



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Aleff Vinícius Araújo Gomes Passos

# **ANÁLISE DO CHAVEAMENTO INTELIGENTE DE FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Campina Grande, Paraíba

Março de 2018

Aleff Vinícius Araújo Gomes Passos

# **ANÁLISE DO CHAVEAMENTO INTELIGENTE DE FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Identificação de Sistemas

Orientador: Edmar Candeia Gurjão

Campina Grande, Paraíba

Março de 2018

---

Aleff Vinícius Araújo Gomes Passos  
ANÁLISE DO CHAVEAMENTO INTELIGENTE DE FONTES DE ENERGIA  
ELÉTRICA/ Aleff Vinícius Araújo Gomes Passos. – Campina Grande, Paraíba,  
Março de 2018-  
63 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Edmar Candeia Gurjão

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande –  
UFCG, Março de 2018.

---

Aleff Vinícius Araújo Gomes Passos

# ANÁLISE DO CHAVEAMENTO INTELIGENTE DE FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Aprovado em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

---

**Leimar de Oliveira**

Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

---

**Edmar Candeia Gurjão**

Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador

Campina Grande, Paraíba

Março de 2018

*A Maria José de Araújo Gomes Passos e Franciraldo Passos Gomes.*

# Agradecimentos

Soli Deo gloria.

*"É um paradoxo, ainda verdadeiro, dizer que quanto mais nós sabemos mais ignorantes nos tornamos no senso absoluto, pois é somente através da iluminação que nos tornamos conscientes de nossas limitações. Precisamente um dos resultados mais gratificantes da evolução intelectual é a abertura contínua de novas e maiores perspectivas."*

*(Nikola Tesla)*

# Resumo

Paralelo ao constante aumento na busca por sistemas de energias limpas e renováveis, faz-se necessário, na mesma velocidade, um aprimoramento de sistemas mais compactos, eficientes e economicamente viáveis. Hoje, sistemas com múltiplas fontes de energia já são uma realidade. O advento desses sistemas deve-se, em grande parte, a facilidade proporcionada por sistemas computacionais de simulação, auxiliando tanto na modelagem quanto no projeto de sistemas complexos. Nesse trabalho serão apresentados modelos computacionais de sistemas fotovoltaicos, acumuladores de energia e linhas de transmissão, sendo para tanto aplicado o software MATLAB® e a ferramenta Simulink®, ambos da MathWorks®. O sistema de conversão e controle foi implementado para alimentação de uma carga característica de uma residência regular, bem como para sua conexão à rede de energia elétrica, visando a monetização da energia gerada. Nele é possível fazer o monitoramento dos níveis de tensão das fontes, o índice de descarga dos acumuladores de energia e a potência gerada ou demandada da rede. Com uso dessas ferramentas é feita análise da viabilidade do sistema a fim de comprovar que é possível fazer a manutenção da carga, prevenir-se de faltas no sistema elétrico e ainda transferir a energia produzida pelos painéis para a rede a 220V, 60 Hz, provendo assim lucros para o proprietário.

**Palavras-chave:** Fotovoltaico, painéis, chaveamento, baterias, on-grid, off-grid, controle, monitoramento, conversores, inversores, MPPT.



# Abstract

Parallel to the constant increase in the search for clean and renewable energy systems, it is necessary, at the same speed, an improvement of systems more compact, efficient and economically viable. Today, systems with multiple sources of energy are already a reality. The advent of these systems is largely due to the ease provided by computer simulation systems, assisting both the modeling and the design of complex systems. In this work, therefore, will be presented computational models of photovoltaic systems, energy accumulators and transmission lines, with MATLAB® software and the Simulink® tool, both from MathWorks®, being applied. The conversion and control system was implemented to feed a load characteristic of a regular residence, as well as for its connection to the electric power network, aiming at monetization of the generated energy. It is possible to monitor the voltage levels of the sources, the discharge rate of the accumulators and the generated or demanded power of the grid. With the use of these tools, the feasibility of the system is analyzed in order to verify that it is possible to maintain the load, to prevent faults in the electrical system and to transfer the energy produced by the panels to the network at 220V, 60 Hz, providing so profits for the owner.

**Keywords:** Photovoltaic, panels, switching, batteries, on-grid, off-grid, control, monitoring, converters, inverters, MPPT.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Gráfico Sistema de Controle . . . . .	15
Figura 2 – Irradiância . . . . .	18
Figura 3 – Transalação . . . . .	19
Figura 4 – Primeiro Arranjo Fotovoltaico . . . . .	20
Figura 5 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica . . . . .	21
Figura 6 – Modelo Equivalente de Célula Fotovoltaica . . . . .	21
Figura 7 – Células Fotovoltaicas em Série . . . . .	24
Figura 8 – Curva I-V . . . . .	25
Figura 9 – Curva P-V . . . . .	25
Figura 10 – ligação de células fotovoltaicas . . . . .	26
Figura 11 – Corrente em função da irradiância . . . . .	27
Figura 12 – Corrente em função da temperatura . . . . .	28
Figura 13 – Sistema fotovoltaico genérico . . . . .	29
Figura 14 – Topologia de um Conversor . . . . .	30
Figura 15 – Dispositivo de MPPT . . . . .	32
Figura 16 – Sistema Fotovoltaico Isolado . . . . .	33
Figura 17 – Bateria de chumbo-ácido . . . . .	35
Figura 18 – Inversor Ponte Completa . . . . .	36
Figura 19 – Sistema Fotovoltaico Híbrido . . . . .	38
Figura 20 – Diagramação de Sistema Fotovoltaico Híbrido . . . . .	39
Figura 21 – <i>PV Array</i> . . . . .	41
Figura 22 – Parâmetros do bloco <i>PV Array</i> . . . . .	42
Figura 23 – Bloco <i>Battery</i> no Simulink® . . . . .	43
Figura 24 – Bloco <i>Three-Phase Source</i> . . . . .	45
Figura 25 – Parâmetros do bloco <i>Three-Phase Source</i> . . . . .	46
Figura 26 – Bloco <i>Three-Phase Transformer (Two Windings)</i> . . . . .	46
Figura 27 – Parâmetros do bloco <i>Three-Phase Transformer (Two Windings)</i> . . . . .	47
Figura 28 – Bloco <i>Three-Phase PI Section Line</i> . . . . .	48
Figura 29 – Parâmetros do bloco <i>Three-Phase PI Section Line</i> . . . . .	49
Figura 30 – Bloco <i>Multi-Winding Transformer</i> . . . . .	49
Figura 31 – Parâmetros do bloco <i>Multi-Winding Transformer</i> . . . . .	50
Figura 32 – Função Indutância Incremental . . . . .	51
Figura 33 – Fluxograma de algoritmo de Indutância Incremental . . . . .	51
Figura 34 – Conversor Bidirecional . . . . .	52
Figura 35 – Controle de Conversor Bidirecional . . . . .	53
Figura 36 – Teste de MPPT . . . . .	54

Figura 37 – Teste de MPPT . . . . .	56
Figura 38 – Teste de MPPT . . . . .	57
Figura 39 – Diagrama de Blocos do <i>microgrid</i> estudado . . . . .	58
Figura 40 – Diagrama de de <i>microgrid</i> estudado . . . . .	59
Figura 41 – Resultado do Sistema Proposto . . . . .	60

# Lista de abreviaturas e siglas

SEP	Sistema Elétrico de Potência
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
SoC	State of Charge Estado de Carga
SFI	Sistemas Fotovoltaicos Isolados
SFC	Sistemas Fotovoltaicos Conectados
SFV	Sistemas Fotovoltaicos
HSP	Horas de Sol Pleno
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
SI	Sistema Internacional

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Energia Solar</b>	<b>17</b>
2.1.1	Radiação Solar	18
<b>2.2</b>	<b>Energia Solar Fotovoltaica</b>	<b>19</b>
2.2.1	Células Fotovoltaicas	20
2.2.1.1	Características Elétricas das Células Fotovoltaicas	21
2.2.2	Módulos Fotovoltaicos	23
2.2.2.1	Curva I-V e P-V	24
2.2.2.2	Conexão Série	26
2.2.2.3	Conexão Paralelo	26
2.2.2.4	Efeito da Irradiância Solar e Temperatura	26
<b>2.3</b>	<b>Sistemas Fotovoltaicos</b>	<b>28</b>
2.3.1	Conversores CC/CC	29
2.3.2	Seguimento do Ponto de Potência Máxima (MPPT)	30
2.3.2.1	Algoritmos de MPPT	31
2.3.2.1.1	Perturbar e Observar	31
2.3.2.1.2	Condutância Incremental	32
2.3.2.1.3	Tensão Fixa	32
2.3.3	Controladores de Carga	33
2.3.4	Baterias	34
2.3.5	Inversores	35
<b>3</b>	<b>SISTEMA PROPOSTO</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Sistema Fotovoltaico Híbrido All-in-One</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Sistema Fotovoltaico Híbrido Bi-Modal ou Bidirecional</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Funcionamento de um SFH</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>Painéis Fotovoltaicos - PV Array</b>	<b>40</b>
<b>4.2</b>	<b>Banco de Baterias - Battery</b>	<b>43</b>
<b>4.3</b>	<b>Rede de Distribuição</b>	<b>44</b>
4.3.1	Concessionária - Three-Phase Source	44
4.3.2	Transformador Abaixador - Three-Phase Transformer (Two Windings)	46
4.3.3	Linha de Transmissão - Three-Phase PI Section Line	48

4.3.4	Transformador de Atendimento - <i>Multi-Winding Transformer</i> . . . . .	49
4.4	<b>Controlador de Carga</b> . . . . .	<b>50</b>
4.5	<b>Conversores</b> . . . . .	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÃO E RESULTADOS</b> . . . . .	<b>54</b>
5.1	<b>Teste do MPPT</b> . . . . .	<b>54</b>
5.2	<b>Sistema Híbrido Proposto</b> . . . . .	<b>57</b>
5.2.1	Dimensionamento do Sistema . . . . .	58
5.2.2	Funcionamento do Sistema . . . . .	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>62</b>

# 1 Introdução

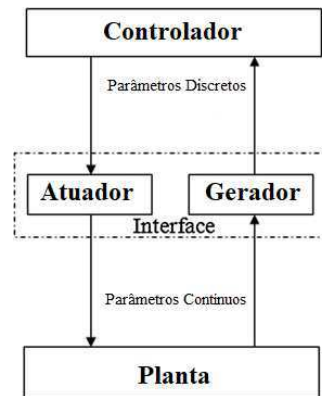
Em termos de gerência do consumo de energia elétrica, pouco se sabe dos detalhes do fluxo de potência ou das nuances entre variações de carga dentro de um sistema que contenha múltiplas fontes de energia elétrica. Sistemas assim não são convencionais, logo o senso comum, como na maioria dos casos, não basta para uma interpretação correta de como os recursos energéticos estão sendo administrados. Dessa forma, vê-se uma crescente necessidade de um olhar individualizado para esses sistemas ditos "híbridos", que fazem uso de diferentes tipos de geração de energia elétrica, sendo, portanto, um primeiro passo a monitoração dos níveis de energia consumida possibilitando uma visão mais detalhada o que corrobora para um sistema eficiente de controle tanto das fontes, como dos dispositivos a elas conectados.

Do ponto de vista de engenharia de controle, um Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode ser considerado como um sistema em que há um dinamismo de entradas e saídas. Em sistemas com mais de uma fonte de energia essa característica dinâmica é intrínseca à estrutura do sistema, já que os valores de referência dimensionados para tal costumam exibir oscilações, tanto graças ao período de utilização quanto as condições de operação que podem ser alteradas, fruto da flutuação das cargas conectadas ao sistema. Para contrariar essa característica, diversos estudos com vista ao desenvolvimento de sistemas de controle interativos vem sendo desenvolvidos. Como parte da composição desses sistemas, temos dispositivos auxiliares que são essenciais para seu funcionamento e buscam máxima eficiência na regulação dos parâmetros que determinam os níveis de tensão e corrente ótimos para plena operação do conjunto de fontes.

Na literatura, ([BIZON, 2013](#)), temos que o principal objetivo da supervisão e controle, é a otimização do fornecimento de energia. Onde as tarefas básicas para alcançar tal objetivo incluem melhorar o desempenho do sistema, seja por diminuir custos de produção ou aprimorar o consumo; manter os parâmetros operacionais (frequência, tensão, potência, etc.) dentro dos limites estabelecidos. Para tanto usa-se o chaveamento de componentes que, por sua vez, altera o ponto de operação dos equipamentos.

O diagrama da Figura 1 ilustra as três partes principais de um sistema de controle: Planta, interface e controlador.

Figura 1 – Sistema de Controle e Supervisão



Fonte: Adaptado de (BIZON, 2013)

Assim, esse trabalho apresenta como objetivo geral realizar o gerenciamento de um sistema híbrido de supervisão e controle de transferência de fontes alternativa de energia, bem como o demonstrar o chaveamento dos dispositivos auxiliares do sistema. Tendo como foco o controle de painéis fotovoltaicos, acumuladores de energia e o chaveamento de conversores e inversores de frequência. Como objetivos específicos desse trabalho destacam-se:

- Monitoramento dos níveis de tensão e corrente da unidade consumidora.
- Estudo do momento ótimo de chaveamento de múltiplas fontes de energia elétrica.
- Avaliação do conjunto de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos e suas especificidades.

O trabalho se estrutura da seguinte forma: Capítulo 1 é introdutório, tratando de caracterizar o tema abordado, define o objetivo geral e representa a estrutura do texto.

O Capítulo 2 aborda o estado da arte, as definições a cerca dos dispositivos usados, sua evolução ao longo dos anos e como se inserem no contexto atual.

O Capítulo 3 trata do sistema que foi proposto na elaboração desse trabalho. Em sequência o Capítulo 4 apresenta a metodologia adota na elaboração do projeto.

A etapa final fica por conta do Capítulo 5, exibindo as simulações e seus resultados, seguido pelo Capítulo 5 que trás as conclusões.

O Capítulo



## 2 Estado da Arte

O aumento exponencial no consumo de energia elétrica é uma realidade. O uso de combustíveis fósseis, petróleo, gás natural, carvão mineral e outros emissores de CO<sub>2</sub> são nocivos ao meio ambiente. Cientes desse quadro, é possível ver uma coalizão global empenhada em criar ou aprimorar novas fontes complementares de energias "limpas". Como exemplo desse empenho da comunidade internacional, tem-se o tratado de Quioto e a Convenção do Clima (O...), rumando na direção de tornar a geração de energia o mais limpa possível.

Dentro desse contexto hoje é possível ver países gerando grandes quantidades de energia oriundas de fontes renováveis. Como modelo, a Alemanha chegou a produzir tanta energia renovável que foi preciso pagar para os cidadãos consumirem (ALEMANHA...). No Brasil têm sido investido no desenvolvimento de parques eólicos e recentemente parques fotovoltaicos, além de um constante movimento para pressionar alteração da legislação vigente no intuito de gerar subsídios que levem a construção de novos sistemas, tanto em larga escala como modelos domésticos de geração de energia limpa (PROGRAMA...).

O contínuo e crescente aumento na busca de energias limpas, dentre elas a fotovoltaica, tem conduzido esse modelo de gerador a uma evolução tanto em eficiência quanto aprimoramento de sua capacidade geradora. Contudo o preço elevado desses equipamentos tem sido um fator impeditivo para sua utilização em larga escala. Diversos estudos da comunidade científica em parceria com as grandes corporações corroboram para tornar economicamente viável: desenvolvimento de novos materiais possibilitando melhor eficiência energética, avanços na construção de novas topologias para conversores (MIN JONG-PIL. LEE, 2007), algoritmos de controle de carga e chaveamento (AMUDHAVALLI.D MEYYAPPAN.M, 2013), todos avidamente perseguindo o objetivo conjunto que permita melhor eficiência e redução dos investimentos necessários para implementação de sistemas desse modelo (PRASAD SACHIN JAIN, 2008).

O presente trabalho insere-se nesse contexto expondo métodos de conversão de energia solar e as evoluções alcançadas nos últimos anos; o desenvolvimento de conversores eletrônicos de potência, introduzindo os conceitos básicos sobre conversores CC/CC e inversores CC/CA; o uso de controladores proporcional integral derivativo (PID) como regulador de tensão, concluindo com a apresentação do funcionamento dos acumuladores de energia e das técnicas usuais de controle com algoritmos de MPPT (Maximum Power Point Tracker). Sua relevância está na demonstração de meios práticos para modelagem e simulação de sistemas com múltiplas fontes de energia, também em maneiras de utilização dos conversores e algoritmos de controle e no chaveamento inteligente, tanto das fontes

quanto dos dispositivos eletrônicos de potência.

## 2.1 Energia Solar

A energia dita solar, é a energia proveniente da radiação emitida pelo Sol que chega a superfície da terra. Inúmeros efeitos de atenuação ocorrem quando essa energia chega ou cruza a atmosfera terrestre, esses processos geralmente são intitulados como processos de extinção. Há duas classes principais de processos de extinção: Absorção e difusão (sendo a reflexão um caso especial da difusão).

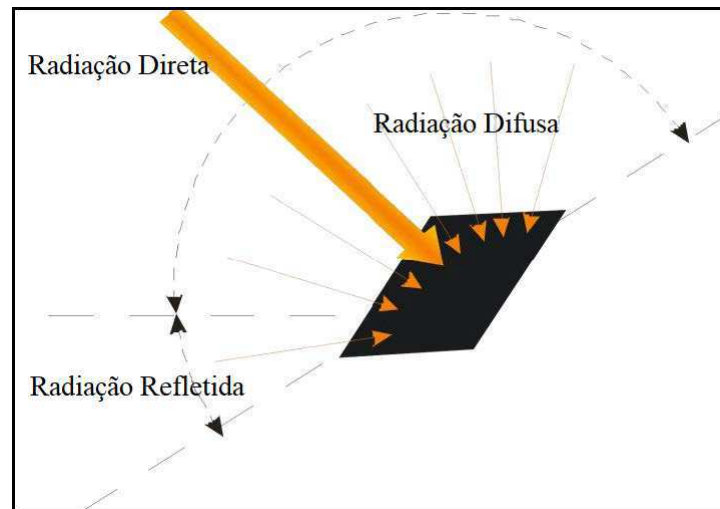
No tocantes aos processos sofridos por essa energia, é importante destacar a definição terminológica que os diferenciam, a fim de evitar eventuais equívocos conceituais, tendo em vista à semelhança gráfica. São eles: radiação, irradiação e irradiância. Radiação descreve diferentes processos de transferência de energia, o que inclui transmissão de energia na forma de ondas eletromagnéticas ou em forma de energia nuclear (que trata de radiações do tipo alfa, beta e gama). Irradiação se refere ao processo pelo qual um objeto é exposto a radiação. Na radiometria, irradiância é o fluxo radiante recebido em uma superfície por unidade de área. É definido como

$$E_e = \frac{\partial \phi_e}{\partial A} \quad (2.1)$$

Em que fluxo radiante é a energia radiante emitida, refletida, transmitida ou recebida por unidade de tempo. Sua unidade no SI é *watt* ( $W$ ) ou  $\left(\frac{J}{s}\right)$ . Sendo assim, irradiância solar pode ser definida como a potência por unidade de área recebida do Sol na forma de radiação eletromagnética, cuja unidade no SI é  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ . A irradiância, seja em uma superfície, na atmosfera ou no solo é sempre a soma de três componentes: irradiação devido a radiação direta, radiação difusa e radiação refletida. De acordo com (GÜNTHER et al., 2011), essa soma é chamada de irradiação total ou global  $G = G_b + G_d + G_r$ .

- Radiação Direta( $G_b$ ): É composta por todos os raios solares incidentes de forma direta sob o receptor em uma linha reta com o Sol;
- Radiação Refletida( $G_r$ ): Proveniente da difusão ou desvio em obstáculos atmosféricos ou terrestre. É recebida indiretamente
- Radiação difusa( $G_d$ ): Descreve a luz solar que foi espalhada por moléculas e partículas na atmosfera, mas que ainda incide sob a superfície da terra.

Figura 2 – Irradiação devido à radiação direta, difusa e refletida.



Fonte: Adaptado de (GÜNTHER et al., 2011)

Dentre os vários processos de conversão ou aproveitamento da energia solar incidida sobre a Terra, destacam-se o heliotérmico e o fotovoltaico. Onde o primeiro caracteriza-se pela imposição de uma diferença de potencial, causada pela junção de dois metais, em condições específicas. Já o efeito fotovoltaico é o surgimento de tensão elétrica ou de corrente elétrica em um material em resultado da sua exposição à luz (ATLAS... , 2005).

### 2.1.1 Radiação Solar

A despeito das condições climáticas ou atmosféricas (umidade, nebulosidade etc.), a radiação solar disponível para uso, depende da geolocalização e da posição temporal, variando conforme sua latitude, hora dia e também dia do ano. Esse fato deve-se, primeiro a inclinação do eixo imaginário da Terra, entorno do qual é desenvolvido o movimento de rotação, segundo a trajetória elíptica descrita pela Terra ao redor do Sol, conhecido como translação ou revolução. Ilustrado na Figura 3.

Sendo assim, tem-se uma variabilidade de incidência luminosa, dependente das regiões e períodos do ano. Essas variações são mais intensas em regiões polares. No Brasil não é possível observar variações significativas na duração solar do dia. Seu território encontra-se ligeiramente próximo da linha do Equador. Há, contudo, uma maior aglomeração da população brasileira em regiões mais afastadas do Equador. No ponto mais meridional do Brasil fica a cidade de Porto Alegre, onde a duração solar do dia varia de 10 horas e 13 minutos a 13 horas e 47 minutos, valores que variam entre 21 de junho e 22 de dezembro.

É possível calcular a duração solar do dia através da seguinte equação:

$$T_d = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (2.2)$$

Sendo:

$T_d$  : Tempo de duração do dia;

$\phi$  : A latitude da cidade;

$\delta$ : É a declinação da Terra no local de interesse.

A declinação da Terra, por sua vez, pode ser aproximada pela equação:

$$\delta = 23,25 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + n)\right) \quad (2.3)$$

Onde  $n$  é o dia de interesse do ano (1.º/jan = 1; 31/dez = 365 ou 366, se bissexto).

Desse modo, a fim de maximizar a proficuidade da radiação solar, deve-se ajustar a posição ou inclinação do coletor solar de acordo com a latitude do local e o período do ano em que se requer a energia (ATLAS... , 2005).

Figura 3 – Representação das estações do ano e do movimento da Terra em torno do Sol.



Fonte: Adaptado de (MAGNOLI; SCALZARETTO, 1998)

## 2.2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através de um processo de conversão da luz em eletricidade. Esse processo é possível graças ao efeito fotovoltaico. Os dispositivos responsáveis pela execução desse processo são chamados de células fotovoltaicas, dispositivo composto de uma material semicondutor. O efeito fotovoltaico foi constatado por Becquerel<sup>1</sup> em 1839. Ele verificou que iluminando uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos nela imersos. Já os primeiros dispositivos que podem ser denominados de células fotovoltaicas foram fabricados em Selênio e desenvolvidos por Charles Fritts em 1883. O primeira arranjo de painéis solares do mundo, usando as células de Selênio de Fritts, foi instalado no ano de 1884 em um telhado da cidade de Nova York,

<sup>1</sup> Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891), cientista francês.

a Figura 4 resgata essa memória histórica.

Figura 4 – A primeira matriz solar em um telhado da cidade de Nova York.



Fonte: (PHOTOVOLTAIC..., 2014)

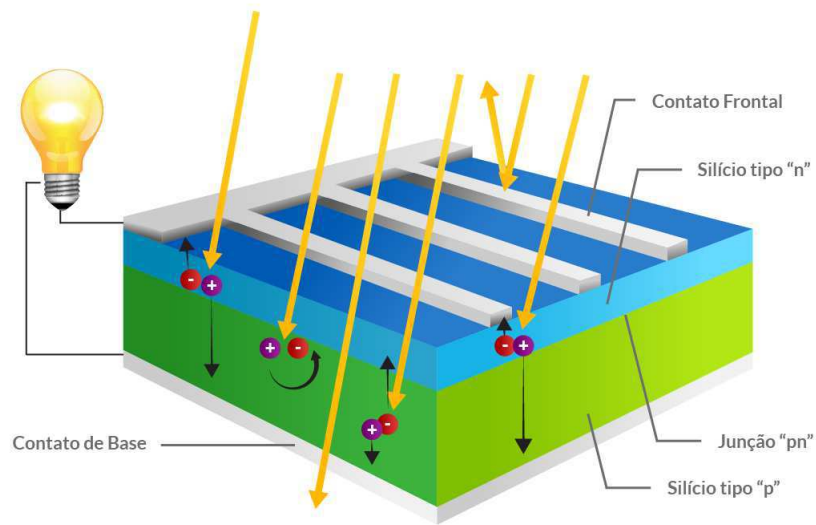
Contudo, as células solares tornaram-se mais práticas para uso na obtenção de energia após o desenvolvimento de Russell Ohl, em 1941. Ohl foi um notável pesquisador na área de semicondutores, como fruto desse trabalho, desenvolveu células de junção de Silício PN que atingiram eficiências superiores a 5% nas décadas de 1950 e 1960.

Numerosas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nas últimas 6 décadas. Decorrente disso as células fotovoltaicas produzidas a partir de lâminas de silício cristalino tornaram-se o padrão do mercado atualmente, respondendo por cerca de 81% da produção mundial desde 2000, e em 2011 apresentou 88% do mercado de células solares (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.2.1 Células Fotovoltaicas

Na Figura 5 é ilustrado o princípio básico de funcionamento e a estrutura de uma célula fotovoltaica constituída de camadas por camadas sobrepostas de material semicondutor, sendo que sob a influência da luz criam-se cargas livres positivas e negativas, que se deslocam através de um condutor e podem alimentar uma carga.

Figura 5 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

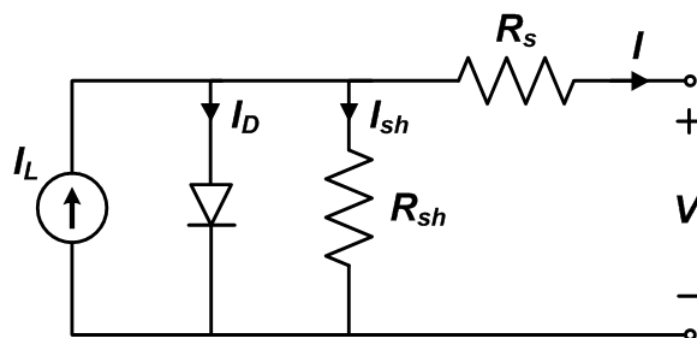


Fonte: Adaptado de (LES..., )

### 2.2.1.1 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas

Do ponto de vista de circuitos elétricos, uma célula fotovoltaica ideal pode ser representada como sendo um fonte de corrente conectada em paralelo com um diodo retificador. O modelo mais comum é o conhecido como *single-diode model*, como é mostrado no circuito equivalente da Figura 6.

Figura 6 – Circuito Equivalente para células fotovoltaicas.



Fonte: Adaptado de (LUQUE; HEGEDUS, 2011)

Por meio do circuito equivalente acima mostrado, do uso das Leis de Kirchhoff e também do auxílio de (LUQUE; HEGEDUS, 2011) é possível escrever a corrente  $I$  de saída por.

$$I = I_L - I_D - I_{Sh} \tag{2.4}$$

Onde  $I_L$  representa a corrente gerada pela foto-célula exposta a luz,  $I_D$  é a corrente dependente da tensão que é perdida por recombinação, e  $I_{Sh}$  representa a corrente perdida devido a resistências *shunt*. Tendo como modelo básico o *single-diode model*, a corrente  $I_D$  pode ser definida segundo a equação de Shockley para diodos ideais (SHOCKLEY, 1949).

$$I_D = I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

Em que:

$I_0$  - É a corrente de saturação reversa do diodo (A);

$n$  - Fator de idealidade do diodo, número adimensional geralmente entre 1 e 2, obtido por ajuste de dados medidos experimentalmente;

$q$  - carga do elétron ( $1,6 * 10^{-19}C$ );

$k$  - constante de Boltzmann <sup>1</sup> ( $1,38 * 10^{-23} J/K$ );

$T$  - Temperatura absoluta (K).

Em conformidade com (PINHO; GALDINO, 2014), a corrente de saturação reversa  $I_0$  pode ser teoricamente mensurada pela Equação 2.6 pelas propriedades do material e características físicas da junção PN.

$$I_0 = q.A.n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p.N_d} + \frac{D_n}{L_n.N_a} \right) \quad (2.6)$$

Onde:

$I_0$  - É a corrente de saturação reversa do diodo (A);

$A$  - Área da seção reta da junção (área da célula);

$n_i$  - Concentração dos portadores intrínsecos no material;

$N_d, N_a$  - Concentração dos dopantes do tipo  $n$  e tipo  $p$ , respectivamente;

$L_p, L_n$  - Comprimentos de difusão de lacunas e de elétrons;

$q$  - carga do elétron ( $1,6 * 10^{-19}C$ ).

A corrente retida pelas resistências *shunt* pode ser escrita como:

$$I_{Sh} = \frac{(V + IR_s)}{R_{Sh}} \quad (2.7)$$

Combinando e rearranjando as equações acima é possível chegar ao modelo matemático generalista que define o comportamento elétrico conhecido como *single-diode model*:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.8)$$

<sup>1</sup> A constante de Boltzmann é a constante física que relaciona temperatura e energia de moléculas. Tem o nome do físico austríaco Ludwig Boltzmann, que fez importantes contribuições para a física e para a mecânica estatística, na qual a sua constante tem um papel fundamental.

Os cinco parâmetros nesta equação são essenciais para todos os modelos de circuitos equivalentes *single-diode model*:

$I_L$  = Corrente por exposição à luz (A);

$I_0$  = Corrente de saturação reversa do diodo;

$I$  = Corrente na carga (A);

$R_s$  = Resistência série ( $\Omega$ );

$R_{sh}$  = Resistência *shunt* ( $\Omega$ );

$n$  = Fator de idealidade de diodo (adimensional)

Temos, portanto, para um módulo fotovoltaico composto por  $N_s$  células solares idênticas conectadas em série, que:

$$\begin{aligned} I_{\text{módulo}} &= I_{\text{cell}}, \\ V_{\text{módulo}} &= N_s * V_{\text{cell}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

De posse desse conjunto equações é possível ter um fundamento sólido do funcionamento elétrico das células solares, bem como fornecer a base teórica para a modelagem computacional moderna das células ou painéis fotovoltaicos. Tais recursos auxiliam de forma magistral pesquisadores da área, como por exemplo para traçar a curva I - V que ilustra a relação entre a tensão e corrente de saída de um painel fotovoltaico, sendo esta, portanto, informação primordial para todo o estudo de geração de energia fotovoltaica.

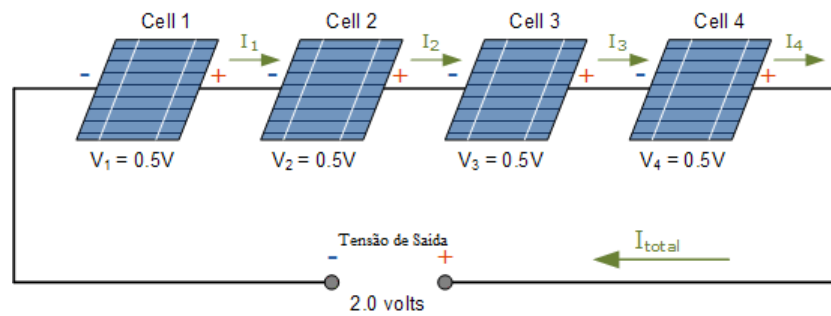
## 2.2.2 Módulos Fotovoltaicos

Tendo em vista que uma célula solar individualmente não é capaz de fornecer uma potência considerável, apresentando uma tensão elétrica de circuito aberto ( $V_{OC}$ ) entre 0,4 e 0,6 V e uma corrente de 3 A para uma superfície de 100 cm<sup>2</sup> a 25 °C. Contudo, ao conectar várias células solares é possível obter uma tensão e corrente mais elevada, constituindo assim os módulos, painéis ou placas fotovoltaicas.

Para se obter uma tensão maior de saída, as células geralmente são conectadas em série. Como ilustrado na Figura 7.



Figura 7 – Conexão de células fotovoltaicas em série.



Fonte: Adaptado de (ALTERNATIVE... , )

Contudo essa associação pode ser feita em série ou paralelo, de forma a conseguir os níveis de tensão e corrente desejados. Essa conexão pode ser feita entre as células, que constituem os módulos, ou arranjos fotovoltaicos. Os arranjos fotovoltaicos podem ser formados por associações série-paralelo para estabelecer uma única saída de tensão e corrente do sistema, modificando assim a sua curva I-V.

### 2.2.2.1 Curva I-V e P-V

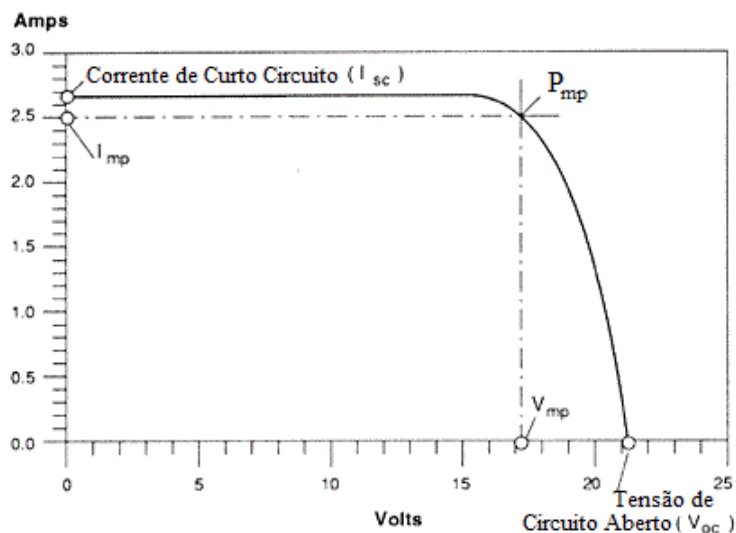
O funcionamento de uma módulo fotovoltaico pode ser estudado observando a curva que determina a relação da tensão com a corrente à saída do mesmo. Esta curva é conhecida como a característica I-V e apresenta a mesma forma geral para qualquer célula fotovoltaica.

A Figura 8 ilustra uma curva I-V de uma placa genérica. Nela é possível verificar a existência de cinco pontos que são essenciais para o entendimento do funcionamento elétrico dos módulos fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014). São eles:

- Corrente de Curto Circuito ( $I_{sc}$ ): É a máxima corrente que o módulo pode oferecer. É medida quando a tensão elétrica em seus terminais é nula. Pode ser medida através de um amperímetro curto-circuitando os terminais de saída do módulo. A corrente de curto circuito depende diretamente da área da célula solar e da irradiância solar, como demonstrado na Equações 2.6 e 2.8;
- Tensão de Circuito Aberto ( $V_{OC}$ ): É a tensão estabelecida entre os terminais do módulo fotovoltaico quando não existe corrente elétrica fluindo. É a máxima tensão que o módulo pode fornecer. Pode ser medido com um voltímetro na saída do módulo;
- Corrente em Máxima Potência ( $I_{mp}$ ): Corrente máxima que um módulo fotovoltaico pode entregar a uma carga;
- Tensão de Máxima Potência ( $V_{mp}$ ): É a tensão máxima que o módulo fornece quando em carga;

- Potência Máxima ( $P_{mp}$ ): É a potência máxima obtida pelo produto de  $I_{mp}$  por  $V_{mp}$ , que depende diretamente das condições de irradiância e temperatura.

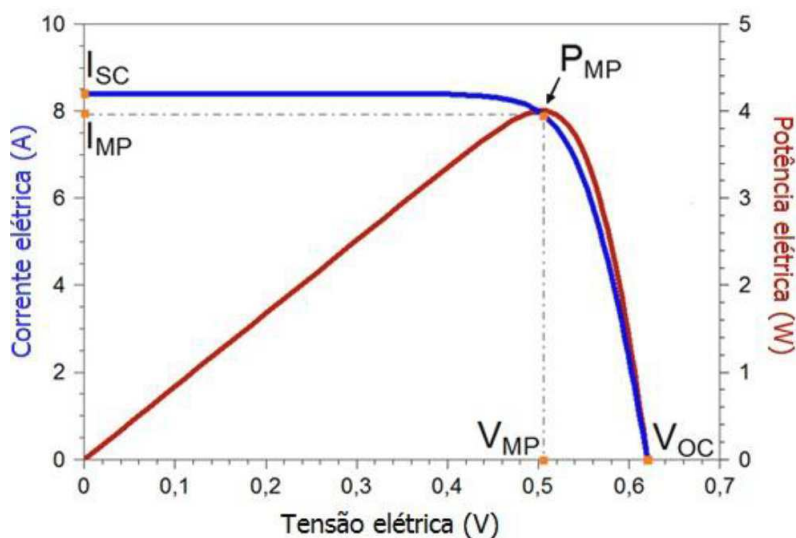
Figura 8 – Curva IV de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (ENCYCLOPEDIA... , )

Através dos dados da curva I-V é possível determinar a curva que descreve a potência gerada pelos módulos em função da tensão elétrica. Essa curva é denominada de curva P-V, na qual se destaca o ponto  $P_{mp}$ , representando a máxima potência, ou o ponto no qual sua derivada em função da tensão é nula ( $\frac{dP}{dV} = 0$ ).

Figura 9 – Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014)

### 2.2.2.2 Conexão Série

Na conexão série, o pólo positivo de uma célula ou painel é conectado ao terminal negativo do outro dispositivo, e assim por diante. Julgando os dispositivos idênticos e submetidos ao mesmo nível de irradiância, conectando-os em série suas tensões são somadas e a corrente elétrica não é alterada. Logo:

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 + \dots + V_n, \\ I &= I_1 = I_2 = \dots = I_n \end{aligned} \quad (2.10)$$

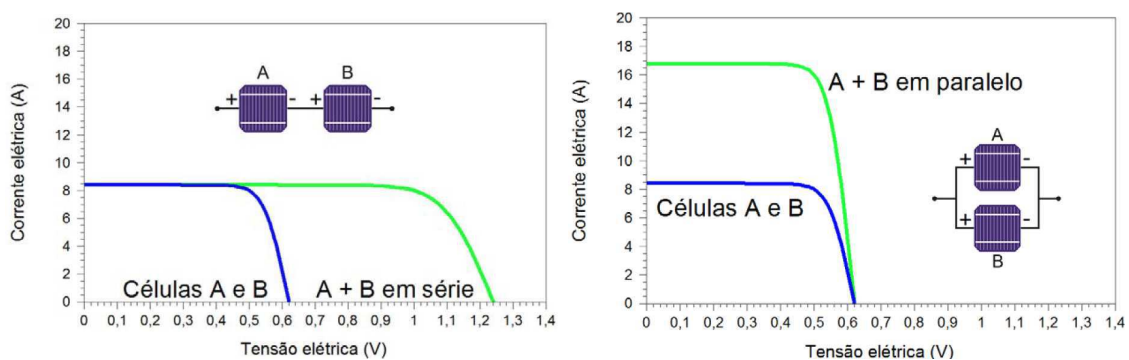
Resultado que é demonstrado na Figura 10 por meio de sua característica I-V. É importante mencionar que, caso a associação em série seja feita entre dispositivos diferentes, ou seja, com correntes diferentes, a corrente elétrica total será limitada pela menor corrente. Contudo, esta não é uma prática recomendável (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.2.2.3 Conexão Paralelo

Na associação em paralelo, os pólos positivo e negativo das células ou módulos são ligados entre si, como ilustrado na Figura 10. Nessa configuração há a soma das correntes e a manutenção da tensão elétrica. Ou seja:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + \dots + I_n, \\ V &= V_1 = V_2 = \dots = V_n \end{aligned} \quad (2.11)$$

Figura 10 – Células conectadas em série e paralelo.



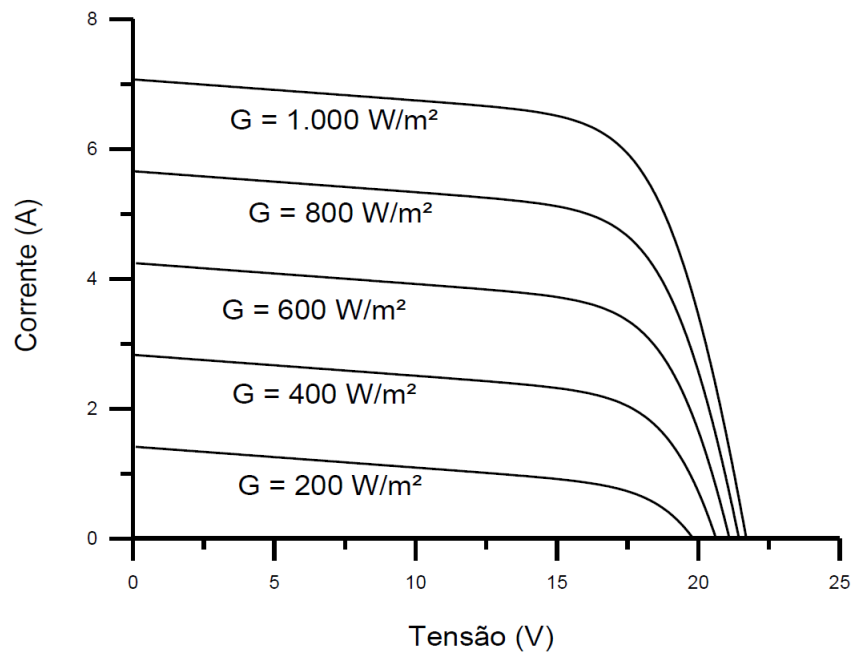
Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014)

### 2.2.2.4 Efeito da Irradiância Solar e Temperatura

Por se tratar de um aglomerado de células solares, os módulos apresentam, portanto, comportamento semelhante, onde sua capacidade geradora é diretamente influenciada pela incidência de luz e a temperatura a qual operam.

A corrente elétrica gerada pela luz é proporcional ao fluxo de fótons com energia que incide nas células. Com o aumento da irradiância aumenta-se, na mesma proporção, o fluxo de fótons que, sendo assim, há um aumento da corrente proporcionalmente maior. Assim, uma relação aumento linear e diretamente proporcional entre corrente e irradiância é estabelecida, como mostra a Figura 11.

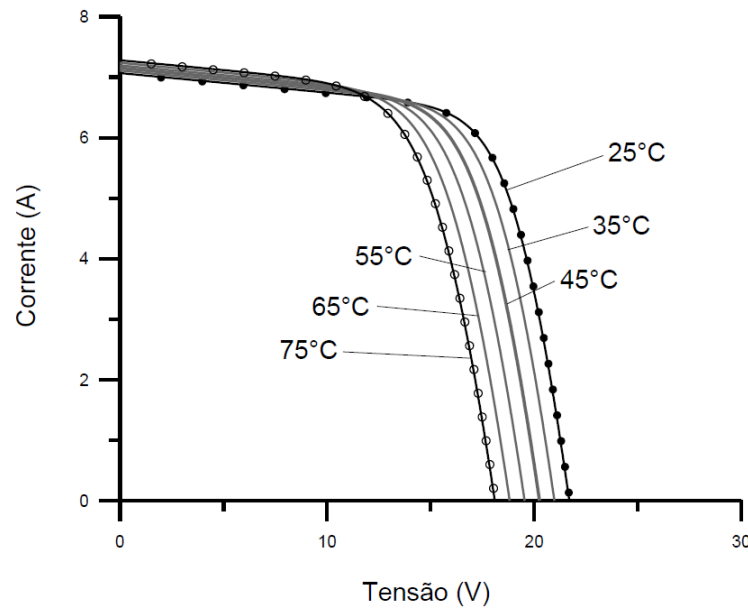
Figura 11 – Efeito causado pela variação da irradiância sobre a curva característica I-V.



Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014)

Há também variações de corrente fruto da variação de temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos, que sofrem incidência direta de radiação solar e também estão submetidos a temperatura ambiente. A Figura 12 demonstra essa variação de corrente para diversas temperaturas na célula. É possível notar um leve aumento da corrente, contudo, uma considerável queda de tensão é registrada. Como a elevação de corrente é pequena, acaba por não compensar graças a queda de tensão, quando se visto em termos de potência gerada.

Figura 12 – Efeito causado pela variação da temperatura sobre a curva característica I-V.

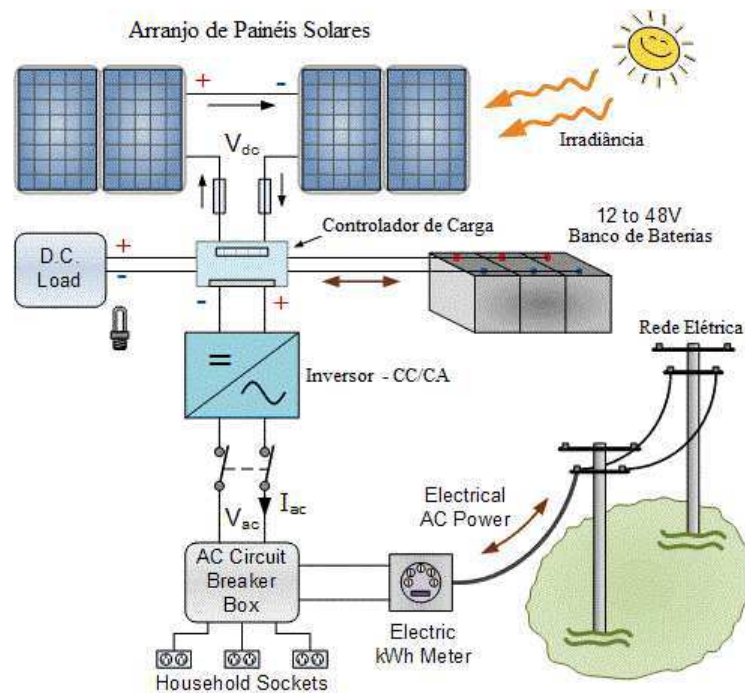


Fonte: Adaptado de (PINHO; GALDINO, 2014)

## 2.3 Sistemas Fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico é composto por um bloco gerador, um bloco condicionador de potência e, de maneira não obrigatória, um bloco de acumuladores de energia. Um sistema desse gênero é capaz de produzir e/ou armazenar energia proveniente da radiação solar. O bloco gerador contém os arranjos descritos nos tópicos anteriores, portanto, esse tópico tratará dos demais dispositivos que compõem um sistema fotovoltaico em seu modelo *off-grid* (sem conexão com a rede de distribuição de energia elétrica, como também em seu modelo *on-grid* (conectado à rede de distribuição)). O bloco responsável pelo condicionamento de potência contém conversores do tipo CC/CC conectado a um dispositivo do tipo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), inversores de frequência, controladores de carga (geralmente em sistemas *off-grid*), bem como dispositivos de controle, proteção e monitoramento. O conjunto de armazenamento é constituído por dispositivos armazenadores de energia, também comumente chamados de baterias. Esse tópico, portanto, trata da descrição do funcionamento de cada dispositivo conectado aos módulos fotovoltaicos acima descritos. Como ilustra a Figura 13

Figura 13 – Dispositivos de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de (??).

Os sistemas fotovoltaicos podem dividir-se em duas principais categorias: Sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) e sistemas fotovoltaicos conectados (SFC). Sistemas fotovoltaicos isolados, também chamados de sistemas *off-grid*, consistem em sistemas que não são conectados à rede de fornecimento elétrica distribuída. Logo, a geração e consumo mantêm-se no local. Esse modelo de sistema é bastante utilizado em lugares remotos onde não há fornecimento adequado de energia elétrica e também em locais acometidos por catástrofes ambientais. Já os sistemas conectados são denominados como *on-grid* e são o oposto dos SFI, havendo conexão com a rede de distribuição para possível monetização da potência gerada, cujo excedente é acrescido na rede podendo gerar créditos para o proprietário.

Há também uma outra categoria de sistemas fotovoltaicos não muito comum, mas que é abordada em particular nesse trabalho, que são os sistemas fotovoltaicos híbridos (SFH), esses sistemas levemente complexos dispõem de mais de uma fonte de energia elétrica, requerendo assim algum dispositivo de controle que faça o chaveamento das múltiplas fontes, objetivo desse trabalho.

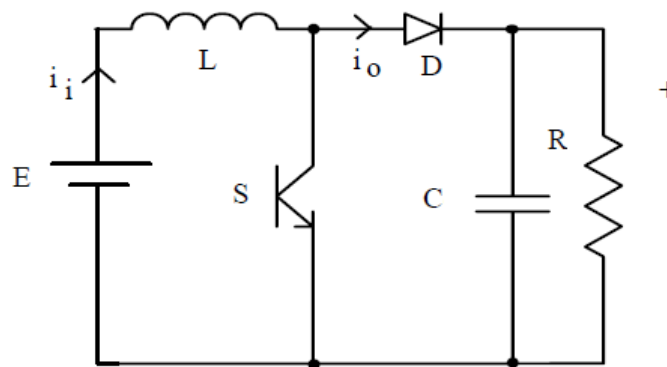
### 2.3.1 Conversores CC/CC

Os conversores CC/CC são o segundo estágio de um sistema fotovoltaico, vindo logo após o estágio gerador, composto pelo arranjo de placas fotovoltaicas. A utilização desse tipo de conversor é feita para se ter um controle mais preciso dos níveis de tensão

e corrente que são aplicadas ao estágio posterior, que pode ser um banco de baterias ou um inversor de frequência. Em sistemas fotovoltaicos, esses conversores também podem apresentar um sistema de controle que busca resgatar a máxima potência possível de ser gerada pelos painéis, entregando, assim, melhor desempenho para todo o sistema. Esse dispositivo de controle é conhecido como *Maximum Power Point Tracking* (Seguimento do Ponto de Potência Máxima).

O uso de conversores de potência CC/CC se dá também quando se almeja um nível de tensão de saída CC com valor diferente do que é fornecido pelas placas fotovoltaicas. Esse conversor pode ser utilizado para elevar tensão (conversores do tipo boost) e também para abaixar tensão (conversores do tipo buck). A transferência de energia se dá por um processo de chaveamento da tensão de entrada de forma adequada. Controla-se o período e a frequência de chaveamento dos dispositivos semicondutores como o MOSFET ou IGBT a fim de se regular a tensão de saída aos valores desejados.

Figura 14 – Conversor Buck - Topologia Geral.



Fonte: Própria.

### 2.3.2 Seguimento do Ponto de Potência Máxima (MPPT)

No subtópico 2.2.2.1 foi apresentado o  $P_{mp}$ , que representa o ponto de máxima potência, ou seja, o ponto com derivada nula. Conforme foi discutido anteriormente os módulos fotovoltaicos sofrem influência direta do nível de irradiância e temperatura de operação, logo, há flutuações de tensão e corrente dependentes desses valores. A tensão e, conseqüentemente, a potência gerada decrescem em valor absoluto quando há aumento da temperatura. Assim sendo, os valores de corrente e tensão de máxima potência ( $I_{mp}$ ,  $V_{mp}$ ) flutuam de acordo com essas condições.

É sabido que as variações de temperatura, geralmente, ocorrem de maneira lenta e gradual. Há, contudo, uma maior preocupação com os níveis de irradiância, pois costumam apresentar mudanças drásticas em intervalos de segundos, resultado de sombreamento parciais por árvores, passagem de nuvens ou algum tipo de objeto que bloqueie a passagem de luz para os módulos (PINHO; GALDINO, 2014).

Ciente disso, é adequado o emprego de algum sistema de controle que monitore de forma contínua alterações na curva I-V dos módulos, atuando diretamente no chaveamento do inversor buscando maximizar a extração de potência do bloco gerador. É possível implementar esse sistema de forma alógica, ou de maneira mais comum, de forma digital, através de processadores digitais de sinais (DSP - *Digital Signal Processing*).

### 2.3.2.1 Algoritmos de MPPT

Os algoritmos de MPPT tem a função de buscar o ajuste contínuo dos níveis de tensão e corrente para inúmeras condições de irradiância e temperatura. Os métodos são diversos e dividem-se em duas categorias: métodos diretos e indiretos.

- Métodos Diretos: Valem-se de medições em tempo real de corrente e tensão na entrada do conversor/inversor, buscando o ponto de potência máxima dos módulos fotovoltaicos. Por utilizarem dados em tempo real, não carecem de informações prévias sobre os módulos ou características do sistema. Exemplos desse tipo são os métodos: Perturbar & Observar (PO - *Perturb&Observe*) e Condutância Incremental(*IncCond*);
- Métodos Indiretos: Utilizam sinais ou informações de referência para estimar e/ou buscar o ponto de máxima potência. Para tanto é preciso prover o algoritmo com uma base de dados para busca e comparação com a situação atual. São pouco utilizados pois apresentam imprecisão e falhas ao logo do envelhecimento ou desgaste natural dos módulos.

A seguir uma descrição básica de dois métodos diretos e um método indireto (CARVALHO, 2012).

#### 2.3.2.1.1 Perturbar e Observar

Esse método consiste em alterar o deslocamento do ponto de operação de maneira forçada em uma direção (daí o "perturbar"), em seguida observa-se o resultado da potência instantânea. Essas alterações são feitas na forma de pequenos incrementos, positivos ou negativos, em intervalos determinados. Se um incremento positivo de tensão resultou em um aumento da potência de saída, significa que a perturbação deve prosseguir nesse sentido incremental. Se, em determinado ponto, a potência começar a decrescer, significa que a tensão para máxima potência foi ultrapassada e perturbação seguinte deve ser no sentido oposto. Esse processo é contínuo e como resultado a operação dos módulos oscila entre o valor ótimo para máxima potência.



### 2.3.2.1.2 Condutância Incremental

Trata-se de uma versão melhorada do P& B para determinação do ponto ótimo de operação, onde usa-se incremento adaptativo. O método se baseia no cálculo da derivada da curva de potência. Quando a derivada apresenta um valor positivo, significa que o ponto de operação encontra-se na subida da curva, caso contrário, encontra-se na descida. Em resumo o método busca a soma nula da condutância e da condutância incremental, que representa o ponto de máxima potência.

### 2.3.2.1.3 Tensão Fixa

O método trabalha para estabilizar o gerador fotovoltaico polarizado em uma tensão de operação ótima. O nível de tensão é estabelecido de antemão, baseando-se nas características de operação dos módulos. A desvantagem do método é sua incapacidade de responder a oscilações das condições adversas da do clima e possíveis mudanças nas características de operação dos módulos fotovoltaicos.

Figura 15 – Modelo de Controlador de Carga com uso de MPPT.



Fonte: Amazon.

### 2.3.3 Controladores de Carga

Os controladores de carga geralmente são componentes dos SFI, cujo objetivo principal é proteger o banco de baterias contra variações bruscas de tensão e cargas e descargas excessivas, aprimorando assim a vida útil da mesma. Também é conhecido como "regulador de carga" ou "regulador de tensão". Como componente essencial em SFI, a qualidade do controlador de carga deve ser assegurada, já que os danos sofridos pelo banco de baterias pode ser irreparável, sendo que este último corresponde a uma grande parcelado investimento financeiro de sistemas fotovoltaicos.

O projeto de um controlador de carga leva em considerações características específicas das baterias, já que a uma variedade de modelos de baterias com diferentes constituições químicas. Portanto um controlador projetado para uma bateria de

Sua utilização permite otimizar as dimensões do banco de bateria, além de oferecer um maior nível de proteção ao sistema. Os controladores de carga tem como função desconectar os módulos fotovoltaicos no momento em que as baterias estejam com carga total e interromper o fornecimento de energia no momento em que sua carga estiver em nível baixo, representando provável comprometimento da vida útil. A seguir a Figura 16 demonstra um modelo de SFI com a inserção de um controlador de carga.

Figura 16 – Modelo de Sistema Fotovoltaico Isolado.



Fonte: (SISTEMAS...).

Atualmente a maioria dos controladores de carga no mercado se baseiam no estado de carga (SoC - *state of charge*) em sistemas fotovoltaicos. Esse modelo visa manter a proteção contra carga e descarga excessiva, independente do modelo de bateria utilizado.

Seu desafio é manter a eficiência e vida útil das baterias em função do estado de carga e da temperatura de operação.

### 2.3.4 Baterias

Também componente obrigatório em sistemas fotovoltaicos isolados, as baterias são dispositivos eletroquímicos acumuladores de energia, sendo capaz tanto de armazenar quanto de fornecer energia a uma carga. Seu uso em SFI faz-se necessário para atendimento da demanda de carga em períodos nos quais a geração de energia é insuficiente para alimentar a carga (à noite ou em dias chuvosos). Sendo assim, a energia gerada durante o dia também é armazenada para posterior utilização em atendimento à demanda (PINHO; GALDINO, 2014).

Apesar de serem mais comuns em sistemas fotovoltaicos isolados, acumuladores de energia também podem ser utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o que foi denominado no tópico anterior como sistemas fotovoltaicos híbridos. Esses sistemas são encontrados nos EUA e Europa, no Brasil, no entanto esse sistema ainda não é adotado, não havendo regulamentação pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), sendo assim não aceito pelas concessionárias. Sendo esse outro ponto de relevância desse trabalho, demonstrar a interconexão de fontes em sistemas híbridos.

As tensões de operação nominais mais comuns desses dispositivos são: 12, 24, 36 e 48 volts. A capacidade disponível das baterias é medida em amperes-hora (Ah) que é a capacidade total que pode ser extraída sob um conjunto específico de operação. Teoricamente uma bateria de 100 Ah deve ser capaz de fornecer uma corrente de 100 A durante 1 hora, ou 50 A durante 2 horas. Contudo, esse fator é influenciado pela capacidade da bateria e sua velocidade de carga ou descarga. Além disso, outro fator que influencia a capacidade das baterias é a temperatura de operação. Por padrão, as baterias são especificadas para operarem em 25°C, sendo possível encontrar temperaturas mais altas. Temperaturas mais baixas diminuem significativamente sua capacidade, enquanto que temperaturas mais elevadas resultam em uma capacidade ligeiramente maior, resultando contudo, em perda de água do eletrólito e consequente diminuição no número de ciclos e vida útil da bateria (PINHO; GALDINO, 2014).

Além de sua tensão de operação e capacidade de energia, um parâmetro que deve ser levado em conta ao se trabalhar com esses dispositivos é o estado da carga, que traduz a capacidade remanescente disponível em uma bateria em determinado momento. Sua sigla em inglês é SoC - *state of charge*, como citado no tópico 2.3.3. A exemplo, se 50 Ah forem retirados de uma bateria cuja capacidade nominal é de 100 Ah em plena carga, significa que seu estado atual é de 50%. Sendo portanto este o valor complementar da

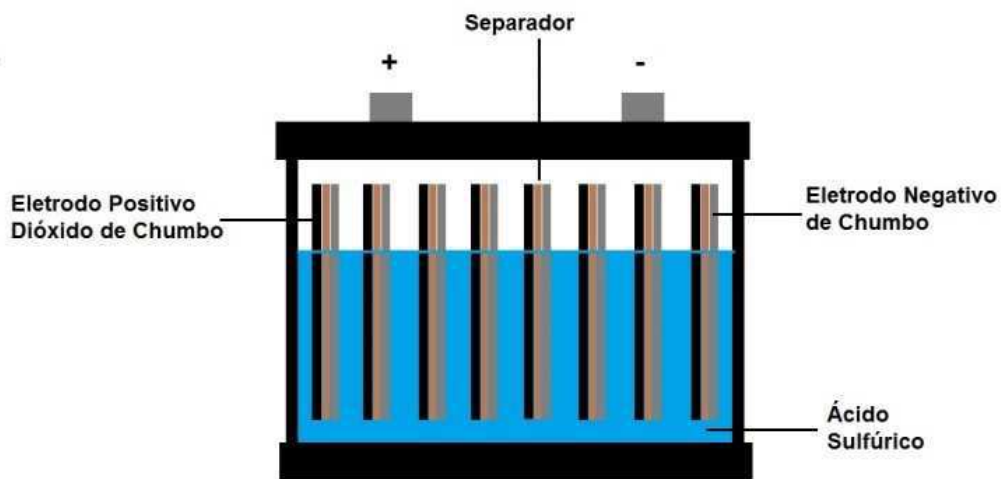
profundidade de descarga (DoD - *Depth of discharge*).

$$SoC(\%) = 100 \times \frac{\text{capacidade remanescente na bateria (Ah)}}{\text{capacidade nominal da bateria (Ah)}} \quad (2.12)$$

$$DoD(\%) = 100 - SOC(\%) \quad (2.13)$$

É interessante mencionar que, por um processo natural, as baterias se descarregam gradualmente, fruto de processos químicos inerentes a sua composição. Processo conhecido como auto descarga.

Figura 17 – Partes que constituem uma bateria de chumbo-ácido.



Fonte: (A..., ).

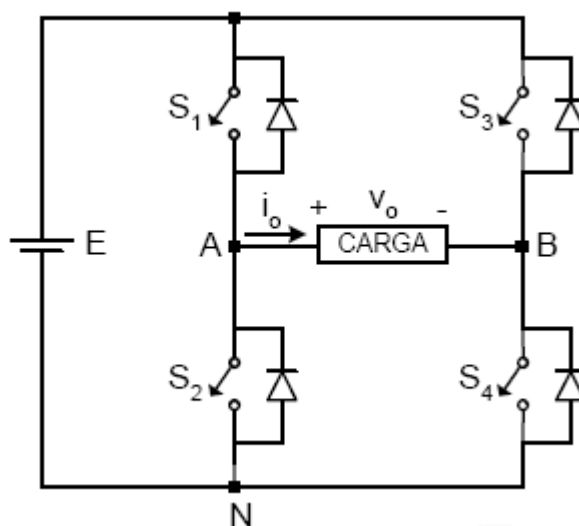
### 2.3.5 Inversores

Um inversor de frequência é um equipamento eletrônico de potência responsável pela transformação de corrente contínua em corrente alternada, transferindo potência de uma fonte contínua, tais como: banco de baterias; células de carga ou painéis fotovoltaicos, para uma carga em corrente alimentada em corrente alternada. Sua tensão de saída deve ser adequada à exigência da carga, em amplitude, frequência e nível harmônico. Dividem-se em monofásicos e polifásicos. Seu principal papel é fornecer uma tensão de saída de qualidade aceitável em conformidade com as características da carga. Em sistemas de geração distribuída seu principal papel é entregar energia elétrica em corrente alternada dentro dos padrões de qualidade exigidos pela rede de distribuição.

Em uma maneira geral, os inversores de frequência que são utilizados para conexão à rede, com potência até 5kW tem uma saída monofásica. Ressaltando que para estes casos, a frequência da saída deve coincidir com a frequência de operação da rede de distribuição.

Acima de 5kW geralmente encontramos inversores trifásicos ou que monofásicos com algum tipo de associação trifásica. A potência do inversor deve ser dimensionada de acordo com a potência demandada pela carga, além também, da potência máxima fornecida pela geração.

Figura 18 – Circuito inversor de frequência com carga.



Fonte: Própria.

## 3 Sistema Proposto

Como foco desse trabalho, os Sistemas Fotovoltaicos Híbridos(SFH) representam um desafio, tanto quanto da sua implementação quanto do seu dimensionamento, já que as múltiplas fontes precisam estar em plena conformidade a fim de prevenir que sobretensões ou sobrecorrentes surjam na operação do sistema.

Por definição, um SFH é um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica que é conectado à rede elétrica de distribuição (de forma similar aos Sistemas Fotovoltaicos Conectados (SFC) ou *on-grid*) e integrado com algum sistema de armazenamento de energia(similar ao Sistema Fotovoltaico Isolado - SFI), que em suma, deve ser feito de forma inteligente. Um sistema desse gênero gera além de uma maior economia, uma confiabilidade para cargas ditas prioritárias (cargas para as quais o fornecimento de energia não pode cessar), além inclusive de fornecer uma autonomia conforme o banco de baterias ou demais fontes secundárias, diferenciando-se assim dos sistemas *on-grid*, que não operam em caso de faltas ou quedas de energia da rede local.

### 3.1 Sistema Fotovoltaico Híbrido All-in-One

Conjunto de ativos Inversor Interativo, Inversor Autônomo e Banco de Baterias, em alguns casos são aplicados Retificadores, Controladores de Carga e outros equipamentos. Utilizado para alimentação de cargas prioritárias em instalações no qual o funcionamento deve ser ininterrupto e seguro. O sistema possui arquitetura modular, de forma que pode ser ampliado e adaptado para inúmeras situações permitindo flexibilidade e grande abrangência. Sua comercialização normalmente realizada em sistemas pré-montado e homologado por um fornecedor, ou desenvolvimento de Engenharia para integração de componentes conforme aplicação necessária, para esses casos um Engenheiro Especializado será indispensável para aprovação e homologação de projeto (SISTEMA... , ).

### 3.2 Sistema Fotovoltaico Híbrido Bi-Modal ou Bidirecional

Inversor Interativo com função bi-modal ou bidirecional. Seria o funcionamento igual ao de um Sistema Fotovoltaico Autônomo (SFA), com a alteração somente do inversor, que seria bi-modal (Dois modos de aplicação, consumo direto pela rede elétrica ou pelo Banco de Baterias). Entretanto, o dimensionamento não necessita considerar o funcionamento das cargas pelo período de dois dias (padrão recomendado para SFA), pois a maioria dos inversores híbridos consegue carregar o banco de baterias com energia fornecida pela rede. São, basicamente, um misto de *nobreak* e SFCR, com custos mais

elevados devido ao Banco de Baterias. Ao manter o funcionamento igual a o de um Sistema Fotovoltaico Autônomo (SFA), o sistema não injeta a energia excedente gerada pelo Sistema Fotovoltaico na Rede Elétrica Concessionária, não necessitando de Homologação para implantação (SISTEMA... , ).

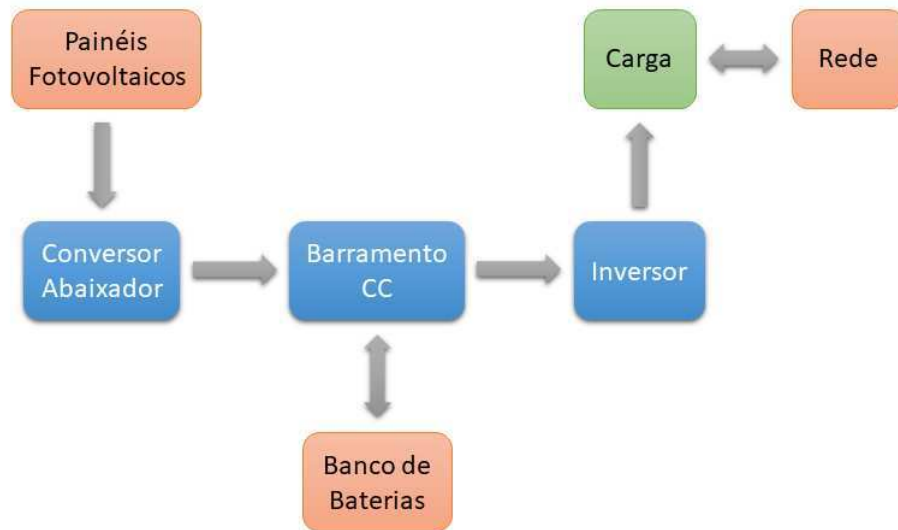
Figura 19 – Sistema Híbrido.



Fonte: (HÍBRIDO, ).

A Figura 19 acima retrata de forma ilustrativa quais os dispositivos utilizados num sistema fotovoltaico híbrido e suas conexões. O diagrama de blocos abaixo ilustra o forma simples o sistema proposto neste trabalho.

Figura 20 – Diagrama de Blocos de Sistema Proposto.



Fonte: Autoria Própria.

### 3.3 Funcionamento de um SFH

Um Sistema Fotovoltaico Híbrido possui diferentes modos de operação, que variam dependendo da situação e/ou dos recursos nele disponíveis. Dentre as fontes ou recursos gerados que podem ser incluídos, tem-se de forma mais comum geradores a diesel, fotovoltaicos e banco de baterias. Geradores eólicos não são comuns nesse sistemas, visto que a utilização desses geradores é feita de forma massiva na montagem de parques geradores e a energia deles proveniente é inserida na rede de distribuição interligada.

De forma geral as cargas prioritárias tem uma instalação separada das cargas convencionais e podem ser alimentadas por um inversor CC/CA ou grupo Motor Gerador. O Inversor nesses sistemas geralmente apresenta funcionamento bidirecional, estando habilitado para trabalhar com um retificador CC junto com um banco de baterias e painéis fotovoltaicos, bem como com a rede de distribuição. Sendo, nesse o sistema retificador funcionando como Controlador de Carga junto a um MPPT.



## 4 Metodologia

A natureza desse trabalho é exploratória e descritiva, visto que já há trabalhos de simulação com sistemas fotovoltaicos, contudo, sistemas fotovoltaicos híbridos, no Brasil, ainda são novidade. No que tange às características descritivas desse trabalho, são apresentados métodos e tecnologias para a modelagem, dimensionamento e projeto de sistemas fotovoltaicos, bem como de seus componentes constituintes.

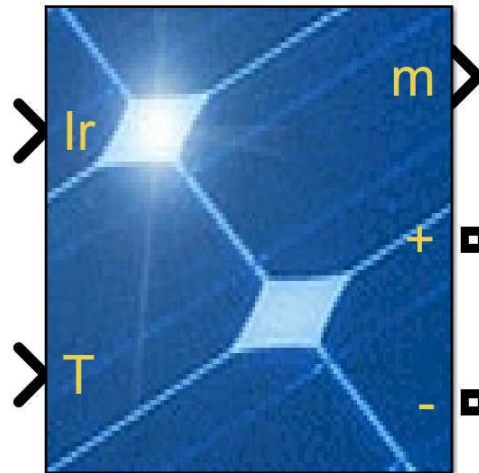
Neste capítulo, portanto, o objetivo é direcionado à descrição de forma clara e precisa dos dispositivos utilizados neste trabalho. Como já dito anteriormente, a principal fonte de resultados desse trabalho provém do software MATLAB® e a sua ferramenta complementar Simulink®. Nele foi possível fazer a modelagem dos dispositivos que compõe o sistema e estimar resultados deles esperado.

### 4.1 Painéis Fotovoltaicos - *PV Array*

O bloco *PV Array* implementa módulos fotovoltaicos baseando-se no mesmo princípio de composição exposto no Tópico 2.2.1.1. Além disso, esse bloco é capaz de fazer diferentes arranjos em sua matriz, possibilitando a conexão de inúmeros módulos em serie e/ou paralelo, de forma a dar liberdade ao usuário na hora de construir seu modelo. Este bloco permite modelar módulos fotovoltaicos predefinidos pelo banco de dados do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), bem como módulos fotovoltaicos definidos pelo usuário.

Sua constituição dá-se pela composição de cinco parâmetros usando uma fonte de corrente  $I_L$  (corrente gerada por luz), diodo (parâmetros  $I_0$  e  $n$ ),  $R_s$  de resistência em série e resistência a derivação  $R_{sh}$  para representar as características IV dependentes da irradiância e da temperatura do módulos, todos exhaustivamente descritos no Tópico 2.2.1.1.

Figura 21 – Módulo PV Array utilizado no ambiente Simulink®.



Fonte: MathWorks®.

A Figura 21 apresenta as entradas e saídas do bloco *PV Array*, onde *Ir* recebe um sinal proveniente do ambiente Simulink® que representa a variação de irradiância solar, medida em  $W/m^2$ . De semelhante modo a variável *T* recebe um sinal, contudo representando a temperatura de operação das placas em grau celcius. Os terminais *+/-* representam a saída da matriz de painéis fotovoltaicos por onde a corrente fluirá. Por fim, *m* é um vetor de valores contendo cinco sinais que podem ser utilizados no monitoramento do sistema. A potência de saída desse sistema depende tanto dos valores de entrada, irradiância e temperatura, quanto dos parâmetros descritivos do funcionamento elétrico dos módulos.

Os parâmetros que definem o modo de operação da matriz de módulos fotovoltaicos dentro do ambiente Simulink® são descritos a seguir:

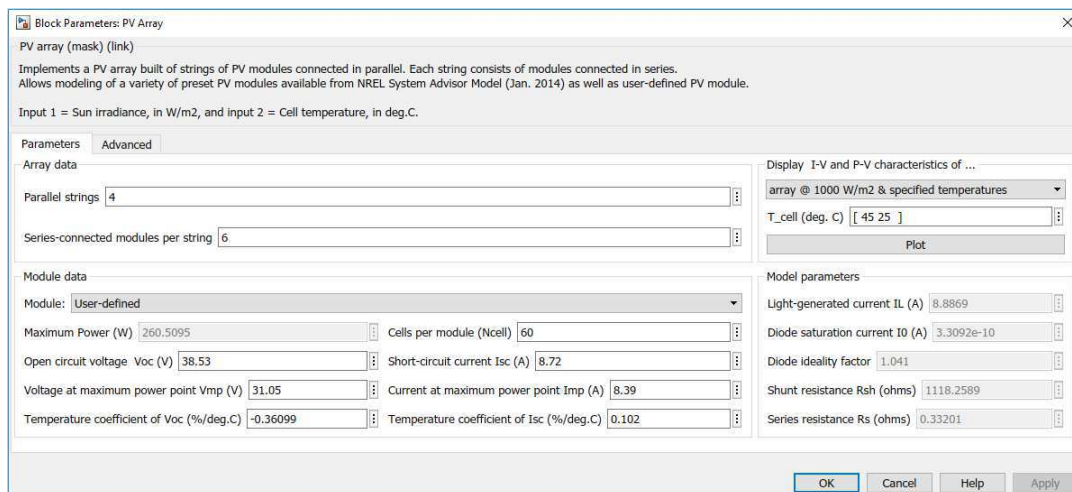
- *Parallel strings*: Número de *strings* de módulos conectados em série que são conectados em paralelo. O valor padrão é 40;
- *Series-connected modules per string*: Número de módulos fotovoltaicos conectados em série em cada *string*. O valor padrão é 10;
- *Module*: Define qual o módulo fotovoltaico a ser utilizado, um definido pelo usuário ou presente no banco de dados da *NREL System Advisory Model* que conta com mais de 10000 modelos listados de diferentes marcas.

Ao selecionar um módulo já presente no banco de dados, todos os valores que o caracterizam são automaticamente carregados no bloco, ficando a encargo do usuário apenas definir a quantidade de módulos ligados em série e quantas *strings* em paralelo desse modelo serão utilizadas

Utilizando a opção *user-defined* o usuário está habilitado a entrar com as características elétricas que definem o módulo que se deseja implementar;

- *Maximum Power (W)*: Potência obtida no ponto de potência máxima ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ).  $P_{max}$  é calculado como  $P_{max} = V_{mp} \times I_{mp}$ . Elementos demonstrado no Tópico 2.2.2.1;
- *Cells per module (Ncell)*: Número de células por módulo. O valor padrão é 60;
- *Open circuit voltage Voc (V)*: Tensão obtida quando os terminais da matriz estão em aberto. O valor padrão é 36,3 V;
- *Short-circuit current Isc (A)*: Corrente obtida quando os terminais da matriz estão em curto-circuito. O valor padrão é 7.84 A;
- *Voltage at maximum power point Vmp (V)*: Tensão no ponto de máxima potência. O valor padrão é 29 V;
- *Current at maximum power point Imp (A)*: Corrente no ponto de máxima potência. O valor padrão é 7.35 A.;

Figura 22 – Parâmetros definidos no bloco *PV Array*.



Fonte: MathWorks®.

Este trabalho baseou-se na modelagem de módulos solares da marca **ASTRO-ENERGY**, modelo CHSM6610P-260, que são modelos instalados no Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFREN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Na tabela a seguir são exibidos os valores utilizados para implementação do bloco.

Tabela 1 – Parâmetros Definidos no bloco *PV Array*

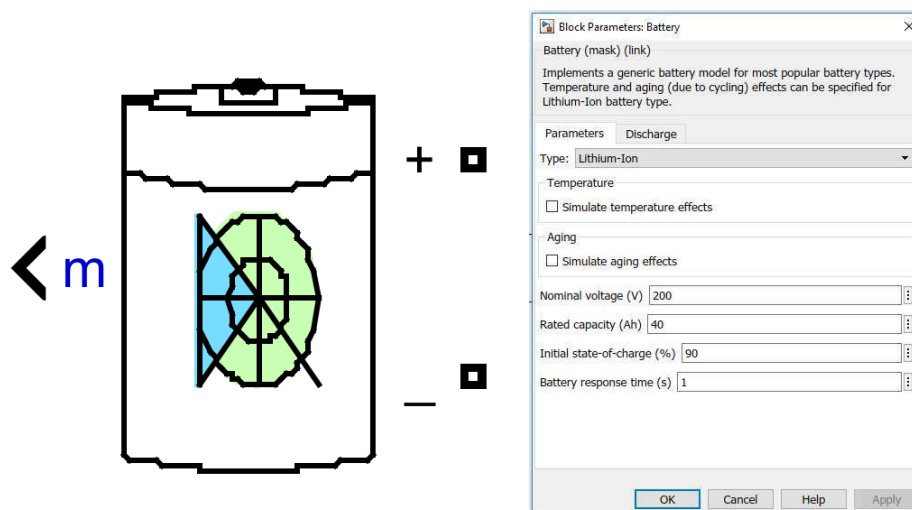
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<i>Parallel strings</i>	4
<i>Series-connected modules per string</i>	6
<i>Module</i>	user-defined
<i>Open circuito voltage <math>V_{oc}(V)</math></i>	38.53
<i>Voltage at maximum power point <math>V_{mp}(V)</math></i>	31.05
<i>Cells per module (<math>N_{cell}</math>)</i>	60
<i>Short-circuit current <math>I_{sc}(A)</math></i>	8.72
<i>Current at maximum power point <math>I_{mp}(A)</math></i>	8.39
<i>Maximum Power (W)</i>	260.5095

Como é fácil notar na tabela acima, o arranjo é composto por quatro *strings* cada uma contendo seis módulos ligados em série, cada um podendo fornecer uma potência máxima de 260 W, o que em condições ideais e de forma nominal seria 6240 W entregues pelo arranjo em sua totalidade. Todos os dados que foram utilizados como referenciado podem ser encontrados no site da empresa referenciado em ([ASTRONERGY](#), ).

## 4.2 Banco de Baterias - *Battery*

O bloco da bateria implementa um modelo genérico e dinâmico parametrizado para representar os tipos mais populares de baterias recarregáveis. A Figura 23 mostra o bloco equivalente à modelagem de um banco de uma bateria ou banco de baterias no ambiente Simulink®.

Figura 23 – Bloco que implementa uma bateria genérica no Simulink®.



Fonte: MathWorks®.

O funcionamento dos acumuladores de energia já foi discutido no Tópico 2.3.4,

portanto, nesse tópico os aspectos referentes a modelagem computacional das baterias será descrito. A seguir os parâmetros que compõem o bloco:

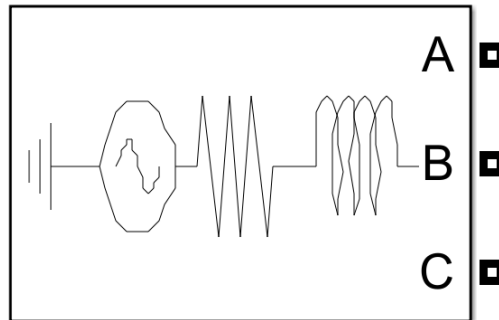
- *Type*: Fornece um conjunto de comportamento de carga predeterminado para quatro tipos de bateria:
  - Lead-Acid
  - Lithium-Ion (Padrão)
  - Nickel-Cadmium
  - Nickel-Metal-Hydride
- *Simulate temperature effects*: Quando selecionado este parâmetro, a guia Temperatura fica visível e exibe os parâmetros do modelo térmico;
- *Simulate aging effects*: A seleção desse parâmetro para permite que a guia *Aging* se torne visível e exiba os parâmetros do modelo de envelhecimento;
- *Nominal voltage (V)*: A tensão nominal,  $V_{nom}$ , da bateria em V;
- *Rated capacity (Ah)*: A capacidade nominal,  $Q_{rated}$ , da bateria em Ah. A capacidade nominal é a capacidade efetiva mínima da bateria;
- *Initial state-of-charge (%)*: O estado inicial de carga (SOC) da bateria;
- *Battery response time (s)*: O tempo de resposta da bateria (a 95% do valor final). O padrão é 30;

## 4.3 Rede de Distribuição

Neste trabalho, uma das múltiplas fontes de energia elétrica usadas para compor o sistema foi o sistema de distribuição elétrica via concessionária. Para tanto, foi necessário modelar um sistema de potência com os múltiplos componentes que o compõe como: unidade geradora (representada pela subestação), transformadores, linha de distribuição, etc.

### 4.3.1 Concessionária - *Three-Phase Source*

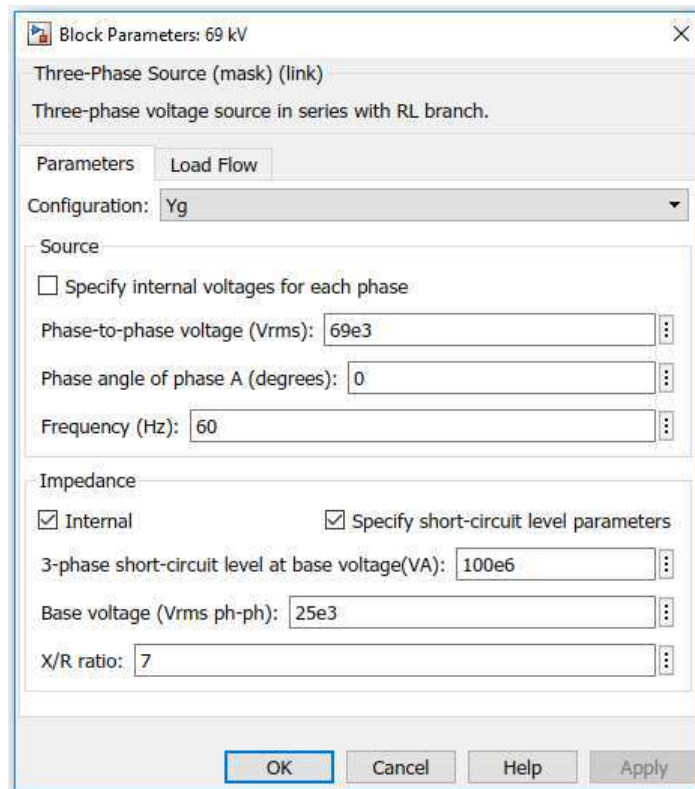
Esse bloco implementa uma fonte de tensão trifásica balanceada com impedância R-L interna. As três fontes de tensão estão conectadas em Y com uma conexão neutra que pode ser internamente aterrada. É possível especificar a resistência interna e a indutância, bem como a potência e a tensão.

Figura 24 – Bloco de unidade geradora *Three-Phase Source*.

Fonte: MathWorks®.

A rede elétrica brasileira funciona na frequência base de 60Hz, a distribuição de energia elétrica dentro dos centros urbanos é feita em níveis de tensão por volta de 13.8kV, dentro das concessionárias essa tensão chega em diferentes níveis dependendo do nível de potência e necessidade da concessionária. Nesse trabalho foi considerado uma unidade geradora em 69kV, que para efeitos de distribuição foi necessário usar um transformador abaixador para 13.8kV. A seguir os parâmetros que definem o funcionamento do bloco *Three-Phase Source*.

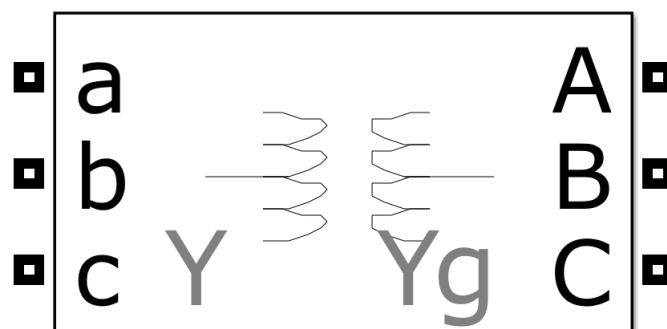
- *Configuration*: Ajusta a configuração interna da conexão das três fontes de tensão. A opção "Y" habilita a conexão em Y com neutro flutuante, "Yn" configura a fonte como Y com neutro isolado, por fim "Yg" ajusta a fonte para conexão Y com neutro aterrado. O ícone do bloco é atualizado de acordo com a conexão de origem.
- *Specify internal voltages for each phase*: Usado para especificar a tensão interna para cada fase. O padrão é vazio;
- *Phase-to-phase voltage ( $V_{rms}$ )*: A tensão pico-a-pico interna em volts rms. O padrão é  $25e3$ ;
- *Phase angle of phase A*: O ângulo de fase da tensão interna gerada pela fase A, em graus. O padrão é 0;
- *Frequency*: A frequência da fonte em *Hertz* (Hz). O padrão é 60;
- *Base voltage*: A tensão de base de pico-a-pico, em volts RMS, utilizada para especificar o nível de curto-circuito trifásico. O padrão é  $25e3$ ;
- *Source resistance*: Resistência interna da fonte;
- *Source inductance*: Indutância interna da fonte;

Figura 25 – Parâmetros utilizados na modelagem do bloco *Three-Phase Source*.

Fonte: MathWorks®.

#### 4.3.2 Transformador Abaixador - *Three-Phase Transformer (Two Windings)*

Nesta altura do sistema de potência a tensão base da concessionária é reduzida para o nível de 13.8kV a fins de distribuição dentro dos centros urbanos até as unidades consumidoras. O bloco implementa um transformador trifásico com conexões de enrolamento configuráveis. Nesse trabalho o transformador abaixador foi configurado em Yg-Y, fazendo a redução dos níveis de tensão de 69kV para 13.8kV com potência nominal de 10kVA.

Figura 26 – Bloco transformador *Three-Phase Transformer (Two Windings)*.

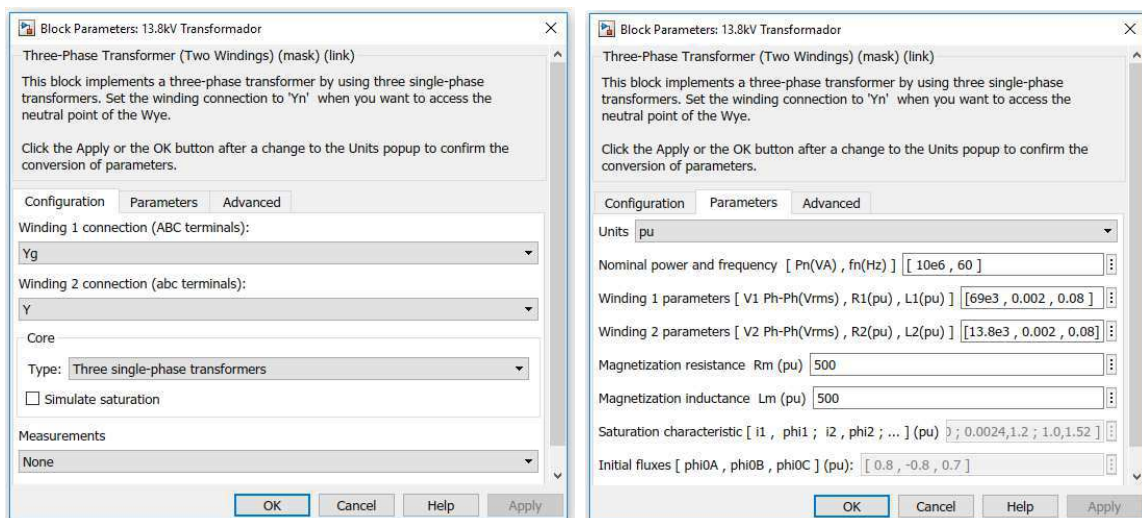
Fonte: MathWorks®.

Os parâmetros essenciais para a correta configuração e adequação desse bloco ao sistema são descritos abaixo apresenta os valores utilizados na modelagem desse transformador.

- *Winding 1 connection (ABC terminals)*: As conexões de enrolamento para enrolamento 1;
- *Winding 2 connection (ABC terminals)*: As conexões de enrolamento para enrolamento 2;
- *Type*: Seleciona o tipo de conexão a ser implementada: ;
- *Nominal power and frequency*: Usado para especificar a tensão interna para cada fase. O padrão é vazio;
- *Phase-to-phase voltage (Vrms)*: A potência nominal, em volt-ampères (VA) e a frequência nominal, em hertz (Hz), do transformador;
- *Winding 1 parameters*: A tensão nominal pico-a-pico em volts RMS, resistência e indutância de dispersão em pu para o enrolamento 1;
- *Winding 2 parameters*: A tensão nominal pico-a-pico em volts RMS, resistência e indutância de dispersão em pu para o enrolamento 2;

O restante dos parâmetros foram deixados em sua configuração padrão. A figura abaixo

Figura 27 – Parâmetros utilizados na modelagem do bloco *Three-Phase Transformer (Two Windings)*.



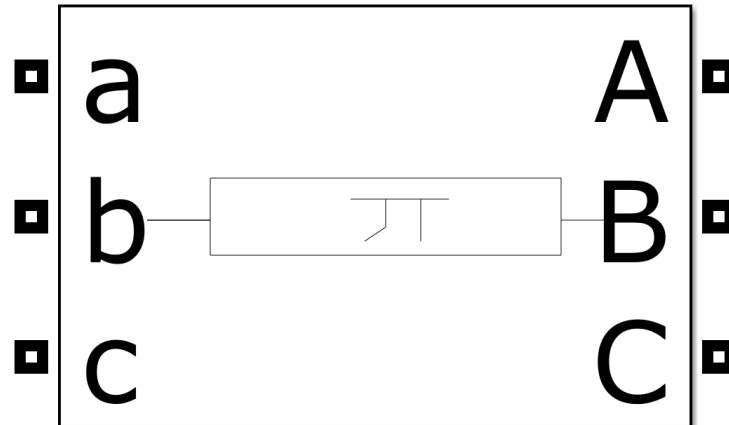
Fonte: MathWorks®.



### 4.3.3 Linha de Transmissão - *Three-Phase PI Section Line*

O bloco *Three-Phase PI Section Line* implementa um modelo de linha de transmissão trifásica balanceada com parâmetros concentrados em um modelo PI.

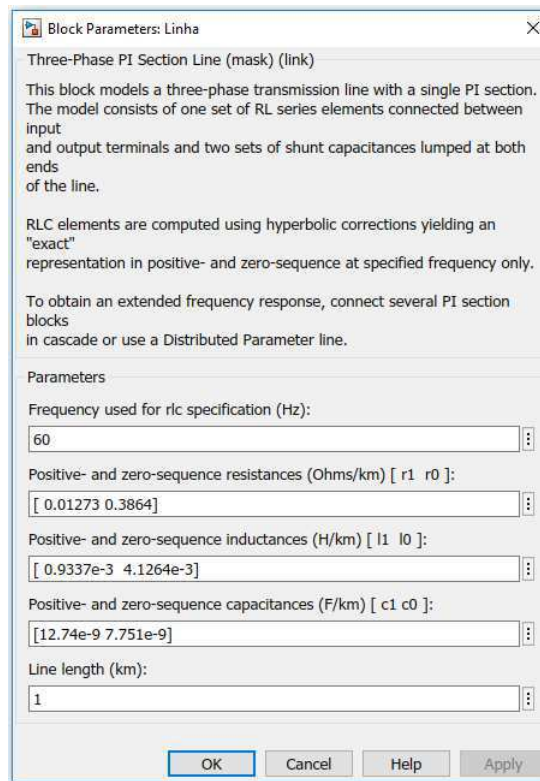
Figura 28 – Bloco que modela linha de transmissão *Three-Phase PI Section Line*.



Fonte: MathWorks®.

Segue abaixo os parâmetros básicos para implementação desse dispositivo.

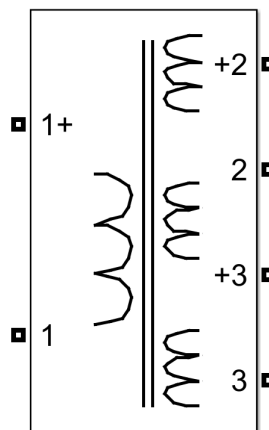
- *Frequency used for rlc specification*: A frequência utilizada para a especificação dos parâmetros da linha RLC por unidade de comprimento, em hertz (Hz);
- *Positive and zero-sequence resistances*: As resistências de sequência positiva e zero em ohms/km ( $\Omega/\text{km}$ );
- *Positive- and zero-sequence inductances*: As indutâncias de sequência positiva e zero em henries/km (H/km);
- *Positive- and zero-sequence capacitances*: As capacitâncias de sequência-positiva e zero em farads/km (F/km);
- *Line section length*: O comprimento da seção de linha em quilômetros (km). O padrão é 100.

Figura 29 – Parâmetros utilizados na modelagem do bloco *Three-Phase PI Section Line*.

Fonte: MathWorks®.

#### 4.3.4 Transformador de Atendimento - *Multi-Winding Transformer*

Este bloco foi utilizado para simular o transformador abaixador de atendimento, no padrão usual de transformação para atendimento residencial que é de 13.8kV para 220V de forma monofásica. O bloco implementa um transformador com TAPs par ajuste da relação de transformação. Bloco exibido na figura abaixo.

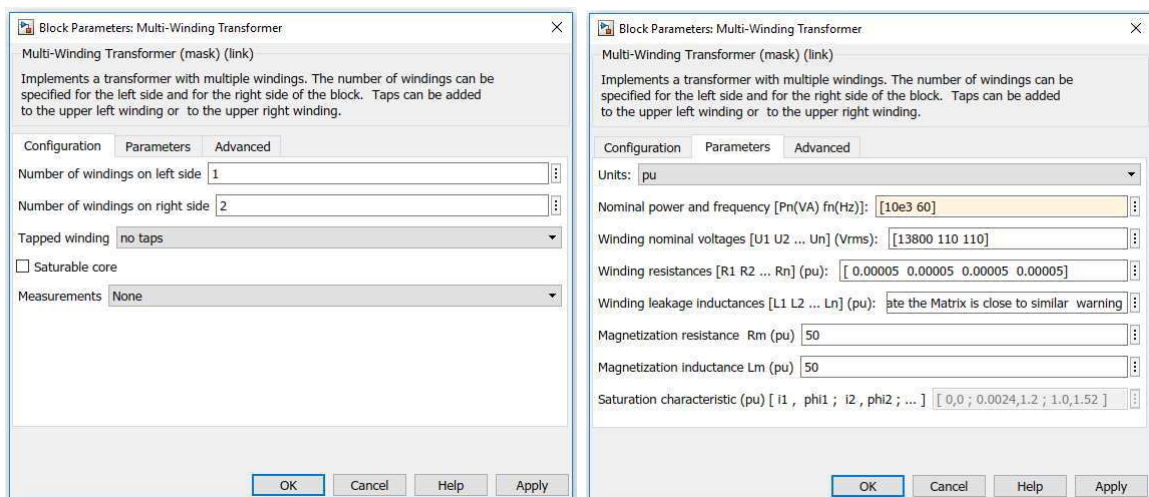
Figura 30 – Bloco para transformador para atendimento *Multi-Winding Transformer*.

Fonte: MathWorks®.

Abaixo são listados os parâmetros essenciais para modelagem desse transformador, com objetivo de atender a carga em 220V-60Hz.

- *Number of windings on left side*: Especifica o número de enrolamentos no lado primário (lado esquerdo) do transformador;
- *Number of windings on right side*: Especifica o número de enrolamentos no lado secundário (lado direito) do transformador;
- *Nominal power and frequency*: A potência nominal, em volt-ampères (VA) e a frequência nominal, em hertz (Hz), do transformador;
- *Winding nominal voltages*: Especifica um vetor que contém as tensões RMS nominais, em Vrms, dos enrolamentos do lado esquerdo, seguido das tensões RMS nominais dos enrolamentos no lado direito.

Figura 31 – Parâmetros utilizados na modelagem do bloco *Multi-Winding Transformer*.

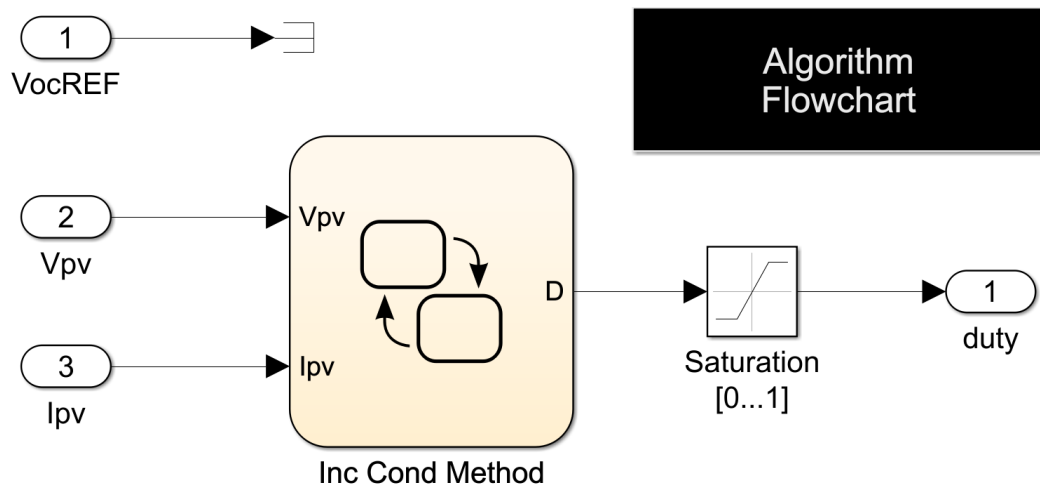


Fonte: MathWorks®.

## 4.4 Controlador de Carga

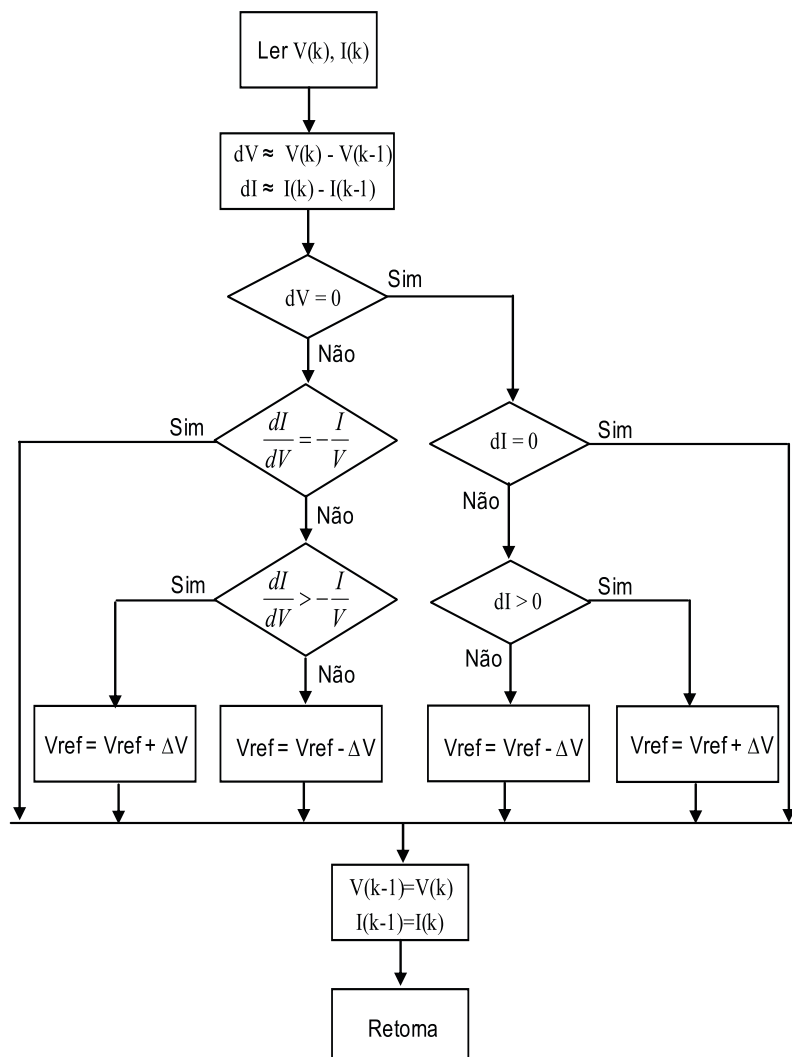
Para implementação do controlador de carga com algoritmo MPPT foi utilizado uma função embarcada concedida pelos engenheiros da MathWorks®. O método utilizado foi o *Incremental Conductance*, anteriormente apresentado Tópico 2.3.2.1.

Figura 32 – Código disponibilizado pela MathWorks® para implementação do MPPT.



Fonte: MathWorks®.

Figura 33 – Fluxograma para Indutância Incremental.

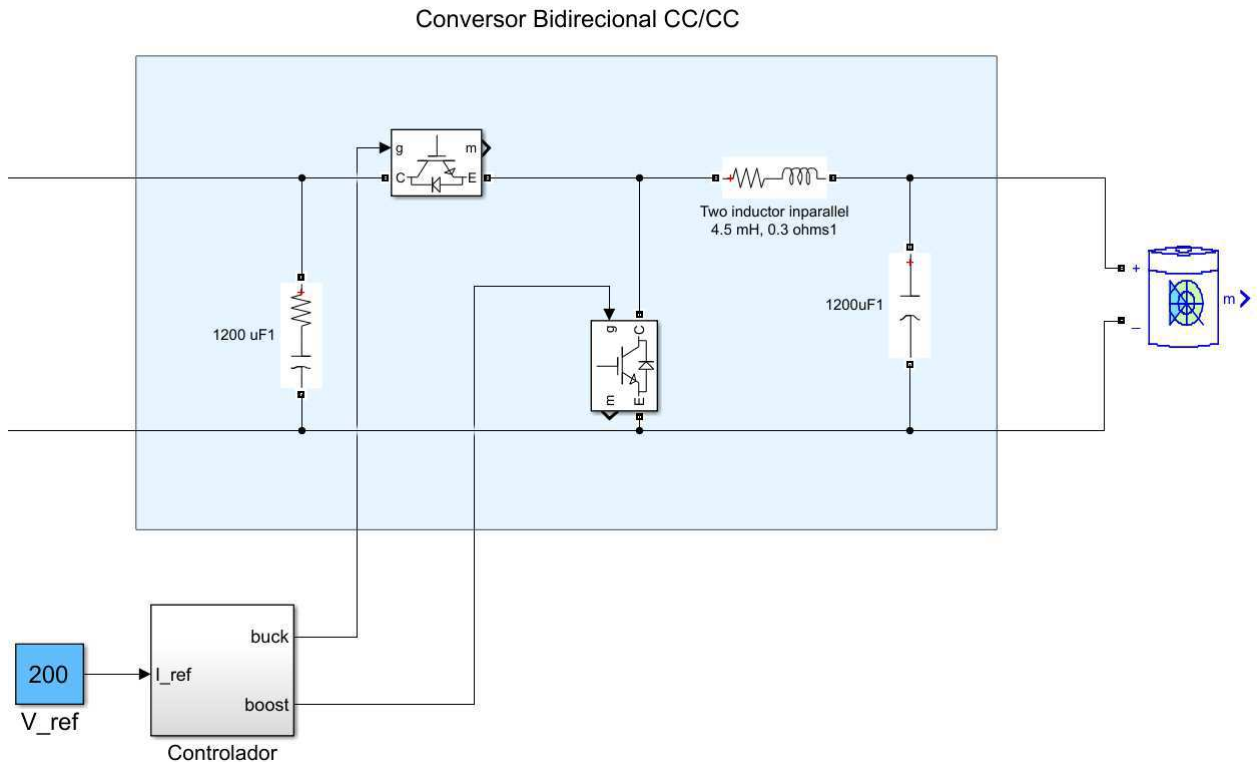


Fonte: MathWorks®.

## 4.5 Conversores

No contexto de acumuladores de energia visto as necessidades de controle de corrente e tensão já explanada em tópicos anteriores, foi necessário a implementação de um conversor bidirecional. Dado o caráter demonstrativo desse trabalho, a modelagem dos conversores deu-se em conformidade com o trabalho de Saleh em (SALEH et al., 2015).

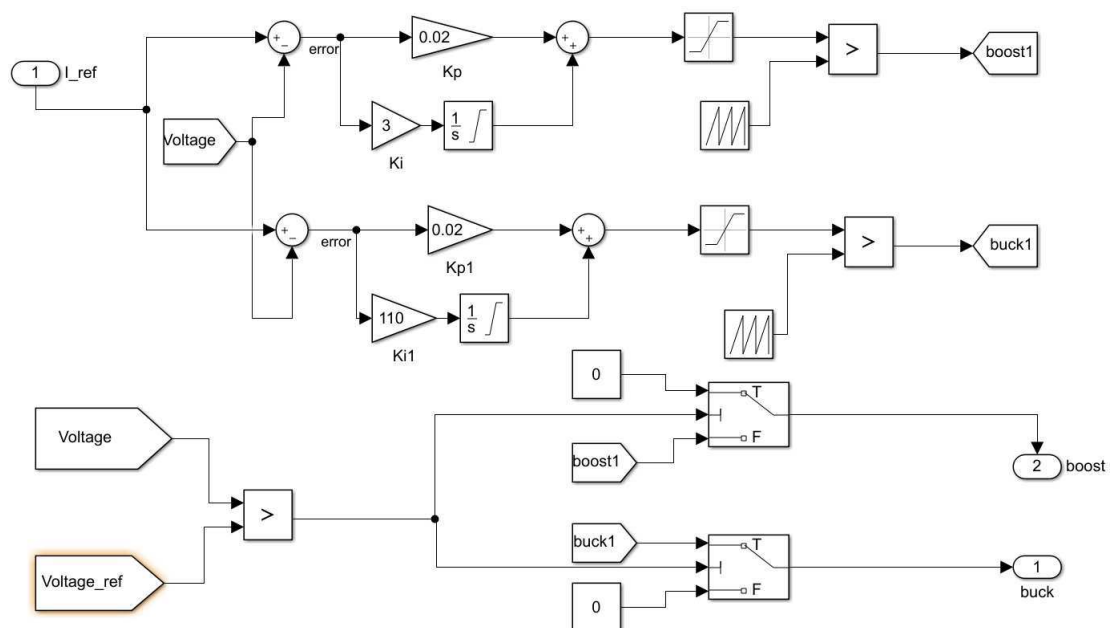
Figura 34 – Conversor bidirecional no Simulink



Fonte: Adaptado de (SALEH et al., 2015).

A tensão de referência para controle em nível CC foi configurada em 200V, os valores dos componentes estão explícitos na figura acima. Abaixo segue o esquema de controle proposto por (SALEH et al., 2015).

Figura 35 – Controle do Conversor



Fonte: Adaptado de (SALEH et al., 2015).

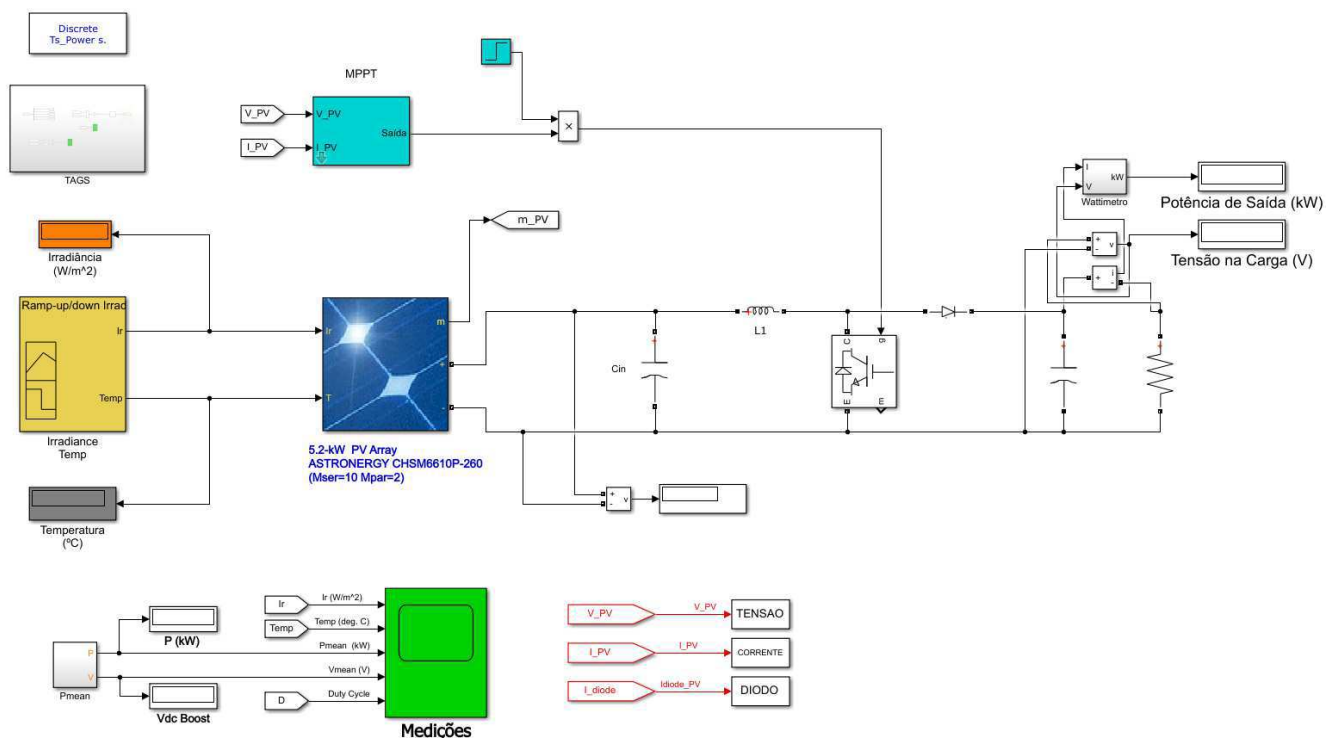
## 5 Simulação e Resultados

Utilizando os dispositivos descritos no capítulo anterior foi possível construir um sistema híbrido que simulasse o que foi proposto anteriormente. Contudo, dada o grau de complexidade de modelagem do sistema para seu pleno funcionamento, esse trabalho foi feito de forma progressiva, onde a primeira etapa limitou-se a testar o funcionamento do algoritmo MPPT.

### 5.1 Teste do MPPT

Para avaliação do algoritmo de MPPT, foi elaborado um sistema de menor complexidade e com um número limitado de elementos, a fim de possibilitar uma melhor visualização da atuação do algoritmo no conversor e sua influência na potência que é entregue a carga. O sistema simulado é exibido na Figura 36.

Figura 36 – Sistema de verificação par ao algoritmo de MPPT



Fonte: Própria.

No sistema acima um arranjo de 10 módulos ASTRONERGY CHSM6610P-260 foi conectado em série, tendo então como tensão alvo de saída 310V. Dois desses arranjos foi

conectado em paralelo, de modo a se obter a mesma tensão de saída porém uma corrente maior, sendo, portanto sua potência nominal em máxima potência 5.2kW.

Um conversor CC/CC do tipo *Boost* foi projeto para elevar a tensão a níveis próximos de 700V e nele uma carga resistiva com o valor de  $115.84\Omega$  foi acoplada.

O algoritmo de MPPT, como anteriormente explicado, atua no chaveamento do IGBT para controle dessa tensão de saída. Sua atuação é necessária em face das variações de irradiância e temperaturas impostas ao bloco *PV Array*, que ficam a encargo do bloco *Signal Builder* localizado imediatamente à esquerda do módulo fotovoltaico, na figura acima.

Para correta verificação do do algoritmo de Indutância Incremental o sistema foi submetido a variações de irradiância e temperatura. Inicialmente a irradiância foi mantida em seu valor de referência,  $1000 \text{ W/m}^2$ , o *duty cycle* foi configurado para iniciar em 0.5, com essas configurações é possível ver uma potência de saída da ordem de 4.2 kW, o que oferece um rendimento de 81%.

Pouco antes do tempo 0.5 na Figura 37 é possível ver a atuação do MPPT, elevando o valor do *duty cycle* de forma a se extrair mais potência dos painéis. Pouco depois do instante 0.5 o bloco *Signal Builder* atua reduzindo os níveis de irradiância de forma linear até  $250 \text{ W/m}^2$  impactando de forma agressiva a geração de potência dos módulos. O constante decaimento não permite uma clara e rápida atuação do MPPT, que irá atuar novamente no instante 1.7 reajustando o *duty cycle* mais uma vez.

A partir do instante 2 o *Signal Builder* altera o valor da referência de temperatura, elevando-a para  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  o que deve ser traduzido em uma queda de tensão, visto na Figura 38, e conseqüente diminuição na potência de saída, como explicado no Tópico 2.2.2.4. Em face dessa novo ponto de operação, o MPPT atua ais uma vez reajustando o valor do *duty cycle*, dessa forma evitando que a diminuição na potência gerada se acentue e ainda obtendo uma pequena elevação e posterior estabilidade dessa potência extraída.

É possível, portanto, inferir a importância do algoritmo de MPPT de forma prática em um sistema fotovoltaico. Sua atuação no conversor foi capaz de manter e muitas vezes elevar a potência que se obtém dos geradores fotovoltaicos, mantendo um alto nível de rendimento na conversão de potência. Contudo é necessário reconhecer suas limitações, visto que a baixíssimos níveis de irradiância não há possibilidade de alta geração de energia, pois é sabido a forte relação entre irradiância e potência gerada em módulos fotovoltaicos.



Figura 37 – Sistema de verificação do algoritmo de MPPT

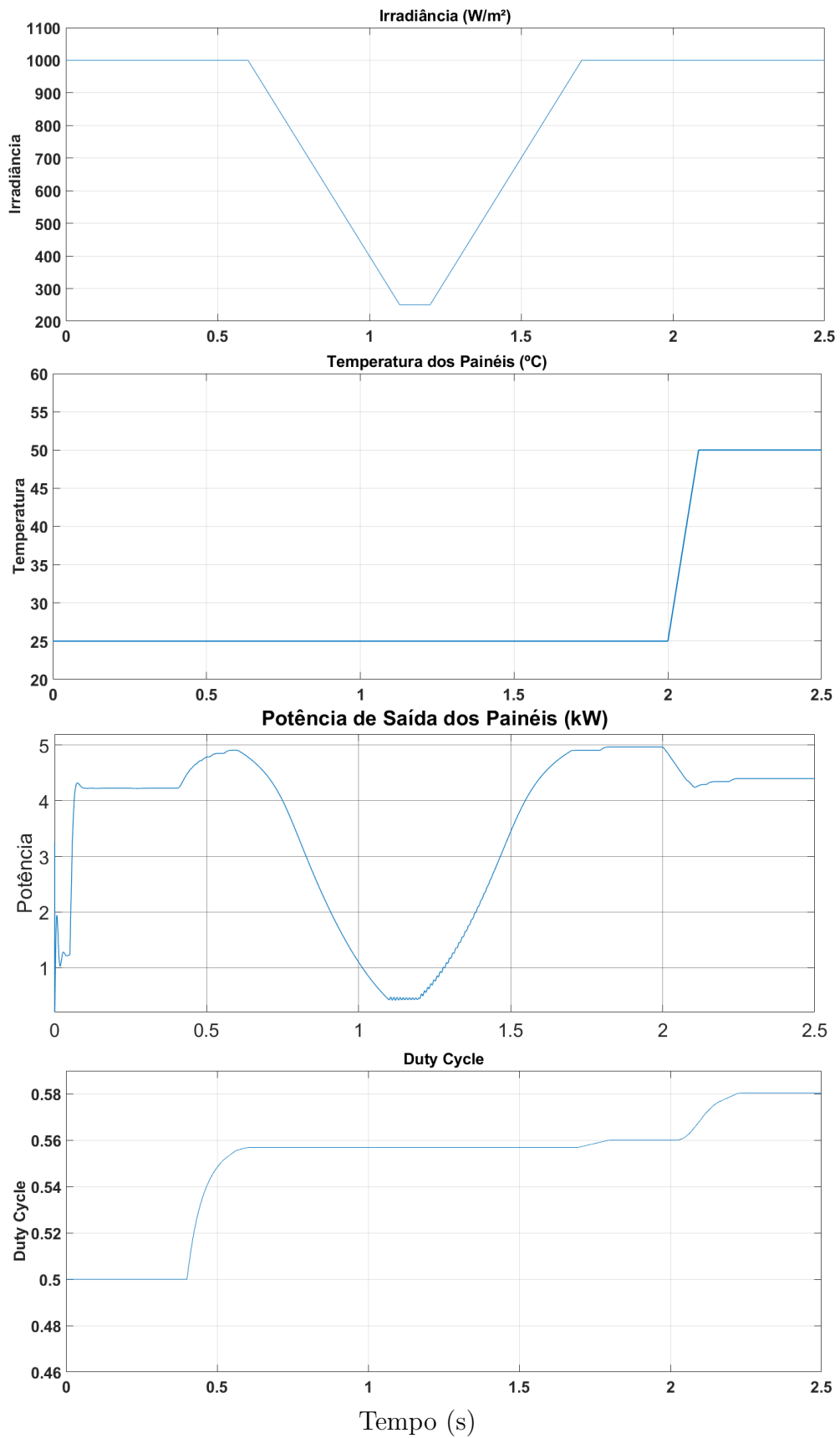
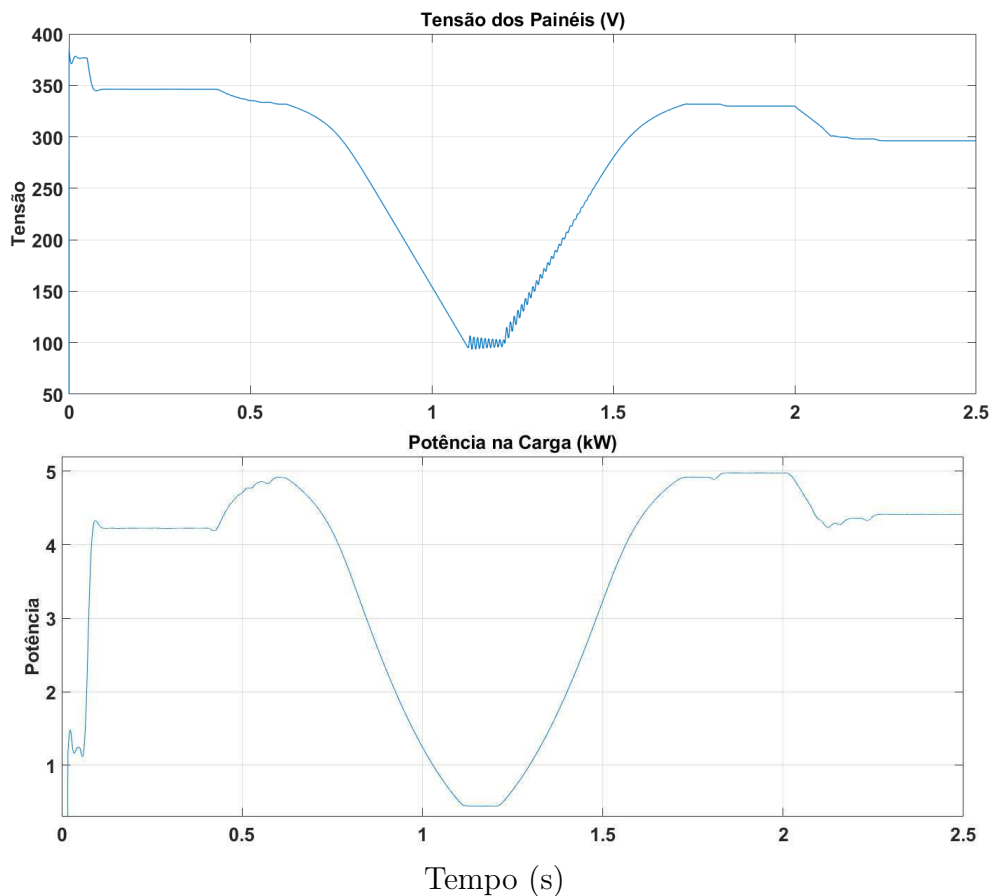


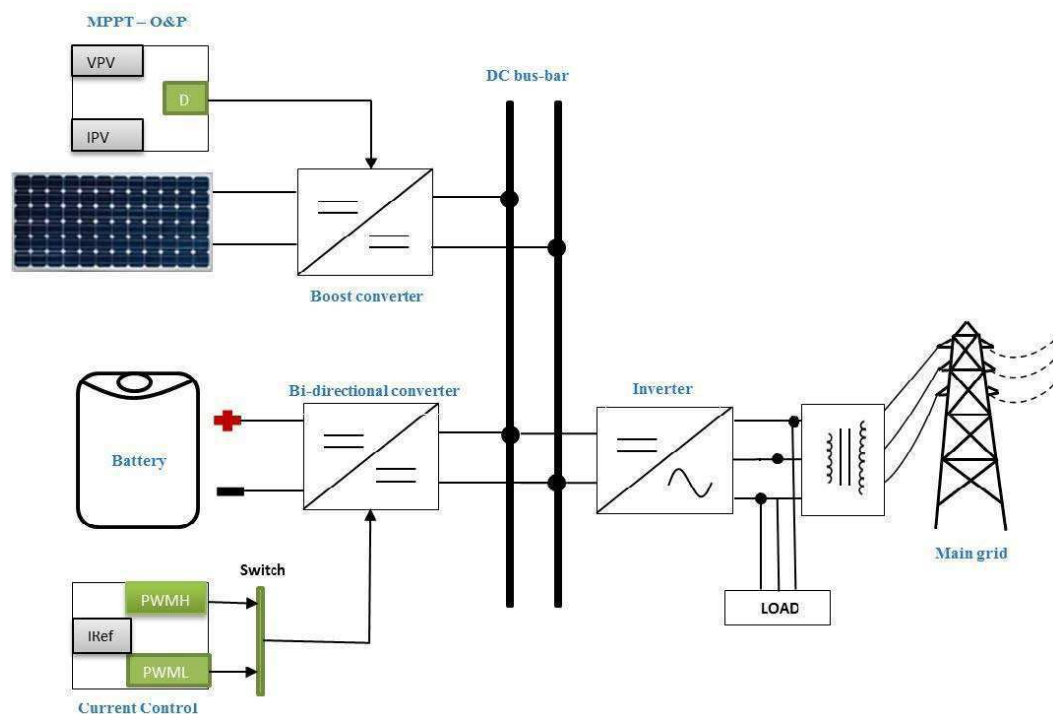
Figura 38 – Tensão de Saída dos Painéis e Potência na Carga



## 5.2 Sistema Híbrido Proposto

Passado a avaliação do funcionamento do MPPT, um sistema maior e mais robusto foi projetado. Desta vez foi incluído a rede de distribuição de energia elétrica e um banco de baterias, também foi feito a alteração da carga resistiva para uma carga com características indutivas e capacitivas alimentada em corrente alternada a 220V e 60Hz, sendo portanto necessário o acréscimo de um inversor de frequência. Como já discutido em tópicos anteriores, sistemas desse gênero não são comuns no Brasil, pois não há regulamentação da ANEEL. Sendo assim, os materiais e modelos de referência são geralmente provenientes de países Europeus ou Norte Americanos, como o da Figura 39 no qual este tópico se inspirou

Figura 39 – Diagrama de blocos do modelo usado na simulação.



Fonte: Adaptado de (SALEH et al., 2015).

A estratégia usada na construção desse modelo foi a de separar os componentes em subsistemas, criando assim o que é conhecido como *Mask* no ambiente Simulink. Dentro desses subsistemas pode haver inúmeros blocos com configurações individuais, entradas e saídas de dados ou simplesmente medição de dados obtidos através da simulação. Essa estratégia foi adotada para minimizar a incidência de erros no sistema e facilitar sua identificação, caso venham a ocorrer. Portanto os blocos discutidos no Capítulo 4 estão inseridos dentro das *Mask* ou subsistemas da Figura 40, diminuindo assim a poluição visual e facilitando a compreensão do funcionamento do sistema como um todo, haja vista a prévia compreensão dos blocos que o constituem em sua individualidade.

### 5.2.1 Dimensionamento do Sistema

No que diz respeito aos geradores fotovoltaicos o modelo utilizado foi novamente o ASTRONERGY CHSM6610P-260, porém dessa vez o arranjo foi reajustado tendo em vista o rendimento médio obtido na simulação anterior, que foi por volta dos 80%. Sendo assim, o novo arranjo conta com 6 módulos conectados em série formando uma *string* e 4 dessas *strings* conectadas em paralelo totalizando uma potência de geração aproximado da ordem de 6250 W, contudo dado a simulação anterior e seu rendimento médio, é esperado uma geração por volta de 5000W.

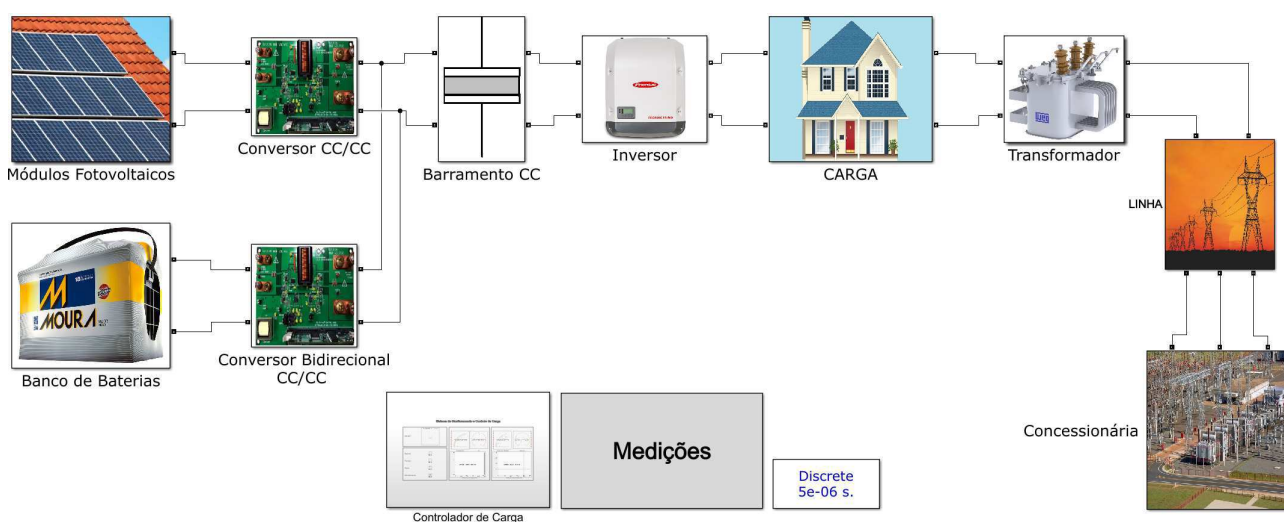
Os banco de baterias foi dimensionado de forma a fornecer uma capacidade de

60Ah a uma tensão de 200V, cujo ajuste é feito através do algoritmo anteriormente testado. Para esse trabalho foi desprezado os efeitos de envelhecimento e temperatura atuando no dispositivo.

O dimensionamento e arranjo de distribuição elétrica foi descrito no Tópico 4.3. Seus componentes foram divididos em três subsistemas: concessionária, linha e transformador.

Visando dinamismo no sistema a carga foi dimensionada de forma que em sua totalidade superasse a capacidade gerada pelos painéis. Sendo assim a carga foi dividida em duas componentes, uma de 2000W e outra de 4000W, totalizando assim 6000W, número superior ao que deve ser gerado pelos módulos em plena carga, se considerado seu rendimento.

Figura 40 – Sistema modelado no ambiente Simulink.

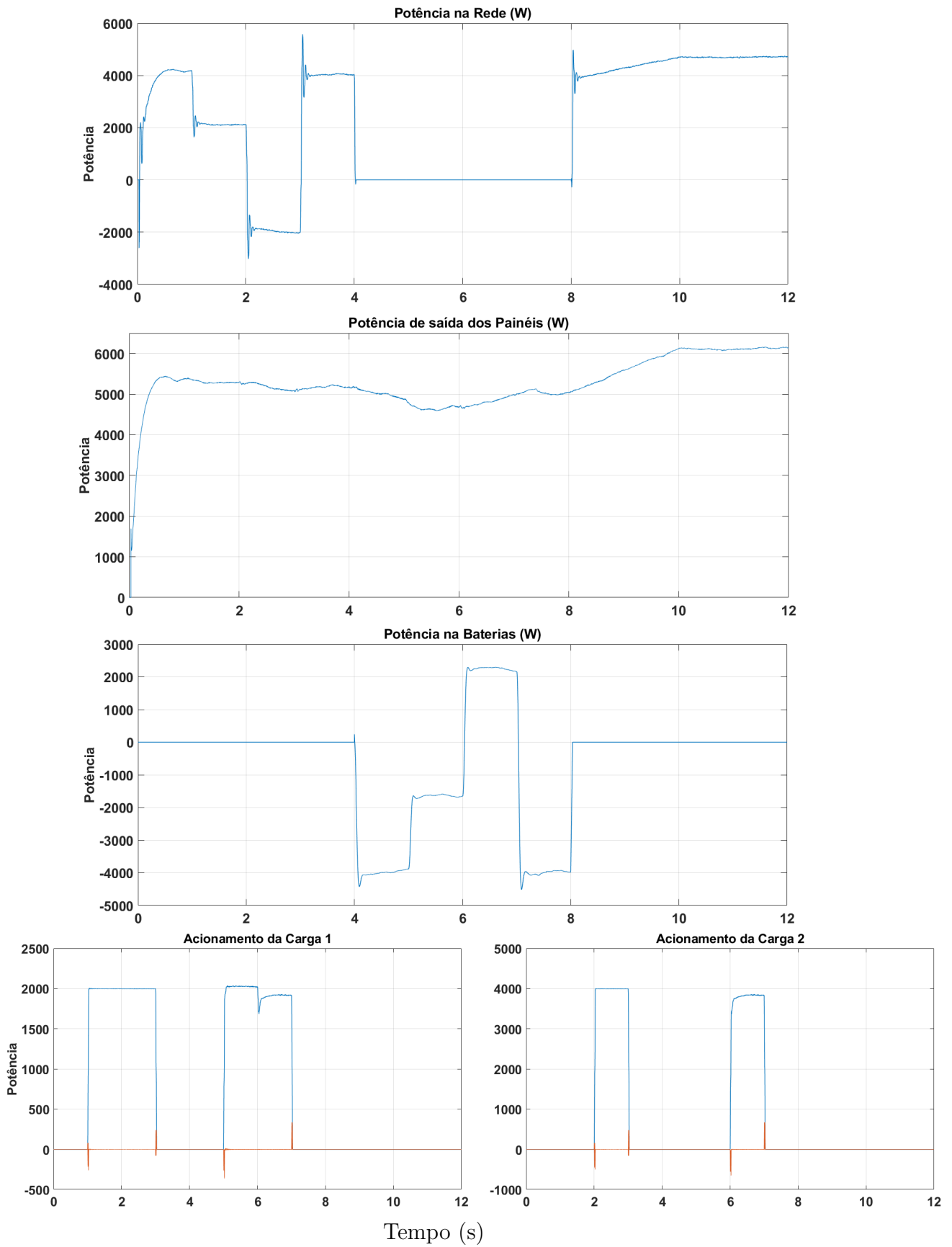


Fonte: Própria.

## 5.2.2 Funcionamento do Sistema

Inicialmente o sistema não apresenta carga acionada, portanto, como se trata de um sistema híbrido, a potência gerada nos painéis deve ser transferida para a rede de distribuição elétrica. Em um instante posterior uma carga de 2000W é acionada, assim, os painéis conseguem alimentar essa carga e o excedente de potência gerada é transferido para a rede. Posteriormente a segunda carga é acionada acrescentando um consumo de 4000W, nesse instante os painéis não fornecem energia suficiente para alimentar as duas cargas, o restante então é complementado pela rede. No próximo estágio, a rede é desconectada, o que pode acontecer em uma situação de falta, por exemplo. Nesse ponto as baterias são conectadas ao sistema e, visto que não há carga acionada, a energia gerada nos painéis é utilizada para carregar as baterias. Por fim as cargas são acionadas novamente e é possível ver o banco de baterias complementando a potência necessária para alimentá-las, como ocorria com a rede de distribuição. A figura abaixo demonstra a dinâmica do sistema.

Figura 41 – Saídas do Sistema Híbrido Modelado



## 6 Conclusão

No transcorrer desse trabalho foi visto a importância das fontes de energia renováveis, seu desenvolvimento ao longo dos anos e as projeções que futuras pesquisas. Sua inserção em sistemas de micro geração vem tomando forma atualmente, já que o Brasil se encontra em uma região no planeta onde há elevados índices de irradiância. Toda esse potência deve ser aproveitado em sua plenitude, não sendo interessante limitações quanto aos *layouts* na qual devem ser inseridos, como é o caso dos SFH não serem regulamentados no Brasil.

A implementação de sistemas híbridos é promissora no sentido em que é capaz de fornecer alimentação prioritária de cargas, assim sendo, caso haja faltas ou desligamento da rede de distribuição, as baterias podem ser conectadas ao sistema e funcionar de maneira semelhante a um *no-break*.

Por se tratar de um sistema complexo, no qual as múltiplas fontes de energia elétrica tem características diferentes e precisam trabalhar de forma harmoniosa, é necessário um profundo estudo para adequação e controle desses geradores.

Com isso, esse trabalho apresenta sua relevância e objetivo na demonstração do funcionamento de Sistemas Fotovoltaicos Híbridos como alternativa aos tradicionais modelos de SFC e SFI. Para tanto o uso de ferramentas de simulação mostram-se bastante efetivas no auxílio ao pesquisador ou projetista.

O objetivo foi alcançado e o sistema se comportou da forma prevista, fornecendo energia excedente da micro geração para a concessionária e atuando em momentos críticos como faltas ou insuficiência de potência gerada.

Como proposta futura, é possível implementar um sistema preditivo de geração, valendo-se de todos os parâmetros estudados no presente trabalho e agregado a um sistema de controle autônomo. Também fica como proposta uma avaliação econômica para estimar a viabilidade de um sistema semelhante a esse.

# Referências

- A HISTÓRIA DAS BATERIAS. <<http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/a-historia-das-baterias>>. Acessado: 18-02-2018. Citado na página 35.
- ALEMANHA produz tanta energia renovável que chegou a pagar para os cidadãos consumirem. <<https://tecnoblog.net/195517/alemanha-energia-sustentavel-producao/>>. Acessado: 09-02-2018. Citado na página 16.
- ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS. <<http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/pv-panel.html>>. Acessado: 13-02-2018. Citado na página 24.
- AMUDHAVALLI.D MEYYAPPAN.M, I. P. K. Interleaved soft switching boost converter with mppt for photovoltaic power generation system. In: *Anais do International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 1214–1219. Citado na página 16.
- ASTRONERGY. <<https://goo.gl/dckwG7>>. Acessado: 28-02-2018. Citado na página 43.
- ATLAS de energia elétrica do Brasil: Energia Hidráulica. [S.l.]: Agência Nacional de Energia ELétrica - ANEEL, 2005. <[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)>. Acesso em: Acessado: 10-02-2018. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- BIZON, N. *Analysis, Control and Optimal Operation in Hybrid Power Systems*. [S.l.]: Springer, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- CARVALHO, E. d. P. *Uma Nova Abordagem de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2012. Citado na página 31.
- ENCYCLOPEDIA OF ALTERNATIVE ENERGY. <[http://www.daviddarling.info/encyclopedia/I/AE\\_I-V\\_curve.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/I/AE_I-V_curve.html)>. Acessado: 15-02-2018. Citado na página 25.
- GÜNTHER, M. et al. Parabolic trough technology. *Advanced CSP Teaching Materials*, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- HIBRIDO. <<http://esvsolarvida.com.br/hibrido/>>. Acessado: 25-02-2018. Citado na página 38.
- LES cellules photovoltaïques. <<http://tpe.photovoltaique.free.fr/cellules.html>>. Acessado: 11-02-2018. Citado na página 21.
- LUQUE, A.; HEGEDUS, S. *The Physics of the Solar Cell, Handbook of photovoltaic science and engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado na página 21.
- MAGNOLI, D.; SCALZARETTO, R. Geografia, espaço, cultura e cidadania. V, v. 4, p. 191–193, 1998. Citado na página 19.

MIN JONGPIL. LEE, J.-H. K. T.-J. K. D.-W. Y. C.-Y. W. H.-G. K. B. D. New topology for grid-connected photovoltaic system using the converter with flat efficiency curve for all load range. In: *Anais do Power Electronics Specialists Conference (PESC)*. [S.l.]: IEEE, 2007. p. 152–155. Citado na página 16.

O que é a Convenção do Clima. <<http://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28809-o-que-e-a-convencao-do-clima/>>. Accessed: 2010-09-30. Citado na página 16.

PHOTOVOLTAIC Dreaming 1875–1905: First Attempts At Commercializing PV. 2014. <<https://cleantechnica.com/2014/12/31/photovoltaic-dreaming-first-attempts-commercializing-pv/>>. Acessado: 11-02-2018. Citado na página 20.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Grupo de trabalho de energia solar–GTES*. [S.l.], 2014. Citado 9 vezes nas páginas 20, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 30 e 34.

PRASAD SACHIN JAIN, V. A. B. S. Universal single-stage grid-connected inverter. In: *Anais do IEEE Transactions on Energy Conversion*. [S.l.]: IEEE, 2008. p. 128 – 137. Citado na página 16.

PROGRAMA incentiva pequenos agricultores a gerarem energia eólica e solar. <<https://www.brasil.gov.br/cidadania-e-justica/2015/11/programa-facilita-custo-de-energia-solar-e-eolica-para-agricultores-familiares>>. Acessado: 09-02-2018. Citado na página 16.

SALEH, M. S. et al. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts. In: IEEE. *Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), 2015 International Conference on*. [S.l.], 2015. p. 195–200. Citado 3 vezes nas páginas 52, 53 e 58.

SHOCKLEY, W. The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. *Bell Labs Technical Journal*, Wiley Online Library, v. 28, n. 3, p. 435–489, 1949. Citado na página 22.

SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO (ON-GRID E OFF-GRID). <<http://www.csrenergiasolar.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-hibrido-on-grid-e-off-grid>>. Acessado: 21-02-2018. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEUS COMPONENTES. <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acessado: 17-02-2018. Citado na página 33.