- Tensão de entrada máx. ( $V_{max}$ ): 150 V;
- Corrente de entrada máx. ( $I_{max}$ ): 96 A;
- Tensão máxima de carregamento ( $V_{out}$ ): 93 V;
- Corrente máxima de carregamento ( $I_{out}$ ): 96 A;
- Tensão nom. do banco de baterias: 12-72 V.

Como se vê, a corrente obtida encontra-se na faixa da corrente máxima de entrada permitida pelo controlador (96 A). Ao final, propõe-se o esquema de conexão do sistema ao controlador conforme apresentado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Esquema de conexão do controlador de carga proposto.



Fonte: Autoria própria.



### 3.6.4 Inversor

O dimensionamento do inversor requer conhecimento da demanda máxima da carga e, portanto, do período do dia que os equipamentos estarão em operação. O inversor deve ser dimensionado para que apresente tensão de entrada compatível com tensão DC do banco de baterias, e tensão de saída AC senoidal, com valor normalmente de 120 ou 240 V, e frequência de 60 Hz.

A potência do inversor deve ser igual ou superior a potência máxima da curva de carga, acrescidos de 20% (Equação 3.11) (CRESESB-CEPEL, 2014).

$$P_{inv} = \epsilon_c \times 1,2. \quad (3.11)$$

Como mostrado na Tabela 3.2, a potência máxima da curva de carga do LABFREN é 5,1 kW, que o inversor deve ser capaz de atender. Portanto, a potência mínima do inversor deverá ser:

$$P_{inv} = 5,1k \times 1,2 = 6,12 \text{ kW}.$$

Para a conformidade do inversor ao sistema é necessário também avaliar a corrente máxima de entrada que este suportará. A corrente de entrada do inversor é dada pela potência sobre a tensão do sistema DC (Equação 3.12):

$$I_{invs} = \frac{P_{total}}{V_{cont}}. \quad (3.2)$$

Avaliando as diferentes tensões consideradas na seção 3.6.2, tem-se:

$$\text{Caso 1 (36 V): } I_{inv} = \frac{6,12 \text{ kW}}{36 \text{ V}} = 170 \text{ A}.$$

$$\text{Caso 2 (48 V): } I_{inv} = \frac{6,12 \text{ kW}}{48 \text{ V}} = 127,5 \text{ A}.$$

$$\text{Caso 3 (60 V): } I_{inv} = \frac{6,12 \text{ kW}}{60 \text{ V}} = 102 \text{ A}.$$

O inversor disponível no LABFREN possui as seguintes características elétricas:

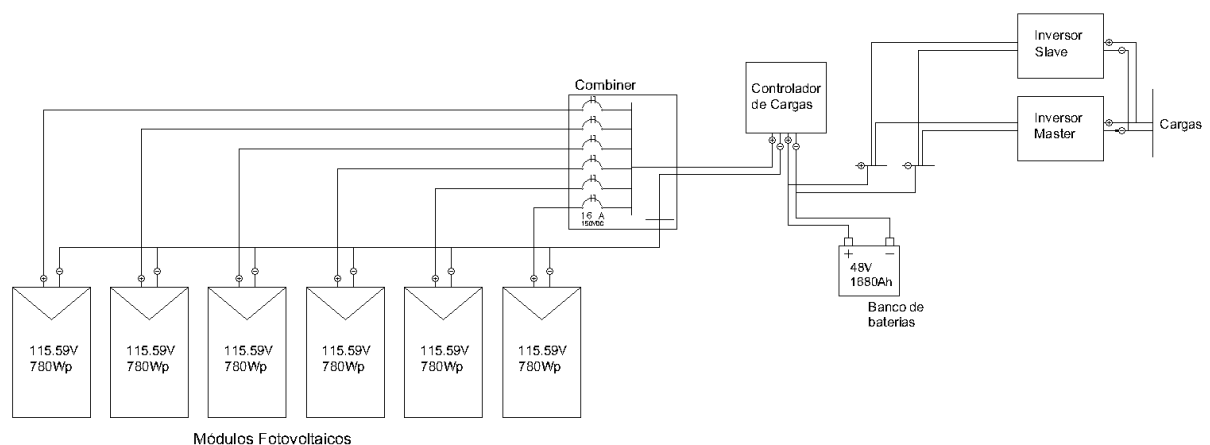
- Inversor/ Carregador: AC/AC;

- Capacidade: 4400 W;
- Tensão de entrada: 36–64 V<sub>DC</sub>;
- Corrente máxima de entrada: 147 A;
- Tensão de saída: 120-240 V<sub>AC</sub>/60 Hz;
- Corrente máxima de saída: 18,3 A.

Pode-se concluir que a potência total é muito alta para ser atendida por um único inversor, o que requer a conexão de inversores em paralelo, visto que dessa forma a potência e a corrente máxima de saída e de entrada apresentam valores compatíveis com o inversor.

Devido ao inversor operar como carregador e inversor, ou seja, retificador e inversor, conforme visto na Figura 3.2, para ser utilizado na aplicação em questão, será necessário anular sua função de retificador e conectá-lo diretamente ao banco de baterias, resultando nas conexões apresentadas na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Conexão dos inversores aos demais equipamentos do SFV.



Fonte: Autoria própria.

### 3.6.5 Sistema de Proteção e Cabeamento

Finalmente, seguiu-se para a etapa de planejamento da interconexão dos equipamentos e de adequação aos requisitos de segurança sob o ponto de vista elétrico, especificando os condutores e dispositivos de proteção. A realização desta etapa requer uso das seguintes Normas: NBR5410 – instalações elétricas de baixa tensão;

NBR 5419 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, bem como normas internacionais.

Felizmente, os componentes principais requeridos do sistema de proteção já estão disponíveis no LABFREN, que são:

- Painel fotovoltaico com diodos de desvio, *by-pass*;
- Caixa de combinação que comporta disjuntores;
- DSP – Dispositivo contra Surtos Atmosféricos;
- Painel AC/DC Inversor MPSSL-30D - Magnum Energy, que comporta a instalação de todos os dispositivos de seccionamento automático, barramentos, conexões, inversores, controladores de carga, sistema de controle e proteção.

Desta forma, constata-se apenas a necessidade de dimensionar os disjuntores<sup>4</sup>.

A corrente nominal do disjuntor deverá ser, pelo menos 1,25 vezes maior que a corrente nominal da *string* ou da carga (Equação 3.12) (CRESESB-CEPEL, 2014). Assim, podem-se selecionar disjuntores DC para compor a caixa de combinação cuja corrente nominal é igual a 16 A, e disjuntor AC para a carga cuja corrente nominal é igual a 32 A.

$$I_{disjuntor} \geq 1,25 \times I_{sc}. \quad (3.13)$$

$$I_{disjuntorDC} \geq 1,25 \times 8,72 = 10,9 \text{ A.}$$

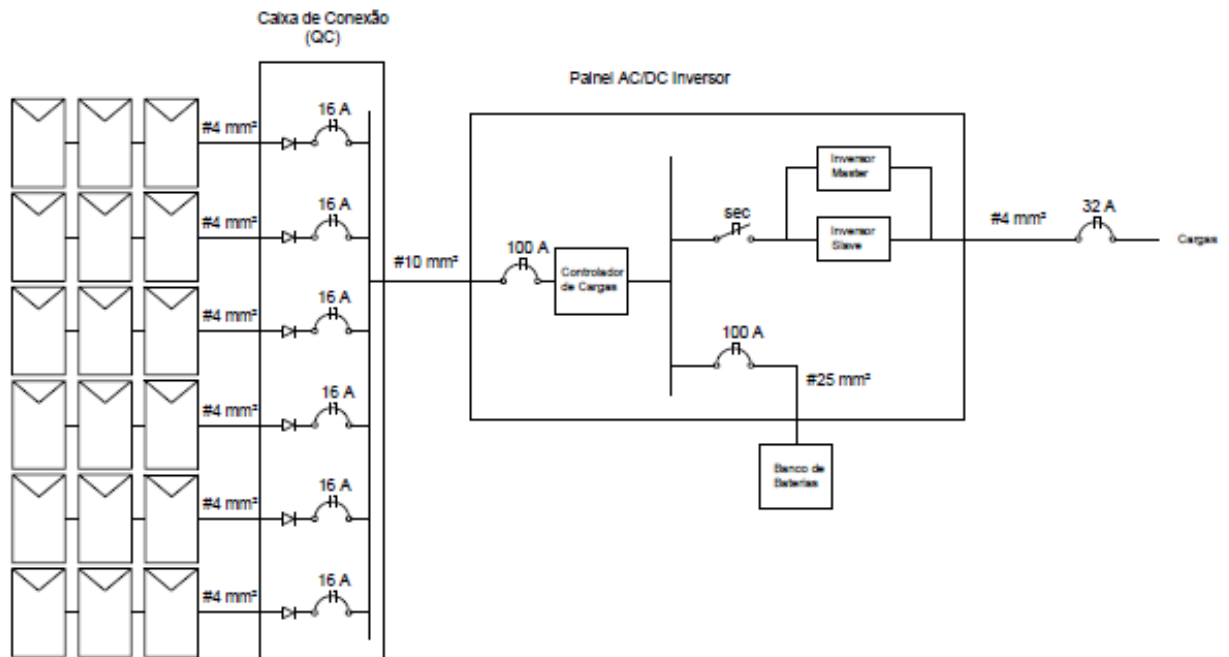
$$I_{disjuntorAC} \geq 1,25 \times \frac{5,1kW}{220V} = 28,9 \text{ A.}$$

Após execução desta etapa elaborou-se o digrama unifilar, apresentado na Figura 3.12, destacando os pontos para instalação dos componentes de proteção.

---

<sup>4</sup> Para a proteção de todos os condutores de fase de cada fileira, devem-se instalar disjuntores DC. Os disjuntores têm como objetivo proteger os cabos, equipamentos e demais componentes, nos casos de correntes elevadas, causadas por um curto circuito no sistema, sobrecarga ou falha no aterramento.

Figura 3.12 - Diagrama unifilar do sistema de proteção.



Fonte: Autoria própria.

Além dos equipamentos de proteção, todo o sistema e sua estrutura de suporte será aterrada, como forma de proteger a instalação e as pessoas que frequentam a instalação contra os riscos de contatos indiretos.

A escolha dos condutores foi feita baseando-se na Norma NBR 5410, indicando-as em função do comprimento do ramal, da tensão nominal e do nível de perdas tolerável.

A definição da seção mínima de condutor também pôde ser computada conforme Equação (3.14):

$$S(\text{mm}^2) = \rho \times \frac{d * I}{\Delta V}. \quad (3.14)$$

Sendo:  $\rho$  a resistividade do material do condutor;  $d$  a distância total do condutor, considerando o trecho de retorno;  $I$  a corrente que passa pelo condutor;  $\Delta V$  a queda de tensão tolerada.

É importante destacar que SFV requer condutores que suportem as mais adversas condições climáticas, por estarem expostos à intensa radiação, calor, frio e chuva por

longos períodos de tempo, portanto, devem possuir material de proteção e isolamento resistentes, especialmente à radiação ultravioleta.

A planilha da relação dos cabos e suas especificações para o LABFREN está disponível no Apêndice A.

### 3.6.6 Levantamento dos Custos

O custo de um sistema de energia solar fotovoltaico depende principalmente do tamanho e da complexidade da instalação, e corresponde ao somatório de vários fatores, tais como:

- Painéis fotovoltaicos;
- Inversores;
- Controladores de carga;
- Banco de baterias;
- Materiais acessórios: fiação, disjuntores, estruturas de fixação, quadro elétrico, ferragens, eletrodutos, armário para baterias, etc.;
- Mão de obra.

Um fator importante no custo final do SFV é a grande variação de preço entre os fornecedores, a qual é função da qualidade dos componentes e da instalação propriamente dita. Itens de instalação tais como: sistema de aterramento, SPDA, instalação do SFV em abrigo fora da edificação, grau IP (proteção contra penetração de água e sólidos) e resistência à corrosão dos quadros elétricos, adoção de eletrodutos rígidos em toda a instalação, ferragens em aço inox, melhoram significativamente a qualidade e, conseqüentemente, aumentam o custo do sistema. (GALDINO, 2012)

Uma vez que o Brasil ainda não possui empresas que forneçam todos os itens que compõem um SFV, a compra de produtos importados encarece sobremaneira o processo. Conforme Regime de Tributação (RTS), um valor tributário de ICMS de 60% deve ser aplicado sobre o valor da mercadoria importada, incluindo o frete. Esse valor pode ser ainda maior, como é o caso do estado da Paraíba: o art. 13 Inciso I do Artigo

1º do Decreto Nº 36.213/15 diz que se deve adicionar uma alíquota de 18% na importação de bens e mercadorias. Totalizando assim, um tributo de 78%.

Neste projeto, os valores dos módulos e dos demais equipamentos foram obtidos via pesquisa de mercado no comércio especializado. A aquisição dos equipamentos do LABFREN deu-se por meio de empresas americanas, o que acrescentou 78% do valor tributário ICMS. Já os equipamentos faltantes podem ser adquiridos por empresas brasileiras, tornando prescindível a importação.

Conforme dados obtidos pela pesquisa de mercado, estimou-se para os custos referentes à mão de obra e materiais acessórios 15% do custo total, assim como 5% para o frete. Logo, elaborou-se uma proposta de orçamento para o SFV a ser instalado no LABFREN, a qual está apresentada resumidamente, na Tabela (3.3). Na cor **azul**, as informações quanto aos equipamentos já adquiridos e na cor **vermelho**, o custo restante. Considerou-se a cotação do dólar do dia 30 de julho de 2017: \$ **3,13**.

Tabela 3.3 - Orçamento do SFV LABFREN.

Item		Quant.	Valor Unitário (\$)	Valor Unitário (R\$)	Valor sob impostos 78% + Frete (R\$)	Subtotal (R\$)
1	Painéis Fotovoltaicos: Astroenergy CHSM6610P-260	18	\$ 390,00	R\$ 1.220,70	R\$ 2.281,49	R\$ 41.066,79
2	Controlador de Cargas: MidNite Solar Classic 150	1	\$ 850,00	R\$ 2.660,50	R\$ 4.972,47	R\$ 4.972,47
3	Inversor: Magnum Energy MS4448PAE	2	\$ 2.159,20	R\$ 6.758,30	R\$ 12.631,26	R\$ 25.262,51
4	Painel AC/DC Inversor: Magnum Energy -MPSL-30D com MPXS-30D-R e Router ME-RTR	1	\$ 1.457,87	R\$ 4.563,13	R\$ 8.528,50	R\$ 8.528,50
5	Caixa de Combinação (QC): Midnite Solar Inc. MNPV6 Combiner Box	1	\$ 204,00	R\$ 638,52	R\$ 1.193,39	R\$ 1.193,39
6	DPS: Midnite Solar Inc. MNSPD -300DC	4	\$ 119,00	R\$ 372,47	R\$ 696,15	R\$ 2.784,59
7	Baterias Freedom 12V 240Ah - Df4001	28	-	R\$ 1.174,34	R\$ 1.233,06	R\$ 34.525,60
8	Materiais Acessórios	-	-	R\$ 7.050,00	R\$ 7.402,50	R\$ 7.402,50
9	Mão de Obra	-	-	R\$ 5.300,00	R\$ 5.300,00	R\$ 5.300,00
<b>Total do material restante (R\$)</b>						<b>R\$ 47.228,10</b>
<b>Total (R\$)</b>						<b>R\$ 131.036,35</b>

Portanto, para conclusão do SFV do LABREN serão necessários ainda um total de **R\$ 47.228,10**.

## 4 Conclusões

O estudo realizado neste TCC mostrou a importância crescente dos sistemas fotovoltaicos como fonte de geração distribuída. Como em todo projeto, análise e dimensionamento adequados são determinantes para o sucesso desse tipo de sistema, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

O estudo de caso realizado no LABFREN foi criterioso quanto ao dimensionamento adequado dos equipamentos em função das cargas a serem alimentadas e da autonomia desejada. No entanto, um estudo mais detalhado quanto ao ciclo de operação das cargas, da incidência solar e da minimização das perdas ainda é necessário.

Em relação à metodologia adotada neste TCC, constatou-se que ela facilitou consideravelmente, o processo de dimensionamento do sistema, de modo que se mostrou uma ferramenta útil, inclusive para fins didáticos.

Inspeção minuciosa da infraestrutura atual do LABFREN mostrou que para o sistema fotovoltaico entrar de fato, em operação, são necessários ainda:

- Aquisição e instalação do banco de baterias;
- Cabeamento;
- Aquisição de equipamentos de proteção;
- Instalação dos painéis fotovoltaicos.

Sugere-se o emprego do caso 2 (48 V) para a tensão do banco de baterias. Devido sua corrente nominal de saída (127,5 A) ser menor quando comparado ao caso 1 (36 V), haja vista as perdas serem menores, além de necessitar apenas 28 baterias.

Em relação aos custos, devido ao fato do LABFREN ter adquirido equipamentos de alta qualidade com objetivo de empregá-los em pesquisas acadêmicas, a análise de viabilidade econômica para este caso é irrelevante.



Ao final, o TCC, propiciou o contato inicial à pesquisa científica, bem como estudo de um tema de interesse pessoal e mundial.

Sugerem-se para trabalhos futuros:

- Validar a metodologia adotada, em softwares, exemplo *PVsyst*;
- Realizar o dimensionamento do sistema conectado à rede para devida aplicação, desprezando os equipamentos adquiridos, em especial o inversor, afim de comparar os custos finais;
- Realizar estudos relativos ao período de operação das cargas, suprimento de energia diária e minimização das perdas.

# Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5410/2004: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Versão corrigida. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR 5419/2001: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro, 2001.

AIR PRODUCTS. Disponível em:

<<http://www.airproducts.com.br/industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-basics.aspx>>. Acesso em agosto 2017.

ALTERNER. **Energia Fotovoltaica**: Manual sobre tecnologias, projetos e instalação. Portal Energia: Energias Renováveis. Programa ALTENER. 2004.

BACH, V. R. **Dimensionamento da capacidade de produção de hidrogênio a partir da energia vertida turbinável de Itaipu e sua utilização em veículos automotivos**. 2013, 61f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Tecnologia em Biocombustíveis) Universidade Federal do Paraná. Palotina, 2013.

CARVALHO, D. M. S. **Análise e caracterização energética de sistemas fotovoltaicos de baixa potência com ligação à rede elétrica**. 2011. Dissertação (Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2011.

CHAMMA. B. C. **Projeto de uma microgeração fotovoltaica aplicada a uma residência**. 2017. 63p. Projeto de Graduação (Engenharia Elétrica). UFRJ/Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2017.

CRESESB-CEPEL. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. Edição Revisada e Atualizada. Rio de Janeiro, 2014.

ENOVA SOLAR. Disponível em:

<<http://www.enovasolar.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Programa-de-Treinamento-Atualizado-PV-Hands-On-Hybrid.pdf>>. Acesso em junho de 2017.

FIGUEIRA, F. F. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede para alimentar a sala de computação da Escola Municipal Tenente Antônio João**. 2014. 54f. Projeto de Graduação (Engenharia Elétrica). UFRJ/Rio de Janeiro, 2014.

GALDINO, M. A. **Análise de custos históricos de sistemas fotovoltaicos no Brasil**. Artigo. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES. São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012.

GARCÍA, F. H.; KRENZINGER, A. & ALÉ, J. A. V. **Bancada experimental para estudo de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos**. Artigo. Enc. Energ. Meio Rural. Porto Alegre, 2002.

GOMES NETO, E. H. **Hidrogênio - evoluir sem poluir**. A era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. Editora Brasil H2. Curitiba-PR, 2005.

LONGO, V. A. M. **Produção biológica de hidrogênio**. Departamento de engenharia química e engenharia de alimentos. Artigo. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

MEDEIROS, W. B. & J. P. BOTTON. **Métodos e eletrólitos utilizados na produção de hidrogênio**. Artigo. Universidade Federal de Integração Latino-Americana, 2015.

MOURA. Disponível em:

<[https://www.moura.com.br/externos/catalogos/catalogo\\_clean\\_max\\_fotovoltaica.pdf](https://www.moura.com.br/externos/catalogos/catalogo_clean_max_fotovoltaica.pdf)>. Acesso em maio 2017.

O GLOBO. Disponível em:

<<https://oglobo.globo.com/economia/energia-solar-cresceu-70-em-dois-anos-20715504#ixzz4nhkOgy8Z>>. Acesso em julho de 2017.

PORTAL ELETRICISTA. Disponível em:

<<http://www.portaleletricista.com.br/kit-de-energia-solar/>>. Acesso em abril de 2017.

QdoQ ENERGIAS. Disponível em:

<<https://www.qdoqenergias.com/sistemas-conectados-a-rede-ongrid>>. Acesso em junho de 2017.

SANTOS, J. E. **Controle e automação de um sistema de geração de energia elétrica renovável: avaliação da célula a combustível h<sub>2</sub>/ar tipo PEMFC**. 2013. 157f. Tese (Engenharia Química). Universidade Federal de Campina Grande, 2013.

SØRENSEN, B. **Hydrogen and Fuel Cell: emerging technologies and applications** hydrogen and fuel cells emerging technologies and applications. 2nd ed. Amsterdam, Boston: Elsevier Academic Press, 2005.

SUNDATA. Disponível em:

<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em abril de 2017.

VIOLA, L. **Estudo da produção de hidrogênio eletrolítico a partir de fontes eólica, solar e hidrelétrica**. 2014. 68f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

## Apêndice – Especificações dos Cabos

Os cabos com código e cores devem estar em conformidade com a norma NBR 5410. Para não comprometer a segurança dos trabalhadores durante a instalação, verificação ou manutenção, os condutores devem estar em conformidade com a tabela de cores:

- Cabos de proteção: Amarelo-Verde (Obrigatório)
- Cabos de neutro: Azul claro (Obrigatório)
- Cabos de fase: Preto/Cinza/Marrom
- Cabos de circuito corrente contínua: Com indicação específica de (+) para positivo e (-) para negativo.

A seção do condutor do SFV é superdimensionada, com referência à corrente e às distâncias, afim de que a queda de potência esteja na faixa de 2% do valor medido, a partir de qualquer módulo para o grupo de conversão.

### Fiação: Conjunto Fotovoltaico

Descrição	Valor
<b>Identificação:</b>	01 cabo vermelho, 01 cabo preto e 01 cabo verde
<b>Comprimento total:</b>	90 metros
<b>Temperatura ambiente:</b>	30° C
<b>Tabela:</b>	NBR 5410
<b>Instalação:</b>	11A (C) - Cabos unipolares fixados diretamente no teto
<b>Instalações:</b>	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície
<b>Material</b>	Cobre
<b>Tipo de isolamento:</b>	EPR
<b>Formação</b>	1#4(4)4
<b>Nº condutores positivos:</b>	1
<b>Seção positivo/ fase</b>	4 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores negativo/neutro:</b>	1
<b>Seção negativo/neutro:</b>	4 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores PE:</b>	1
<b>Seção PE:</b>	4 mm <sup>2</sup>
<b>Tensão nominal:</b>	115,59 V
<b>Corrente de funcionamento:</b>	8,39 A
<b>Corrente de curto-circuito módulos</b>	8,72 A

Fiação: Conjunto Fotovoltaico – *Combiner Box*

Descrição	Valor
<b>Identificação:</b>	01 cabo vermelho, 01 cabo preto e 01 cabo verde
<b>Comprimento total:</b>	17 metros
<b>Temperatura ambiente:</b>	30° C
<b>Tabela:</b>	NBR 5410
<b>Instalação:</b>	3(B1) - Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede
<b>Instalações:</b>	Em feixe: embutidos
<b>Material</b>	Cobre
<b>Tipo de isolamento:</b>	EPR
<b>Formação</b>	1#4(4)4
<b>Nº condutores positivos:</b>	1
<b>Seção positivo/ fase</b>	4 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores negativo/neutro:</b>	1
<b>Seção negativo/neutro:</b>	4 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores PE:</b>	1
<b>Seção PE:</b>	4 mm <sup>2</sup>
<b>Tensão nominal:</b>	115,59 V
<b>Corrente de funcionamento:</b>	8,39 A
<b>Corrente de curto-circuito módulos</b>	8,72 A

Fiação: *Combiner Box* – Controlador (Painel)

Descrição	Valor
<b>Identificação:</b>	01 cabo vermelho e 01 cabo preto
<b>Comprimento total:</b>	21 metros
<b>Temperatura ambiente:</b>	30° C
<b>Tabela:</b>	NBR 5410
<b>Instalação:</b>	62(D) - Cabos unipolares diretamente enterrado(s), sem proteção mecânica adicional
<b>Instalações:</b>	Em feixe: embutidos
<b>Material</b>	Cobre
<b>Tipo de isolamento:</b>	EPR
<b>Formação</b>	1#10(10)
<b>Nº condutores positivos:</b>	1
<b>Seção positivo/ fase</b>	10 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores negativo/neutro:</b>	1
<b>Seção negativo/neutro:</b>	10 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores PE:</b>	
<b>Seção PE:</b>	
<b>Tensão nominal:</b>	115,59 V
<b>Corrente de funcionamento:</b>	60,41 A
<b>Corrente de curto-circuito módulos</b>	62,78 A

## Fiação: Pannel – Banco de Baterias

Descrição	Valor
<b>Identificação:</b>	01 cabo vermelho e 01 cabo preto
<b>Comprimento total:</b>	10 metros
<b>Temperatura ambiente:</b>	30° C
<b>Tabela:</b>	NBR 5410
<b>Instalação:</b>	3(B1) - Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede
<b>Instalações:</b>	Em feixe: embutidos
<b>Material</b>	Cobre
<b>Tipo de isolamento:</b>	EPR
<b>Formação</b>	1#25(25)
<b>Nº condutores positivos:</b>	1
<b>Seção positivo/ fase</b>	25 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores negativo/neutro:</b>	1
<b>Seção negativo/neutro:</b>	25 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores PE:</b>	
<b>Seção PE:</b>	
<b>Tensão nominal:</b>	48 V
<b>Corrente de funcionamento:</b>	106,25 A

## Fiação: Conjunto – Banco de Baterias

Descrição	Valor
<b>Identificação:</b>	01 cabo preto, 01 cabo vermelho e 01 cabo verde
<b>Comprimento total:</b>	6 metros
<b>Temperatura ambiente:</b>	30° C
<b>Tabela:</b>	NBR 5410
<b>Instalação:</b>	3(B1) - Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede
<b>Instalações:</b>	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície
<b>Material</b>	Cobre
<b>Tipo de isolamento:</b>	EPR
<b>Formação</b>	1#25(25)10
<b>Nº condutores positivos:</b>	1
<b>Seção positivo/ fase</b>	25 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores negativo/neutro:</b>	1
<b>Seção negativo/neutro:</b>	25 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores PE:</b>	1
<b>Seção PE:</b>	10 mm <sup>2</sup>
<b>Tensão nominal:</b>	48 V
<b>Corrente de funcionamento:</b>	106,25 A

## Fiação: Painel – QDC com Medidor

Descrição	Valor
<b>Identificação:</b>	01 cabo preto, 01 cabo azul claro e 01 cabo verde
<b>Comprimento total:</b>	2,5 metros
<b>Temperatura ambiente:</b>	30° C
<b>Tabela:</b>	NBR 5410
<b>Instalação:</b>	3(B1) - Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede
<b>Instalações:</b>	Em feixe: embutidos
<b>Material</b>	Cobre
<b>Tipo de isolamento:</b>	PVC
<b>Formação</b>	1#4(4)4
<b>Nº condutores positivos:</b>	1
<b>Seção positivo/ fase</b>	4 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores negativo/neutro:</b>	1
<b>Seção negativo/neutro:</b>	4 mm <sup>2</sup>
<b>Nº condutores PE:</b>	1
<b>Seção PE:</b>	10 mm <sup>2</sup>
<b>Tensão nominal:</b>	240 V
<b>Corrente de funcionamento:</b>	14,58 A