

Autonomous System with Photovoltaic Conversion, Battery Storage and Supply on Single Phase Alternated Voltage

Nuno Mota¹, VitalVilarinho¹, Nuno Claudio¹, F. Sales. Rodrigues^{1,2}, E. Margato^{1,2,3}

¹ Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 – 1950 – 062 Lisboa, Portugal
Tel: +351 218 317 010, Fax: +351 218 317 009

² Centro de Electrotecnia e Electrónica Industrial, Centro de Instrumentação e Controlo – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa,

R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 – 1950 – 062 Lisboa, Portugal

³ Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais – 1049-001 Lisboa, Portugal
Tel: +351-21-8417215, Fax: +351-21-8417167

E-mail: nmota@deea.isel.ipl.pt, vvilarinho@deea.isel.ipl.pt, nclaudio@deea.isel.ipl.pt,
ferodrigues@deea.isel.ipl.pt, efmargato@deea.isel.ipl.pt,

Abstract The photovoltaic conversion of solar energy is a way to produce electrical energy from a renewable resource with economic profits, when used in remote and isolated areas. This paper describes the design and assembling of an electrical energy production prototype, using photovoltaic conversion, suitable to feed rural stand-alone home plants. The prototype has battery energy storage and provides power supply on single-phase alternated voltage.

Keywords Renewable energy, Photovoltaic, Batteries Charging, Power Electronic Converters.

1. Introdução

São indiscutíveis os benefícios ecológicos da produção de energia eléctrica a partir da energia solar através da utilização de células fotovoltaicas. Contudo, este tipo de conversão energética não é, do ponto de vista económico e com a tecnologia hoje disponível, uma alternativa à utilização de outras fontes energéticas, especialmente para produção de energia eléctrica em grande escala.

A produção de energia eléctrica a partir da conversão fotovoltaica possui hoje espaço de oportunidade nas pequenas potências, particularmente, em instalações localizadas em locais remotos ou distantes da rede de distribuição de energia eléctrica.

Este artigo descreve o projecto e a construção de um protótipo de uma instalação autónoma de produção de energia eléctrica de pequena potência, com conversão fotovoltaica, dimensionada para cobrir necessidades básicas de consumo doméstico do tipo rural.

A instalação possui armazenamento e processamento de energia eléctrica de forma a garantir continuidade de serviço e fornecimento em modo monofásico (230V, 50Hz). Na figura 1 apresenta-se o esquema geral da instalação, ilustrando os módulos de conversão fotovoltaica, de regulação e de processamento de energia.

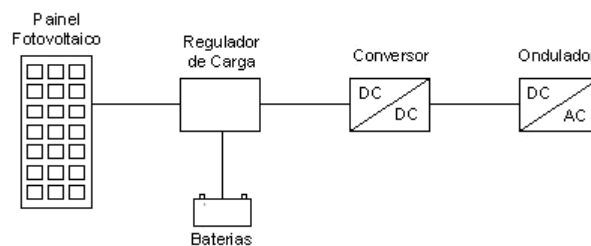


Figura 1 – Esquema geral da instalação.

Na conversão fotovoltaica utilizaram-se painéis solares construídos com módulos BP®, Ref. BP Solar (BP 2150 S), com as características especificadas no Anexo 1.

O armazenamento da energia eléctrica é realizado por um banco de baterias de chumbo-ácido da série E, do fabricante Autosil® (quatro baterias em série) com as características especificadas no Anexo 2.

O processamento da energia eléctrica para fornecimento em modo monofásico é conseguido pela utilização conjunta de um conversor DC-DC, do tipo elevador e por um ondulador de tensão monofásico.

O regulador de carga gere a carga do banco baterias e realiza funções de protecção.

O conversor DC-DC efectua a adaptação do nível de tensão do banco de baterias para valores adequados ao processamento pelo ondulador de tensão.

2. Descrição dos Módulos do Protótipo

Nesta secção é feita a descrição do módulo de regulação da carga das baterias, do conversor DC-DC e do Conversor DC-AC.

A. Regulador de Carga e Protecção das Baterias

O regulador de carga interliga o painel fotovoltaico e o banco de baterias conforme é ilustrado na Figura 2.

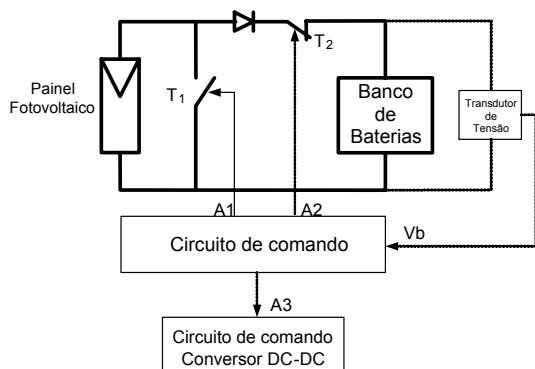


Figura 2 – Estrutura básica do regulador de carga

Atendendo a que o painel fotovoltaico possui características de fonte de corrente, o regulador de carga é do tipo *shunt*.

O circuito de comando fornece a sequência apropriada de disparo do semicondutor que efectua o curto-circuito ao painel fotovoltaico (T_1), de forma a impor o valor de corrente de saída pretendido.

Através da monitorização permanente da tensão aos terminais do banco de baterias (V_b), o regulador estabelece a lei de controlo da carga das baterias e faz a sua protecção contra sobretensões e subtensões.

1) Controlo da Carga das Baterias

O controlador do processo de carga das baterias possui como referência o valor máximo estabelecido para a tensão aos terminais do banco de baterias na situação de plena carga.

A carga das baterias é efectuada em três etapas:

i - As baterias sofrem um processo de carga rápida, desde a sua tensão mínima (46V) até atingirem 93% (52 V) da tensão máxima de carga (56V)

O regulador de carga coloca o painel em paralelo com o grupo de baterias entre os níveis de tensão 46V e 52V.

A Figura 3 ilustra a situação descrita.

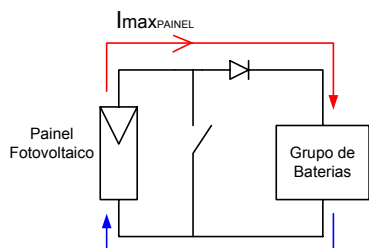


Figura 3 – Acção do regulador na fase de carga rápida

Nesta situação o valor da corrente de carga corresponde à corrente máxima que o painel fornece ($I_{max_{painel}}=15A$, valor obtido experimentalmente) e é definida pela tensão instantânea aos terminais do banco de baterias. Dado que a corrente máxima do painel é inferior à corrente máxima de carga admitida pelas baterias, não é necessário qualquer controlo de corrente nesta fase ($I_{max_{painel}}=15A < I_{max_{carga}}=22A$).

ii - A partir dos 52V até ao valor de tensão estipulado como sendo o valor máximo de carga (56 V), é efectuado

o processo de carga lenta (*floating*) no qual o regulador vai ajustando a corrente de carga das baterias desde o valor final de carga rápida até aproximadamente 0A.

Nesta fase de carga é efectuada uma regulação de corrente decrescente através da comutação, a 1kHz, do semicondutor T_1 que curto-circuita o painel de forma a variar a relação cíclica T_{ON}/T de 0% a 100%, como é ilustrado na Figura 4.

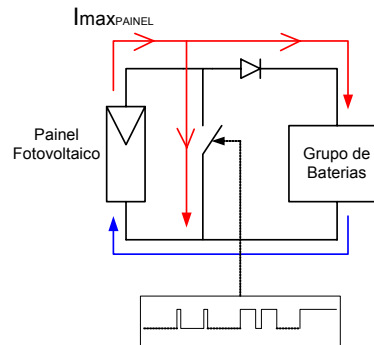


Figura 4 – Acção do regulador na fase de carga lenta

iii – Atingidos 56V aos terminais do banco de baterias, o processo de carga é inibido por acção de um controlador de histerese, só voltando estas à carga quando descenderem a 93% (52V) do valor de tensão de carga máxima. A Figura 5 ilustra esta etapa de funcionamento.

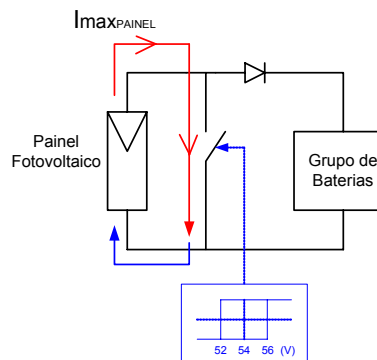


Figura 5 – Acção do regulador na fase de inibição de carga

2) Protecção das Baterias

i - Protecção contra sobretensões: Caso as baterias atinjam a tensão máxima de segurança (60V) (por inoperação de T_1 , dado que esta é superior ao valor máximo de carga, indicia uma anomalia no sistema de controlo, pelo que será gerado um sinal de alarme e as baterias são desligadas do painel pela acção do interruptor mecânico T_2 .

ii - Protecção contra subtensões: Quando as baterias descem ao seu limite mínimo de tensão (46V), o fornecimento de energia é suspenso através da ordem de inibição (A_3) do funcionamento do conversor DC-DC. O funcionamento do conversor será retomado quando as baterias atingirem 89% (50V) da sua tensão máxima.

A Figura 6 ilustra os regimes de carga e os limites de tensão estabelecidos para o banco de baterias.

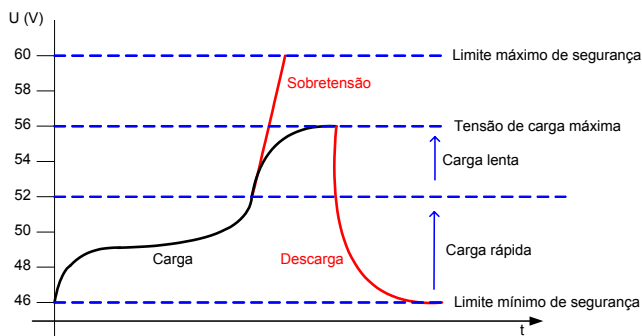


Figura 6 – Curvas de carga e descarga do banco de baterias

Na Figura 6, a descarga ilustrada poderá acontecer numa situação de consumo energético e ausência de conversão fotovoltaica.

3) Resultados experimentais

Na Figura 7 apresenta-se, para uma situação de carga rápida, a evolução temporal da tensão aos terminais do banco de baterias e da correspondente corrente de carga, registadas no período compreendido entre as 7:00h e as 10:20h do dia 26/09/2003, em Lisboa.

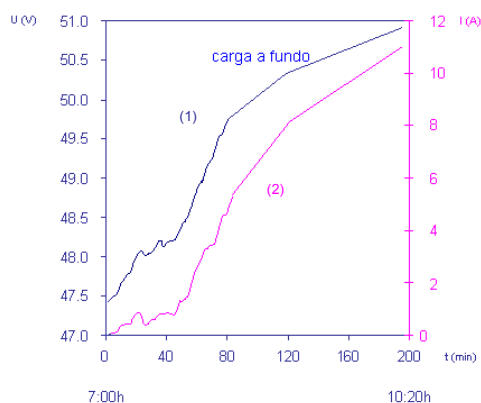


Figura 7 – Registo da evolução temporal da tensão aos terminais do banco de baterias e da correspondente corrente de carga numa situação de carga rápida: 1 – Tensão; 2 – Corrente

Na situação ilustrada na Figura 7, as baterias encontravam-se, aquando do início do processo de carga, praticamente descarregadas e as condições de radiação solar eram na altura muito inconstantes.

Na Figura 8 apresenta-se, para uma situação de carga lenta, a evolução temporal da tensão aos terminais do banco de baterias e da correspondente corrente de carga, registadas no período compreendido entre as 12h e as 14h do dia 27/09/2003, em Lisboa. Nesta Figura é visível a acção do regulador de carga, expressa pela diminuição do valor da corrente com o aumento da tensão aos terminais do banco de baterias. É, também, visível a inibição do processo de carga do banco de baterias quando a tensão atinge os 56V.

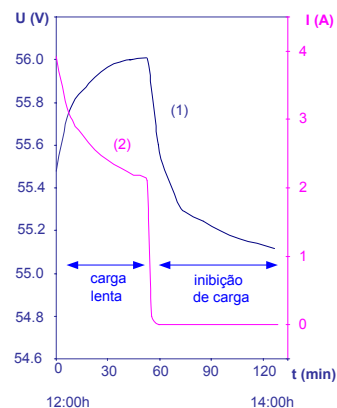


Figura 8 – Registo da evolução temporal da tensão aos terminais do banco de baterias e da correspondente corrente de carga numa situação de carga lenta: 1 – Tensão; 2 – Corrente

O banco de baterias ao proporcionar diferentes valores de tensões permite obter, de forma simples, após estabilização, as tensões de alimentação dos circuitos de comando.

B. Conversor DC-DC

Este módulo faz processamento de energia, adaptando o nível de tensão disponível aos terminais do banco de baterias (46V – 56V) para o nível de tensão (362V) pretendido para a alimentação do conversor DC-AC (ondulador de tensão monofásico), de forma a assegurar condições ao funcionamento adequado deste conversor. A potência de saída deste conversor de 850W.

1) Circuito de Potência

O circuito de potência do conversor DC-DC é constituído, como é ilustrado na Figura 9, por quatro partes distintas; Ponte inversora monofásica, transformador de alta frequência, ponte rectificadora e filtragem da tensão (U_o) e da corrente de saída.

A ponte inversora é alimentada directamente pelo banco de baterias, admite variação da tensão de alimentação entre os 46V e os 56V, uma corrente máxima admissível de 36A e é comandada à frequência de 25kHz usando modulação por largura de impulso (*PWM*). Nesta ponte inversora foram utilizados os seguintes dispositivos semicondutores: MOSFET IRFP140 e diodos BY399.

O transformador de alta frequência é alimentado a três níveis de tensão, possui núcleo de ferrite (UR64), cinco espiras no primário, cinquenta e três espiras no secundário e a secção dos condutores foi dimensionada para uma densidade de corrente de quatro amperes por milímetro quadrado.

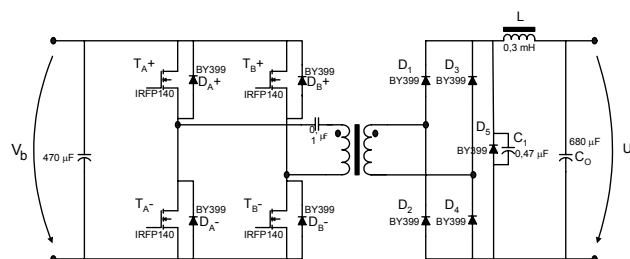


Figura 9 – Circuito de potência do conversor DC-DC

2) Circuito de Controlo da Tensão de Saída

O controlo da tensão de saída do conversor DC-DC é realizado através do ajuste do factor de ciclo da tensão de saída da ponte inversora. Na Figura 10 ilustra-se o modo de funcionamento do controlador implementado.

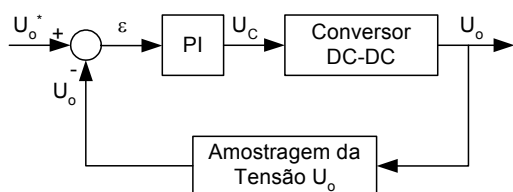


Figura 10 – Controlo da tensão de saída do conversor DC-DC

O erro (ϵ) estabelecido entre a tensão de referência (U_o^*) e a tensão de saída do conversor (U_o), define, após a acção de um compensador do tipo PI, a tensão de comando (U_c) que conjuntamente com uma portadora triangular de 25kHz estabelecem o factor de ciclo.

Existem dois tipos de sinais passíveis de inibir o sistema. Um deles é, como descrito, proveniente do módulo de carga das baterias. O outro diz respeito ao valor máximo da tensão de saída deste conversor, de modo a que a tensão limite de alimentação do módulo posterior (ondulador) não seja excedida (400V). Este valor máximo foi estabelecido em 380 V.

3) Resultados Experimentais

Na Figura 11 apresenta-se o registo da evolução temporal da tensão de saída do conversor DC-DC com carga constante.

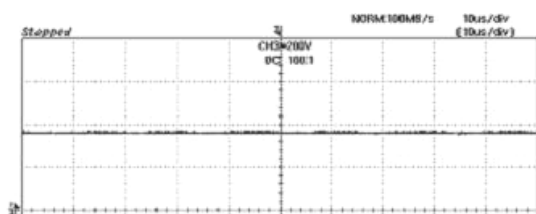


Figura 11 – Tensão de saída conversor DC-DC com carga constante; Escalas 200V/div, 10µs/div

Na Figura 12 apresenta-se um gráfico ilustrativo da evolução do rendimento do conversor em função da corrente de carga, à tensão nominal.

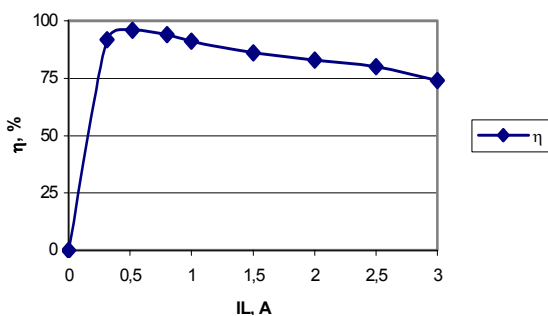


Figura 12 – Rendimento do conversor DC-DC, à tensão nominal

Da análise da Figura 12, conclui-se que o conversor DC-DC possui rendimento acima dos 80% para valores

da corrente de carga abaixo do valor nominal da corrente de saída (2,3A).

C. Ondulador de Tensão Monofásico

O ondulador de tensão processa a energia proveniente do conversor DC-DC e fornece-a à instalação de consumo em modo monofásico, possui a potência de 0,75kW e fornece tensão com valor eficaz de 230V à frequência de 50Hz. Na Figura 13 apresenta-se o esquema dos componentes da rede AC.

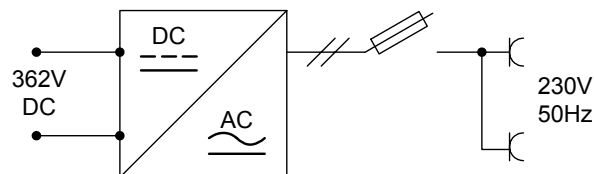


Figura 13 – Estrutura da rede AC

A alimentação das cargas de iluminação é feita em DC, de forma a não deteriorar o rendimento global do protótipo

1) Circuitos de Potência e de Controlo

Na conversão DC-AC foi utilizado um módulo integrado IRPT1059C da IR®. Este módulo incorpora o circuito de potência, os circuitos de disparo e protecção dos dispositivos semicondutores. Na Figura 14 apresenta-se a estrutura do módulo IRPT1059C e a necessária ligação, através de acoplamento óptico, ao circuito de comando implementado.

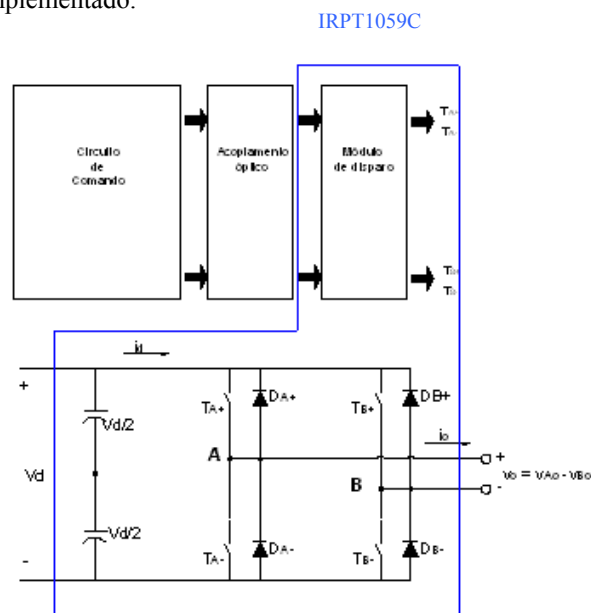


Figura 14 – Interligação do módulo integrado IRPT1059C com o circuito de comando, com realce para a entrada/saída de potência

O comando do ondulador de tensão é tipo unipolar, realizado através de modulação por largura de impulso (PWM), na variante triangular – sinusoidal, possuindo a portadora a frequência de 10kHz.

2) Resultados Experimentais

Na figura 15 apresenta-se o registo oscilográfico da forma de onda da corrente de alimentação de uma carga, constituída um motor assíncrono monofásico, de 0,25kW, funcionando em vazio.

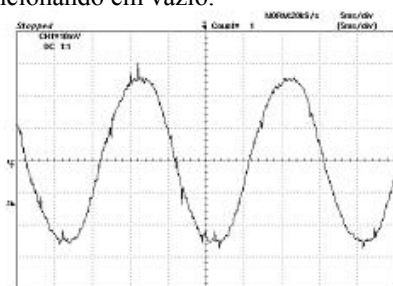


Figura 14 – Forma de onda da corrente de alimentação de um motor monofásico de 0,25kW; Escalas 2A/div, 5ms/div

Da observação da figura 14, pode dizer-se que rede AC ao alimentar cargas de carácter indutivo origina formas de onda de corrente sinusoidais com pequena deformação.

3. Fotografias do Equipamento



Figura 15 – Painéis fotovoltaicos



Figura 16 – Banco de baterias

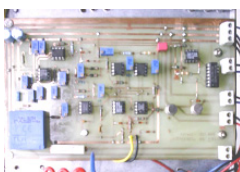


Figura 17 – Circuito de comando do regulador de carga

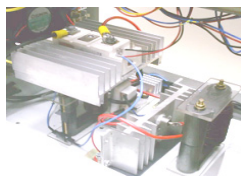


Figura 18 – Circuito de potência do regulador de carga

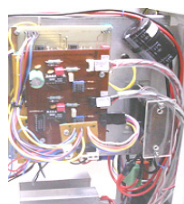


Figura 19 – Circuito de comando do conversor DC-DC

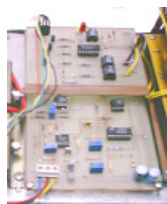


Figura 20 – Circuito de comando do ondulator

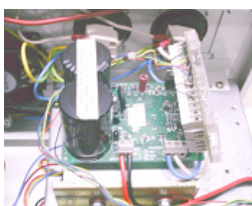


Figura 21 – Circuito de potência do ondulator



Figura 22 – Aspecto final do protótipo

4. Conclusões

Foi construído um protótipo de uma instalação autónoma de produção de energia eléctrica de pequena potência, com conversão fotovoltaica, projectado para cobrir necessidades básicas de consumo doméstico do tipo rural.

O regulador de carga do banco de baterias mostra-se adequado aos objectivos propostos e, face aos prolongados ensaios a que esteve sujeito, revelou-se fiável. Este regulador apresenta flexibilidade adequada a posteriores alterações, admitindo a duplicação do número de painéis fotovoltaicos e o aumento do número de baterias.

O conversor DC – DC apresenta bom desempenho no que diz respeito à regulação da sua tensão de saída, nomeadamente perante variações significativas, dentro dos valores admitidos, da tensão aos terminais do banco de baterias.

O ondulator de tensão, perante variações de carga, apresenta boa precisão no que se refere à manutenção da amplitude da tensão da rede e da sua frequência.

O protótipo construído necessita de intervenção ao nível dos conversores de potência, de modo a melhorar o seu rendimento global, factor importante numa instalação deste tipo.

Nota

Este trabalho foi realizado no âmbito da disciplina de Projecto Final de Curso do curso de Engenharia Electrotécnica – Automação Industrial e Sistemas de Potência da responsabilidade do Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Referências

- [1] Fernando Almeida; José Antunes; Susana Raposo; Elmano Margato, “Carregador de Baterias Utilizando Tecnologia de Fontes Comutadas” 7.ªs Jornadas Hispano Lusãs de Ingeniería Eléctrica, volume I, páginas: 141-148, Madrid, 4,5 e 6 de Julho,2001.
- [2] Seong-Jeub Jeon; Gyu-Hyeong Cho; ”A zero-voltage and zero-current switching full bridge DC-DC converter with transformer isolation”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 16 , Issue: 5 , Sept. 2001 Pages:573 - 580
- [3] Yaosuo Xue; Liuchen Chang; Sren Baekhj Kjaer; Bordonau, J.; Shimizu T.; “Topologies of Single-Phase Inverters for Small Distributed Power Generators: An Overview”, Power Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 19 , Issue: 5 , Sept. 2004 Pages:1305 – 1314
- [4] Mohan, Undeland e Robbins, “Power Electronic”, Converters, application and design; John Wiley & Sons, Inc, 1995.

Anexo 1

Características individuais dos módulos fotovoltaicos BP® Solar (BP 2150S)

<i>Silício monocristalino</i>		
Potência máxima	P_{max}	150 W
Tensão máxima	V_{max}	34 V
Corrente máxima	I_{max}	4,45 A
Corrente de curto-circuito	I_{cc}	4,75 A
Tensão em circuito aberto	V_{ca}	42,8 V
Coefficiente de temperatura de I_{cc}	μI_{cc}	65E-03 A/°C
Coefficiente de temperatura de V_{ca}	μV_{ca}	-160E-03 V/°C
Coefficiente de temperatura de P_{max}	μP_{max}	-0,5 W/°C
Temperatura normal de funcionamento	NOCT	47°C
Comprimento	C	1,590 m
Largura	L	0,79 m
Área	A	1,256 m ²
Número de células em série	N_s	72

Anexo 2

Características individuais das baterias de chumbo-ácido Autosil® Série E

Tensão	12 V
Capacidade (10h)	80 Ah
Capacidade (100h)	110 Ah
Energia (10h)	0.960 kWh
Energia (100h)	1.320 kWh

Segundo o fabricante, a corrente de carga das baterias é dada por

$$I_{carga} = \frac{\text{Capacidade}_{100h}}{10} = 11A$$

podendo assumir o valor máximo de

$$I_{carga} = \frac{\text{Capacidade}_{100h}}{5} = 22A$$