



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RHASLA RAMOS ABRÃO**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO DE UM  
SISTEMA AUTÔNOMO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM  
CORRENTE CONTÍNUA**

**CAMPO GRANDE – MS**

**MAIO – 2011**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RHASLA RAMOS ABRÃO**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO DE UM  
SISTEMA AUTÔNOMO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM  
CORRENTE CONTÍNUA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sob a orientação do Prof<sup>o</sup> Dr. Paulo Irineu Koltermann.  
Área de Concentração: Geração de Energia Elétrica.

**CAMPO GRANDE – MS**

**MAIO – 2011**

# **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA AUTÔNOMO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM CORRENTE CONTÍNUA**

Rhasla Ramos Abrão

'Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Geração de Energia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.'

---

**Prof. Paulo Irineu Koltermann, Dr.**  
**Orientador**

---

**Prof<sup>ª</sup>. Luciana Cambraia Leite, Dra.**  
**Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**Banca Examinadora:**

---

**Prof. Paulo Irineu Koltermann, Dr.**  
**Presidente**

---

**Prof. Valmir Machado Pereira, Dr. .**

---

**Prof. Edson Kassar, Dr.**

## **DEDICATÓRIA**

Ao meus pais, Félix e Maria José.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, pela minha vida, minha saúde, minha perseverança e por minhas oportunidades.

Aos meus pais pelo incentivo e força que me deram durante todos os anos da minha vida para que eu pudesse estudar sem ter outras preocupações.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Irineu Koltermann, pela força, incentivo, paciência e pela contribuição de seus conhecimentos.

Ao professor Dr. Jéferson Meneguín Ortega, por sempre estar disposto a ajudar.

E a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (DEL), que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à UFMS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **Modelagem e Simulação de Operação de um Sistema Autônomo de Energia Fotovoltaica em Corrente Contínua**

**Rhasla Ramos Abrão**

Maio/2011

Orientador: Paulo Irineu Koltermann, Dr..

Área de Concentração: Geração de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico autônomo, Conversão CC-CC, Simulação Computacional.

Número de Páginas: 92

Com a crescente demanda de energia elétrica no país e com a preocupação cada vez maior com o meio ambiente, há necessidade de se investir em novas tecnologias que gerem o mínimo possível de impactos ao meio ambiente, sendo uma alternativa o uso de fontes renováveis de energia. Neste trabalho é apresentado um sistema de geração isolado de energia fotovoltaica em corrente contínua, considerando seu funcionamento integrado a um conversor tipo Buck operando com algoritmo de busca de máxima potência e a uma bateria. A operação do sistema está baseada na busca do ponto de máxima potência, utilizando o conversor Buck para alimentar tanto a bateria como a carga. São apresentadas modelagens matemáticas dos principais elementos integrantes do sistema, e utilizando o ambiente MATLAB&SIMULINK®, são efetuadas simulações para condições de irradiação e temperatura. Os resultados consistem de saídas gráficas, caracterizando valores de tensão, corrente e potência em diferentes pontos do sistema. Os resultados de saída traduzem os comportamentos do sistema, nas condições de carregamento da bateria e alimentação da carga, obtendo boa correspondência com os resultados físicos típicos dos circuitos que integram o sistema.

Abstract of Dissertation presented to UFMS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **Modeling and Simulation of Autonomous Operation of a Photovoltaic Power System in Continuous Current**

**Rhasla Ramos Abrão**

Maio/2011

Advisor: Paulo Irineu Koltermann, Dr.

Area of Concentration: Electric Power Generation

Keywords: Autonomous Photovoltaic System, DC-DC Conversion, Computer Simulation.

Number of Pages: 92

With the growing demand for electricity in the country and the growing concern with the environment, there is need to invest in new technologies that generate the least possible impact on the environment, and an alternative use of renewable energy . This paper presents an isolated generation system of photovoltaic power in DC, considering its integrated operation of a Buck converter operating with type search algorithm for maximum power and a battery. The system operation is based on the search of the point of maximum power, using the buck converter to power both the battery and the load. Mathematical models are presented the main elements of the system, and using the MATLAB & SIMULINK ®, simulations are performed for the irradiation conditions and temperature. The results consist of graphic outputs, featuring values of voltage, current and power at different points in the system. The output results reflect the behavior of the system, in terms of battery charging and power load, obtaining good correlation with physical findings typical of the circuits that comprise the system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Produção anual de módulos fotovoltaicos incluindo todas as tecnologias e todos os fabricantes.	08
Figura 1.2 – Crescimento anual da produção de módulos fotovoltaicos incluindo todas as tecnologias e todos os fabricantes.	09
Figura 2.1 - Componentes da radiação solar ao nível do solo	18
Figura 2.2 - Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM)	19
Figura 2.3 – Sistema isolado com armazenamento de energia e cargas CC.	21
Figura 2.4 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica	22
Figura 2.5 - Efeito fotovoltaico na junção pn	23
Figura 2.6 – Estrutura de uma célula de silício monocristalino.	24
Figura 2.7 – Células fotovoltaicas, células associadas formando um módulo e módulos associados denominados de arranjo fotovoltaico.	25
Figura 2.8 - Conexão de células em paralelo.	26
Figura 2.9 - Arranjo das células em série.	27
Figura 2.10 - Possível ligação para um diodo bypass entre células.	27
Figura 2.11 - Diodo de bloqueio.	28
Figura 2.12 - Curva característica IxV típica de uma célula de silício monocristalino, normalizada pela corrente de curto-circuito.	29
Figura 2.13 - Curva típica de potência versus tensão para a célula de silício monocristalino da Figura (IxV).	29
Figura 2.14 - Efeito da variação da resistência série na curva característica teórica de um módulo fotovoltaico com 36 células.	31
Figura 2.15 - Efeito da variação da resistência paralela na curva característica teórica de um módulo com 36 células.	32
Figura 2.16 - Efeito da variação da corrente em relação a variação de intensidade de radiação sobre a célula fotovoltaica.	33
Figura 2.17 - Efeito causado pela temperatura da célula na curva característica IxV (para 1000W/m <sup>2</sup> ) em um módulo fotovoltaico de silício cristalino.	34
Figura 2.19: Curva de Procura do Sistema X Produção de Energia Elétrica.	36
Figura 2.20 - Parâmetros de potência máxima.	37

Figura 3.1 – Circuito elétrico equivalente de um conversor step-down (buck).	40
Figura 3.2 – Sinal de acionamento da chave do conversor Buck.	41
Figura 3.3 – Formas de onda típicas nos modos de condução contínua.	41
Figura 3.4 – Modulação por largura de pulso único.	42
Figura 3.2 – Sinal de acionamento da chave do conversor Buck.	39
Figura 3.3 – Formas de onda típicas nos modos de condução contínua.	39
Figura 3.4 – Modulação por largura de pulso único.	41
Figura 3.5 – Modulação por largura de pulsos múltiplos.	42
Figura 3.6 – Modulação por largura de pulsos senoidal.	43
Figura 4.1 - Tipos de Baterias - Valores de densidade de energia por unidade de volume e massa.	47
Figura 5.1 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica – modelo de um diodo.	50
Figura 5.2 – Circuito elétrico equivalente do conversor step-down para $q(t)=1$ .	54
Figura 5.3 – Circuito elétrico equivalente do conversor step-down para $q(t)=0$ .	55
Figura 5.4 – Modelo simplificado de bateria chumbo-ácido.	56
Figura 6.1 – Comparação das Curvas $I-V$ para um gerador fotovoltaico em vários níveis de temperatura – Valores simulados e do fabricante.	62
Figura 6.2 – Curvas $I-V$ simuladas do Painel BP SX 150 S, sob diferentes níveis de radiação (para temperatura de 25 °C).	63
Figura 6.3 - Curvas de $I-V$ e $P-V$ superpostas.	64
Figura 6.4 – Ponto de Máxima Potência na curva $I-V$ .	64
Figura 6.5 – Curva da tensão (V) no capacitor.	65
Figura 6.6 – Curva da corrente (I) no indutor.	65
Figura 6.7 - Evolução do SOC do modelo da bateria, no modo de carga.	67
Figura 6.8 – Evolução do SOC normalizado, para $0 < SOC_n < 1$ .	68
Figura 6.9 – Evolução do SOC do modelo da bateria, no modo de descarga.	69
Figura 6.10 – Evolução do SOC normalizado durante o descarregamento da bateria.	70
Figura 6.11 – Evolução do SOC para diferentes valores de k.	71
Figura 6.12 - Sistema autônomo de geração de energia elétrica.	72
Figura 6.13 – Modelo médio elaborado com o SIMULINK do sistema analisado	73
Figura 6.13 – Janela de parâmetros de uma célula fotovoltaica - MATLAB®.	72
Figura 6.14 – Montagem do Painel fotovoltaico BP Solar SX 150 S – 72 células em série	75
Figura 6.15 – Características elétricas do Painel BP Solar SX 150 S para as condições	75

padrão de operação (irradiância de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , temperatura da célula de  $25^\circ\text{C}$  e espectro AM 1,5).

Figura 6.16 – Curva da radiação solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) x hora (h)	76
Figura 6.17 - Curva I x V simulado do painel fotovoltaico do sistema	76
Figura 6.18 - Comportamento da Tensão e corrente e razão cíclica em operação.	79
Figura 6.19 – Janela de parâmetros do modelo da Bateria - MATLAB®.	80
Figura 6.20 - Tensão, corrente e potência na bateria.	82
Figura 6.21 - Corrente, tensão e potência na carga (sem bateria).	83
Figura 6.22 – Potência resultantes na saída do painel, na bateria e na carga.	84

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	7
1.1 Contextualização .....	7
1.2 Justificativa .....	7
1.3 Objetivos do Trabalho.....	11
1.3.1 Objetivos Gerais.....	11
1.3.2 Objetivos Específicos.....	11
1.4 Revisão de Literatura.....	11
1.5 Estrutura do Trabalho.....	15
CAPÍTULO 2 – RADIAÇÃO SOLAR EO SISTEMA AUTÔNOMO DE.....	16
ENERGIA FOTOVOLTAICA	
2.1 Radiação Solar.....	16
2.1.1. Radiação Solar a Nível do Solo.....	17
2.2 Sistema de Geração de Energia Fotovoltaica.....	19
2.2.1 Sistema isolado com armazenanto em Baterias alimentando carga CC.....	20
2.2.2 Efeito Fotovoltaico.....	21
2.2.3 Célula Fotovoltaica.....	23
2.2.4 Módulo Fotovoltaico.....	25
2.2.4.1 Arranjo dos Módulos.....	25
2.2.4.2 Características elétricas dos módulos.....	28
2.2.4.3 Corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto.....	30
2.2.4.4 Efeitos das resistências série e paralela na curva IxV.....	30
2.2.4.5 Rendimento de conversão energética.....	32
2.2.4.6 Fatores que afetam as características elétricas dos módulos.....	33
2.2.4.7 Fatores que influenciam na conversão.....	34
2.2.4.8 Interações entre os Módulos Fotovoltaicos e as Baterias.....	35
2.2.5 Seguidor do Ponto de Máxima Potência (MPPT).....	36
CAPÍTULO 3 – CONTROLADORES DE CARGA.....	38
3.1 Introdução.....	38
3.2 Conversores CC-CC.....	38
3.2.1 Conversor CC-CC Buck.....	40

3.3 Modulação por Largura de Pulso (PWM - Pulse Width Modulation).....	42
<b>CAPÍTULO 4 – BATERIAS e CARGA CC.....</b>	<b>45</b>
4.1 Introdução.....	45
4.2 Vida útil.....	45
4.3 Definições relevantes .....	47
4.4 Auto-descarga.....	48
4.5 Caracterização das cargas.....	49
<b>CAPÍTULO 5 – MODELAGEM MATEMÁTICA.....</b>	<b>50</b>
5.1 Modelagem Matemática da Célula Fotovoltaica.....	50
5.2 Modelagem Matemática do Conversor CC-CC tipo Buck .....	54
5.3 – Modelagem Matemática da Bateria.....	56
5.4 Modelagem Matemática da Carga.....	60
<b>CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>61</b>
6.1 Simulação do modelo do painel fotovoltaico.....	61
6.2 Simulação de um conversor Buck – estudo de comportamento do modelo do.....	65
circuito com grandezas arbitrárias.	
6.3 Simulação da bateria – estudo de comportamento do modelo do circuito com .....	66
grandezas arbitrárias.	
6.4 Simulação do sistema completo/integrado.....	71
6.4.1 Controlador de Carga – Conversor Buck (abaixador).....	77
6.4.2 Bateria.....	79
6.4.3 Carga do sistema de geração isolada de energia fotovoltaica CC.....	82
6.4.4 Potências resultantes em diversos pontos do sistema .....	83
<b>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES/ CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>85</b>
7.1 Considerações Finais.....	85
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Diante do cenário atual de demanda e oferta de energia elétrica no Brasil, percebe-se a necessidade de se encontrar novas fontes de energia. As fontes de energia podem ser renováveis ou não-renováveis. As principais fontes não-renováveis de energia são os combustíveis fósseis, na sua forma sólida (carvão), líquida (petróleo) e gasosa (gás natural), e a energia nuclear. Os combustíveis renováveis são combustíveis que usam como matéria-prima elementos renováveis para a natureza.

A energia solar, responsável pela geração da energia fotovoltaica, é um combustível renovável e causa baixo impacto ambiental comparando com os combustíveis fósseis que liberam grande quantidade de CO<sub>2</sub> à atmosfera, sendo que, este gás é o principal destruidor da camada de ozônio e causador do efeito estufa.

O sistema de captação da luz solar e conversão em energia elétrica ocorre através do fenômeno chamado efeito fotovoltaico. A conversão de energia através desse fenômeno depende de vários elementos, os quais compõem os sistemas fotovoltaicos de energia solar. Dentre eles estão: módulos fotovoltaicos (compostos pelas células fotovoltaicas), baterias, controlador de carga e, dependendo da complexidade do sistema, é necessário a presença de outros elementos.

O sistema fotovoltaico, é robusto e possui manutenção reduzida, sendo necessário realizar apenas uma limpeza periódica dos módulos, e isto faz com que seja ideal para ser instalado em locais remotos, onde é difícil o acesso para equipes de manutenção (SHAYANI, 2006).

O mercado mundial fotovoltaico vem crescendo exponencialmente nos últimos anos. Partindo de 135 MWp produzidos em 1998, chegou-se a 7.900 MWp em 2008, um aumento de aproximadamente 44 vezes em dez anos (MME, 2009), como apresenta o gráfico da Figura 1.1.

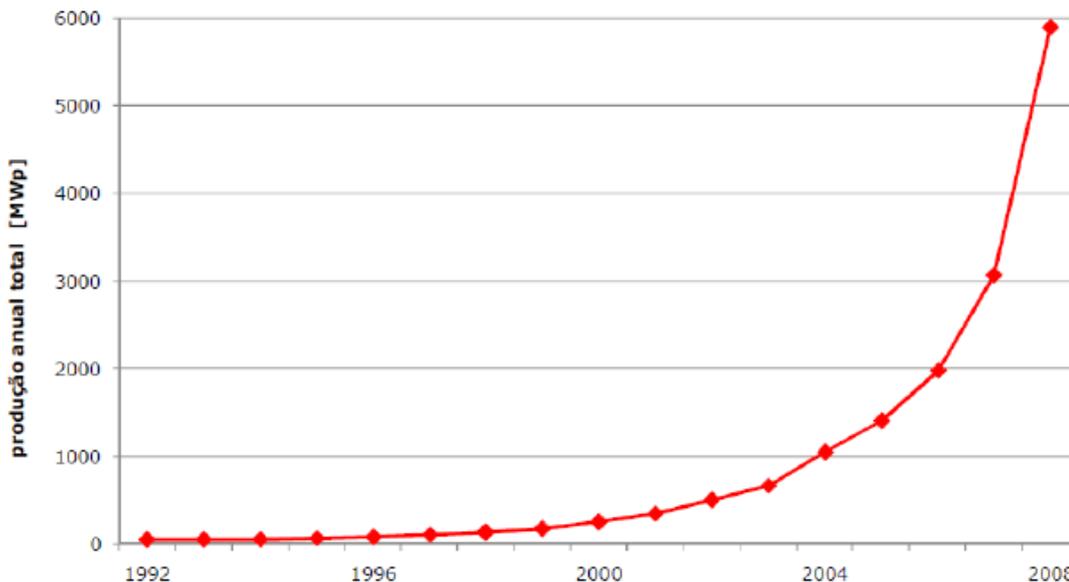


Figura 1.1 – Produção anual de módulos fotovoltaicos incluindo todas as tecnologias e todos os fabricantes.

Fonte: Navigant Consulting, 2009 apud MME, 2009.

O aumento anual na produção de módulos fotovoltaicos possui uma taxa média em torno de 40% desde 2000, o que tem feito com que a indústria fotovoltaica seja hoje a que apresenta maior crescimento dentre as tecnologias de uso de fontes renováveis em nível mundial. Um dos principais fatores que impulsionaram tal crescimento pode ser atribuído aos programas de incentivo a essa tecnologia promovidos por países como a Alemanha, Espanha e Japão (MME, 2009).

No gráfico da Figura 1.2 pode-se visualizar a taxa de crescimento anual da produção de módulos fotovoltaicos.

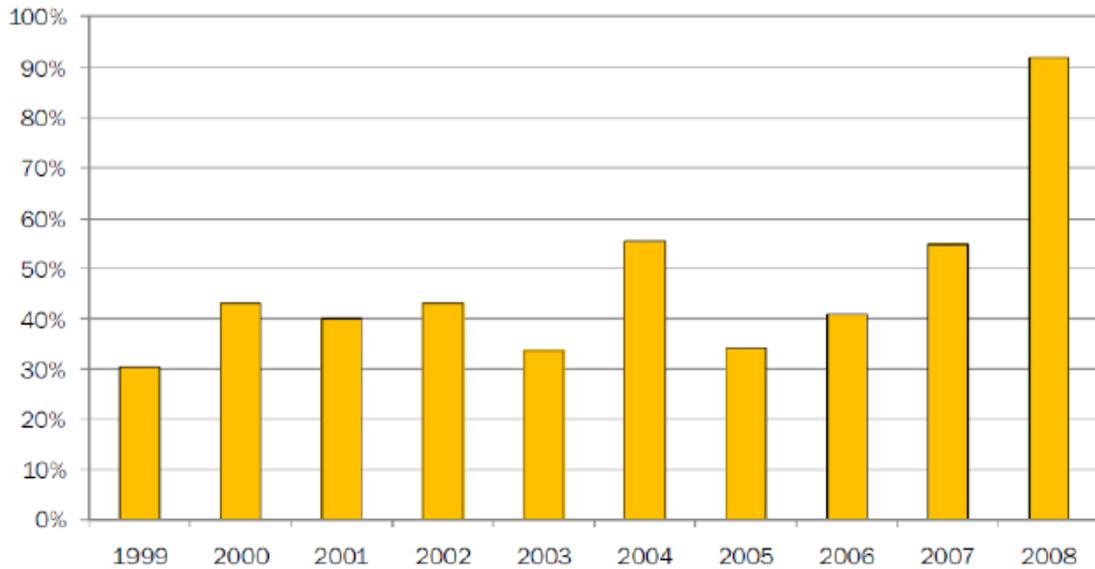


Figura 1.2 – Crescimento anual da produção de módulos fotovoltaicos incluindo todas as tecnologias e todos os fabricantes.

Fonte: Navigant Consulting, 2009 apud MME, 2009.

Devido a inúmeras fusões entre empresas do ramo, em 2004 ocorreu o aparecimento de várias empresas (principalmente na China) na produção de módulos fotovoltaicos, caracterizando em 2007 um novo cenário mundial, onde as cinco primeiras são: Q-Cell (Alemanha – com 380 MWp), Sharp (Japão – com 360 MWp), Sun tech (China – com 360 MWp), Kyocera (Japão – 205 MWp), First Solar (Alemanha – com 200 MWp) (MELO FILHO, 2009).

## 1.2 Justificativa

Quando se trata de locais de difícil acesso e onde o abastecimento de energia elétrica convencional é economicamente inviável, uma das soluções para atender essa população é a instalação de sistemas autônomos de energia fotovoltaica. A energia solar fotovoltaica apresenta vantagens como: não ser nociva à saúde humana, não emitir gases poluentes à atmosfera, consistir de um sistema que utiliza energia renovável, evita perda de energia por transmissão (no caso da energia convencional), possuir baixo custo de manutenção e vida útil longa e, como desvantagem, possui elevado custo de implantação e fabricação das células fotovoltaicas, as quais são o principal componente para geração de energia fotovoltaica e não produz energia à noite e em dias nublados e chuvosos.

Mas os elevados custos estão decrescendo cada vez mais, e essa tecnologia se tornando cada vez mais competitiva. A energia fotovoltaica vem crescendo no Brasil, devido à pesquisas e projetos científicos e governamentais, atraindo, assim, fabricantes no mercado brasileiro. Outro fator significativo para o impulso dessa tecnologia é a radiação solar incidente no país.

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. As facilidades de um sistemas fotovoltaico tais como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica (CRESESB, 2010). Outro fator atraente é que para cada um metro quadrado de coletor solar instalado evita-se a inundação de 56 metros quadrados de terras férteis, na construção de novas usinas hidrelétricas (AMBIENTE BRASIL, 2010).

Mais uma questão que favorece a utilização de sistemas fotovoltaicos autônomos é a necessidade cada vez maior de se utilizar fontes renováveis de energia a fim de atender a sustentabilidade ambiental.

Portanto, este trabalho se justifica pela necessidade de desenvolvimento de massa crítica na área de energias renováveis, especificamente energia fotovoltaica, proporcionando ao estado melhores condições para o desenvolvimento e operação desse tipo de tecnologia.

Para analisar um sistema fotovoltaico autônomo de energia, será construído um diagrama de blocos no Matlab/Simulink envolvendo os componentes que constituem o sistema fotovoltaico isolado com armazenamento e carga CC a partir da modelagem matemática de todo o sistema.

Além da característica da carga, diversas outras variáveis afetam o dimensionamento de um sistema fotovoltaico. Entre elas destacam-se as variáveis climatológicas, a radiação, temperatura ambiente e velocidade do vento, os elementos que compõem o sistema, como baterias, controladores de carga e o custo do próprio sistema (VERA, 2004).

Através de modelagem e simulação é possível estimar o desempenho do sistema sob diversas condições de funcionamento variando, por meio do programa, parâmetros cuja observação em tempo real poderia corresponder a anos. O objetivo é projetar sistemas o mais próximo possível à realidade, evitando superdimensionar o sistema para que não se torne dispendioso nem subdimensioná-lo para evitar falhas constantes de energia (VERA, 2004).

## **1.3 Objetivos do Trabalho**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um modelo de simulação de um sistema de geração isolado de energia fotovoltaica em corrente contínua, considerando seu funcionamento integrado a um conversor tipo Buck, operando com algoritmo de máxima potência, alimentando banco de baterias e carga.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Esta dissertação visa alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar a teoria de funcionamento e modelos matemáticos dos diferentes elementos integrantes do sistema;
- Construir um modelo de simulação no ambiente MATLAB&SIMULINK dos diferentes elementos integrantes do sistemas, que permita avaliar o comportamento sob diferentes condições de operação;
- Construir um modelo contemplando todos os elementos do sistema, para simulação integrada e quantificação das grandezas elétricas, sob influências das diferentes variáveis no processo de conversão fotovoltaica, controle, armazenamento de energia e atendimento à carga;
- Contribuir para o melhor entendimento do processo de geração de energia fotovoltaica CC-CC, em operação isolada, com busca do ponto de máxima potência;
- Contribuir para o Estado, na formação de massa crítica na área de energias renováveis, em especial em geração fotovoltaica.

## **1.4 Revisão de Literatura**

Vários pesquisadores desenvolveram modelos matemáticos para simulação em softwares capazes de analisar o comportamento do sistema fotovoltaico autônomo de energia, de analisar os efeitos causados por variáveis externas na eficiência do sistema, distribuição de temperatura nas células fotovoltaicas ao longo de um dia ou meses, entre outros, cada um utilizando uma metodologia diferente e softwares adequados a cada finalidade desejada.

**Hecktheuer, 2001.** Analisou o comportamento de um sistema fotovoltaico nas situações de circuito aberto e curto-circuito em operação perto do ponto de máxima potência, com e sem sombreamento de módulos. Implementou um programa de simulação que utiliza, como base, modelo matemático do programa Crearray para analisar o desempenho de sistemas fotovoltaicos, o qual considera um grande número de fatores que influenciam na eficiência do mesmo, entre eles estão: a temperatura dos módulos, a reflexão da radiação solar, a variação do espectro solar em função da massa de ar e a queda de tensão nos condutores do sistema. Este programa foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS e possui uma limitação que é a necessidade de ter que introduzir cada associação a ser simulada na linguagem do programa, ou seja, ainda não apresenta uma interface amigável para construir diferentes associações. Foram comparados os resultados obtidos na simulação do comportamento dos módulos fotovoltaicos com os valores medidos, e foram bastante satisfatórios quando considerados os fatores de reflexão, variação espectral, resistência elétrica dos condutores de conexões e temperatura dos módulos. As diferenças relativas de maior valor encontram-se nos períodos de início e fim do dia, períodos esses de baixa irradiância solar e no período compreendido 10 e 16 horas e trinta minutos, o erro percentual da simulação é bastante baixo. Durante as simulações verificou-se que os dados de entrada do programa de simulação são fatores que podem conduzir a erros bastante significativos. Muitas vezes, esses dados de entrada como radiação incidente nos módulos, temperatura das células dos módulos e ponto de operação do sistema, não estão disponíveis aos usuários do programa.

**Vera, 2004.** Integrou modelos matemáticos validados por diferentes autores para desenvolver um programa de dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos. Utilizou uma linguagem de programação Visual Basic 5.0, chamado PVSize, capaz de propor, para uma certa configuração de sistema, o número de baterias e módulos com seu risco de déficit de energia. Para calcular a energia de saída dos painéis fotovoltaicos, utilizou dois métodos chamados método  $I_{max}$  e método I-V. Seu trabalho limitou-se em comparar os dois métodos, obtendo como resultado a verificação do método mais eficiente para geração de corrente no painel fotovoltaico, o qual foi o método I-V.

**Shayani, 2006.** Mediu o real rendimento de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células, utilizando para isto as instalações do Laboratório de Fontes Alternativas do ENE/UnB. Com os dados obtidos experimentalmente neste laboratório, foi possível identificar quais são as perdas ocasionadas em cada etapa durante o processo de conversão de energia solar em energia elétrica através do sistema fotovoltaico auto-regulado. Para obter as médias diárias mensais de irradiância solar em Brasília para uma inclinação

igual à latitude local, foi utilizado o programa SUNDATA do CEPEL. Por fim, constatou que para um situação em que a energia disponibilizada pelo Sol corresponde a 100 unidades, somente 2,2 unidades são efetivamente entregues à carga. A perda devido ao perfil de energia requerido para recarregar a bateria e redução da corrente nominal pelo painel auto-regulado corresponde a 0,6 unidades; a perda pelo rendimento do banco de baterias corresponde a 0,9 unidades; a perda pelo rendimento do inversor corresponde a 0,2 unidades; a perda pelo rendimento da conversão fotovoltaica do módulo corresponde a 24,6 unidades; e as perdas pelo efeito da massa de ar atmosfera, nebulosidade do dia, posicionamento fixo e inclinação do arranjo correspondem a 71,4 unidades.

**Andrade, 2008.** Realizou um estudo para analisar a distribuição de temperatura entre as células de um módulo fotovoltaico. Teoricamente analisou as principais características que justificariam diferenças de temperatura entre as células de um módulo. Realizou simulações no software Tecplot ® tendo como variáveis de entrada as condições ambientais. Utilizou três metodologias diferentes para medir as temperaturas das células dos módulos fotovoltaicos: varredura de termômetro sem contato, termografia e arranjo de sensores de contato. Comparando os três métodos de medida, obteve-se uma avaliação de vantagens e desvantagens de cada um. O método da varredura com termômetro sem contato apresenta dificuldade do longo tempo necessário para realizar o ensaio, durante o qual as condições do módulo podem ter variado, mas tem a vantagem de ser implementado com baixo custo de equipamento. O método de sensores de contato exige um longo tempo de preparação e calibração, além do custo ser mais elevado que o primeiro, mas permite varreduras em pouco tempo e apresenta uma precisão muito boa. A termografia aparece como método ideal para mapear a temperatura de módulos fotovoltaicos, tendo em vista a facilidade de uso e, apesar de exigir alguns cuidados, pode ser utilizado sem prévia preparação dos módulos. E com a análise teórica e experimental, concluiu que o efeito da distribuição de temperatura sobre as curvas características dos módulos é muito pequeno, desde que sejam consideradas as temperaturas médias das células do módulo em cada situação. O maior impacto que a distribuição não-uniforme de temperatura pode trazer ao caracterizar eletricamente um módulo é proporcionar a possibilidade de cometer-se um grave erro ao medir a temperatura em uma célula qualquer e atribuir este valor à temperatura média do módulo.

**Silva, 2008.** Utilizou a ferramenta computacional EnergyPlus que possibilitou obter análises térmicas, energéticas e econômicas de edificações com sistemas fotovoltaicos a partir de simulações de sistemas fotovoltaicos interligado a rede de um ambiente climatizado com o objetivo de minimizar o consumo elétrico anual e aliviar o sistema elétrico no horário de pico.

**Gasparin, 2009.** Utilizou um programa de computador desenvolvido em linguagem Visual Basic® para gerenciar um sistema para traçar curvas características I-V de módulos fotovoltaicos. O programa envia os comandos para os multímetros e para a fonte através de uma interface USB – GPIB (Universal Serial Bus/General Purpose Interface Bus). Desenvolveu um método de disparo dos multímetros que se mostrou eficiente por assegurar a simultaneidade da medida do par I-V além de possibilitar a independência e integração de diferentes multímetros no sistema. Através da análise de incertezas demonstrou que a principal fonte de incerteza na determinação dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos é na medida da irradiância solar. O sistema desenvolvido apresentou-se eficiente e apresentou maior flexibilidade nos ajustes dos parâmetros para levantamento na medida da curva característica.

**Seguel, 2009.** Projetou, simulou e implementou um carregador de baterias para um sistema fotovoltaico autônomo de baixa potência, utilizando um conversor Buck como interface entre o arranjo fotovoltaico e o banco de baterias. Simulou o sistema fotovoltaico no software Matlab, com seus parâmetros ajustados ao de um módulo comercial. Para maximizar a energia elétrica produzida pelos painéis fotovoltaicos, utilizou uma técnica de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) e comparou três técnicas de MPPT mais utilizadas (Tensão Constante; Perturbação e Observação; e Condutância Incremental) a fim de escolher a mais eficiente. A que se mostrou com maior eficiência nas simulações realizadas foi a de Condutância Incremental. Para modelar matematicamente o conversor Buck utilizou a técnica de espaço de estados, obtendo as funções de transferência para auxiliar o projeto da malhas de controle. Após testar o carregador no programa de simulação, comprovou experimentalmente o funcionamento do carregador de baterias implementando um protótipo no laboratório de eletrônica de potência da Universidade Federal de Minas Gerais.

**Vera, 2009.** Sabendo que o sistema de acumulação de um sistema autônomo de energia fotovoltaica é o mais fraco do sistema global no aspecto confiabilidade e economia, propôs realizar uma análise teórica e prática do impacto das baterias sobre a confiabilidade técnica e viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos autônomos. Para isso, realizou testes experimentais, utilizou bancadas de ensaio que caracterizavam o sistema de geração e o sistema de acumulação e utilizou uma ferramenta computacional denominada PVSize, que ajuda na determinação da qualidade técnica e econômica de sistemas autônomos de energia fotovoltaica. A caracterização e monitoramento do sistema experimental permitiram a quantificação dos desvios entre valores calculados e medidos.

Com base nessas pesquisas, esta dissertação irá abordar a modelagem e simulação de cada elemento que compõe um sistema autônomo de energia fotovoltaica com armazenamento e carga CC e de um sistema que integra todos os elementos de uma só vez.

## **1.5 Estrutura do Trabalho**

Este projeto de dissertação está dividido em 7 capítulos, separados em introdução, fundamentação teórica (capítulos 2, 3 e 4) , modelagem matemática, simulação/análise de resultados e conclusão.

No primeiro capítulo foram feitas a contextualização e justificativa sobre a escolha do tema, os objetivos gerais e específicos de todo o trabalho e revisão de literatura para mostrar onde o presente trabalho se enquadra e quais as necessidades de pesquisa.

O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica sobre radiação solar e sistema autônomo de energia fotovoltaica, onde é possível entender como é feita a conversão da energia solar em energia elétrica.

O capítulo 3 apresenta a função e as características de funcionamento dos controladores de carga e conversores CC tipo Buck.

O capítulo 4 apresenta as principais características e os parâmetros de entrada da bateria utilizada no sistema autônomo fotovoltaico e quais tipos de carga CC geralmente utilizadas no tipo de configuração do sistema adotado neste trabalho.

No capítulo 5 foram desenvolvidas as modelagens matemáticas de cada parte do sistema como: módulo fotovoltaico, conversor CC abaixador de tensão, bateria (em situação de carga e descarga) e carga resistiva.

No capítulo 6 são apresentadas as simulações de cada componente separadamente e a simulação do sistema integrado utilizando o MATLAB&SIMULINK.

E no capítulo 7 foram feitas as considerações finais, citando a contribuição desta dissertação e, também, foram apresentadas ideias para trabalhos futuros relacionados ao mesmo tema.

## CAPÍTULO 2 – RADIAÇÃO SOLAR E O SISTEMA AUTÔNOMO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

### 2.1 Radiação Solar

A Terra recebe anualmente  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia solar, o que corresponde a 10000 vezes o consumo mundial de energia neste período. Este fato vem indicar que, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (CRESESB, 2009).

É importante conhecer a radiação solar incidente na superfície da Terra, tanto para entender sua influência no clima terrestre como para convertê-la em outras formas de energia. Entre outras alternativas, a energia elétrica fotogerada é uma das que envolvem o conhecimento da radiação solar. E como existe uma variabilidade não apenas sazonal, mas também interanual da radiação solar incidente, o monitoramento deve ser feito de maneira contínua através de estações solarimétricas, que são os locais responsáveis pela medição, aquisição e tratamento de dados relativos à radiação solar, bem como outras variáveis meteorológicas afins (FIORENTINO, 2004).

O nosso planeta, em seu movimento anual em torno do Sol, descreve em trajetória elíptica um plano que é inclinado de aproximadamente  $23,5^\circ$  com relação ao plano equatorial. Esta inclinação é responsável pela variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, dando origem às estações do ano e dificultando os cálculos da posição do Sol para uma determinada data.

A posição angular do Sol, ao meio dia solar, em relação ao plano do Equador (Norte positivo) é chamada de Declinação Solar ( $d$ ). Este ângulo varia, de acordo com o dia do ano, dentro dos seguintes limites:  $-23,45^\circ < d < 23,45^\circ$ . A soma da declinação com a latitude local determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra.

Pode-se definir um valor médio para o nível de radiação solar incidente normalmente sobre uma superfície situada no topo da atmosfera. Para a distância-padrão de uma unidade astronômica (distância média Terra-Sol que corresponde a 149,6 milhões de km), a energia que atinge cada  $m^2$  do topo da atmosfera é de  $1367 \text{ W/m}^2$ . Esses dados são fornecidos pela WMO (World Meteorological Organization).

A energia solar incidente no meio material pode ser refletida, transmitida e absorvida. A parcela absorvida dá origem, conforme o meio material, aos processos de fotoconversão e termoconversão (CRESESB, 2009).

Cerca de 30% da radiação, principalmente na faixa de comprimentos de ondas longos (do infravermelho ao termal), é refletida pelas nuvens, pela superfície e pela própria atmosfera. Os restantes 70% são absorvidos por gases atmosféricos - em especial o ozônio (O<sub>3</sub>), o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e o vapor d'água (H<sub>2</sub>O), pelas nuvens, pelas partículas em suspensão no ar e pela superfície do planeta. As nuvens são, sem dúvida, o principal fator modulador do fluxo de radiação que incide na superfície, causando o resfriamento da atmosfera (ANDRADE, 2007).

A radiação infravermelha é uma radiação eletromagnética cujo comprimento de onda é maior do que o da luz visível, e por conseqüência não é visível para os seres humanos. O nome significa "abaixo do vermelho" (do latim *infra*, "abaixo"). Isto se deve ao fato de a cor vermelha possuir a menor freqüência do espectro de luz visível e o infravermelho possuir uma freqüência logo abaixo da dele. O infravermelho é a porção do espectro eletromagnético limitada pelo visível no lado de menor comprimento de onda e pelas microondas no lado de maior comprimento de onda. O comprimento de onda do infravermelho possui tamanho aproximadamente de 750 nm a 1mm (GTA, 2011).

### **2.1.1. Radiação Solar a Nível do Solo**

De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera, apenas uma fração atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Esta fração que atinge o solo é chamada de global total e é constituída por uma componente direta, radiação que manteve sua trajetória na atmosfera e por uma componente difusa, que sofreu atenuação atmosférica (CRESESB, 2009). Estas componentes podem ser observadas na Figura 2.1 e são representadas pela seguinte equação, conforme Oliveira (2008):

$$G = G_b + G_d \quad (2.1)$$

onde  $G$  é a radiação global,  $G_b$  a radiação direta e  $G_d$  a radiação difusa.

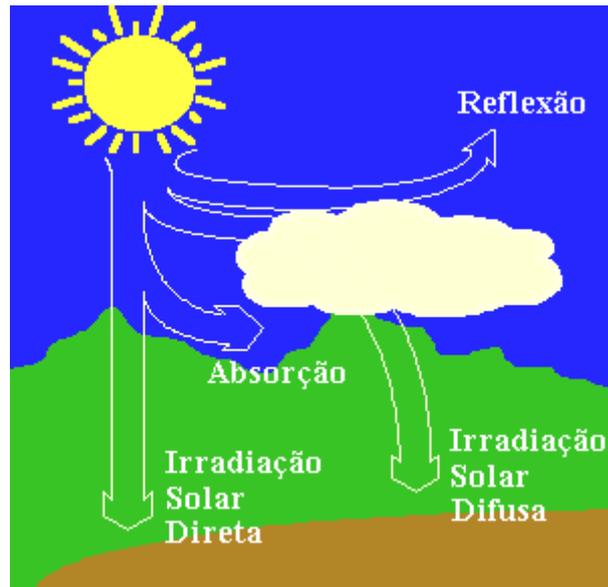


Figura 2.1 - Componentes da radiação solar ao nível do solo

Notadamente, se a superfície receptora estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.) (CRESESB, 2009). O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de "albedo", o qual varia de 0 a 1. Quando o albedo é 0, significa que a luz incidente na superfície ou corpo não é refletida e quando é 1, significa que a luz incidente na superfície é totalmente refletida. Mas as superfícies terrestres típicas nunca apresentam albedo exatamente 0 ou exatamente 1, e sim valores entre 0 e 1. Por exemplo, o albedo da Terra é 0,37 ou 37%. O albedo pode ser definido da seguinte forma:

$$\rho = \frac{\text{radiação refletida por uma superfície}}{\text{radiação incidente em uma superfície}} \quad (2)$$

Antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, também identificada por um coeficiente denominado "Massa de Ar" (AM), e, portanto, do ângulo Zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas (CRESESB, 2009).

Segundo Oliveira (2008), a pior situação é quando o céu está totalmente nublado ou com excesso de partículas sólidas, quando ocorre uma grande atenuação da radiação solar.

O valor de AM (do inglês *air mass*), massa de ar, é definido com a relação entre o comprimento da trajetória percorrida pela radiação solar direta até a superfície terrestre e o

comprimento da trajetória da radiação direta até o nível do mar caso o sol estivesse no zênite. Ela pode ser calculada de maneira simplificada para ângulos de até  $70^\circ$  através da Equação (2.2) (GASPARIN, 2009).

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.2)$$

Onde:

$\theta$  - é o ângulo entre zênite e a radiação solar direta

Na Figura 4, pode-se visualizar ângulos  $\theta$  iguais a  $60,1^\circ$  correspondendo a AM 2,0 e  $\theta$  igual a  $48,2^\circ$  correspondendo a AM 1,5 e pode-se observar, também, que massa de ar (AM) igual a 0 (zero), é definida para a radiação fora da atmosfera e igual a 1, é definida com o sol no zênite ao nível do mar.

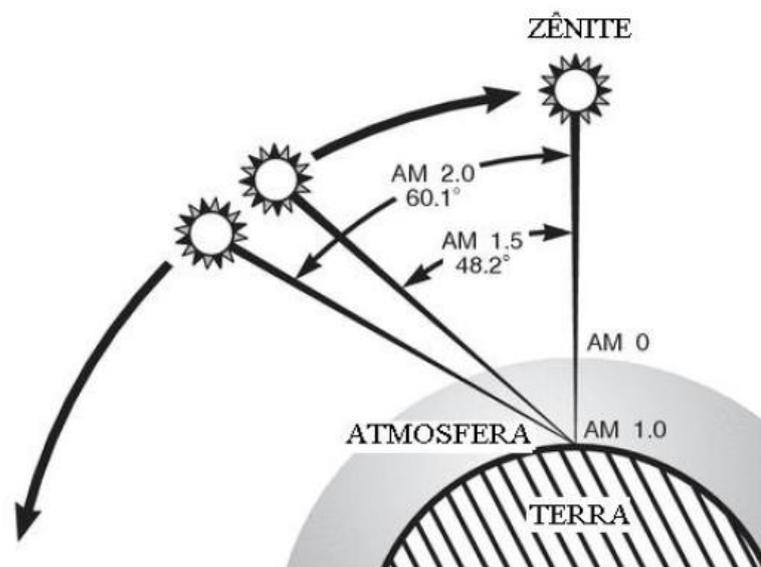


Figura 2.2 - Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM).  
(Fonte: Gasparin, 2009)

## 2.2 Sistema de Geração de Energia Fotovoltaica

Sistemas Fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais: isolados, híbridos ou conectados à rede. A utilização de cada uma dessas opções dependerá da aplicação e/ou da disponibilidade de recursos energéticos. Cada um deles poderá ser de

complexidade variável dependendo da aplicação em questão e das restrições específicas de cada projeto (CEPEL, 1999). Suas principais aplicações são em eletrificação rural (luz, televisão, rádio, comunicações, bombas de água), eletrificação de cercas, sinalização, barcos, antenas de telefonia móvel e satélites.

Devido à alternância de dias e noites, das estações do ano e períodos de passagem de nuvens e chuvosos, o recurso energético solar apresenta grande variabilidade, induzindo, conforme o caso, à seleção de um sistema apropriado de estocagem para a energia resultante do processo de conversão. O armazenamento pode ser na forma de energia química em bancos de baterias, quando se deseja utilizar aparelhos elétricos nos períodos em que não há geração fotovoltaica (CEPEL, 1999), ou pode ser feita na forma de energia potencial gravitacional em tanques elevados para armazenamento, geralmente de água em sistemas de bombeamento, ou ainda em formas menos convencionais como na produção de hidrogênio e ar comprimido (COUTO, 2000).

Dentre os sistemas isolados existem muitas configurações possíveis, que são escolhidas conforme a aplicação, o tipo de carga e o custo. As configurações são: sistema isolado com carga de corrente contínua (CC) sem armazenamento, sistema isolado com carga CC com armazenamento, sistema isolado com carga de corrente alternada (CA) sem armazenamento e sistema isolado com carga CA com armazenamento. Neste trabalho, a configuração que servirá de base para a modelagem matemática e simulações será um sistema com carga CC com armazenamento.

### **2.2.1 Sistema isolado com armazenamento em Baterias alimentando carga CC**

Este tipo de sistema é instalado, geralmente, em locais remotos onde se deseja alimentar principalmente equipamentos eletrônicos com tensão contínua e o fornecimento de energia deve ser ininterrupto. Alguns tipos de aplicações são: estações repetidoras de sinais de rádio, antenas de telefonia móvel e telefones de emergência em rodovias (ROSEMBACK, 2004).

Um Sistema Solar Fotovoltaico é normalmente composto por três partes básicas: o arranjo dos módulos, o subsistema de condicionamento de potência, o qual converte a saída do arranjo em potência útil, e as baterias, que têm a função de armazenar a energia elétrica gerada. A célula solar que está localizada no módulo é o dispositivo mais importante de todo o sistema, pois é responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica (CEPEL, 1999) que acontece através do efeito fotovoltaico.

Neste trabalho, o sistema simulado terá como acumulador de energia baterias recarregáveis, ou seja, forma de energia química. De acordo com IST (2004), em geral, a utilização de acumuladores exige a utilização de um controlador de carga adequado que faça a gestão do processo de carga, com o objetivo de proteger e garantir uma elevada fiabilidade e um maior tempo de vida útil dos acumuladores. Assim sendo, um sistema autônomo típico consta de quatro componentes, que podem ser visualizados no diagrama de blocos da Figura 2.3.

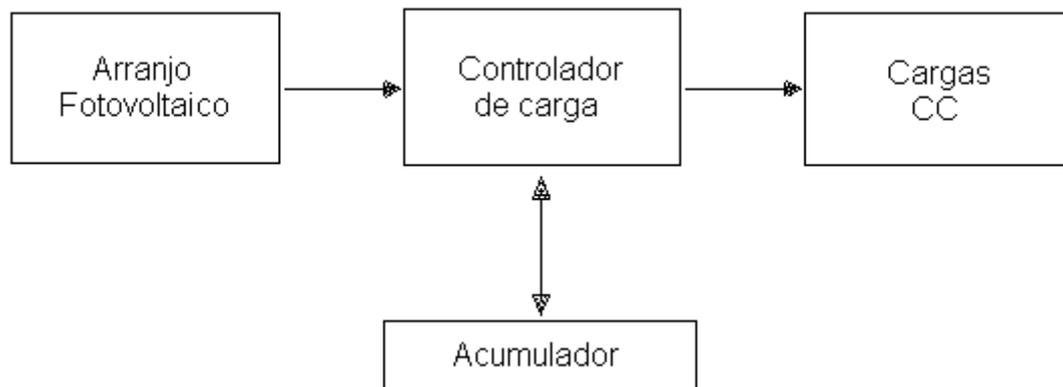


Figura 2.3 – Sistema isolado com armazenamento de energia e cargas CC.

Fonte: a autora.

### 2.2.2 Efeito Fotovoltaico

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico). O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. Os materiais semicondutores se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra totalmente "vazia" (banda de condução). A célula fotovoltaica é a unidade fundamental do processo de conversão (CRESESB, 2009).

O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para

a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n (CRESESB, 2009).

Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se portanto, que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante p (CRESESB, 2009).

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama junção pn (CRESESB, 2009). A junção pn e os silícios do tipo “p” e do tipo “n” podem ser visualizados na Figura 2.4.

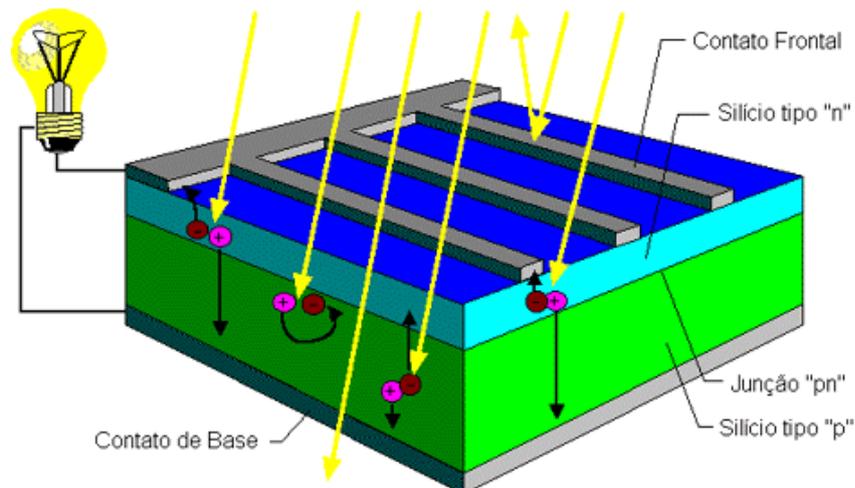


Figura 2.4 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica

Fonte: CRESESB, 2009.

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico. Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas (CRESESB, 2009). Todo o processo do Efeito Fotovoltaico pode ser acompanhado na Figura 2.5.

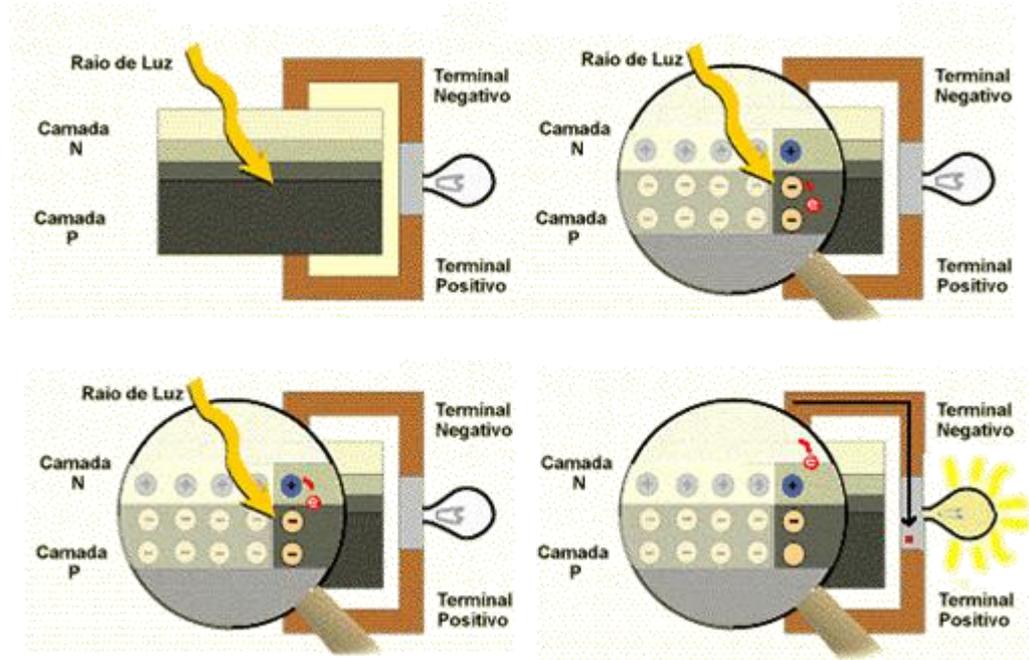


Figura 2.5 - Efeito fotovoltaico na junção pn

Fonte: CRESESB, 2009.

### 2.2.3 Célula Fotovoltaica

As células são componentes optoeletrônicos que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico. São basicamente constituídas de materiais semicondutores, sendo o silício o material mais empregado (CRESESB, 2009).

As células podem ser constituídas de cristais de silício monocristalino, policristalino ou de silício amorfo. As mais utilizadas atualmente em escala industrial, são as de silício monocristalino. Estas possuem eficiência de conversão maior que as de silício policristalino, mas ao mesmo tempo são mais caras por exigirem um processo de preparação mais rigoroso. As células de silício amorfo são as que possuem menor custo de fabricação comparadas com as outras duas. Outras vantagens das células de silício amorfo são o baixo consumo de energia na produção e a possibilidade de fabricação de células com grandes áreas.

No entanto, conforme CRESESB (2009), o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil.

A estrutura de uma célula de silício monocristalino pode ser visualizada na Figura 2.6.

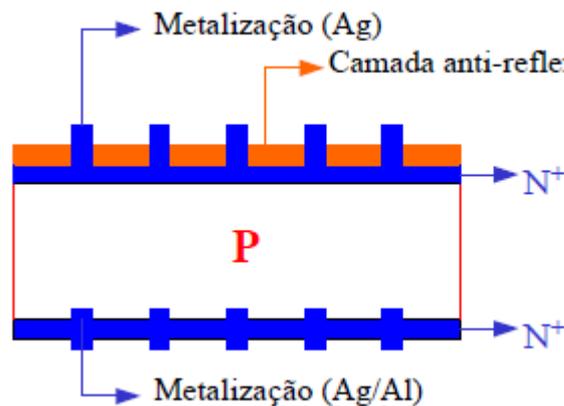


Figura 2.6 – Estrutura de uma célula de silício monocristalino.

A primeira célula fotovoltaica foi comercializada por Werner Siemens, no final do século XIX e tinha uma eficiência em torno de 0,5%. Como afirmam Brito et.al. (2006), depois disso, a história da energia fotovoltaica teve de esperar os grandes desenvolvimentos científicos da primeira metade do século XX, nomeadamente a explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein em 1905, o advento da mecânica quântica e, em particular, a teoria de bandas e a física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício.

A história da primeira célula solar moderna teve início em 1953 e vários pesquisadores como Calvin Fuller, Gerald Pearson e Daryl Chapin, ambos pesquisadores do Laboratório Bell Labs localizado em Murray Hill, New Jersey, Estados Unidos da América, se dedicaram em vários testes com as células solares fabricadas com diferentes materiais, almejando o aumento da eficiência das células solares. E quando alcançaram uma eficiência recorde de 6%, os resultados foram publicados.

A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954. Tinha apenas dois centímetros quadrados de área e uma eficiência de 6%, gerando 5 mW de potência elétrica. Cinquenta anos depois, em 2004, foram produzidas cerca de mil milhões de células, com eficiência da ordem dos 16%, ultrapassando pela primeira vez a barreira de 1GW de potência elétrica anual instalada (BRITO, et.al., 2006). E, atualmente, a eficiência das células solares de silício monocristalino comercializadas varia de 15% a 19,5% e em laboratório essa eficiência chega a 24%.

As células fotovoltaicas de silício são encapsuladas em módulos. O empacotamento é feito para que fiquem protegidas das intempéries, principalmente da umidade do ar (CEPEL,

1999). A Figura 2.7 mostra como são as células fotovoltaicas, os módulos e o arranjo fotovoltaico.

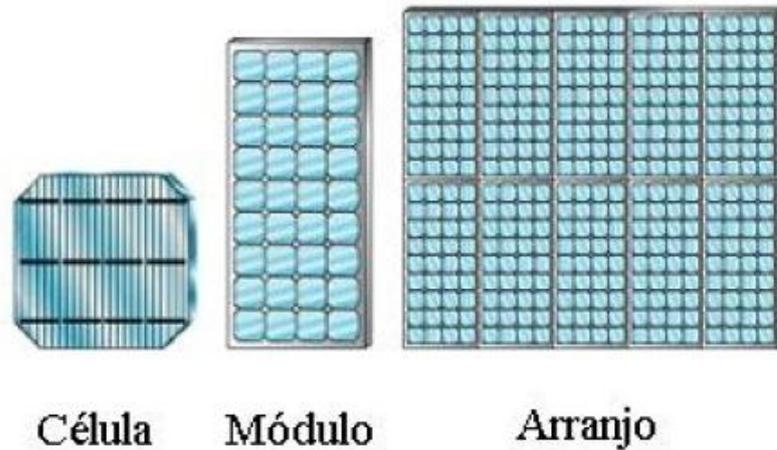


Figura 2.7 – Células fotovoltaicas, células associadas formando um módulo e módulos associados denominados de arranjo fotovoltaico.

Fonte: GASPARIN, 2009.

A máxima tensão gerada por uma célula de silício em circuito aberto é da ordem de 0,6V. Como pouquíssimos aparelhos funcionam com uma alimentação dessa ordem, é necessário que se faça associações série e/ou paralelo entre as células, podendo se obter valores maiores de tensão com associações série e valores maiores de correntes com associações paralelas.

## 2.2.4 Módulo Fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são construídos a partir da associação de várias células fotovoltaicas de silício em série e em paralelo.

### 2.2.4.1 Arranjo dos Módulos

O arranjo dos módulos é feito de acordo com a potência e tensão desejadas. Os módulos podem ser conectados em série e/ou em paralelo. A conexão série é feita ligando um terminal positivo de um módulo a um terminal negativo de outro módulo, e assim por diante. E a conexão em paralelo é feita ligando terminais positivos juntos e terminais negativos juntos.

Deve ser dada cuidadosa atenção às células a serem reunidas, devido às suas características elétricas. A incompatibilidade destas características leva a módulos “ruins”, porque as células de maior fotocorrente e fotovoltagem dissipam seu excesso de potência nas células de desempenho inferior. Em consequência, a eficiência global do módulo fotovoltaico é reduzida (CEPEL, 1999). Por isso, quando se faz a associação de células, deve-se unir células com curvas características I-V o mais semelhante possível.

Nas ligações em paralelo, representadas na Figura 2.8, as correntes são somadas e a tensão continua a mesma se os módulos forem idênticos e sob as mesmas condições de radiação e temperatura. Assim, tem-se as seguintes equações (2.3) e (2.4):

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (2.3)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (2.4)$$

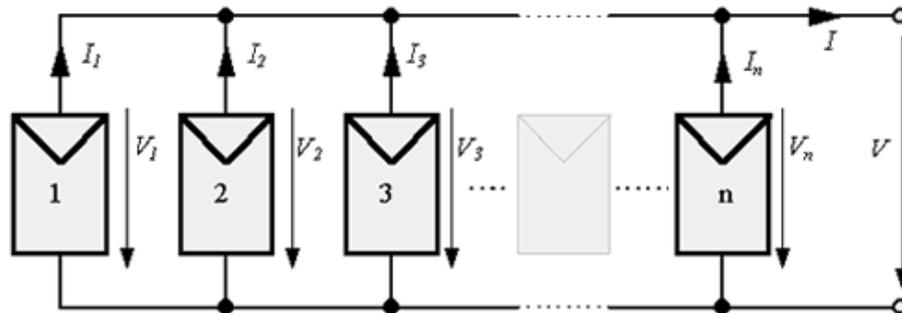


Figura 2.8 - Conexão de células em paralelo.

Fonte: CRESESB, 2009.

E no arranjo de células em série, que pode ser visualizado na Figura 2.9, as tensões são adicionadas e as correntes individuais são iguais se, também, forem considerados módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura, ou seja:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (2.5)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (2.6)$$

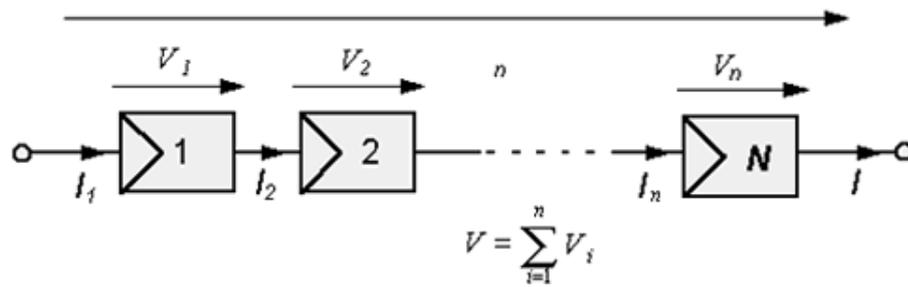


Figura 2.9 - Arranjo das células em série.

Fonte: CRESESB, 2009.

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em módulos é o arranjo em série. Este consiste em agrupar o maior número de células em série onde soma-se a tensão de cada célula chegando a um valor final de 12V o que possibilita a carga de acumuladores (baterias) que também funcionam na faixa dos 12V (CRESESB, 2009). A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua.

Quando uma célula fotovoltaica dentro de um módulo, por algum motivo, estiver encoberta, a potência de saída do módulo cairá drasticamente que, por estar ligada em série, comprometerá todo o funcionamento das demais células no módulo. Para que toda a corrente de um módulo não seja limitado por uma célula de pior desempenho (o caso de estar encoberta), usa-se um diodo de passo ou de "bypass". Este diodo serve como um caminho alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Geralmente o uso do diodo bypass é feito em grupamentos de células o que, torna muito mais barato comparado ao custo de se conectar um diodo em cada célula (CRESESB, 2009). A Figura 2.10 mostra a ligação de diodo bypass entre as células.

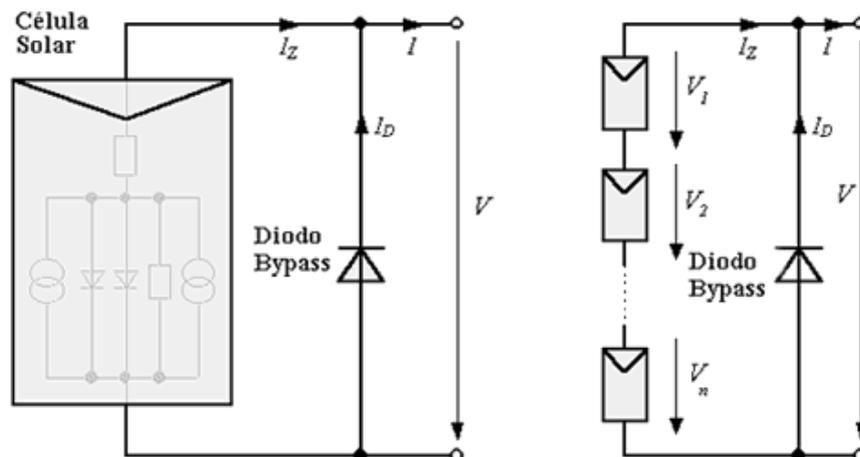


Figura 2.10 - Possível ligação para um diodo bypass entre células.

Fonte: CRESESB, 2009.

Um outro problema que pode acontecer é quando surge um corrente negativa fluindo pelas células ou seja, ao invés de gerar corrente, o módulo passa a receber muito mais do que produz. Esta corrente pode causar queda na eficiência das células e, em caso mais drástico, a célula pode ser desconectada do arranjo causando assim a perda total do fluxo de energia do módulo. Para evitar esses problemas, usa-se um diodo de bloqueio, como na Figura 2.11, impedindo assim correntes reversas que podem ocorrer caso liguem o módulo diretamente em um acumulador ou bateria (CRESESB, 2009).

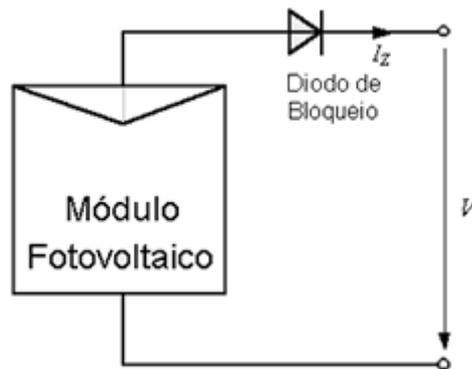


Figura 2.11 - Diodo de bloqueio.

Fonte: CRESESB, 2009.

#### 2.2.4.2 Características elétricas dos módulos

Geralmente, a potência dos módulos é dada pela potência de pico expressa na unidade (Wp).

A potência de pico corresponde à energia elétrica gerada na saída do módulo fotovoltaico quando irradiado por uma luz solar com potência de 1000W e temperatura de 25°C, ou seja, é um valor obtido em condições ideais específicas.

Segundo a norma americana ASTM E1036 (1996) apud Gasparin (2009), a medida de performance de um módulo ou arranjo fotovoltaico consiste em determinar pelo menos as seguintes características elétricas: corrente de curto-circuito  $I_{SC}$ , tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ , potência máxima  $P_m$  e tensão de máxima potência  $V_{mp}$ . Estas características são determinadas mediante análise direta da curva característica  $I \times V$  (ver Figura 2.12). Estes são os dados que obrigatoriamente os fabricantes especificam nos módulos comerciais.

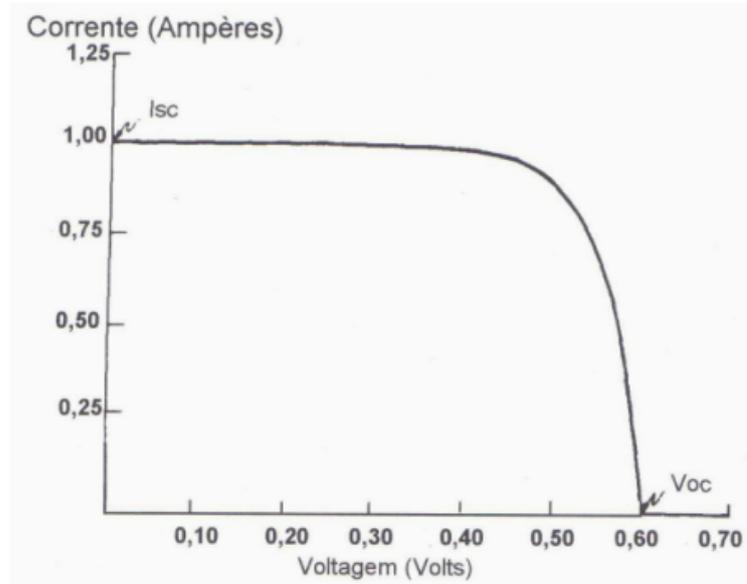


Figura 2.12 - Curva característica  $I \times V$  típica de uma célula de silício monocristalino, normalizada pela corrente de curto-circuito.

Fonte: “Photovoltaic System Design – Course Manual” apud CEPEL (1999)

As características elétricas potência máxima  $P_m$  e tensão de máxima potência  $V_{mp}$  podem ser visualizadas na Figura 2.13.

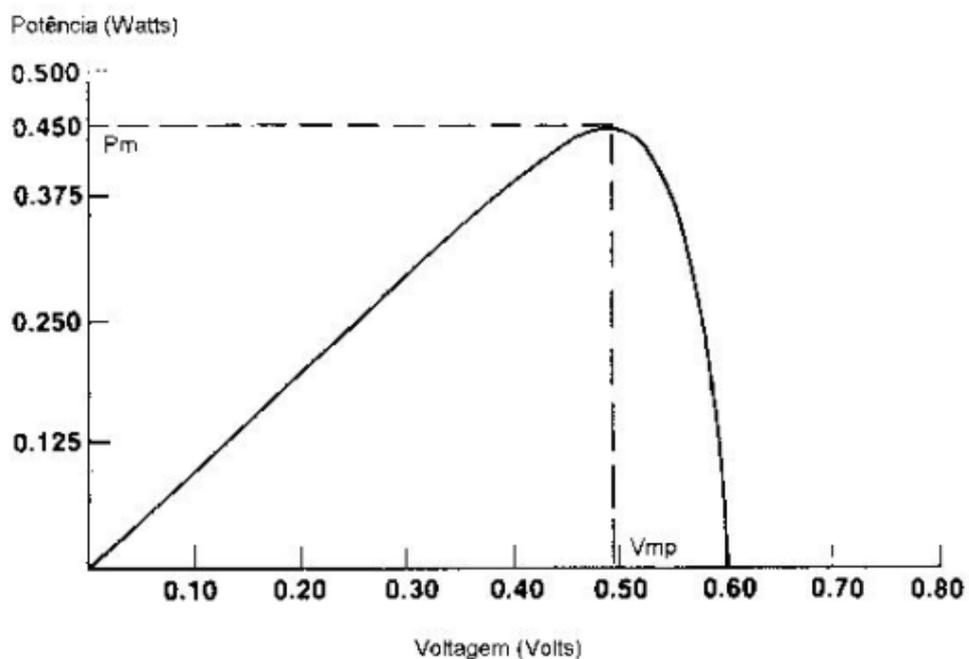


Figura 2.13 - Curva típica de potência versus tensão para a célula de silício monocristalino da Figura (IxV).

Fonte: CEPEL (1999)

Conforme Gasparin (2009), para a completa caracterização elétrica do módulo fotovoltaico outros parâmetros devem ser determinados como a eficiência do módulo  $\eta$ , os coeficientes de temperatura  $\alpha$  e  $\beta$ , a resistência série  $R_s$ , a resistência paralela  $R_p$ , o fator de forma  $FF$ , o fator de idealidade do diodo  $m$  e a corrente de saturação  $I_0$ . As especificações elétricas devem sempre vir acompanhadas das condições em que foram determinadas. Os valores padronizados de teste adotados pelas normas internacionais que regulamentam ensaios em dispositivos fotovoltaicos são:

- Irradiância solar: 1000W/m<sup>2</sup>
- Temperatura da célula: 25°C
- Distribuição espectral: AM 1,5 global

A irradiância é conhecida através da medição da corrente de curto-circuito de uma célula de referência encapsulada, de silício monocristalino, a qual fornece uma corrente curto-circuito de 122,8mA +- 1% quando se tem os valores padrões citados anteriormente para irradiância, temperatura e massa de ar.

#### **2.2.4.3 Corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto**

Quando um módulo está posicionado na direção do sol, a tensão pode ser medida entre os terminais positivo e negativo através de um voltímetro. Se não houver, ainda, nenhuma conexão de qualquer equipamento ao módulo, a corrente não flui. Então esta medida é denominada tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) (CEPEL, 1999).

A corrente deve ser medida por um amperímetro, e ainda sem as conexões de qualquer equipamento, se ligarmos os terminais de um módulo diretamente, haverá uma corrente fluindo denominada corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), neste caso a tensão é zero (CEPEL, 1999).

#### **2.2.4.4 Efeitos das resistências série e paralela na curva IxV**

A resistência paralelo tem sua influência maior na região de baixas tensões, na qual a corrente que circula pelo diodo do circuito equivalente é muito pequena.

Gasparin (2009) afirma que o principal efeito da resistência série  $R_s$  na curva  $I \times V$ , como observado na Figura 2.14, é uma redução da inclinação da curva na região da tensão de circuito aberto.

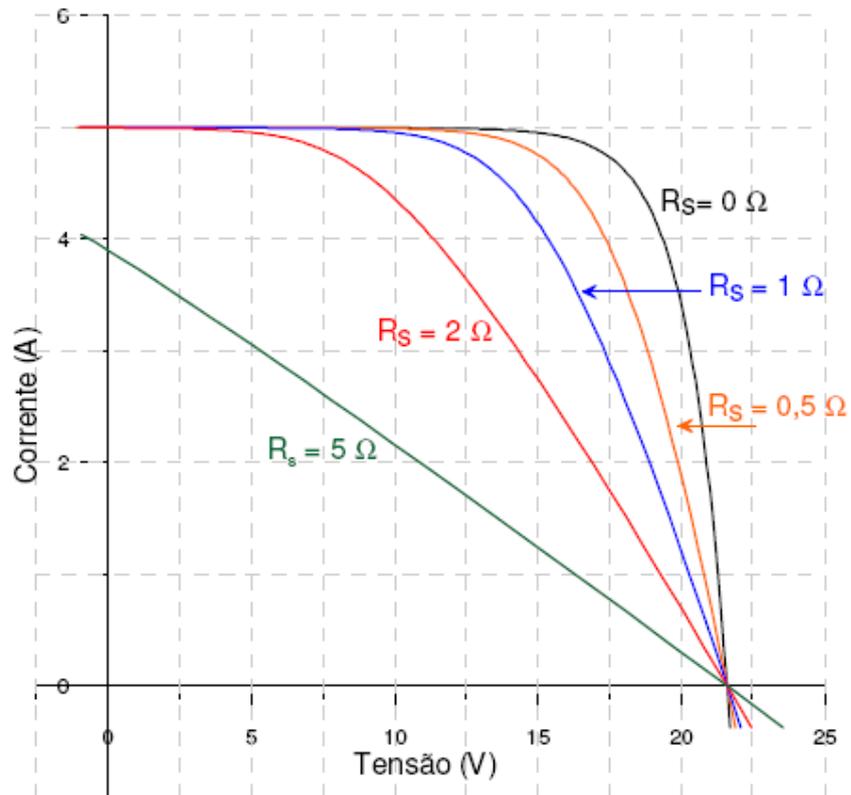


Figura 2.14 - Efeito da variação da resistência série na curva característica teórica de um módulo fotovoltaico com 36 células.

Fonte: GASPARIN (2009).

Conforme Gasparin (2009), a  $R_p$  reúne em um componente resistivo os diversos fatores que originam fugas de corrente. Idealmente a  $R_p$  seria infinita, e seu principal efeito gráfico na curva característica é uma redução da inclinação da curva na região de curto-circuito como pode ser observado na Figura 2.15.

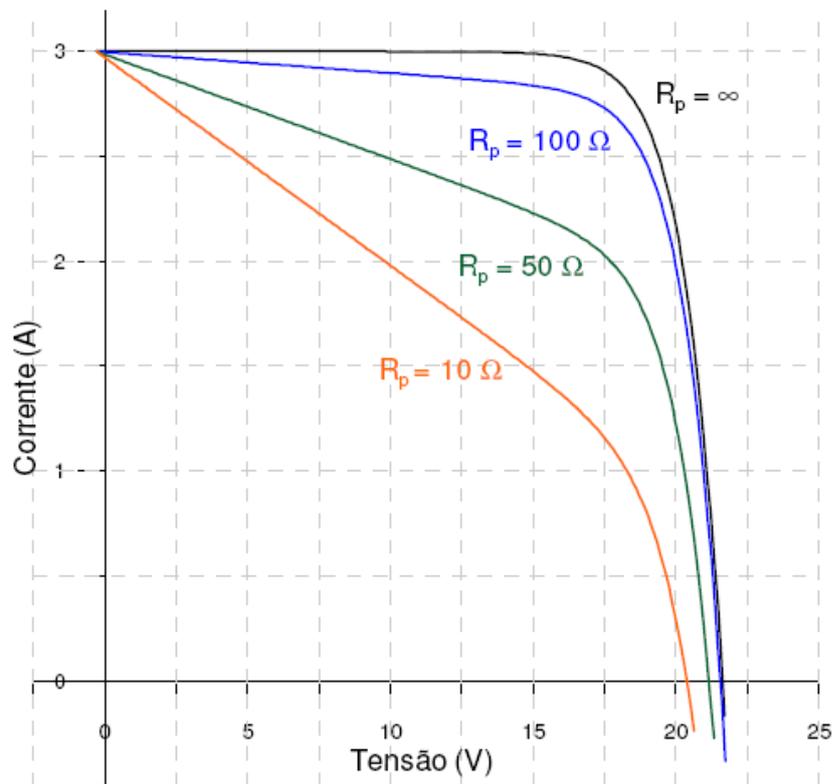


Figura 2.15 - Efeito da variação da resistência paralela na curva característica teórica de um módulo com 36 células.

Fonte: GASPARIN (2009).

#### 2.2.4.5 Rendimento de conversão energética

Os módulos mais utilizados são constituídos por células, que são classificadas de acordo com os materiais com que são fabricadas e a sua estrutura interna. As células mais utilizadas são as de silício monocristalino, pois possuem a maior eficiência comparando com as de silício amorfo e silício policristalino.

A medida da qualidade de uma célula é dada pela sua eficiência. Esta é denotada por  $\eta$  e é o resultado da relação entre a potência elétrica máxima fornecida nos seus terminais da célula e a potência radiante incidente no dispositivo. O cálculo da eficiência é feito por meio da equação (2.7) (ANDRADE, 2008).

$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{AG} \quad (2.7)$$

onde  $A$  é a área do dispositivo e  $G$  é o fluxo radiante incidente no componente (em  $W/m^2$ ) (Green, 1992; Goetzberger, 1998; apud Andrade, 2008).

### 2.2.4.6 Fatores que afetam as características elétricas dos módulos

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é fundamentalmente influenciado pela intensidade luminosa e temperatura das células. A condição padrão para plotagem das curvas características e testes dos módulos é definida para a radiação de  $1000\text{W/m}^2$  (radiação recebida na superfície da terra em dia claro, ao meio dia), e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  na célula (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura) (CEPEL, 1999). Entretanto, em uma aplicação real, a temperatura da célula exposta a  $1\text{kW/m}^2$  certamente será muito mais elevada, por estar diretamente exposta ao Sol e dentro de um invólucro que cria um efeito estufa, fazendo com que estes dados nunca sejam alcançados no cotidiano do sistema (SHAYANI, 2006).

A corrente gerada pelo módulo aumenta linearmente com o aumento da intensidade luminosa. O sol possui movimento aparente no céu de acordo com a hora do dia e com o dia do ano. Para receber maior intensidade luminosa seria necessário acompanhamento destes movimentos. Entretanto, os módulos, normalmente, são instalados em posição fixa, devido ao elevado custo dos equipamentos que permitem sua movimentação (seguidores ou trackers) (CEPEL, 1999). Na Figura 2.16, pode-se verificar a variação da corrente gerada de acordo com a variação da intensidade da luz.

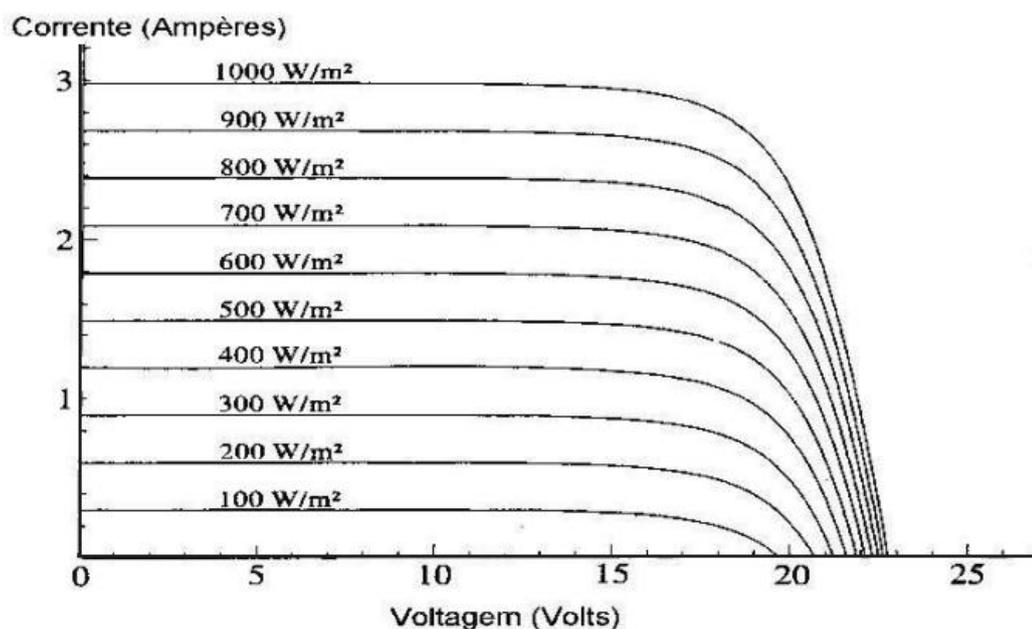


Figura 2.16 - Efeito da variação da corrente em relação a variação de intensidade de radiação sobre a célula fotovoltaica.

Fonte: CEPEL (1999).

A incidência de um nível de insolação e a variação da temperatura ambiente implicam uma variação de temperatura nas células que compõem os módulos. O aumento do nível de insolação aumenta a temperatura da célula e conseqüentemente tende a reduzir a eficiência do módulo. Isto se deve ao fato de que a tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura enquanto que a corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível (CEPEL, 1999). Na Figura 2.17 pode-se comparar os “joelhos” das curvas, os quais indicam os pontos de operação para potência máxima gerada para as condições padrões de teste (1000W/m<sup>2</sup> e ATM 1,5) relacionados com valores diferentes de temperatura.

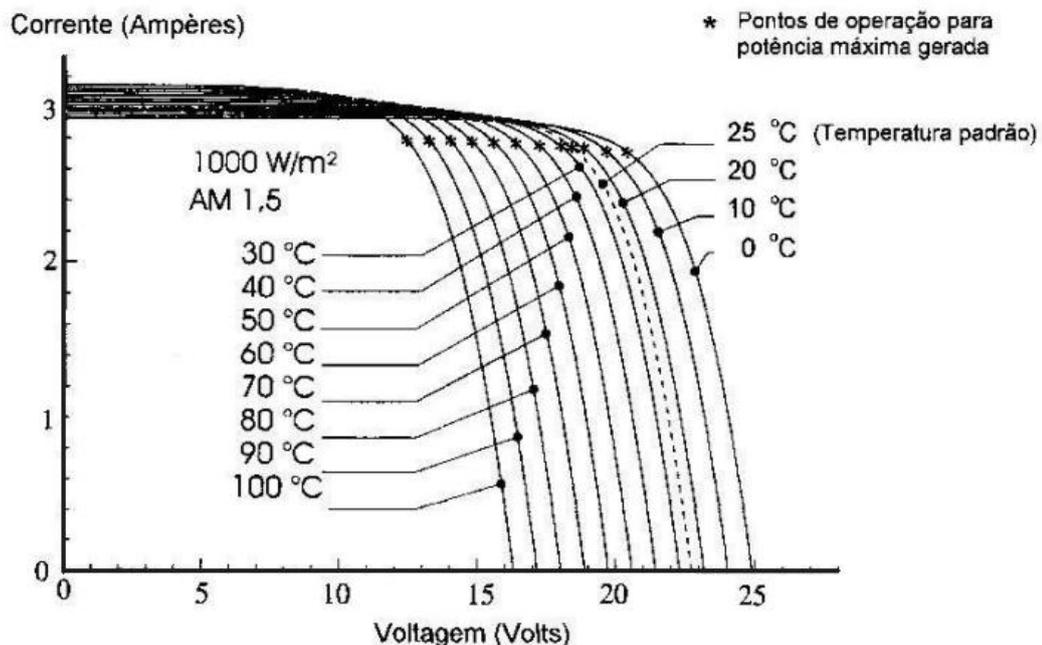


Figura 2.17 - Efeito causado pela temperatura da célula na curva característica IxV (para 1000W/m<sup>2</sup>) em um módulo fotovoltaico de silício cristalino.

Fonte: CEPEL, 1999.

#### 2.2.4.7 Fatores que influenciam na conversão

Alguns dos fatores que influenciam o desempenho do sistema são: utilização de rastreador solar; distância Terra-Sol; irradiação solar; temperatura; quantidade de nuvens no céu; poeira sobre os painéis solares; perdas entre os módulos mal conectados; perdas nos condutores; perdas internas no controlador de carga; e o material entorno do painel.

No caso dos fatores relacionados ao módulo deve-se aplicar um fator de correção do módulo que faz o ajuste da corrente do mesmo para as condições de campo, prevendo o

acúmulo de poeira, perdas entre os módulos mal conectados, degradação ao longo do tempo e outros. Para o módulo do tipo cristalino, o valor padrão é 0,9 (CRESESB, 1999).

Para captar maior intensidade luminosa é preciso seguir o movimento do Sol no céu segundo a hora e a época do ano através de um seguidor azimutal. Para os módulos fixos, que é o caso neste trabalho, é recomendado que se instale os módulos com uma inclinação de acordo com a latitude do local e virada para o Norte verdadeiro.

Um dos fatores atenuantes, que dificulta o aproveitamento de toda a energia que o Sol disponibiliza fora da atmosfera, reduzindo-o até a chegada ao solo, além da massa de ar, é a quantidade de nuvens no céu, as quais impedem que os raios solares diretos atinjam os painéis (SHAYANI, 2006).

#### **2.2.4.8 Interações entre os Módulos Fotovoltaicos e as Baterias**

Normalmente o banco de baterias de acumuladores e os módulos fotovoltaicos trabalham em conjunto para alimentar as cargas. A Figura 2.19 mostra como se distribui a entrega de energia à carga ao longo do dia. Durante a noite toda a energia pedida pela carga é fornecida pelo banco de baterias. Em horas matutinas os módulos começam a gerar, mas se a corrente que fornecerem for menor que aquela que a carga exige, a bateria deverá contribuir. A partir de uma determinada hora da manhã a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos supera a energia média procurada. Os módulos não só atenderão a procura e, além disso, o excesso será armazenado na bateria que começará a carregar-se e a recuperar-se da sua descarga da noite anterior. Finalmente durante à tarde, a corrente gerada diminui e qualquer diferença em relação à procura será entregue pela bateria. Durante a noite, a produção é nula e todo o consumo vem da(s) bateria(s) de acumuladores (ANDRADE, 2007).

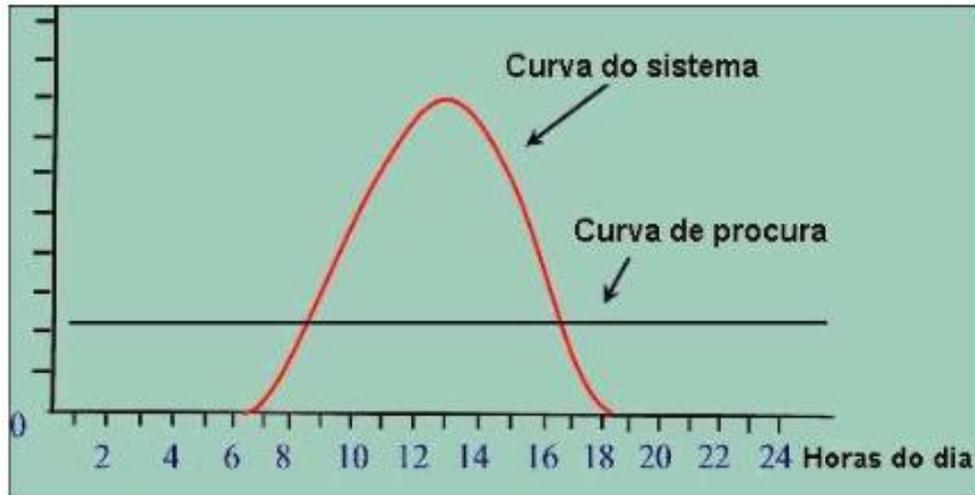


Figura 2.19: Curva de Procura do Sistema X Produção de Energia Elétrica.

Fonte: ANDRADE, 2007.

### 2.2.5 Seguidor do Ponto de Máxima Potência (MPPT)

Algumas vezes, os projetos de Sistemas Fotovoltaicos, para otimização do ponto de operação, utilizam um controle eletrônico capaz de aumentar o rendimento de geração. Nestes casos, o controle do ponto de operação é realizado por dispositivos seguidores do ponto de máxima potência, comumente chamados de MPPT – Maximum Power Point Tracker, que operam de modo a regular a tensão e corrente de operação do arranjo fotovoltaico, a fim de obter o máximo produto  $I \times V$ .

O ponto de máxima potência (ver Figura 2.20) é atingido quando a tensão é mantida no maior valor dentro do qual não reduz a produção de corrente. Entretanto este ponto ótimo de operação é difícil de ser mantido devido às variações que estas curvas sofrem ao serem expostas às condições reais de temperatura e irradiância, fatores estes sempre existentes, pois o painel fotovoltaico é exposto diretamente ao Sol (SHAYANI, 2006).

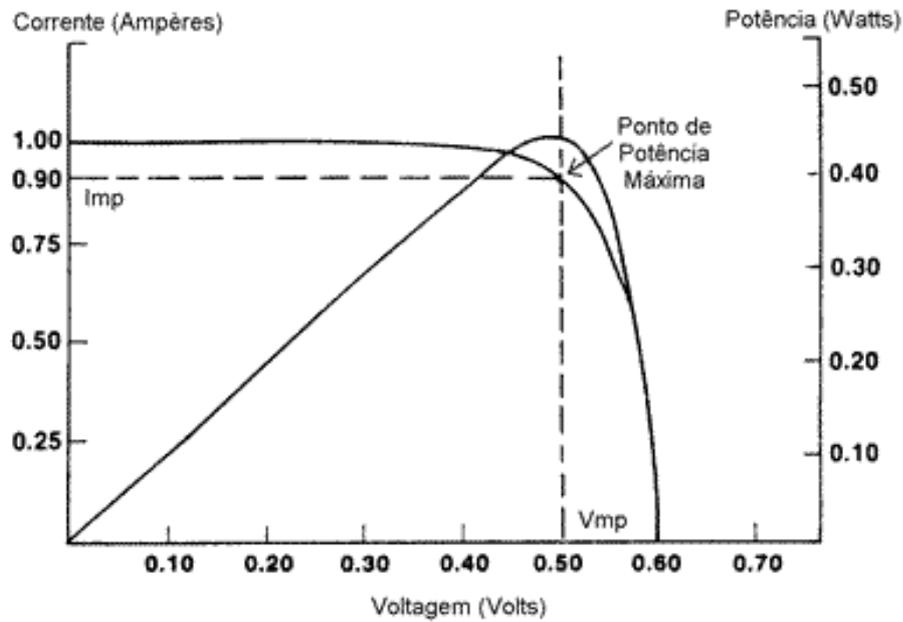


Figura 2.20 - Parâmetros de potência máxima.

Fonte: "Photovoltaic System Design – Course Manual" apud CEPEL (1999).

O dimensionamento de sistemas que utilizam dispositivos seguidores de máxima potência é bastante crítico, uma vez que, tanto a tensão quanto a corrente variam simultaneamente, dentro de uma larga faixa. Por estes motivos, o uso de um MPPT (Maximum Power Point Tracking) só é viável nos projetos de grandes instalações que já possuem sistemas de controle sofisticados. Uma alternativa mais simples e mais econômica de controle do ponto de operação na curva característica do arranjo fotovoltaico consiste em fixar a tensão de saída do arranjo (CEPEL, 1999).

## **CAPÍTULO 3 – CONTROLADORES DE CARGA**

### **3.1 Introdução**

Controladores de carga são incluídos na maioria dos Sistemas Fotovoltaicos, com os objetivos de facilitar a máxima transferência de energia do arranjo fotovoltaico para a bateria ou banco de baterias e protegê-las contra cargas e descargas excessivas, aumentando, conseqüentemente, a sua vida útil. São componentes críticos em Sistemas Fotovoltaicos Isolados pois, caso venham a falhar, a bateria ou a carga poderão sofrer danos irreversíveis. Eles devem ser projetados considerando-se as especificidades dos diversos tipos de bateria (CEPEL, 1999).

Para algumas aplicações, algumas vezes é necessário transformar uma tensão CC em outra de magnitude diferente, como em situações de alimentação de cargas como baterias ou motores CC. Em sistemas CA, esta operação de baixar ou elevar a tensão é facilmente feita com o uso de um transformador. Em sistemas CC, a situação é bem diferente, e requer o uso de um conversor chaveado.

Para sistemas fotovoltaicos isolados, normalmente a tarefa de controlar a carga é realizada geralmente por conversores estáticos, os quais tem a função de gerenciar o processo de carregamento da bateria e alimentação da carga, garantindo seu carregamento completo de forma adequada. Para as baterias chumbo-ácido os controladores de carga também devem monitorar o processo de descarga para evitar que ultrapassem a profundidade de descarga recomendada pelos fabricantes da bateria (SEGUEL, 2009).

### **3.2 Conversores CC-CC**

O conversor CC-CC é um dos elementos de maior importância num sistema fotovoltaico, pois é o responsável pela transferência de energia entre o painel solar e a carga e entre o painel solar e a bateria. Controlando o nível de tensão aplicado à bateria, proporciona um aumento da vida útil das mesmas e uma melhor eficiência do processo de transferência de energia do painel para a bateria.

Também é necessário utilizar este conversor quando se deseja na carga uma tensão CC de saída de valor diferente daquele fornecido pelas baterias e painéis. Pode-se utilizar este conversor tanto para elevar a tensão (conversores tipo Boost) quanto para abaixar a tensão

(conversores tipo Buck). Também é possível obter com este conversor várias tensões de saída a partir de uma única tensão de entrada. Normalmente os conversores para abaixar a tensão tem uma eficiência maior que os conversores para elevar a tensão. Quanto mais o conversor elevar a tensão de entrada menor será a eficiência de conversão.

Em geral estes conversores utilizam o armazenamento de energia em indutores ou transformadores para obter o valor de tensão desejado na saída. As estruturas estáticas são geralmente feitas de chaves ativas e idealmente sem perdas, que convertem uma tensão contínua em um outra com certa amplitude. A transferência de energia se processa através do chaveamento da tensão de entrada de forma adequada. O dispositivo semiconductor opera a uma frequência alta, quando comparado com variações na tensão de entrada. Controlando o período de chaveamento dos semicondutores empregados com chaves, é possível regular a tensão de saída nos valores desejados.

Estes dispositivos podem ter dois tipos de configuração construtiva: série e paralela (shunt). E possui diversas estratégias de controle, por exemplo, *On/Off*, Tensão Constante e Corrente Constante. Normalmente, as estratégias que se utilizam de tensão ou corrente constante fazem uso de PWM (*Pulse Width Modulation*) para obterem um valor de tensão ou corrente médio fixo (ALMEIDA et.al., 2008).

Segundo RASHID (1993) esta modulação é definida como sendo uma técnica de comutação dos interruptores a frequência de operação constante, sendo que apenas a largura do pulso, ou tempo de condução, varia dentro deste período. Esta comutação é resultado da comparação de um sinal triangular com um sinal de controle.

As configurações série e paralela diferenciam-se, basicamente, pela posição da chave que conecta os módulos às baterias. Na configuração série, a chave é colocada entre os dois subsistemas. Quando fechada, permite que os módulos entreguem corrente aos acumuladores, enquanto que aberta, ela impede esse fluxo de corrente. Já na configuração paralela, a chave é posicionada em paralelo, quando as baterias estão próximas de sua carga total, o arranjo fotovoltaico é curto-circuitado, e, conseqüentemente, isolado do restante do circuito. O curto-circuito pode afetar o sistema de acumulação, caso não haja um diodo de bloqueio para evitar que ele se descarregue. A grande vantagem da configuração série é que não existe a necessidade desse diodo, o que elimina a corrente de fuga reversa e diminui a queda de tensão e o aquecimento do circuito (ALMEIDA et.al., 2008).

### 3.2.1 Conversor CC-CC Buck

O esquema elétrico do conversor Buck pode ser visualizado na Figura 3.1 e seu funcionamento é descrito da seguinte forma: a tensão de entrada ( $V_{in}$ ) é cortada pela chave  $T$ . Considera-se  $V_o$  constante. Assim, a corrente pela carga ( $R$ ) tem ondulação desprezível, possuindo apenas um nível contínuo. Com o transistor conduzindo (diodo cortado), transfere-se energia da fonte para o indutor (cresce  $I_L$ ) e para o capacitor (quando  $I_L > V_o/R$ ). Quando  $T$  desliga, o diodo conduz, dando continuidade à corrente do indutor. A energia armazenada em  $L$  é entregue ao capacitor e à carga. Enquanto o valor instantâneo da corrente pelo indutor for maior do que a corrente da carga, a diferença carrega o capacitor. Quando a corrente for menor, o capacitor se descarrega, suprindo a diferença a fim de manter constante a corrente da carga (já que estamos supondo constante a tensão  $V_o$ ) (POMILIO, 2009).

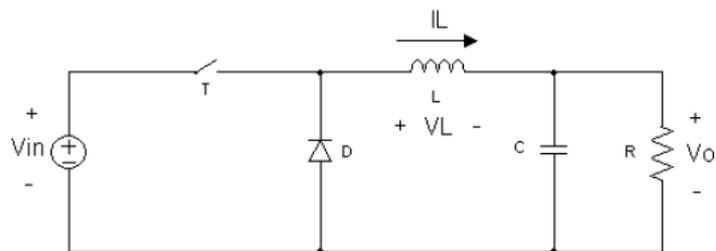


Figura 3.1 – Circuito elétrico equivalente de um conversor step-down (buck).

Fonte: POMILIO, 2009.

A fonte de tensão contínua é representada por  $V_{in}$ ,  $T$  representa a chave, o indutor é representado por  $L$ ,  $D$  um diodo de roda-livre que será considerado ideal (sem queda de tensão quando estiver positivamente polarizado) enquanto a análise gráfica do conversor, um capacitor  $C$  e a carga representado por um resistor  $R$  com tensão  $V_o$ .

Considerando a chave  $T$  uma chave semicondutora ideal, ela está ou no estado bloqueado (aberta) ou em condução (fechada). A tensão média de saída ( $V_o$ ) depende da relação entre o intervalo de tempo em que a chave está fechada ( $t_T$ ), no estado bloqueado, e o período de chaveamento  $\tau$ , tal como se mostra na Figura 3.2. Define-se como razão cíclica, ciclo de trabalho ou largura de pulso à relação entre o intervalo de condução da chave ( $t_T$ ) e o período de chaveamento  $\tau$ .

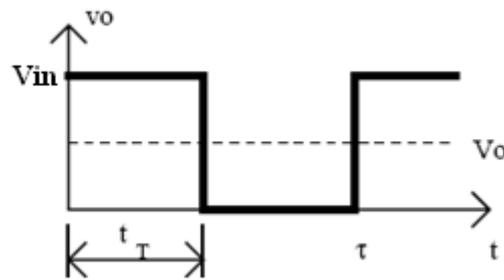


Figura 3.2 – Sinal de acionamento da chave do conversor Buck.

Fonte: POMILIO, 2009.

O circuito do conversor tem duas etapas de funcionamento. Em um primeiro momento a chave T está fechada e o diodo D está inversamente polarizado e pode ser desconsiderado, C está sendo carregado. Na segunda etapa, a chave T está aberta, excluindo assim a fonte  $V_{in}$  do circuito, já o diodo de roda-livre D entra em funcionamento fazendo com que a corrente  $i_L$  (corrente que passa no indutor) exclusiva da energia acumulada no indutor, passe a fluir pela carga e os demais componentes.

Se a corrente pelo indutor não vai a zero durante a condução do diodo, diz-se que o circuito opera no modo de condução contínua. Caso contrário tem-se o modo descontínuo. Em regra, prefere-se operar no modo de condução contínua devido a haver neste caso uma relação bem determinada entre a largura de pulso e a tensão média de saída. A Figura 3.3 mostra a forma de onda típica do modo de condução contínua (POMILIO, 2009).

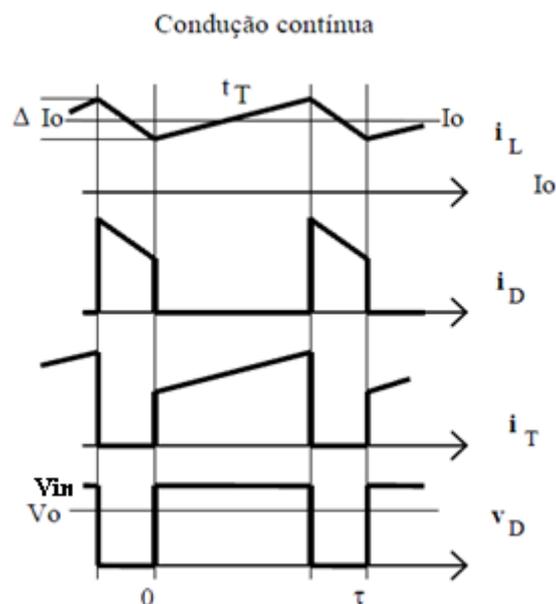


Figura 3.3 – Formas de onda típicas nos modos de condução contínua.

Fonte: POMILIO, 2009.

### 3.3 Modulação por Largura de Pulso (PWM - Pulse Width Modulation)

O sistema é modulado através da Modulação por Largura de Pulsos ou PWM. Esta modulação é definida como sendo uma técnica de comutação dos interruptores a frequência de operação constante, sendo que apenas a largura do pulso, ou tempo de condução, varia dentro deste período. Esta comutação é resultado da comparação de um sinal triangular com um sinal de controle. A seguir são apresentadas algumas das técnicas PWM mais conhecidas (MEDEIROS, 2010).

**Modulação por largura de pulso único:** na modulação por largura de pulso único, existe só um único pulso por cada metade do ciclo. A forma da geração dos sinais de comando dos interruptores aparece na Figura 3.4. Estes sinais são gerados pela comparação de um sinal de referência retangular de amplitude  $A_r$ , com um sinal triangular de amplitude  $A_t$ . A frequência do sinal de referência determina a frequência fundamental do sinal da saída. Variando-se  $A_r$  de zero até  $A_t$ , a largura do pulso pode ser variado de zero até  $T/2$ , onde  $T$  é o período do sinal triangular.

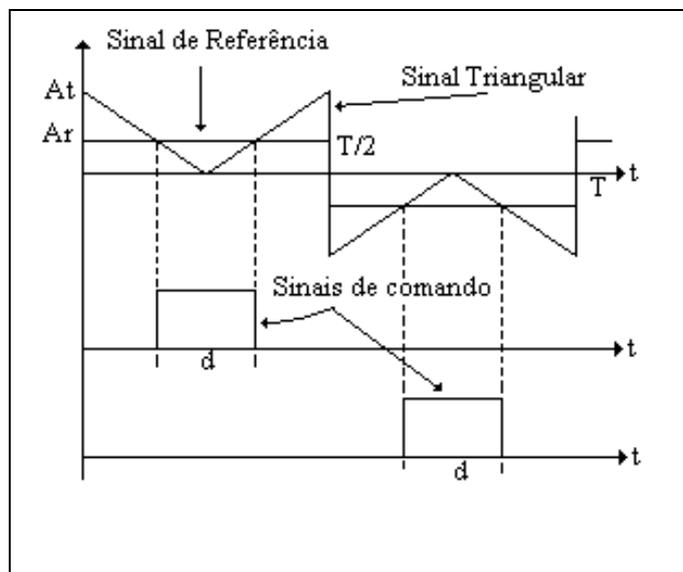


Figura 3.4 – Modulação por largura de pulso único.

Fonte: MEDEIROS, 2010.

**Modulação por largura de pulsos múltiplos:** na modulação por largura de pulsos múltiplos, existem vários pulsos em cada semi período. Esta técnica é uma extensão da técnica anterior. A geração dos sinais de comando (Figura 3.5), é realizada pela comparação de um sinal de referência com um sinal triangular. A frequência do sinal de

referência fixa a frequência de saída, e a frequência do sinal triangular determina o número de pulsos por semi período.

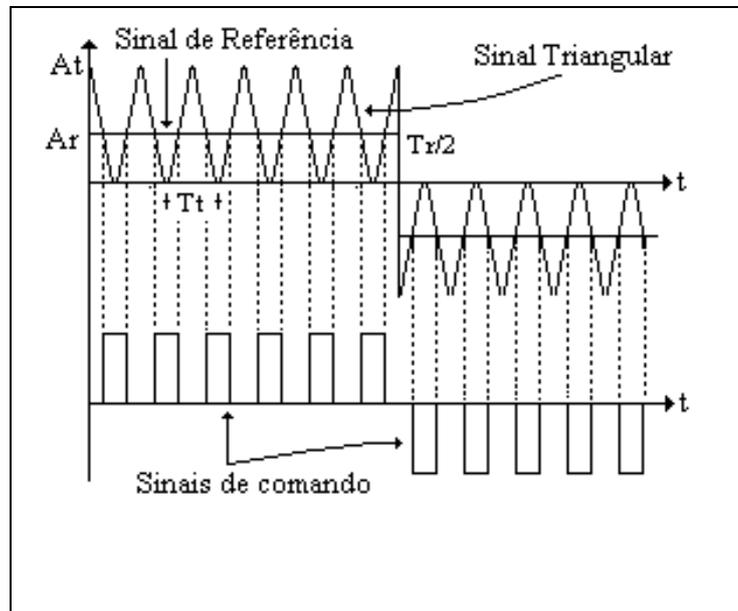


Figura 3.5 – Modulação por largura de pulsos múltiplos.

Fonte: MEDEIROS, 2010.

**Modulação por largura de pulsos senoidal:** ao invés de manter a largura dos pulsos iguais, como nos casos anteriores, a largura de cada pulso é variada em proporção à amplitude de um sinal senoidal (Figura 3.6). Os sinais de comando são gerados pela comparação de um sinal de referência senoidal com um sinal triangular de período  $T_t$ . A frequência da referência ( $1/T_s$ ) determina a frequência de saída. O número de pulsos num semi período depende da frequência da triangular.

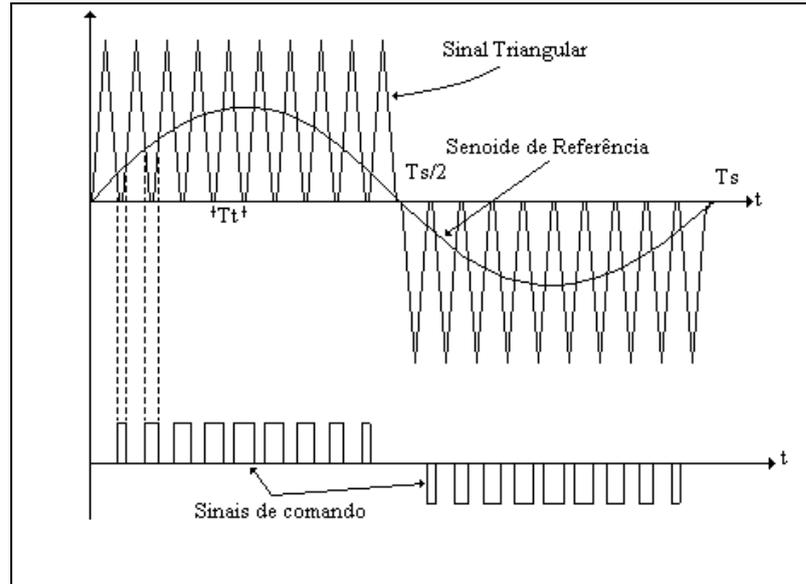


Figura 3.6 – Modulação por largura de pulsos senoidal.

Fonte: MEDEIROS, 2010.

## CAPÍTULO 4 – BATERIAS e CARGA CC

### 4.1 Introdução

A natureza da radiação solar é intrinsecamente variável no tempo já que, por um lado, está submetida ao ciclo diário dos dias e das noites; por outro, o ciclo anual das estações e, por último, a variação aleatória do estado da atmosfera (nuvens, etc.). Como consequência disso, são muitos os momentos em que a potência elétrica que pode ser entregue a um gerador fotovoltaico se difere, por excesso ou por falta, do que demanda uma determinada aplicação. O correto abastecimento energético da aplicação exige, portanto, poder armazenar energia quando a produção fotovoltaica excede a demanda, para utilizá-la na situação contrária (LORENZO, 1994).

As baterias servem para armazenar energia elétrica na forma química. Existem dois tipos básicos de células: as primárias, que compõem as baterias não-recarregáveis e as secundárias, que compõem as baterias recarregáveis.

Para cada tipo de célula existem diversas tecnologias de construção e diversas possibilidades de composição (materiais envolvidos). Atualmente, as baterias de chumbo-ácido e níquel-cádmio são as mais utilizadas em Sistemas Fotovoltaicos. As baterias chumbo-ácido respondem pela quase totalidade dos sistemas já instalados e tem-se dado preferência às *abertas* para sistemas grandes e às *seladas* para sistemas pequenos (CEPEL, 1999).

A função das baterias é suprir a falta de luminosidade, como por exemplo, alimentar as cargas durante a noite. E outra importante função é prover uma intensidade de corrente superior àquela que o dispositivo fotovoltaico pode entregar. É o caso de um motor, que no momento do arranque pode exigir uma corrente de 4 a 6 vezes sua corrente nominal durante uns poucos segundos (ANDRADE, 2007).

### 4.2 Vida útil

A vida útil de uma bateria pode ser expressa de duas formas, número de ciclos ou período de tempo, dependendo do tipo de serviço para o qual a bateria foi especificada. Nas baterias de chumbo-ácido, o “fim de vida” é geralmente tomado como o instante em que a célula, estando totalmente carregada, pode fornecer apenas 80% da sua capacidade nominal.

Esta perda permanente de 20% está relacionada com a ciclagem e com a idade da bateria (CEPEL, 1999).

Procedimentos que contribuem para o aumento da vida útil da bateria são: manutenção do estado de carga em baterias chumbo-ácido (equalização e flutuação), operação em ambientes de temperatura controlada, controle de sobrecargas e sobredescargas etc. A equalização é o processo que busca igualar o estado de carga das células que compõem uma bateria. Para as baterias chumbo-ácido este processo é dimensionado para levar todas as células à carga plena. E a flutuação é o processo que busca manter as baterias ou células com um estado de carga próximo à carga plena, evitando que as mesmas permaneçam por longos períodos com estado parcial de carga (CEPEL, 1999).

As baterias para aplicação fotovoltaica devem ser projetadas para ciclos diários rasos com taxas de descarga reduzidas e devem suportar descargas profundas esporádicas devido a possível ausência de geração, como em dias nublados (CEPEL, 1999).

As principais figuras de avaliação de baterias recarregáveis são: densidade de energia (volumétrica ou por peso), eficiência, capacidade, vida cíclica, taxa de auto-descarga, reciclabilidade dos materiais e custo. Os fatores mais importantes que afetam o desempenho, a capacidade e a vida útil de qualquer bateria recarregável são: profundidade de descarga (por ciclo), temperatura, vida cíclica, controle de carga/descarga e manutenção periódica (especialmente, recarregamento periódico no caso das chumbo-ácido (CEPEL, 1999).

As taxas de carga e descarga não devem ser muito altas, para prolongar a vida útil da bateria (VAIRAMOHAN, 2002).

Os tipos de bateria chumbo-ácido adequadas aos Sistemas Fotovoltaicos, são conhecidos como baterias solares ou baterias fotovoltaicas. Os dois tipos de baterias chumbo-ácido mais comumente utilizadas para esta aplicação, têm sido baterias abertas com liga de baixo-antimônio nas placas positivas e baterias sem manutenção com liga de cálcio nas placas positivas. Mais recentemente, as baterias seladas com eletrólito absorvido começaram a entrar também neste segmento do mercado (CEPEL, 1999).

Na Figura 4.1, estão apresentados os valores de densidade de energia por unidade de volume e ao mesmo tempo por unidade de massa, que cada uma das principais tecnologias de baterias secundárias fornecem comercialmente. Pode-se verificar que a bateria de chumbo-ácido é a que apresenta os menores valores de densidade de energia.

Embora, dentre os modelos disponíveis no mercado, as baterias chumbo-ácido sejam as mais utilizadas atualmente em sistemas fotovoltaicos, as níquel-cádmio são as que apresentam características mais próximas das ideais. As baterias níquel-cádmio não

apresentam, por exemplo, problemas de ciclos profundos ou de sulfatação e, portanto, podem ser deixadas completamente descarregadas. Entretanto, o elevado custo tem limitado o seu uso, em pequenos sistemas (CEPEL, 1999).

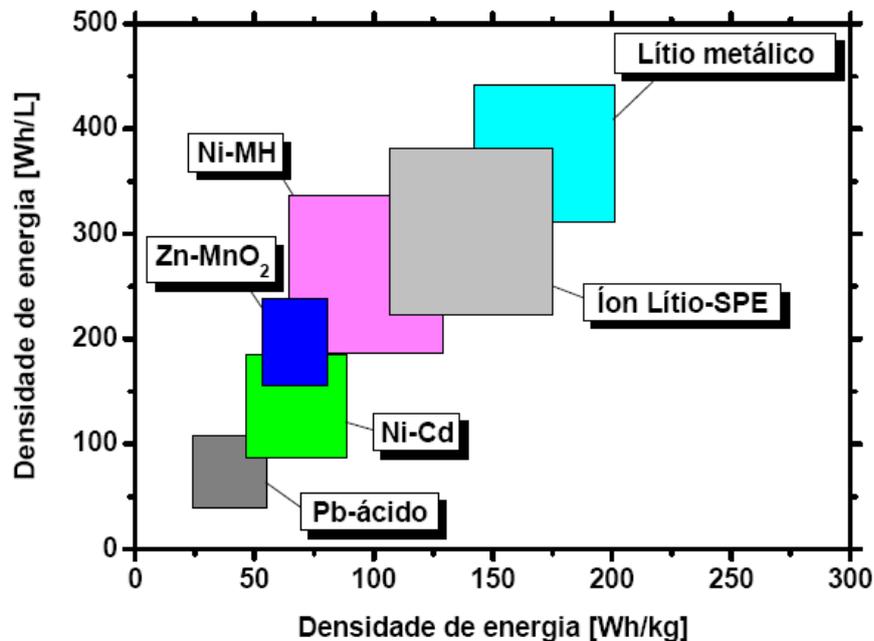


Figura 4.1 - Tipos de Baterias - Valores de densidade de energia por unidade de volume e massa.

### 4.3 Definições relevantes

Uma bateria armazena energia química e a converte em energia elétrica, quando necessário, através de um circuito externo. A bateria consiste em uma ou mais células eletroquímicas que são eletricamente conectadas. Os componentes básicos de uma célula eletrolítica como uma célula de chumbo-ácido é um eletrodo positivo, um eletrodo negativo, um separador poroso, e um eletrólito (VAIRAMOHAN, 2002).

Se denomina *capacidade nominal* de uma bateria,  $C_B$ , a quantidade de corrente (A-h) que é possível extrair dela quando está totalmente carregada, até que a tensão entre seus terminais,  $V_B$ , alcança um certo valor final,  $V_{BF}$ . Há ocasiões em que o valor desta capacidade depende da temperatura, da intensidade da corrente de descarga e do valor de  $V_{BF}$ . Para as categorias mais comuns das aplicações fotovoltaicas,  $V_{BF} = 1,85$  V/elemento a 25°C. Algumas vezes  $C_B$  se define como a quantidade de energia que é possível extrair da bateria e é expressa em Wh (watt-hora) (LORENZO, 1994).

Se chama *estado de carga* de uma bateria, SOC, a relação entre a capacidade de uma bateria, em geral parcialmente carregada, e sua capacidade nominal. Obviamente  $0 < \text{SOC} < 1$ ; SOC=1 indica que a bateria está totalmente carregada e SOC=0 indica que está totalmente descarregada. O valor complementar de SOC, se chama *profundidade de descarga* da bateria,  $\text{PD} = 1 - \text{SOC}$  (LORENZO, 1994).

Se denomina *regime de carga* (ou descarga) a relação entre a capacidade nominal de uma bateria e o valor da corrente a que se realiza uma carga (ou uma descarga). Este parâmetro se expressa, normalmente, em horas e se representa em forma de um subíndice que acompanha o símbolo da corrente. Por exemplo, se uma bateria de 100Ah se descarrega com uma corrente de 5A, diz-se que o regime de descarga é de 20 horas e o valor da corrente é expressa por  $I_{20}$  (LORENZO, 1994).

O *rendimento farádico* de uma bateria em um certo estado de carga, se define como a relação entre a quantidade de corrente (Ah) extraída dela durante um processo de descarga e a quantidade de corrente necessária para restabelecer o estado de carga inicial. Analogamente, o *rendimento energético* de uma bateria em um certo estado de carga, se define como a relação entre a energia (Wh) extraída dela durante um processo de descarga e a energia necessária para restabelecer a carga inicial (LORENZO, 1994).

#### 4.4 Auto-descarga

Num processo espontâneo, todas as baterias descarregam gradualmente, através de processos químicos internos, quando não estão em uso. A este processo dá-se o nome de “auto-descarga”. As baterias de chumbo-ácido têm como característica uma alta taxa de auto-descarga. Quando não estão sendo utilizadas, podem perder de 5 a 30% por mês de sua capacidade, dependendo da temperatura e composição química da célula. Comparativamente, a faixa média de auto-descarga das baterias de níquel-cádmio é de 3 a 6% ao mês (CEPEL, 1999).

Quando a descarga ultrapassa 50% da capacidade da bateria, ela é chamada de “Descarga Profunda”. A profundidade de descarga indica, em termos percentuais, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirada a partir do estado de plena carga. Por exemplo, a remoção de 25Ah de uma bateria de capacidade nominal de 100Ah resulta em uma profundidade de descarga de 25%. É o valor complementar do estado de carga (CEPEL, 1999).

## 4.5 Caracterização das cargas

As cargas atendidas por sistemas fotovoltaicos podem ser em corrente contínua ou corrente alternada. Como o sistema abordado neste trabalho fornece na saída corrente contínua, a carga instalada funciona em corrente contínua.

As cargas em corrente contínua são geralmente resistivas, ou seja, é suficiente conhecer a tensão de operação e o consumo de corrente. Comumente estas cargas são lâmpadas, rádios, equipamentos musicais, motores (VERA, 2004).

Para que o sistema autônomo fotovoltaico seja dimensionado corretamente, deve-se conhecer o perfil de consumo diário da carga, a fim de encontrar o pior caso, tanto para a conversão de energia solar em energia elétrica quanto para dias em que esta carga é muito utilizada.

## CAPÍTULO 5 – MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo serão apresentados os modelos matemáticos utilizados para a simulação dos elementos que compõem o sistema autônomo fotovoltaico.

### 5.1 Modelagem Matemática da Célula Fotovoltaica

Basicamente existe um único modelo tradicionalmente em uso, que atende a maioria das aplicações. Trata-se de modelo de um diodo baseado na equação de diodo de Shockley modificada, acrescentando um fator de qualidade do diodo, para considerar o efeito de recombinação na região do espaço das cargas.

O circuito equivalente simplificado de uma célula solar consiste de uma fonte de corrente a qual é diretamente proporcional à irradiância solar com uma resistência em série e um diodo e uma resistência em paralelo, conforme Figura 5.1. O diodo determina a característica I-V da célula. Introduzindo maior sofisticação, será agregado ao modelo maior precisão e complexidade.

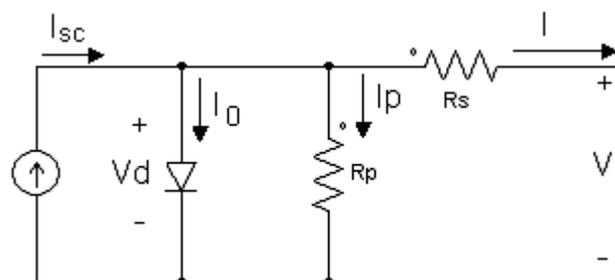


Figura 5.1 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica – modelo de um diodo.

Fonte: a autora.

Neste modelo, a resistência série  $R_s$  representa as perdas joule no material semicondutor e contatos. Seu efeito torna-se muito importante em um painel fotovoltaico, consistindo de inúmeras células conectadas em série. A resistência paralela está associada com uma perda decorrente de pequena dispersão de corrente através de um caminho resistivo em paralelo. Seu efeito é de menor significância no painel fotovoltaico, comparado com a resistência série.

O equacionamento do circuito da Figura 5.1 conduz à expressão para a corrente de saída da célula, conforme Bühler (2006) :

$$I = I_{sc} - I_0 \cdot \left[ e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (5.1)$$

Na qual, “ $I_0$ ” é a corrente de saturação reversa da célula, “ $n$ ” é o fator de idealidade da junção, “ $q$ ” é a carga do elétron, “ $k$ ” é a constante de Boltzman, “ $T$ ” é a temperatura da célula.

A corrente  $I_{sc}$  depende da radiação incidente e da temperatura conforme:

$$I_{sc} |_T = I_{sc} |_{T_r} \left[ 1 + \alpha_T \cdot T - T_r \right] \quad (5.2)$$

onde

$I_{sc}$  e  $|_{T_r}$  = são fornecidos pelo catálogo de fabricante (medido sob irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$ )

$|_{T_r}$  = temperatura de referência da célula em Kelvin (K), usualmente 298 K (25 °C)

$\alpha_T$  = coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$  em variação percentual por grau de temperatura, também fornecido pelo fabricante.

A corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) é proporcional à irradiância, assim,  $I_{sc}$  em uma dada irradiação ( $G$ ) é dada por:

$$I_{sc} |_G = \left( \frac{G}{G_0} \right) \cdot I_{sc} |_{G_0} \quad (5.3)$$

onde:  $G_0$  é o valor nominal da irradiância, normalmente  $1000 \text{ W/m}^2$

A corrente reversa de saturação do diodo ( $I_0$ ) na temperatura de referência ( $T_r$ ) é dada pela equação:

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{0c}}{R_p}}{\left( e^{\frac{qV_{0c}}{n \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} \quad (5.4)$$

A corrente reversa de saturação  $I_0$  é dependente da temperatura e para uma dada temperatura ( $T$ ) é calculada por:

$$I_0|_T = I_0|_{T_r} \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{\frac{-q \cdot E_g}{n \cdot K} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)} \quad (5.5)$$

Na qual “ $T_r$ ” é uma temperatura de referência, “ $I_s$ ” é a corrente de saturação reversa na temperatura “ $T_r$ ”, e “ $E_G$ ” é a energia do *band-gap* do material da célula.

O valor da resistência em paralelo ( $R_p$ ) é calculado por:

$$R_p = \frac{V_{0c}}{I_{sc} - I_{pm}} \quad (5.6)$$

sendo os valores dos variáveis fornecidos pelo catálogo do fabricante.

O valor da resistência série ( $R_s$ ), considerando um painel fotovoltaico, tem um grande impacto na inclinação da curva I-V, próximo da tensão de circuito aberto ( $V_{0c}$ ), sendo daí, calculada pela avaliação da inclinação da curva  $dV/dI$ , da curva I-V em  $V_{0c}$ . A equação para  $R_s$  é derivada pela derivada da equação (5.1) e então rearranjada em termos de  $R_s$ , avaliando a equação resultante em tensão de circuito aberto ( $V=V_{0c}$ ) e também fazendo  $I=0$ ;

$$R_s = -\frac{dV}{dI}\Big|_{V_{0c}} - \frac{n \cdot K \cdot T / q}{I_0 \cdot e^{\frac{qV_{0c}}{n \cdot K \cdot T}}} \quad (5.7)$$

onde:  $\frac{dV}{dI}\Big|_{V_{0c}}$  : é a inclinação da curva em  $V_{0c}$  (tomar valor da curva I-V do catálogo do fabricante e dividi-lo pelo número de células em série).

$V_{0c}$  : é a tensão de circuito aberto da célula (encontrado no catálogo, dividindo  $V_{0c}$  pelo número de células em série).

Finalmente, é possível resolver a equação da curva I-V. Esta equação é complexa porque a solução da corrente é recursiva pela inclusão da resistência série no modelo. Entretanto, pode-se encontrar a solução por simples iterações, usando o Método de Newton Raphson, pela rápida convergência da resposta.

O método de Newton Raphson é descrito por:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (5.8)$$

onde:  $f'(x)$  é a derivada da função,  $f(x) = 0$ ,  $x_n$  é um valor atual, e  $x_{n+1}$  é o próximo valor.

Reescrevendo (5.1), tem-se a seguinte função:

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left[ e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n.k.T}} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} = 0 \quad (5.9)$$

A derivada de (5.10) é dada por:

$$f'(I) = -1 - I_0 \cdot e^{\frac{q(V+I.R_s)}{n.k.T}} \cdot \frac{q.R_s}{n.k.T} - \frac{R_s}{R_p} \quad (5.10)$$

Introduzindo esta equação em (5.4), fornece a seguinte equação recursiva, e a corrente de saída (I) é computada iterativamente.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \left[ e^{\frac{q(V+I_n.R_s)}{n.k.T}} - 1 \right]}{-1 - I_0 \left( \frac{q.R_s}{n.k.T} \right) e^{\frac{q(V+I_n.R_s)}{n.k.T}} - \frac{R_s}{R_p}} \quad (5.11)$$

$V, I$  = tensão e corrente de saída da célula solar

$I_{sc}$  = fotocorrente gerada

$I_0$  = corrente de saturação reversa do diodo, que representa os fenômenos de difusão nas zonas neutras e de recombinação nas zonas de carga;

$R_p$  = resistência paralela associada aos processos de fabricação (correntes de fuga na superfície das bordas da célula, micro-defeitos do cristal que ocasionam curto-circuitos, etc).

$R_s$  = resistência série é a resistência efetiva da célula, composta pelo efeito de resistência elétrica do silício, pela resistência de contato entre o silício e a metalização da célula e pela própria resistência da metalização, etc.

$n$  = fator de idealidade do diodo,  $1 < n < 2$

$V_T$  = tensão a uma dada temperatura

$T$  = temperatura em graus Kelvin (K)

$q$  = carga do elétron ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  C)

$k$  = constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K). Q

## 5.2 Modelagem Matemática do Conversor CC-CC tipo Buck

Para maior amortização dos investimentos financeiros iniciais, é muito importante que se opere o painel fotovoltaico no ponto da máximo de potência que o painel fotovoltaico possa fornecer. Como a potência de um painel muda com a temperatura, intensidade solar e carga (reta de carga), faz-se necessário o uso de uma interface para ajustar a impedância elétrica dinâmica do sistema. Esta interface, comumente, é a associação de um microcontrolador, com a eletrônica de potência, resultando o circuito de um conversor CC-CC.

Para a modelagem do Conversor CC-CC Buck, de acordo com o esquema elétrico da Figura 3.1, tem-se:

Fluxo de corrente na bobina:  $\frac{di_L}{dt}$       Fluxo da tensão no capacitor:  $\frac{dv_C}{dt}$

Tensão de saída:  $v_o(t)$

Tensão de entrada:  $v_{in}(t)$

Sabendo que  $q(t)$  se refere à onda PWM que atua na base do transístor, logo toma os valores “0” ou “1”, e iniciando a análise para a situação em que  $q(t)=1$  obtém-se o esquema elétrico da Figura 5.2, conforme Ferreira (2008).

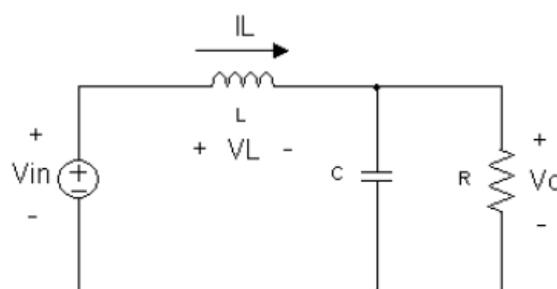


Figura 5.2 – Circuito elétrico equivalente do conversor step-down para  $q(t)=1$ .

Analisando o esquema da Figura 5.2 chega-se às seguintes relações:

$$v_L(t) = V_{in} - v_c(t) \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot V_{in} - v_c(t) \quad (5.12)$$

$$i_c(t) = i_L(t) - \frac{v_c(t)}{R} \Rightarrow \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_L(t) - \frac{v_c(t)}{R} \right) \quad (5.13)$$

$$v_0(t) = v_c(t) \quad (5.14)$$

Realizando a mesma análise para o segundo estado de funcionamento,  $q(t)=0$ , obtém-se o esquema elétrico da Figura 5.3.

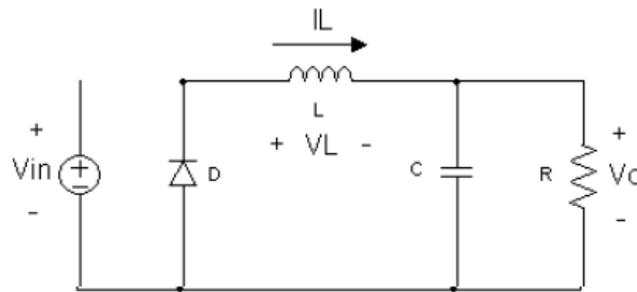


Figura 5.3 – Circuito elétrico equivalente do conversor step-down para  $q(t)=0$ .

Este é descrito pelas equações que se seguem:

$$v_L = -v_c \Rightarrow \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L} \cdot v_c(t) \quad (5.15)$$

$$i_c(t) = i_L(t) - \frac{v_c(t)}{R} \Rightarrow \frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_L(t) - \frac{v_c(t)}{R} \right) \quad (5.16)$$

$$v_0(t) = v_c(t) \quad (5.17)$$

### 5.3 – Modelagem Matemática da Bateria

A bateria considerada é representada pelo modelo apresentado na Figura 5.4.

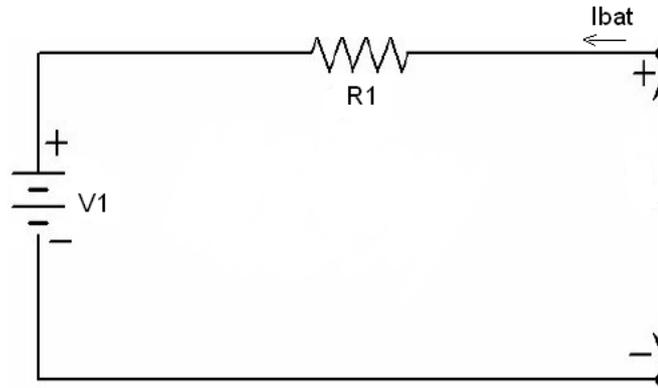


Figura 5.4 – Modelo simplificado de bateria chumbo-ácido.

Fonte: a autora

Os parâmetros de entrada da bateria são:

Estado de Carga Inicial –  $SOC_I$  (%): indicando a carga disponível no início do sistema ( $t=0s$ );

Estado de Carga Máximo –  $SOC_m$  (Wh): máxima capacidade da bateria;

Número de Células de 2V conectadas em série –  $ns$  (adimensional);

Taxa de Carga/Descarga (eficiência) da Bateria –  $k$  (adimensional): depende das características intrínsecas da bateria.;

Taxa de Auto-Descarga da Bateria  $D$ : depende das características empíricas da bateria.

As análises de carga e descarga da bateria são baseadas na Figura 5.4.

Em modo de carga pode ser utilizada a equação(5.18) para representar a tensão  $V_I$  e a equação (5.19) para representar o cálculo de  $R_I$ .

$$V_1 = V_{ch} = (2 + 0,148 \cdot \beta)ns \quad (5.18)$$

$$R_1 = R_{ch} = \left[ 0,758 + \frac{0,1309}{1,06 - \beta} \right] \left( \frac{ns}{SOC_m} \right) \quad (5.19)$$

Onde

$$\beta = \frac{SOC(t)}{SOC_m} \quad (5.20)$$

$SOC_m$  = máximo valor para o estado de carga da bateria (Wh)

$SOC$  = estado de carga da bateria em um dado momento (Wh)

A tensão na bateria é dada pela equação (5.21):

$$V_{bat} = V_{ch} + I_{bat} \cdot R_{ch} \quad (5.21)$$

Quando a bateria estiver no modo de descarga, tem-se para  $V_1$  e  $R_1$ :

$$V_1 = V_{dch} = (1,926 + 0,124 \cdot \beta)ns \quad (5.22)$$

$$R_1 = R_{dch} = \left[ 0,19 + \frac{0,1037}{\beta - 0,14} \right] \left( \frac{ns}{SOC_m} \right) \quad (5.23)$$

A tensão no terminal da bateria, quando em modo de descarga é representada pela equação (5.24):

$$V_{bat} = V_{dch} + I_{bat} \cdot R_{dch} \quad (5.24)$$

O estado da carga na bateria ( $SOC(t)$ , em Wh) num dado instante de tempo, é representado pela equação (5.25):

$$SOC(t) = SOC_n(t) \times SOC_m \quad (5.25)$$

onde  $SOC_n(t)$  representa uma porcentagem da carga total armazenada.

A evolução do  $SOC(t)$  considerando o modelo do Matlab, na forma de uma equação diferencial, é representada por:

$$\frac{SOC(t+dt) - SOC(t)}{dt} = \frac{(k \cdot V_1 \cdot I_{bat})}{3600} - \frac{DSOC(t)}{3600} \quad (5.26)$$

Utilizando a seguinte definição matemática da derivada:

$$\frac{f(t+dt) - f(t)}{dt} = \frac{df(t)}{dt} \quad (5.27)$$

A partir das equações (5.26) e (5.27), obtém-se a equação (5.28), a qual será utilizada para encontrar as expressões para a situação de carregamento e descarregamento da bateria.

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{(k.V_1.I_{bat})}{3600} - \frac{DSOC(t)}{3600} \quad (5.28)$$

Para a situação de carregamento ( $I_{bat} > 0$ ), substituindo as equações (5.18) e (5.20) na equação (5.28), pode-se obter a equação (5.29):

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{(k.I_{bat}).(2+0,148.SOC(t)/SOC_m).ns}{3600} - \frac{D.SOC(t)}{3600} \quad (5.29)$$

Fazendo a distributiva, tem-se:

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{2.k.I_{bat}.ns}{3600} + \frac{0,148.k.I_{bat}.ns.SOC(t)}{3600.SOC_m} - \frac{D.SOC(t)}{3600} \quad (5.30)$$

Aplicando a Transformada de Laplace em ambos os lados da equação:

$$L\left[\frac{dSOC(t)}{dt}\right] = L\left[\frac{2.k.I_{bat}.ns}{3600} + \frac{0,148.k.I_{bat}.ns.SOC(t)}{3600.SOC_m} - \frac{D.SOC(t)}{3600}\right] \quad (5.31)$$

$$s.SOC(s) - SOC(t=0) = \frac{2.k.I_{bat}.ns}{3600} + \frac{0,148.k.I_{bat}.ns.SOC(s)}{3600.SOC_m} - \frac{D.SOC(s)}{3600} \quad (5.32)$$

$$s.SOC(s) - SOC_1.SOC_m = \frac{2.k.I_{bat}.ns}{3600} + \frac{0,148.k.I_{bat}.ns.SOC(s)}{3600.SOC_m} - \frac{D.SOC(s)}{3600} \quad (5.33)$$

Isolando  $SOC(s)$ :

$$SOC(s) = \frac{3600}{s - \frac{0,148.k.I_{bat}.ns}{3600.SOC_m} + \frac{D}{3600}} \quad (5.34)$$

Por fim, aplica-se a Transformada Inversa de Laplace, obtendo:

$$SOC(t) = \left( \frac{2.k.I_{bat}.ns}{3600} + SOC_1.SOC_m \right) e^{\left( \frac{0,148.k.I_{bat}.ns}{3600.SOC_m} - \frac{D}{3600} \right)t} \quad (5.35)$$

Para a situação de descarregamento ( $I_{bat} < 0$ ), substituindo as equações (5.20) e (5.22) em (5.28), obtém-se:

$$\frac{dCOS(t)}{dt} = \frac{(k.I_{bat}).(1,926 + 0,124.SOC(t)/SOC_m).ns}{ns} - \frac{D.SOC(t)}{3600} \quad (5.36)$$

logo,

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = \frac{1,926.k.I_{bat}.ns}{3600} + \frac{0,124.k.I_{bat}.ns.SOC(t)}{3600.SOC_m} - \frac{D.SOC(t)}{3600} \quad (5.37)$$

Aplicando a Transformada de Laplace em ambos os lados da equação, tem-se:

$$L\left[\frac{dSOC(t)}{dt}\right] = L\left[\frac{1,926.k.I_{bat}.ns}{3600} + \frac{0,124.k.I_{bat}.ns.SOC(t)}{3600.SOC_m} - \frac{D.SOC(t)}{3600}\right] \quad (5.38)$$

$$s.SOC(s) - SOC(t=0) = \frac{1,926.k.I_{bat}.ns}{3600} + \frac{0,124.k.I_{bat}.ns.SOC(s)}{3600.SOC_m} - \frac{D.SOC(s)}{3600} \quad (5.39)$$

$$s.SOC(s) - SOC_1.SOC_m = \frac{1,926.k.I_{bat}.ns}{3600} + \frac{0,124.k.I_{bat}.ns.SOC(s)}{3600.SOC_m} - \frac{D.SOC(s)}{3600} \quad (5.40)$$

Isolando  $SOC(s)$ :

$$SOC(s) = \frac{\frac{1,926.k.I_{bat}.ns}{3600} + SOC_1.SOC_m}{s - \frac{0,124.k.I_{bat}.ns}{3600.SOC_m} + \frac{D}{3600}} \quad (5.41)$$

Por fim, aplicando a Transformada Inversa de Laplace:

$$SOC(t) = \left(\frac{1,926.k.I_{bat}.ns}{3600} + SOC_1.SOC_m\right) \cdot e^{\left(\frac{0,124.k.I_{bat}.ns}{3600.SOC_m} - \frac{D}{3600}\right)t} \quad (5.42)$$

As equações (5.35) e (5.42) (referentes a TL inversa) servirão de base para a simulação da carga e descarga da bateria.

## 5.4 Modelagem Matemática da Carga

A carga alimentada por um sistema autônomo de energia fotovoltaica pode ser de vários tipos, tanto DC (televisão, lâmpada) como AC (motor elétrico, bomba, etc).

Para demonstrar o funcionamento do sistema fotovoltaico abordado nesta dissertação, será utilizada uma carga resistiva DC, a qual é modelada pela equação (5.43):

$$I_{DC} = \frac{V_{DC}}{R_L} \quad (5.43)$$

onde  $R_L$  é a carga resistiva e  $I_{DC}$  e  $V_{DC}$  são a corrente e a tensão, respectivamente. E esta carga pode ser determinada pela relação entre tensão nominal e potência nominal da equação (5.44):

$$R_L = \frac{(V_{nom})^2}{P_{nom}} \quad (5.44)$$

## CAPÍTULO 6 – SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a simulação dos elementos do sistema autônomo fotovoltaico foi utilizado o software MATLAB&SIMULINK®, versão 2009 .

O MATLAB® serve para tratar matrizes e números complexos da mesma forma que uma calculadora trata números reais. Além disso, ele possui recursos de programação, agindo como uma linguagem interpretada, semelhante a C ou Pascal, porém voltada para processamento numérico intensivo. Ele contém também programas de projeto de controle e recursos gráficos.

O SIMULINK® é um programa destinado à simulação de sistemas dinâmicos. Ele opera em conjunto com o Matlab, mas ao contrário dele, a sua interface com o usuário é totalmente gráfica, feita a partir da interconexão de blocos.

SIMULINK® é um ambiente para simulação de vários domínios e Design baseado em modelo para sistemas dinâmicos e integrados. Ele fornece um ambiente gráfico interativo e um conjunto personalizável de bibliotecas de blocos que lhe permitem projetar, simular, implementar e testar uma variedade de tempo de vários sistemas, incluindo as comunicações, controles, processamento de sinais, processamento de vídeo e processamento de imagem.

Neste capítulo são apresentadas as simulações individuais dos componentes que integrarão o sistema de geração de energia autônoma e também do sistema completo.

### 6.1 Simulação do modelo do painel fotovoltaico

Foi escolhido um módulo fotovoltaico modelo BP Solar SX150S, a fim de comparar as curvas deste com a curva obtida pela implementação das equações no Matlab. Esse módulo possui 72 células de silício policristalino conectadas em série e tem capacidade para gerar 150Wp de potência. Depois de várias tentativas com vários fatores de idealidade dos diodos, foi escolhido o valor de  $n = 1,62$ , que melhor se ajusta com a curva I-V do fabricante escolhido.

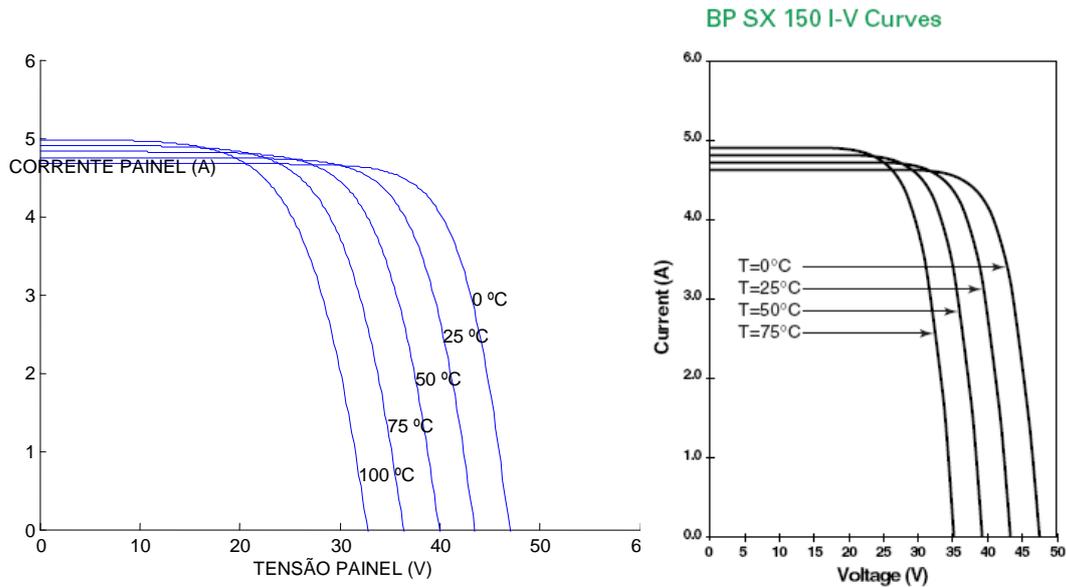


Figura 6.1 – Comparação das Curvas  $I$ - $V$  para um gerador fotovoltaico em vários níveis de temperatura – Valores simulados no Simulink e do fabricante BP.

A Figura 6.1 mostra que a corrente de saída  $I$  de um módulo é pouco influenciada pela variação da temperatura, e a tensão de saída  $V$  varia significativamente com a variação de temperatura.

A característica  $P$ - $V$  de um módulo fotovoltaico pode ser obtida das características  $I$ - $V$ . Um módulo fotovoltaico pode produzir a potência em um ponto, chamado de ponto de operação em algum lugar da curva  $I$ - $V$ . As coordenadas do ponto de operação são a corrente e a tensão. Existe um único ponto perto do joelho da curva  $I$ - $V$ , chamado de ponto de máxima potência (PMP), no qual o painel opera com a máxima eficiência e produz a máxima potência de saída.

A potência em função da tensão é ilustrada na Figura 6.2.

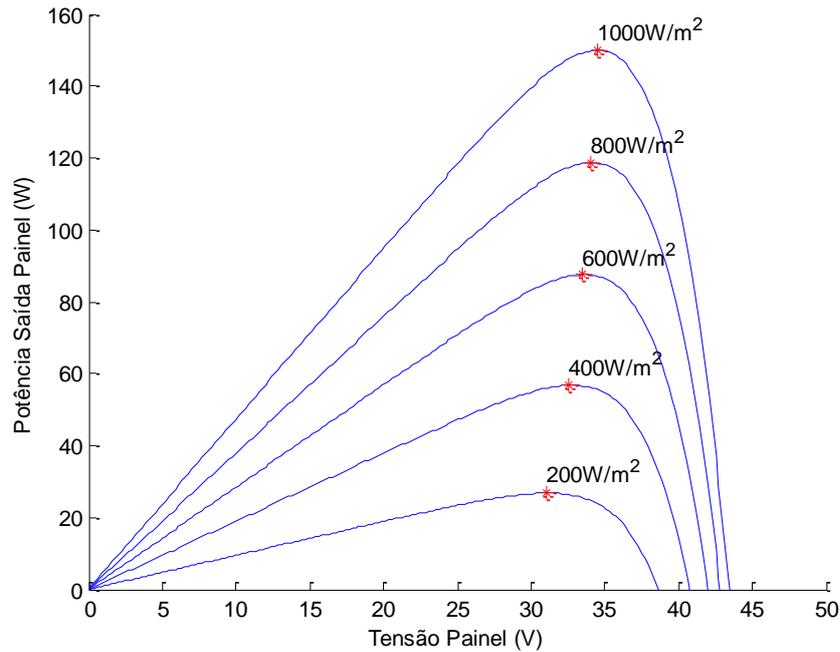


Figura 6.2 – Curvas P-V simuladas do Pannel BP SX 150 S, sob diferentes níveis de radiação (para temperatura de 25 °C).

A Figura 6.2 confirma o comportamento esperado das células que convertem a energia solar em energia elétrica: a potência de saída do módulo é grandemente reduzida para um decréscimo da irradiação. Também mostra um efeito, o qual poderia não ser imediatamente óbvio: a potência de saída é reduzida por um incremento na temperatura do módulo. Isto pode ser explicado pela dependência significativa da temperatura na tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ .

A curva P-I é sobreposta à curva I-V do módulo, como mostrado na Figura 6.3 a qual revela que a quantidade de potência produzida pelo módulo varia significativamente pela sua condição de operação. É importante operar o sistema no ponto de máxima potência a fim de extrair a máxima potência gerada pelo módulo.

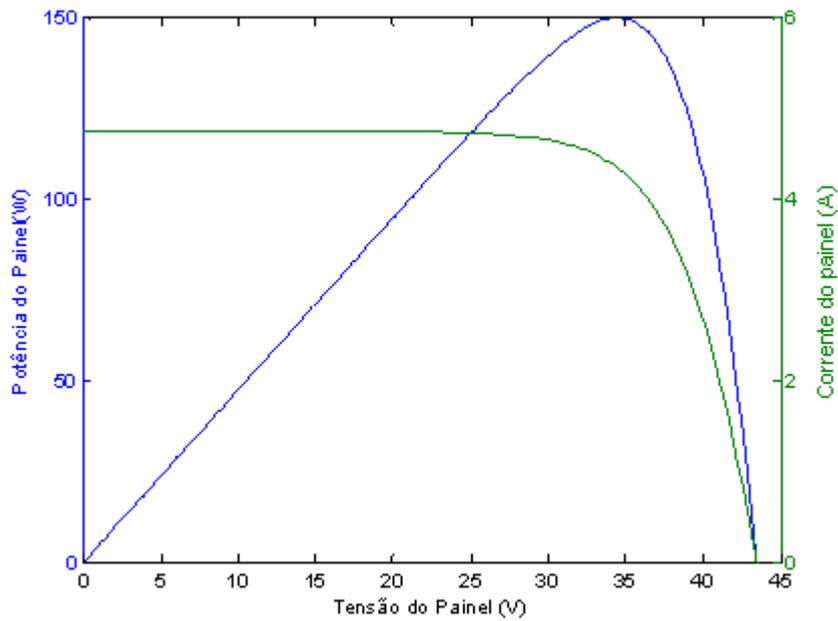


Figura 6.3 - Curvas de I-V e P-V superpostas.

É possível visualizar a localização do ponto de máxima potência ajustando o maior quadrado dentro da curva I-V, e sua área será igual à potência de saída, a qual é dada pelo produto da tensão pela corrente. O ponto de máxima potência indicado na Figura 6.4 é o ponto de operação desejado para o módulo fotovoltaico obter a máxima eficiência. Os valores de tensão e corrente são chamados de  $V_{mpp}$  e  $I_{mpp}$ , respectivamente.

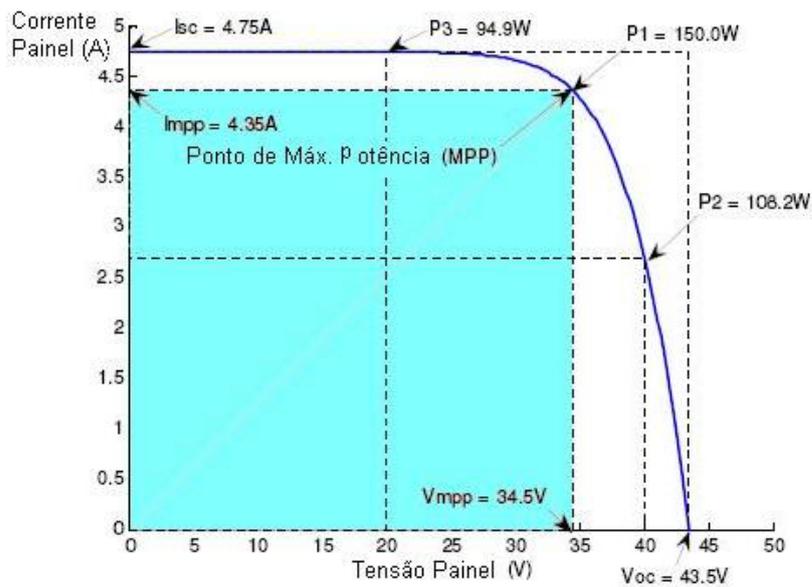


Figura 6.4 – Ponto de Máxima Potência na curva I-V.

## 6.2 Simulação de um conversor Buck – estudo de comportamento do modelo do circuito com grandezas arbitrárias

Quanto ao conversor Buck, foi simulado o circuito elétrico esquematizado na Figura 5.3, sendo a base do transístor controlada em malha aberta, ou seja,  $q(t) = 0$ , com uma onda PWM. Para a simulação foram utilizados os seguintes valores aleatórios:  $V_{in}=36V$ ;  $L=2,2mH$ ;  $C=2200\mu F$ ;  $R=2$ .

As curvas de tensão no capacitor e corrente no indutor do circuito conversor abaixador de tensão são mostradas nas Figuras 6.5 e 6.6, respectivamente. O tempo de simulação foi de 1 segundo.

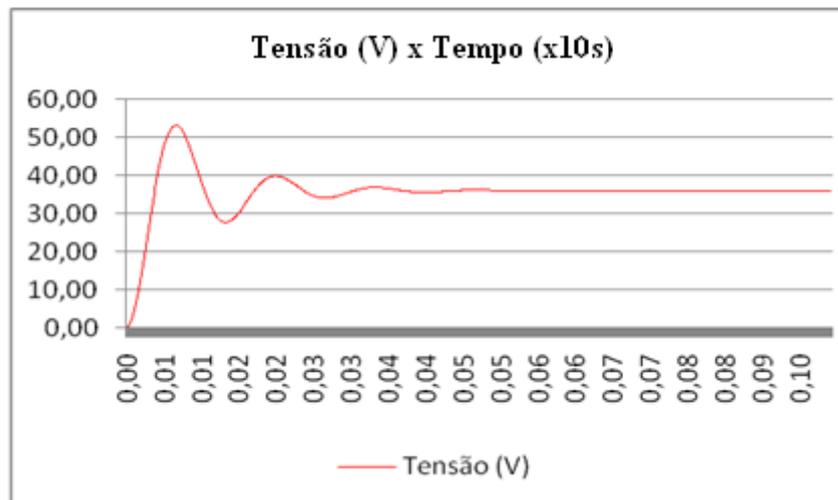


Figura 6.5 – Curva da tensão (V) no capacitor.

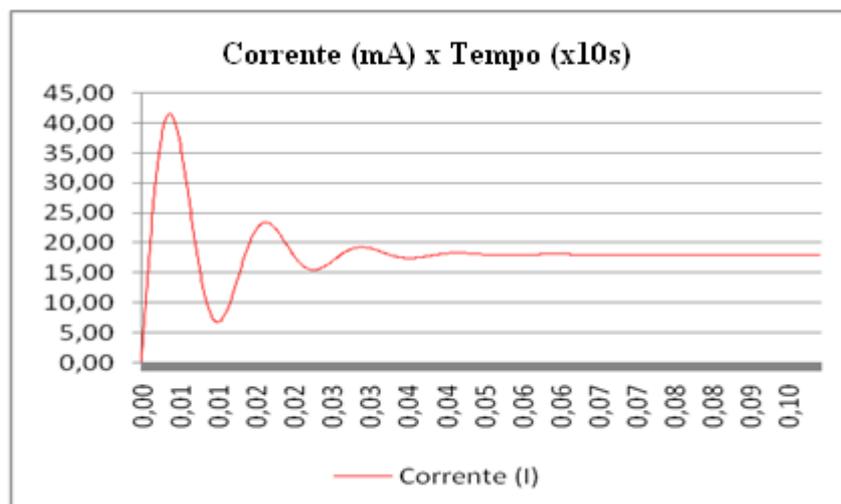


Figura 6.6 – Curva da corrente (I) no indutor.

Conforme Ortiz & Silva (2006) na ocorrência de variações na tensão de entrada ou na carga, que produzem variações na tensão de saída  $V_O$ , o controle, por ser de laço aberto, não poderá agir de maneira rápida de modo a manter a saída no valor desejado, causando um erro no funcionamento do circuito. E para evitar este problema, pode-se simular o conversor abaixador de tensão com controle PI-PWM, no qual é forçada uma mudança no valor da carga do circuito.

### 6.3 Simulação da bateria – estudo de comportamento do modelo do circuito com grandezas arbitrárias

Para o processo de carregamento, a simulação da bateria foi feita com os seguintes parâmetros de entrada (de um fabricante):

$$n_s=12$$

$$SOC_1 = 0,45 \text{ (45\%)}$$

$$SOC_m = 1200\text{Wh}$$

$$K=0,8$$

$$D=0,001$$

$$I_{bat} = 2\text{A}$$

Onde:

$SOC_I$  (%): Estado de Carga Inicial;

$SOC_m$  (Wh): Estado de Carga Máximo;

$N_s$ : Número de Células de 2V conectadas em série (adimensional);

$k$  (adimensional): Taxa de Carga/Descarga (eficiência) da Bateria;

$D$ : Taxa de Auto-Descarga da Bateria;

$SOC_m$ : máximo valor para o estado de carga da bateria (Wh);

$SOC$ : estado de carga da bateria em um dado momento (Wh).

Inserindo estes valores no Matlab, obtém-se o gráfico da Figura 38. Analisando o gráfico, percebe-se que o tempo necessário para que haja o carregamento da bateria é alto, pois para atingir 83,3% do valor máximo, o tempo necessário foi de aproximadamente 444,44 horas, equivalente a 18,52 dias, considerando que a bateria possui um estado de carga inicial de 45%, ou seja, iniciou em 540Wh sendo suprida o tempo inteiro por uma corrente contínua de 2A.

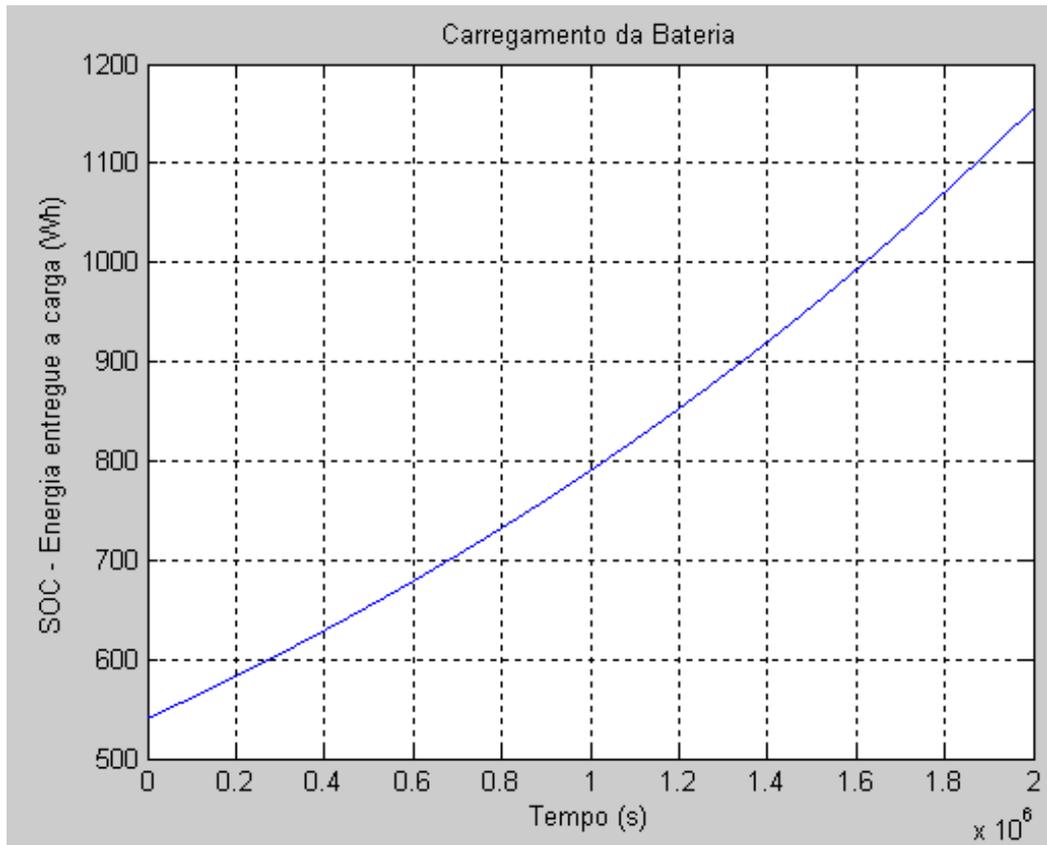


Figura 6.7 - Evolução do SOC do modelo da bateria, no modo de carga.

Segundo Fraga (2009), um método eficiente para diminuir esse tempo de carregamento seria aumentar o valor de CC de Ibat e alterar os parâmetros de entrada do fabricante (k, D e SOCm).

Fazendo a simulação para o SOCn (normalizado), ou seja, a relação entre a corrente de saída e a corrente de entrada, obtém-se o gráfico da Figura 6.8.

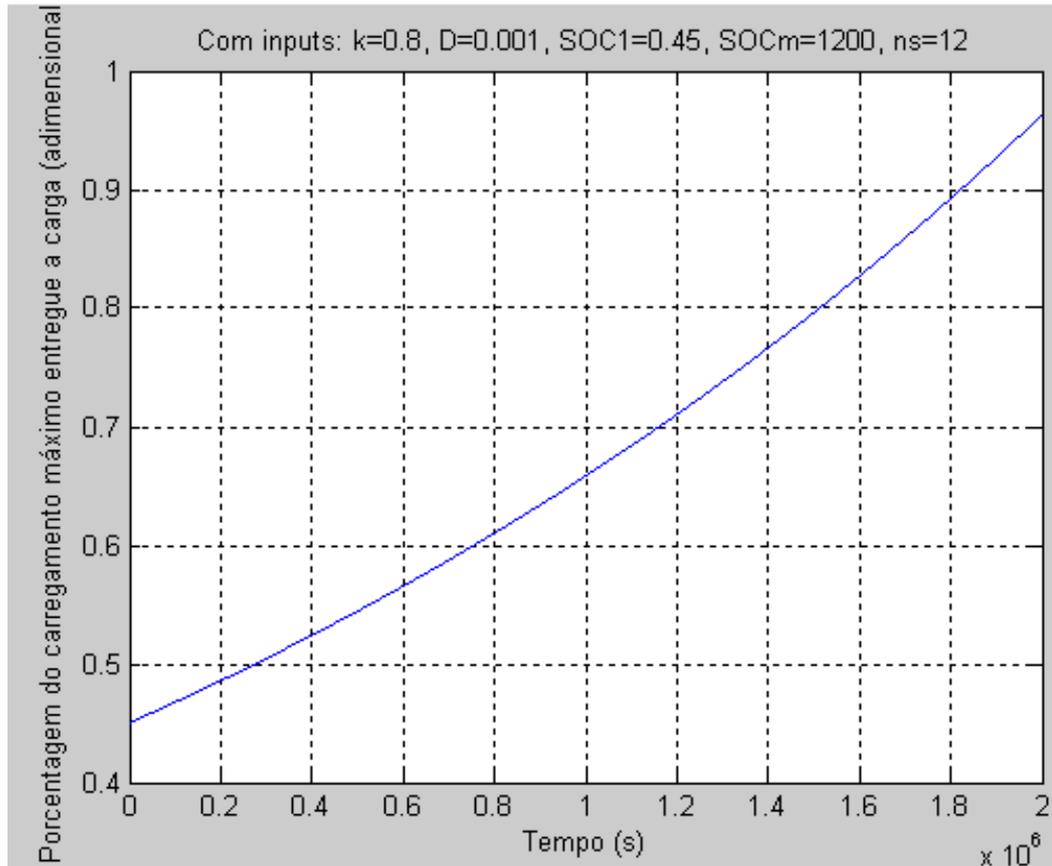


Figura 6.8 – Evolução do SOC normalizado, para  $0 < SOC_n < 1$ .

Pelo gráfico normalizado pode-se visualizar que para um tempo de  $1,8 \times 10^6$  s (muito alto), o carregamento corresponde a 90% do valor máximo (1200Wh).

Para simular o processo de descarregamento utilizou-se os mesmos parâmetros de entrada que foram utilizados para o processo de carregamento, alterando apenas o valor de  $I_{bat}$  para  $I_{bat} = -2A$ .

A Figura 6.9 mostra a evolução do SOC (t) da bateria durante o descarregamento, onde pode-se ver que o tempo para descarregamento também é muito alto.

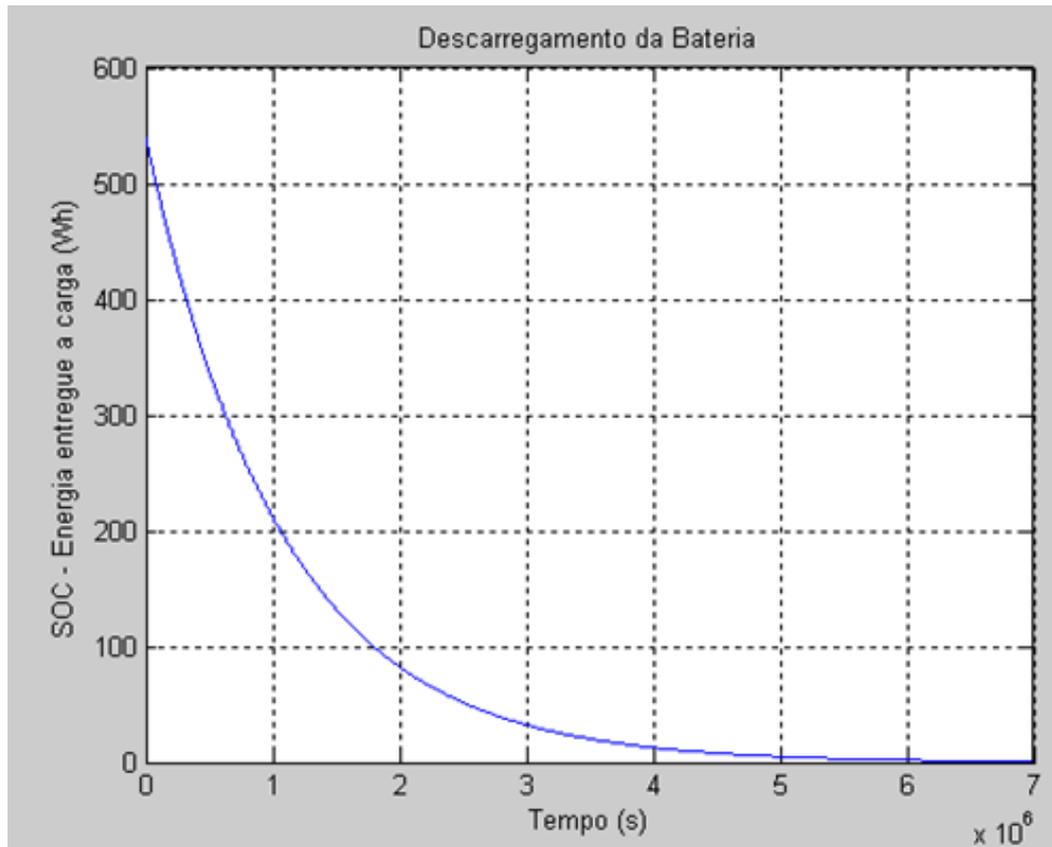


Figura 6.9 – Evolução do SOC do modelo da bateria, no modo de descarga.

Simulando o SOC normalizado ( $SOC_n$ ) para o descarregamento, obtém-se o gráfico da Figura 6.10.

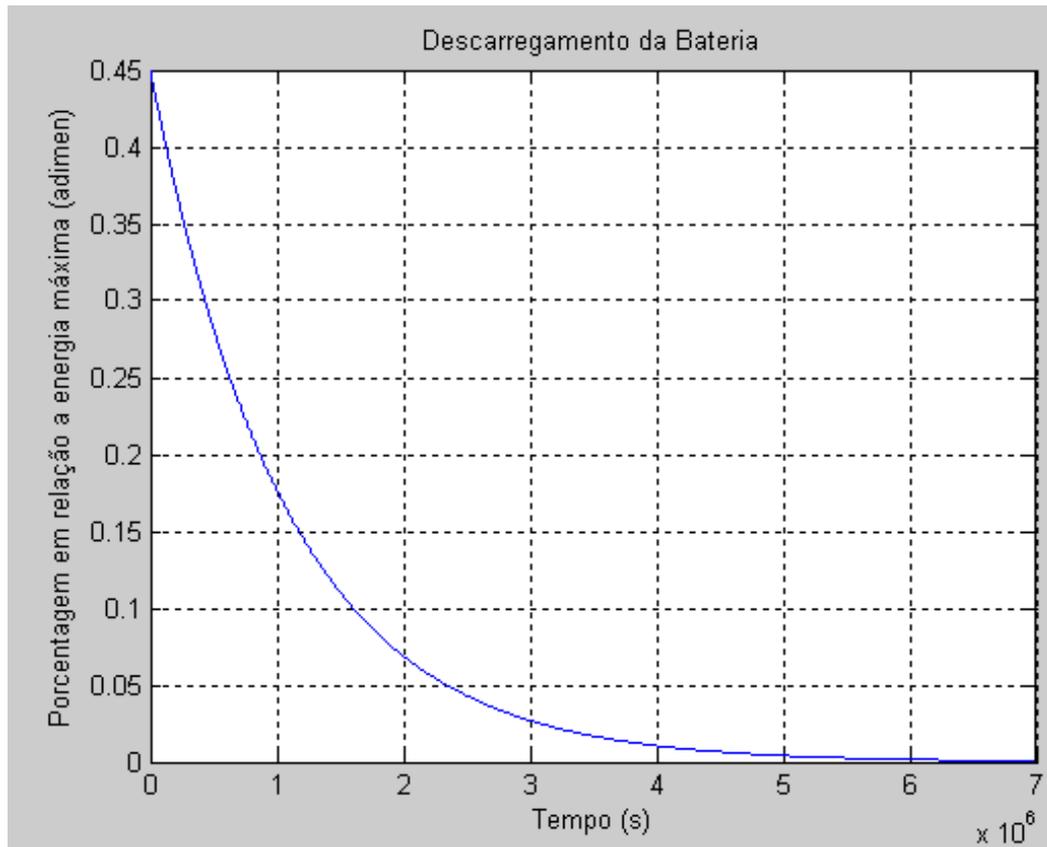


Figura 6.10 – Evolução do SOC normalizado durante o descarregamento da bateria.

Para um tempo de  $1,0 \times 10^6$  s, o descarregamento atingiu 1,67% do valor máximo, mostrando que o tempo para a descarga também é muito alto, mesmo que a bateria tenha começado em 540Wh e tenha sido suprida o tempo inteiro por uma corrente contínua de -2A.

Assim, como no carregamento, um método para diminuir esse tempo de descarregamento seria aumentar o valor em corrente contínua de  $I_{bat}$  e alterar os parâmetros de entrada do fabricante ( $k$ ,  $D$  e  $SOC_m$ ).

Simulando a evolução do SOC para diferentes valores de  $k$  (para uma faixa de 0,4 a 0,8) e mantendo os outros parâmetros constantes, pode-se verificar o resultado das curvas na Figura 6.11.

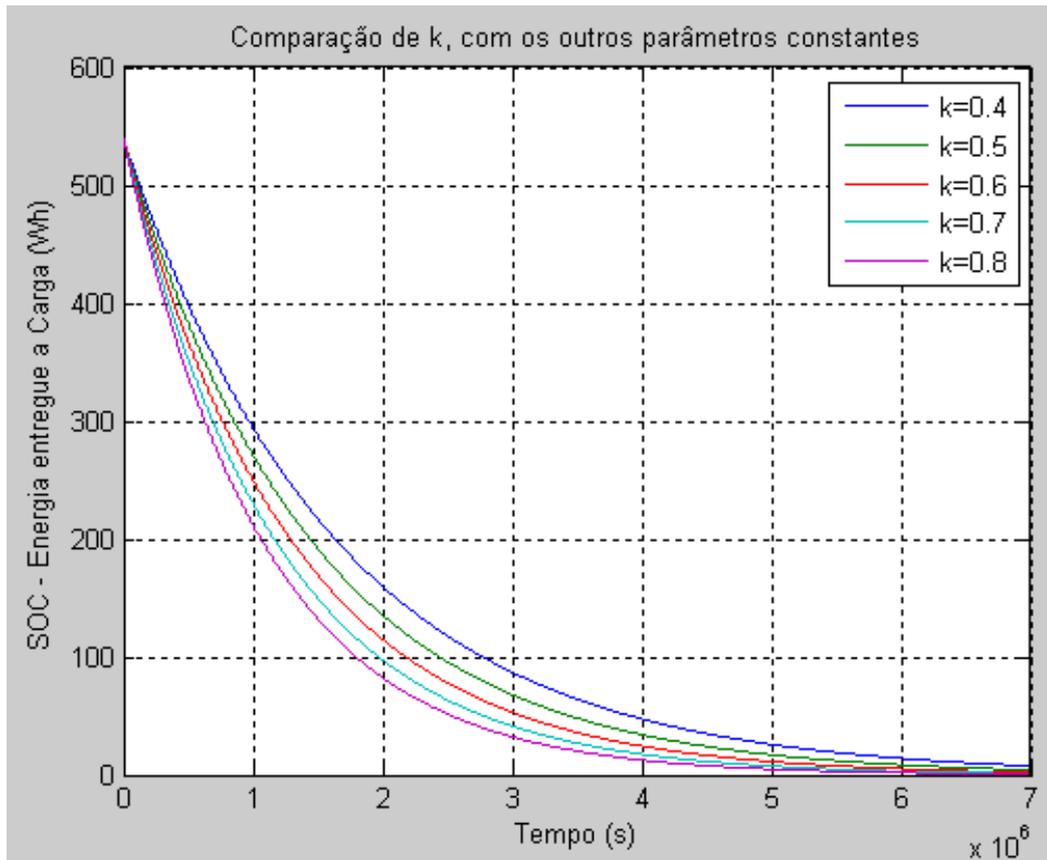


Figura 6.11 – Evolução do SOC para diferentes valores de k.

Analisando o gráfico, pode-se concluir que diminuindo o valor de k, o tempo de descarregamento para uma mesma quantidade de energia diminui ainda mais. Por exemplo, o tempo necessário para atingir 200Wh com  $k=0,8$  foi aproximadamente  $1,0 \times 10^6$ s enquanto que o tempo necessário para atingir 200Wh com  $k=0,4$  foi de, aproximadamente,  $1,6 \times 10^6$ s.

#### 6.4 Simulação do sistema completo/integrado

Existe um grande número de Pacotes Aplicativos Computacionais os quais apresentam capacidade de processamento e modelagem, sendo que alguns deles possuem aplicações específicas. Neste trabalho, o Software MATLAB&SIMULINK® foi escolhido como plataforma computacional. MATLAB&SIMULINK® é um software de análise, o qual é bem apropriado para modelagem, simulação e análise. SIMULINK consiste de um Toolbox do MATLAB, que se apresenta versátil para simulação de sistemas e provê uma interface gráfica para o usuário bastante conveniente, para construção de modelos baseados em suas equações.

O sistema em análise é montado baseado em regras de interconexão as quais requerem uma suportabilidade do software para prover um fácil caminho de construção dos modelos para várias configurações usando diferentes níveis de modelos (simples e complexos) nos subsistemas. Este objetivo é alcançado pelo emprego de aproximações modulares para construção no ambiente SIMULINK, envolvendo os subsistemas e suas partes. Modelos básicos de elementos de circuitos elétricos e subsistemas de baixo nível são designados por módulos, os quais são usados para construir os blocos para criação dos modelos dos subsistemas mais complexos e do sistema completo. Cada bloco tem portas de entradas e de saídas, através das quais intercambiam variáveis de entradas e saídas com outros blocos conectados a eles.

O Programa foi desenvolvido no MATLAB&SIMULINK® 2009b, consistindo de modelos contemplando os elementos componentes: painel fotovoltaico, controlador de carga (tipo Buck), banco de baterias (duas baterias em série) e carga resistiva. Para fins de otimização da potência de saída foi utilizado algoritmo de busca de ponto ótimo de operação (Perturbação&Observação - P&O). Para as saídas gráficas correspondem às tensões e correntes em diversos pontos do circuito.

O sistema autônomo de geração de energia fotovoltaica completo pode ser visualizado na Figura 6.12 e o sistema completo simulado está ilustrado na Figura 6.13 com o painel fotovoltaico representado por uma fonte de tensão, a bateria por uma fonte de tensão e a carga por uma resistência constante.

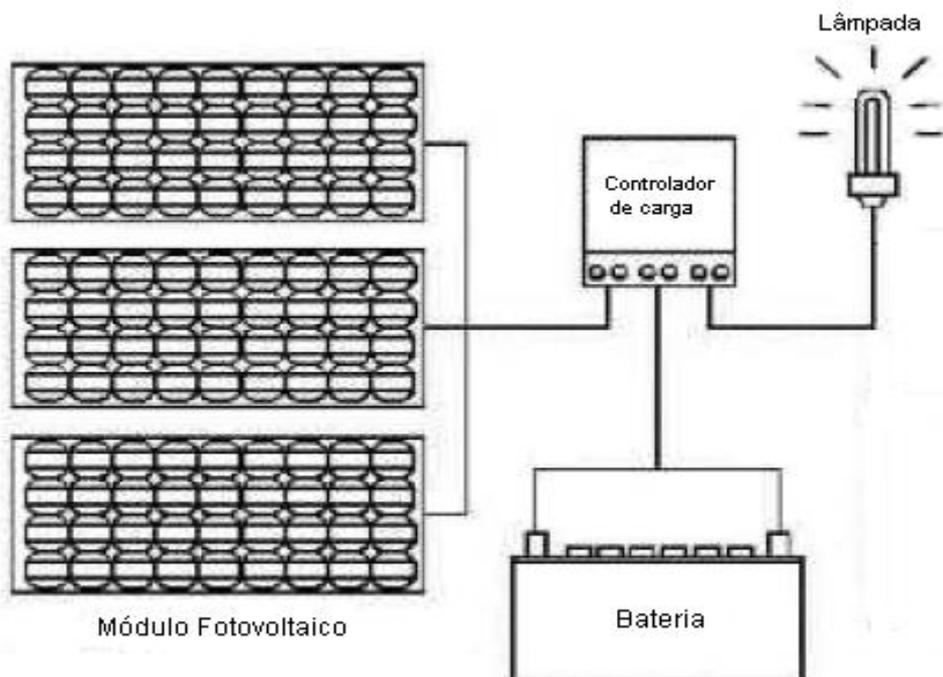


Figura 6.12 - Sistema autônomo de geração de energia elétrica.



O modelo de uma célula fotovoltaica utilizado corresponde às especificações apresentadas na Figura 6.13, caracterizando os parâmetros solicitados pelo SIMULINK.

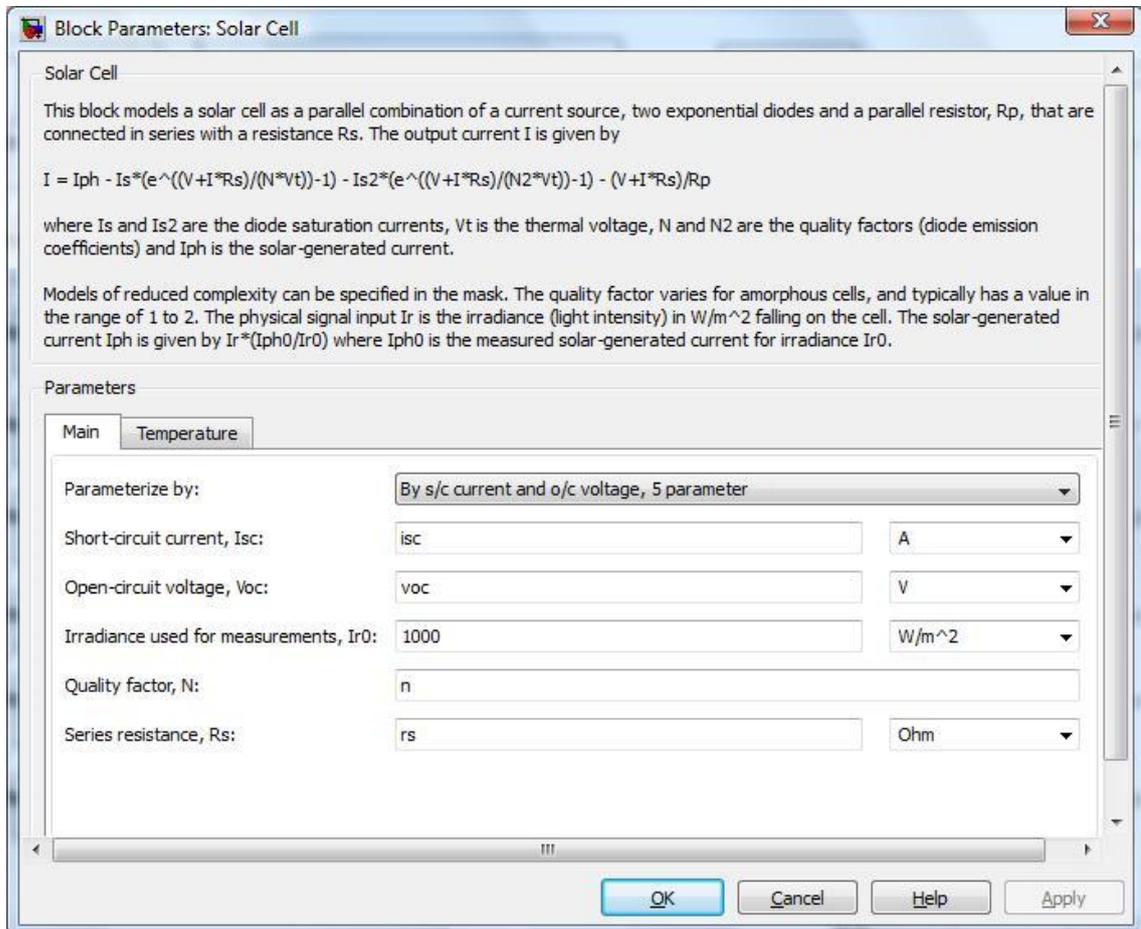


Figura 6.13 – Janela de parâmetros de uma célula fotovoltaica - MATLAB®.

O painel fotovoltaico é formado pela associação em série de 72 células, referente ao painel BP Solar SX 150 S, conforme ilustrado pela Figura 6.14.

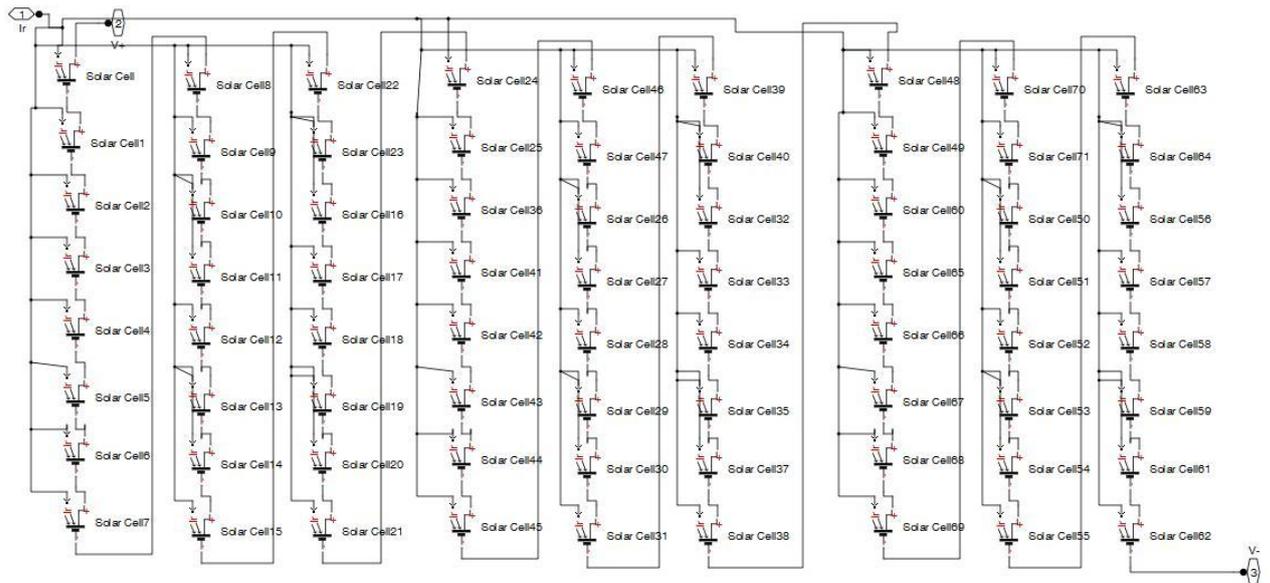


Figura 6.14 – Montagem do Painel fotovoltaico BP Solar SX 150 S – 72 células em série

As características elétricas desse painel encontram-se na tabela da Figura 6.15, obtida de um fabricante de Painel Solar.

CARACTERÍSTICA *	VALOR
Potência Máxima ( $P_{\max}$ )	150 W
Tensão na Pot. Máxima ( $V_{\text{mp}}$ )	34,5 V
Corrente na Potência Máxima ( $I_{\text{mp}}$ )	4,35 A
Potência garantida ( $P_{\text{máx}}$ )	140 W
Corrente de Curto-circuito ( $I_{\text{sc}}$ )	4,75 A
Tensão de Circuito-aberto ( $V_{\text{oc}}$ )	43,5 V
Coefficiente de temperatura de $I_{\text{sc}}$	$(0,065 \pm 0,015)\%/^{\circ}\text{C}$
Coefficiente de temperatura da tensão	$-(160 \pm 20)\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
Coefficiente de temperatura da potência	$-(0,5 \pm 0,05)\%/^{\circ}\text{C}$
Temperatura nominal de operação do Painel	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$

Nota: \* Dados fornecidos pelo fabricante (extraídos do painel fotovoltaico)

Figura 6.15 – Características elétricas do Painel BP Solar SX 150 S para as condições padrão de operação (irradiância de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , temperatura da célula de  $25^{\circ}\text{C}$  e espectro AM 1,5).

Para a simulação, os valores de irradição foram distribuídos em um período de tempo de 1 (uma) hora seguindo o comportamento da curva de Gauss (valores máximos e mínimos caracterizando ambiente com sol e com nuvens), conforme a Figura 6.16.

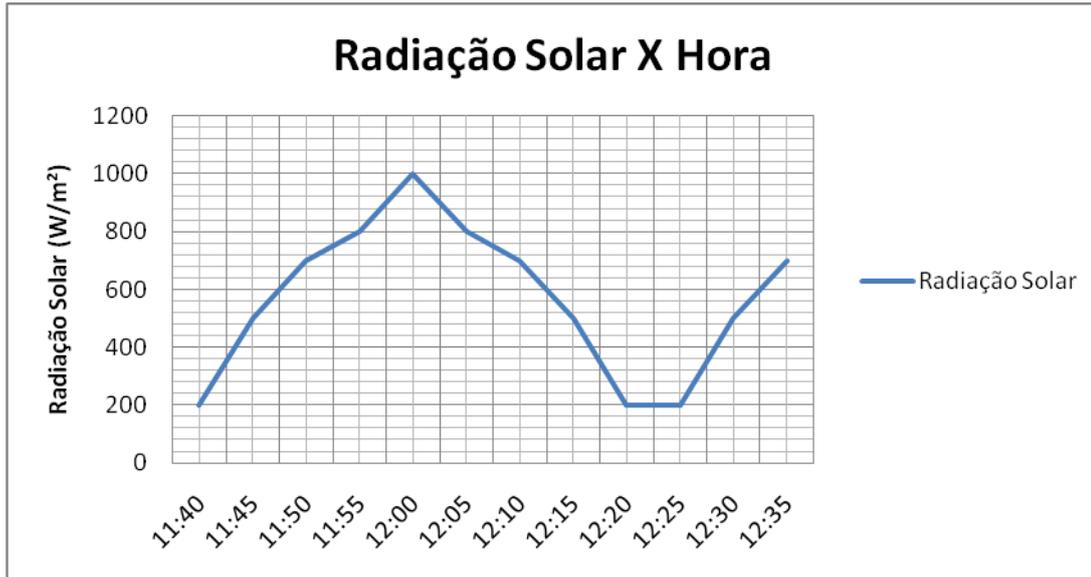


Figura 6.16 – Curva da radiação solar ( $\text{W/m}^2$ ) x hora (h).

Na Figura 6.17 é apresentada a Curva IxV simulada, representativa do painel fotovoltaico, onde pode ser observado os pontos de corrente de curto circuito e tensão a vazio. Os pontos que correspondem à operação de máxima potência equivalem aos valores de 34,5 volts e 4,35 amperes.

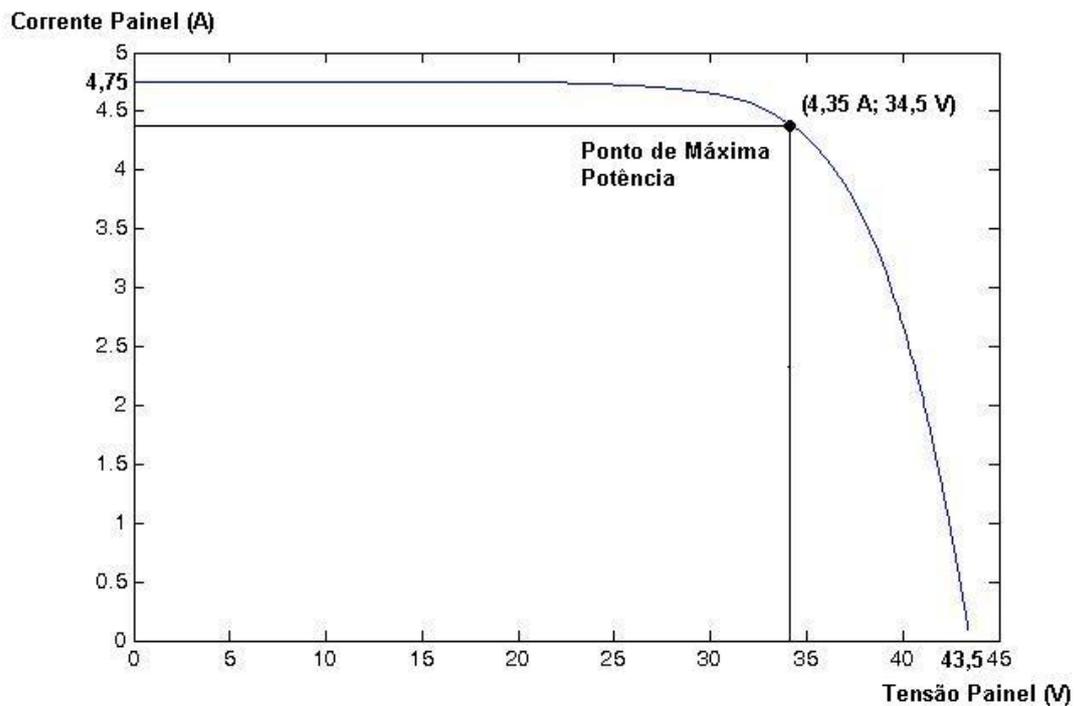


Figura 6.17 - Curva I x V simulado do painel fotovoltaico do sistema.

### 6.4.1 Controlador de Carga – Conversor Buck (abaixador)

Para efeito de simulação, foram consideradas as seguintes especificações:

Tensão DC de entrada (Painel Fotovoltaico):  $E = 43,5 \text{ V}$

Tensão DC de saída:  $V_0 = 24 \text{ volts}$

Potência de Saída:  $P_o = 96 \text{ W}$

Frequência de chaveamento:  $F = 1 \text{ kHz}$

O formato do sinal de acionamento da chave do conversor Buck é determinado pela razão cíclica ( $D$ ) (ciclo de trabalho ou largura de pulso), a qual define o tempo em que a chave permanecerá fechada em um período de comutação, ou seja, à relação entre o intervalo de condução da chave e o período de chaveamento, conforme ilustra a Figura 3.2.

Baseado nesta característica de chaveamento do conversor Buck, origina-se duas etapas de comutação, as quais são descritas como segue:

1ª Etapa ( $0,DTs$ ): Nesta etapa a chave do conversor Buck encontra-se em estado de condução e o diodo estará reversamente polarizado, sendo que a tensão fornecerá energia diretamente para a carga e para a magnetização do indutor.

2ª Etapa ( $DTs,(1-D)Ts$ ): nesta etapa a chave do conversor Buck encontra-se aberta e o diodo estará em estado de condução, ficando o indutor desmagnetizado, fornecendo energia para a carga.

Com relação à corrente que circula pelo indutor do conversor tipo Buck, existem três possíveis modos de operação:

1º ) Condução contínua: neste modo a corrente no indutor não se anula durante um período de comutação;

2º ) Condução descontínua: neste modo a corrente no indutor se anula a cada período de comutação;

3º ) Condução crítica: neste modo a corrente no indutor está no limiar de se anular a cada período de comutação

Os modelos de conversores utilizados pelo Simulink para caracterização dos modelos, denominados “real e médio”, envolvem diferentes modos de chaveamento do conversor Buck, entretanto, os mesmos blocos desenvolvidos no Simulink podem ser usados para construção desses diferentes modelos.

Neste trabalho, o modelo implementado no MATLAB&SIMULINK® foi o modelo médio do conversor Buck, que consiste de um modelo matemático que relaciona a tensão de

entrada com a tensão de saída do conversor Buck, obtido fazendo-se uma média, dos modelos da primeira e segunda etapas de comutação citadas acima, ponderada pela razão cíclica (D).

Para o cálculo do ponto de operação, considera-se que em um conversor DC-DC há uma chave eletrônica formada por um interruptor ativo ( $S_1$ ) e outro passivo (diodo  $D_1$ ). Sendo o conversor tipo Buck um conversor abaixador de tensão, a razão cíclica de trabalho da chave eletrônica  $S_1$  é calculada dividindo-se a tensão de entrada pela tensão de saída:

$$D = \frac{V_0}{V_g} \quad (6.1)$$

A forma de onda da tensão de saída do conversor Buck foi obtida pela simulação do modelo em malha aberta.

O processo ocorre pelo auto-ajuste da tensão, conforme o índice da razão cíclica, cujos resultados de saída da tensão, corrente e razão cíclica está apresentado na Figura 6.18.

A operação no ponto de máxima potência é necessária para drenar a máxima quantidade de potência do painel fotovoltaico. Foi escolhido como método, o algoritmo de Perturbação&Observação (P&O). O método também é conhecido como “*Hill climbing*”. Basicamente a razão cíclica é variada gerando uma perturbação (mudança) no ponto de equilíbrio na curva do painel. Se esta variação gerou aumento de potência, então ela é repetida, caso contrário é feita uma variação no sentido inverso à variação anterior.

Observa-se que a operação se dá para tensão praticamente constante, atendendo ao algoritmo de busca de ponto ótimo de operação na máxima potência, obtido pelo algoritmo de Perturbação & Observação (P&O), que opera fazendo o ajuste da tensão de operação do sistema fotovoltaico e observando se este ajuste aumenta ou diminui a potência de saída do sistema. Se um aumento for observado, o algoritmo continua ajustar a tensão de saída na mesma direção. Se uma diminuição for observada, o algoritmo ajusta a tensão na direção oposta. O efeito geral do algoritmo é que a potência de saída converge sempre para os valores máximos, com alguma oscilação em torno do máximo verdadeiro.

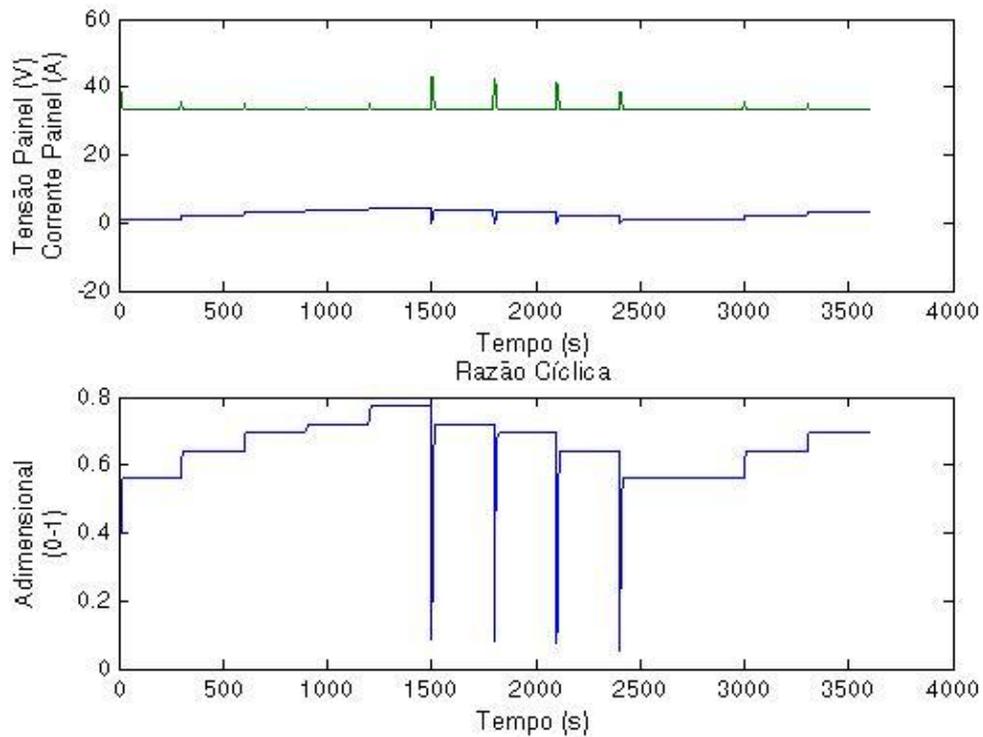


Figura 6.18 - Comportamento da tensão, corrente e razão cíclica em operação.

#### 6.4.2 Bateria

Para especificações dos parâmetros do modelo no SIMULINK, considera-se a seleção “*infinite*” para o parâmetro “*Battery charge capacity*”, sendo os elementos do modelo o resistor série um uma fonte de tensão constante. Se for considerado “*finite*” para este parâmetro, os elementos do modelo serão uma resistência série e uma fonte de tensão dependente, cuja tensão será função da carga, tendo a seguinte relação:

$$V = V_0 \left[ 1 - \left( \frac{\alpha(1-x)}{1-\beta(1-x)} \right) \right] \quad (6.2)$$

onde “*x*” é a razão entre a capacidade atual e a capacidade nominal da bateria em ampéres-hora,  $V_0$  é a tensão quando a bateria é completamente carregada, definida com tensão nominal.

O bloco do modelo calcula as constantes  $\alpha$  (alfa) e  $\beta$  (beta) para satisfazer as seguintes condições da bateria:

- a tensão da bateria é zero quando a carga é zero, o que acontece, quando  $x=0$

- a tensão da bateria é  $V_I$  (a tensão  $V_I < V_{\text{nominal}}$  quando a carga tiver o valor do parâmetro igual a  $AH_1$ ) quando a carga é dada por  $AH_1$  e quando a tensão a vazio for dada pelo valor do parâmetro  $x=AH_1/AH$ .

A equação define a relação recíproca entre a tensão e a carga remanescente. Ela é uma aproximação para o que acontece em uma bateria real, mas ela replica a taxa de queda de tensão em baixos valores de carga. Ela também assegura que a tensão da bateria torna-se zero quando o nível de carga é zero. O modelo simples tem a vantagem de requerer muitos poucos parâmetros, os quais são parâmetros prontamente obtidos de catálogos de fabricantes.

O Banco de Baterias é formado pela associação em série de duas baterias de 12 Volts, sendo apresentado na Figura 6.19 os parâmetros solicitados pelo modelo simulado.

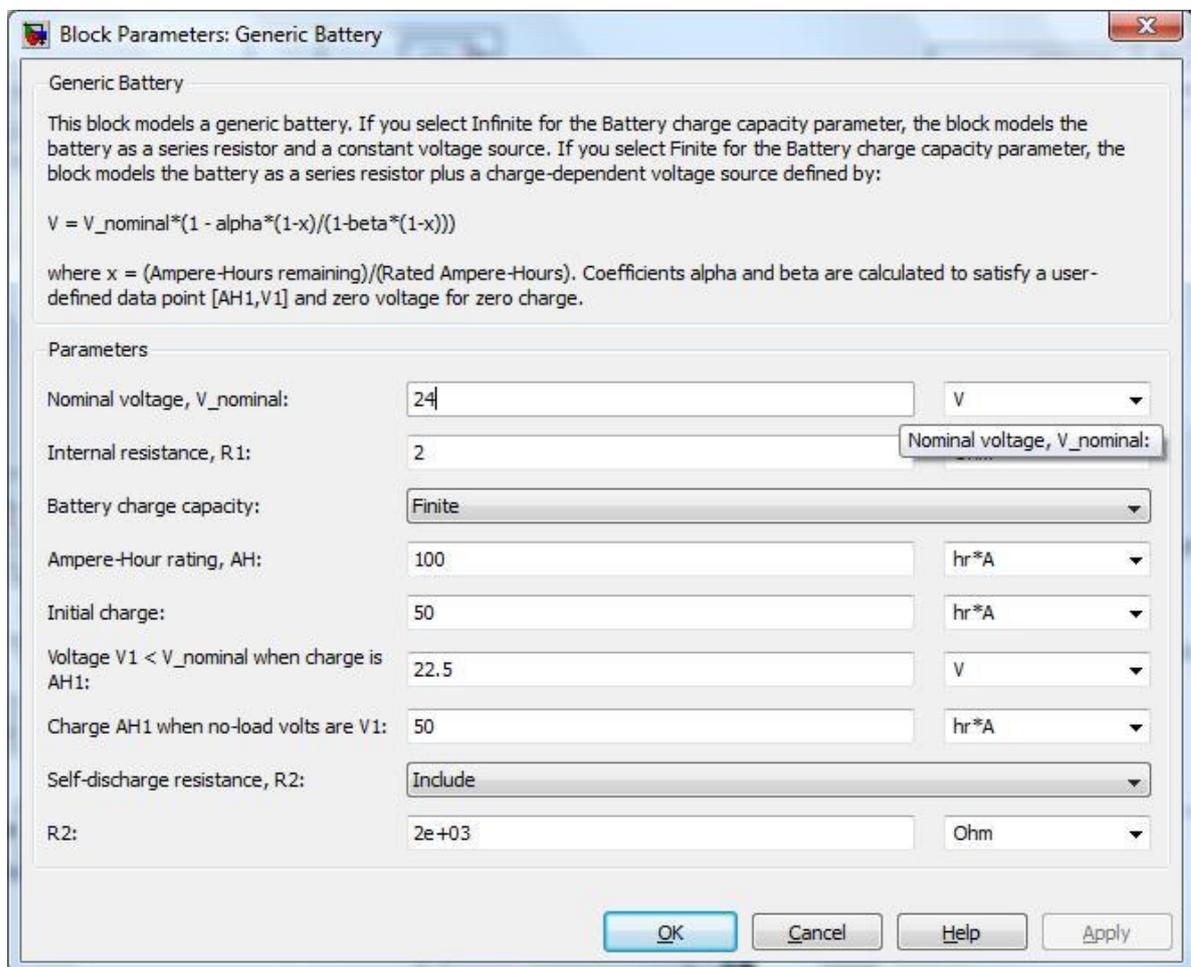


Figura 6.19 – Janela de parâmetros do modelo da Bateria - MATLAB®.

**Nominal Voltage,  $V_{\text{nominal}}$**  – É a tensão da saída quando a bateria está totalmente carregada. O valor default é 12 V.

**Internal Resistance,  $R_1$**  – É a resistência interna. O valor default é 2 ohms.

**Battery charge capacity** – Assume as seguintes opções para modelagem da capacidade de carga da bateria:

**Infinite:** a tensão da bateria é independente da carga drenada da bateria. Esta é a opção default.

**Finite:** a tensão da bateria decresce quando a carga decresce

**Ampere-Hour rating, AH** – É a máxima capacidade da bateria em ampéres-hora. Este parâmetro é somente visível quando é selecionado “*Finite*” para o parâmetro “*Battery charge capacity*”. O valor default é 50 AH.

**Initial charge** – É a carga da bateria no início da simulação. Este parâmetro é somente visível quando é selecionado “*Finite*” para o parâmetro “*Battery charge capacity*”. O valor default é 50 AH

**Voltage V1<V\_nominal when charge is AH1** – É a tensão de saída quando o nível da carga é AH1 ampére-hora. Este parâmetro é somente visível quando é selecionado “*Finite*” para o parâmetro “*Battery charge capacity*”. O valor default é 11,5 volts.

**Charge AH1 when no-load volts are V1** – É o nível de carga da bateria em AH quando a tensão em vazio da bateria é V1. Este parâmetro é somente visível quando é selecionado “*Finite*” para o parâmetro “*Battery charge capacity*”. O valor default é 25 AH.

**Self-discharge resistance, R2** – Seleciona-se uma das seguintes opções para modelagem da resistência de auto-descarga da bateria:

**Omit** – não inclui resistência através dos terminais de saída no modelo

**Include** – inclui resistência R2 através dos terminais de saída do modelo.

**R2** – É a resistência através dos terminais de saída da bateria que representa a auto-descarga da bateria. Este parâmetro é somente visível quando é selecionado “*Include*” para o parâmetro “*Self-discharge resistance, R2*”. O valor default é  $2e^{+03}$  ohms.

A Figura 6.20 apresenta para o primeiro gráfico, os valores de saída da tensão e corrente da bateria, onde podem ser observados os intervalos quando ocorre o processo de carga da bateria, quando a tensão do painel fotovoltaico é maior que a tensão da bateria. De acordo com a curva da radiação solar apresentada na Figura 6.16, o painel foi suficiente para atender a carga e o excesso de energia gerada foi utilizada para carregar a bateria, portanto, no período em que a radiação é maior, a tensão na bateria aumenta e neste mesmo período, a parcela da bateria no atendimento à carga diminui. No segundo gráfico, observa-se o comportamento simulado da potência, indicando que a contribuição da bateria no atendimento à carga é o inverso da contribuição do painel solar, ou seja, no período em que o índice de radiação é baixo (devido a nuvens no céu), a bateria supre o que a carga precisa.

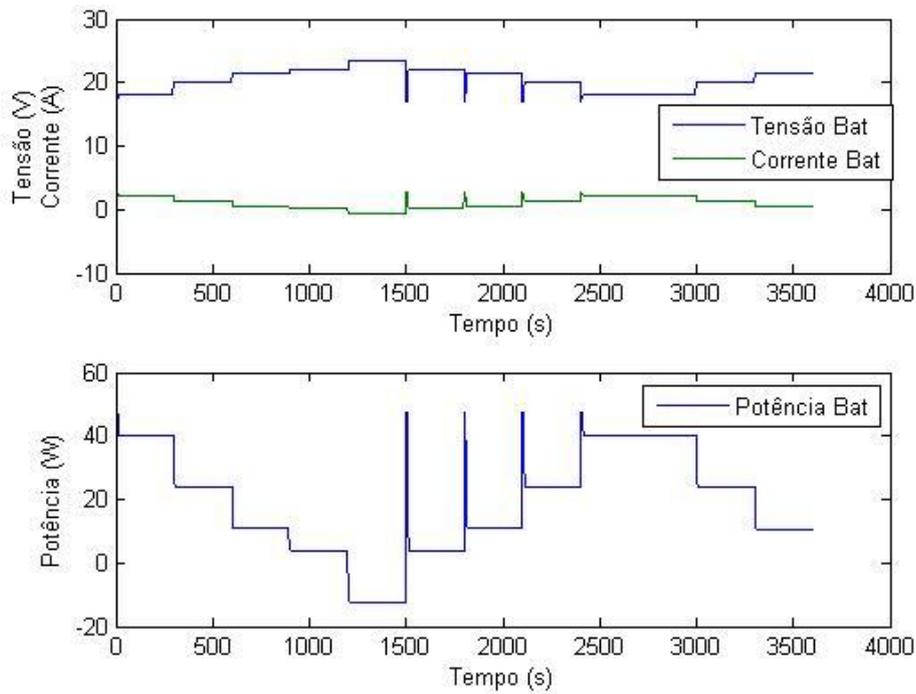


Figura 6.20 - Tensão, corrente e potência na bateria.

#### 6.4.3 Carga do sistema de geração isolada de energia fotovoltaica CC

O cálculo do valor da resistência de carga, para simulação, foi obtido considerando-se o conversor operando no ponto de potência máxima de saída. Foi utilizada a equação (5.43).

A Figura 6.21 apresenta o comportamento da tensão, corrente e potência na carga, sendo alimentada pelo painel solar, sem a contribuição da bateria. Com a bateria, a carga seria alimentada de forma constante, obtendo um funcionamento constante e não variável como neste caso.

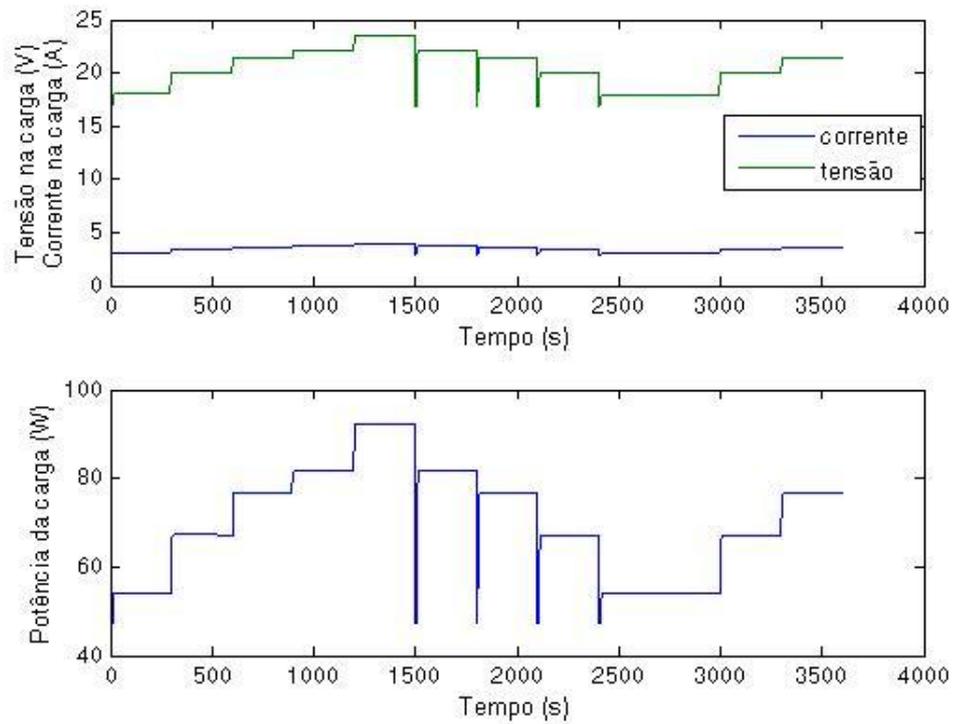


Figura 6.21 - Corrente, tensão e potência na carga (sem bateria).

#### 6.4.4 Potências resultantes em diversos pontos do sistema

Na Figura 6.22 são apresentadas as grandezas resultantes das potências, correspondendo à geração do painel fotovoltaico, potência entre à bateria (valores positivos) e à potência absorvida pela carga. O intervalo de tempo em que a potência da bateria é negativa corresponde ao processo de carga da bateria, pois este intervalo também corresponde à máxima irradiação. Pode-se observar que a potência do painel se comporta de acordo com a irradiação, e no intervalo em que a irradiação corresponde ao valor máximo, é extraído o valor máximo de potência do módulo.

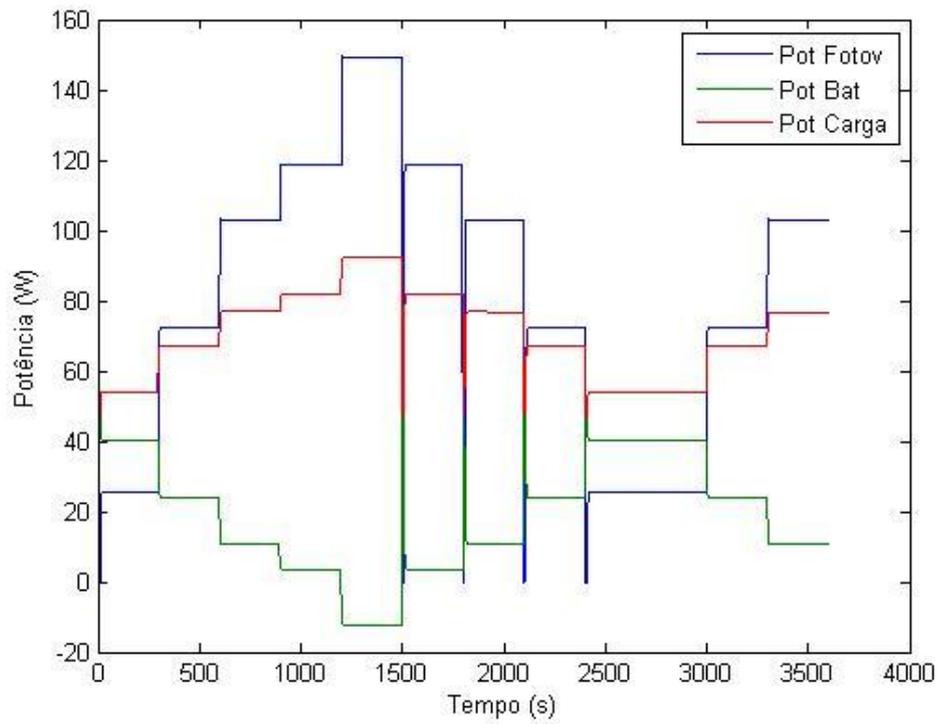


Figura 6.22 – Potência resultantes na saída do painel, na bateria e na carga.

Somando-se, ponto a ponto, as potências na bateria e na carga, obtém-se sempre em torno de 96W de potência, a qual foi estabilizada pelo conversor CC Buck em sua saída.

## CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES/ CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 Considerações Finais

Este trabalho descreveu a modelagem e simulação de um sistema de geração de energia fotovoltaica isolado, utilizando-se o programa MATLAB&SIMULINK versão 9.0b. Através de dados fornecidos por fabricante, pode-se através de modelos, reproduzir o funcionamento de um painel alimentando uma carga CC e banco de baterias, gerenciado por um controlador de carga, operando sempre no ponto de máxima potência. As simulações permitiram analisar os períodos em que as grandezas de irradiação conseguem enviar corrente para a bateria, ou somente alimentar a carga. Para o conversor Buck, observa-se o papel do indutor como limitador das variações de corrente e quanto maior a indutância, para maiores frequências, menores o ripples na corrente de carga. Devido à razão cíclica variar entre 0 e 1, (variando  $t_1$  ou T ou f), conseqüentemente a tensão de saída poderá variar entre 0 e V. De modo geral, pode-se afirmar que o conversor CC-CC abaixador – Buck, transfere energia de uma fonte com maior tensão para uma outra de menor tensão, apresentando característica de fonte de tensão na entrada e fonte de corrente na saída (transformador de corrente contínua onde a razão cíclica é equivalente à relação de transformação em CA). A utilização do modelo médio do conversor Buck foi muito útil para análise, simulação e para obter mais experiência sobre a operação do conversor.

Especificamente, os objetivos almejados neste trabalho foram modelar e simular gerador de energia fotovoltaica, controlador de carga, bateria e carga resistiva, para analisar as condições em que se processa o fornecimento de energia para estes dispositivos, em vários níveis de irradiância e temperatura ambiente, ao longo do funcionamento do sistema; Verifica-se que o processo de modelamento e simulação podem ser de grande ajuda para os projetistas de sistemas de geração de energia fotovoltaica, na análise do funcionamento e operação do sistema, para otimização técnica e redução de seus custos, já que situações das mais diversas podem ser supostas e avaliadas, melhorando todo o desempenho do sistema.

O programa foi desenvolvido no ambiente MATLAB&SIMULINK, pelas seguintes razões: é de fácil manuseio, sendo uma linguagem para resolução de problemas técnicos; possui uma grande biblioteca de funções predefinidas para muitas tarefas técnicas básicas, possui suporte em muitos outros sistemas computacionais, ou seja possui independência de

plataforma e possui diversos comandos para traçado de gráficos, imagens e desenhos integrais.

O trabalho também teve como objetivo reunir informações relativas aos aspectos operacionais e construtivos de painéis fotovoltaicos, controladores de carga, baterias e cargas, no que tange ao seus comportamentos físicos, equacionamento matemático e modelagem matemática. Para isso foi desenvolvido uma metodologia de análise baseada em simulações dos modelos, em função dos parâmetros de fabricantes, que pode ser usada para apoio a projetos de sistemas autônomos, com vistas a otimização da operação desses equipamentos/dispositivos.

De um modo geral, os resultados obtidos são satisfatórios. A boa adequação dos modelos matemáticos foi constatada, mediante a comparação entre os resultados numéricos simulados e os encontrados nos catálogos de fabricantes.

Ao término deste trabalho, tendo conseguido desenvolver um conjunto de informações e análises dos circuitos simulados, faz-se uma avaliação global, podendo-se destacar as seguintes conclusões:

a) sobre a metodologia empregada:

Desenvolveu-se no trabalho uma metodologia de análise que engloba:

- a simulação gráfica da influência dos fatores de irradiação e temperatura no sistema de geração de energia fotovoltaica, através das grandezas de tensão, corrente e potência medidas;
- avaliação de método numérico utilizado para resolução das equações diferenciais dos circuitos, envolvendo a parametrização e condições iniciais impostas, de modo a evitar instabilidade numérica;

b) sobre o aplicativo computacional implementado

- os programas implementados no ambiente MATLAB&SIMULINK®, mostraram-se bastante práticos e versáteis para absorverem modificações e melhorias, no que dizem respeito à entrada e saída de dados, bem como outros cálculos de desempenho;

c) Sobre a contribuição técnico-científica do trabalho;

- O trabalho sob o aspecto informacional, reúne grande número de subsídios para projeto e análise de sistemas autônomos de geração de energia fotovoltaica em corrente contínua.

- Sob o aspecto da ferramenta de análise, a utilização do ambiente MATLAB&SIMULINK permitiu obter-se bons resultados, comprovados pela comparação com dados de fabricantes e avaliação das operações típicas de funcionamento.
- Apesar da literatura sobre os procedimentos de projeto e análise desses sistemas ser vasta, através do estudo dos princípios básicos de operação dos diversos elementos constituintes do sistema, modelagem e simulação, considera-se ter contribuído para um melhor domínio operacional dos mesmos.

d) sobre a continuidade do trabalho

Os aspectos tecnológicos relativos ao tema são vastos, de forma que não são facilmente esgotáveis. Como continuidade do trabalho, aponta-se os seguintes tópicos a serem abordados:

- Simulação de sistemas autônomos de energia fotovoltaica utilizando outras técnicas e softwares de simulação, como por exemplo a técnica de Dinâmica de Sistemas a qual pode ser desenvolvida no software Powersim.
- Realizar comparações entre sistemas utilizando outros tipos de bateria;
- Realizar monitoramento real da radiação solar e geração de energia fotovoltaica, a fim de validar os modelos matemáticos do sistema fotovoltaico de energia elétrica apresentados nesta dissertação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. P.; MACÊDO, W. N.; PINHO, J. T.; PINTO Neto, A. F. C. *Desenvolvimento de um Controlador de Carga do Tipo ON/OFF*. Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas – GEDAE, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES - Florianópolis, 18 a 21 de novembro de 2008.

AMBIENTE BRASIL. *Energia Solar e o Meio Ambiente – O sol é fonte de energia renovável*. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/solar.html> Acesso em: 02/03/10.

ANDRADE, D. M. *Sistema de Gerenciamento de carga da energia solar*. UFOP, 2007.

ANDRADE, A. C. *Análise e Simulação da Distribuição de Temperaturas em Módulos Fotovoltaicos*. Tese de Doutorado, PROMEC-UFRGS, 2008.

ASTM, American Society for Testing and Materials, 1996. E1036M – 96. *Standard Methods of Testing Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells [Metric]*. 1996.

BRASIL ENERGIA. *Sobra Energia. Mais por Quanto Tempo?* Editora Brasil Energia. Edição nº 272/2003 – Rio de Janeiro/RJ, 2003.

BRITO, Miguel Centeno; VALLÊRA, António M. *Meio Século de História Fotovoltaica*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Artigo-Gazeta de Física. Vol.29, 10-15. 2006.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. Rio de Janeiro., CRESESB, 1999.

CHEVARRIA, G. C.; COELHO, R. R. *Controle PI: da Teoria à Implementação Digital*. In. CRICTE 2006 – XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia; VI Feira de Protótipos – UNIJUI, 2006.

COMCET – Conselho Municipal de Ciência e Tecnologia. *Primeiros módulos fotovoltaicos com células inéditas são apresentados na PUCRS*. Fonte: Assessoria de Comunicação da PUCRS, 22/12/2009. Disponível em: <[http://www2.portoalegre.rs.gov.br/comcet/default.php?reg=369&p\\_secao=10](http://www2.portoalegre.rs.gov.br/comcet/default.php?reg=369&p_secao=10)> Acesso em: 22/06/10

COUTO, Maurício Barcelos. *Ensaio de Equipamentos de Consumo Típicos utilizados em Sistemas Fotovoltaicos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2000.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. *Tutorial de Energia Solar – Princípios e Aplicações*. Disponível em: <[www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)> Acesso em: 30/03/09.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. *Tutorial de Energia Solar*. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial\\_solar.htm](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_solar.htm)> Acesso em: 22/06/10.

FERREIRA, R. J. A. *Carro a Energia Solar*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. FEUP, 2008.

FIorentino, Jair de Jesus. *Análise do Desempenho de um Conjunto de Módulos Fotovoltaicos Aplicados para Energização Rural*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Campus de Botucatu/SP. 2004.

FRAGA, José Renato C. P. *Análise do Comportamento da Bateria utilizada em Sistemas Fotovoltaicos de pequeno porte*. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP - Campus de Botucatu. Botucatu-SP, 2009.

GASPARIN, F. P. *Desenvolvimento de um Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GTA. Grupo de Teleinformática e Automação. UFRJ. Disponível em: <[http://www.gta.ufrj.br/grad/06\\_2/fabio/definicao.htm](http://www.gta.ufrj.br/grad/06_2/fabio/definicao.htm)> Acesso em: 21/06/11.

HECKTHEUER, Lúcio Almeida. *Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos*. Tese de Doutorado. PROMEC/UFRGS, Porto Alegre. 2001.

IST – Instituto Superior Técnico. *Energia Fotovoltaica – Manual sobre tecnologias, projeto e instalação*. Departamento de Engenharia Mecânica. Portugal, Janeiro de 2004.

LORENZO, E. *Electricidad Solar - Ingeniería de Los Sistemas Fotovoltaicos*. Instituto de Energía Solar, Universidad politécnica de Madrid. Primera edición, Espanha, 1994.

MEDEIROS, Julio César de O. *Princípios de Telecomunicações – Teoria e Prática*. Ed. Érica, 2010.

MELO FILHO, J. B. *Visão do Mercado de Módulos Fotovoltaicos*. DINA – Desenvolvimento Industrial – Núcleo de Estudos Avançados. Disponível em: <<http://dina.poli.br/index.php/publicacoes/56-modulos>> Acesso em: 22/06/10

MME – Ministério de Minas e Energia. *Estudo e propostas de utilização de geração fotovoltaica conectada à rede, em particular em edificações urbanas*. Relatório do Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos – GT-GDSF, 2009.

OLIVEIRA, Maurício Madeira. *Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. UFRGS, Porto Alegre, 2008.

ORTIZ, Jorge L.R.; SILVA, Lídia C. A.. *Modelagem e Simulação de um Sistemas de Geração Distribuída*. Projeto de Iniciação Científica, CNPQ, PIBIC. UFMS, 2005.

POMÍLIO, J.A. *Topologias básicas de conversores CC-CC não-isolados - Fontes Chaveadas*. Unicamp-SP, 2009.

RASHID, M. H. *Eletrônica de Potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. São Paulo: Makron, 1993.

ROSEMBACK, Ricardo Henrique. *Conversor CC-CC Bidirecional Buc-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. UFJF. Juiz de Fora – MG, Novembro de 2004.

SEGUEL, J. I. L. *Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital*. Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte, 2009.

SHALIMOVA, K.V., 1975. *Física de los Semicondutores*. Editora Mir, Moscou, URSS.

SHAYANI, R. A. *Medição do Rendimento Global de um Sistema Fotovoltaico Isolado utilizando módulos de 32 células*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia da UnB, Brasília, DF, 2006.

SILVA, F. D. L. *Análise de uma Simulação Computacional de um Ambiente Climatizado Alimentado pela Rede Elétrica Convencional e por Painéis Solares Fotovoltaicos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SOUZA, K. C. G. *Avaliação dos Impactos da Geração de Energia Elétrica através da Utilização de Biodigestores: Uma Abordagem via Dinâmica de Sistemas*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2010.

VAIRAMOHAN, Baskar. *State of Charge Estimation for Batteries*. A Thesis Presented for the Master of Science Degree The University of Tennessee, Knoxville. December, 2002.

VERA, L. H. *Programa Computacional para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos*. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

VERA, L. H. *Análise do Impacto do Comportamento de Baterias em Sistemas Fotovoltaicos Autônomos*. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2009.