



UNIVERSIDADE D  
**COIMBRA**

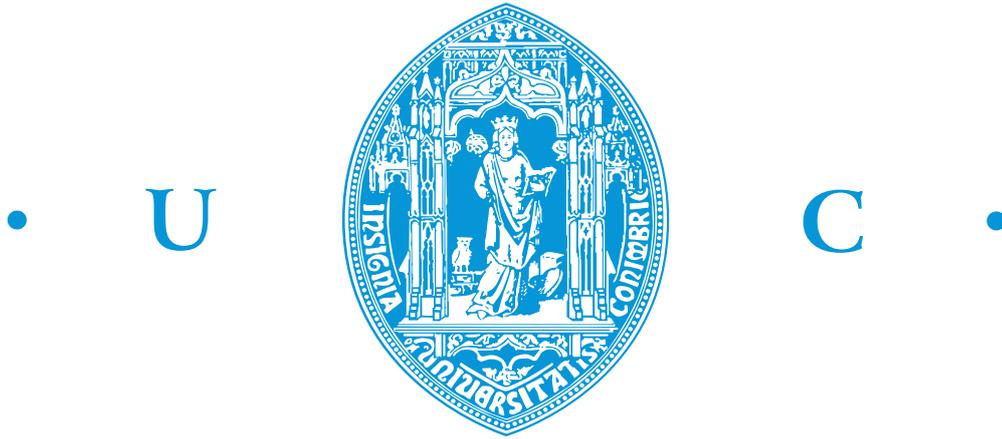
Rafael Graça Carvalho

**PROJETO DE SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO  
DE CARGAS EMERGENTES EM CORRENTE  
CONTÍNUA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Área de Especialização em Energia orientada pelo Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Outubro de 2021





FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# Projeto de Sistemas de Alimentação de Cargas Emergentes em Corrente Contínua

Rafael Graça Carvalho

Coimbra, Outubro 2021





# Projeto de Sistemas de Alimentação de Cargas Emergentes em Corrente Contínua

## **Júri:**

Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz (Presidente)

Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes (Orientador)

Professora Doutora Marina Mendes Sargento Domingues Perdigão (Vogal)

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - Área de especialização em Energia, orientada pelo Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Coimbra, Outubro 2021



# Agradecimentos



Esta dissertação foi realizada no Laboratório de Eletrónica de Potência com o apoio do Instituto de Telecomunicações de Coimbra, tendo o material utilizado sido fornecido pela EDP Distribuição, em particular pelo Engenheiro Ricardo Rocha, a quem expresseo o meu agradecimento, que forneceu duas fontes retificadoras AEG de 2000W e baterias de NiCd necessárias à realização do projeto.



A elaboração desta dissertação não teria sido possível sem o estímulo e colaboração de diversas pessoas que resultam no término deste longo percurso académico com os seus altos e baixos e de certo, uma das etapas mais marcantes e importantes da minha vida.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes, pelo seu empenho, dedicação, apoio e disponibilidade ao longo do desenvolvimento desta dissertação com toda a sua experiência e conhecimentos transmitidos.

Agradeço à minha família, em particular aos meus pais, minha irmã e meus avós que fizeram com que fosse possível atingir este momento e por todas as palavras de carinho, incentivo e compreensão.

Por fim, um agradecimento a todos os meus amigos que me acompanharam ao longo deste percurso, aos de Maiorca, aos que Coimbra me deu e aos diferentes colegas de casa com quem tive o privilégio de partilhar ao longo destes anos.



# Resumo

Os sistemas de alimentação em corrente contínua têm como principal função alimentar todos os equipamentos de supervisão, controlo, iluminação de emergência, comunicações e proteções existentes numa infraestrutura da rede de distribuição, destinada a funções de transformação, corte e seccionamento. A facilidade em armazenar energia em corrente contínua, em detrimento da corrente alternada, tem vindo também a ser utilizada como alimentação dos equipamentos mais críticos preferencialmente com nível de tensão de 110V.

Sendo os equipamentos a alimentar cargas emergentes, em situação alguma deverão perder a alimentação, sob pena da instalação ficar sem controlo correndo riscos com consequências graves. A necessidade de alimentação ininterrupta é reforçada pelo facto da maior parte das infraestruturas serem operadas remotamente.

Nesta dissertação é implementado o sistema já presente na grande maioria das subestações, adicionando uma fonte de energia renovável através de painéis fotovoltaicos. Os constituintes do sistema são portanto, um módulo retificador AEG PM120-15 de 2000 W, os painéis fotovoltaicos e um sistema de armazenamento, todos ligados no barramento DC de 110 V.

Assim, o objetivo desta dissertação consiste em controlar os fluxos de potência que ocorrem no sistema global. Para tal são dimensionados os conversores DC-DC que fazem a interligação entre as fontes e o barramento DC, aplicando estratégias de controlo que permitam um controlo eficaz dos mesmos, extraíndo a máxima potência dos painéis e fornecer/absorver energia do barramento DC, respetivamente.

O sistema é implementado em *Matlab/Simulink* onde é realizado o estudo da dinâmica do sistema, implementando inicialmente cada componente individualmente testando os algoritmos de controlo e os métodos aplicados. Por fim analisa-se o comportamento do sistema global reagindo a alterações da carga a alimentar e fazendo a gestão bidirecional do sistema de armazenamento.

**Palavras-Chave:** Sistema Solar Fotovoltaico, Sistema de Armazenamento, Corrente Contínua, Conversores de Potência, Controlo.



# Abstract

The main function of DC power supply systems is to feed all the supervision, control, emergency lighting, communications and protection equipment existing in a distribution network infrastructure, intended for transformation, cutting and sectioning functions. The ease in storing energy in direct current, instead of alternating current, has also been used to feed the most critical equipment preferably with a voltage level of 110V.

As the equipment is feeding emerging loads, they shouldn't lose under any circumstances, otherwise the installation will be out of control, running risks with serious consequences. The need for uninterrupted power supply is reinforced by the fact that most of the infrastructures are operated remotely.

In this dissertation, is implemented to the system already installed in most substations, adding a renewable energy source through photovoltaic panels. The constituents of the system are therefore a 2000 W AEG PM120-15 rectifier module, the photovoltaic panels and a storage system, all connected to the 110 V DC bus.

Thus, the objective of this dissertation is to control the power flows occurring in the overall system. To do this, the DC-DC converters that make the interconnection between the sources with the DC bus are dimensioned, applying control strategies that allow an effective control of them, extracting the maximum power from the panels and supplying/absorbing energy from the DC bus, respectively.

The system is implemented in *Matlab/Simulink* where the dynamics of the system is studied, initially implementing each component individually, testing the control algorithms and methods applied. Finally, the behavior of the overall system is analyzed reacting to changes in the load to be fed and making the bidirectional management of the storage system.

**Keywords:** Solar Photovoltaic System, Storage System, Direct Current, Power Electronic Converters, Control.



# Conteúdo

Agradecimentos	ii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Siglas e Símbolos	xv
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e Objetivos . . . . .	2
<b>2 Apresentação dos elementos do sistema</b>	<b>5</b>
2.1 Fonte retificadora 230Vac/110Vdc . . . . .	5
2.2 Sistema Solar Fotovoltaico . . . . .	7
2.2.1 Extração da máxima potência do sistema solar fotovoltaico . . . . .	9
2.3 Sistema de Armazenamento . . . . .	10
2.3.1 Aspectos relativos ao carregamento de baterias de NiCd . . . . .	11
2.3.2 Aspectos relativos à descarga de baterias de NiCd . . . . .	13
2.3.3 Funcionamento do conversor das baterias . . . . .	14
<b>3 Dimensionamento dos Conversores de Potência</b>	<b>17</b>
3.1 Dimensionamento do conversor dos painéis . . . . .	17
3.2 Dimensionamento do conversor das baterias . . . . .	17

<b>4</b>	<b>Análise parcial aos componentes do sistema</b>	<b>19</b>
4.1	Módulo retificador AEG . . . . .	19
4.2	Sistema Solar Fotovoltaico . . . . .	21
4.3	Sistema de armazenamento . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Análise global dos sistemas interligados</b>	<b>25</b>
5.1	Instrumentação do sistema global . . . . .	25
5.2	Cenários em estudo . . . . .	26
5.3	Resultados obtidos . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>39</b>
6.1	Conclusões . . . . .	39
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	40
	<b>Bibliografia</b>	<b>41</b>
	<b>Apêndice A</b>	<b>43</b>
	<b>Apêndice B</b>	<b>45</b>
	<b>Apêndice C</b>	<b>47</b>

# Lista de Figuras

1.1	Esquema simplificado do sistema de alimentação de corrente contínua. . . . .	3
2.1	Retificador AEG PM120-15 2000 W . . . . .	6
2.2	Principais componentes do sistema solar fotovoltaico. . . . .	8
2.3	Modelo elétrico equivalente dos painéis fotovoltaicos . . . . .	8
2.4	Curva V-I(a) e V-P(b) para diferentes valores de irradiância a 25°C. . . . .	8
2.5	Curva V-I (a) e V-P (b) para diferentes valores de temperatura com irradiância de 1000 W/m <sup>2</sup> . . . . .	9
2.6	Curvas I-V para diferentes valores de irradiância a 25°C e para diferentes valores de temperatura com irradiância de 1000W/m <sup>2</sup> . . . . .	9
2.7	Fluxograma do algoritmo P&O . . . . .	11
2.8	Características do carregamento de células de NiCd . . . . .	12
2.9	Características do descarregamento de células de NiCd . . . . .	13
2.10	Principais componentes do sistema de armazenamento. . . . .	14
2.11	Esquema elétrico do conversor bidirecional DC-DC . . . . .	14
2.12	Esquema elétrico do conversor bidirecional DC-DC em modo de operação Buck. 15	
2.13	Esquema elétrico do conversor bidirecional DC-DC em modo de operação Boost. 16	
2.14	Corrente na bobina Lcb: (a) Funcionamento como <i>Buck</i> . (b) Funcionamento como <i>Boost</i> . . . . .	16
4.1	Esquema da simulação do módulo retificador AEG (Conversor AC-DC PWM de três níveis). . . . .	20
4.2	Dinâmica do módulo retificador em circuito aberto até ao instante 1 s e com carga de 2000 W após 1 s de tempo de simulação. (a) Tensão no barramento DC. (b) Corrente na carga. (c) Potência da Carga. . . . .	20
4.3	Esquema do sistema solar fotovoltaico. . . . .	21

4.4	Dinâmica do sistema solar fotovoltaico: (a) Comparação entre o valor médio de potência à saída dos painéis e a potência média de referência. (b) Comparação entre a irradiância solar e a potência extraída. (c) Tensão à saída dos painéis. (d) Corrente à saída dos painéis. (e) Tensão do barramento DC. . . . .	22
4.5	Esquema do sistema de armazenamento. . . . .	23
4.6	Dinâmica do sistema de armazenamento em operação em <i>Buck</i> : (a) Tensão no barramento DC. (b) Estado de carga das baterias. (c) Balanço energético do sistema. . . . .	23
4.7	Dinâmica do sistema de armazenamento em operação em <i>Boost</i> : (a) Tensão no barramento DC. (b) Estado de carga das baterias. (c) Corrente de carregamento. (d) Balanço energético do sistema. . . . .	24
5.1	Esquema do sistema global. . . . .	25
5.2	Esquema do fluxo de potência para o cenário 1. . . . .	27
5.3	Esquema do fluxo de potência para o cenário 2. . . . .	28
5.4	Esquema do fluxo de potência para o cenário 3. . . . .	28
5.5	Esquema do fluxo de potência para o cenário 4. . . . .	29
5.6	Esquema do fluxo de potência para o cenário 5. . . . .	29
5.7	Comportamento do sistema isolado para o cenário 1. (a) Balanço energético do sistema. (b) Tensão no barramento DC. (c) SOC das baterias. (d) Comparação da potência extraída pelos painéis fotovoltaicos com a irradiância solar incidente. . . . .	30
5.8	Comportamento do sistema para o cenário 2. (a) Balanço energético do sistema. (b) Tensão no barramento DC. (c) SOC das baterias. . . . .	31
5.9	Comportamento do sistema para o cenário 3. (a) Balanço energético do sistema. (b) Tensão no barramento DC. (c) SOC das baterias. (d) Comparação entre a potência extraída dos painéis e a irradiância solar. . . . .	33
5.10	Comportamento do sistema para o cenário 4 sem limitação do <i>duty-cycle</i> . (a) Balanço energético do sistema. (b) <i>Duty-Cycle</i> do MPPT. (c) Tensão no barramento DC. (d) SOC das baterias. . . . .	35
5.11	Comportamento do sistema para o cenário 4 com limitação do <i>duty-cycle</i> . (a) Balanço energético do sistema. (b) <i>Duty-Cycle</i> do MPPT. (c) Tensão no barramento DC. (d) SOC das baterias. . . . .	35

5.12 Comportamento do sistema para o cenário 5. (a) Balanço energético do sistema. (b) Tensão no barramento DC. (c) SOC das baterias. (d) Comparação da potência extraída dos painéis com a irradiância solar. . . . .	36
--	----

# Lista de Tabelas

2.1	Características dos elementos do banco de baterias . . . . .	11
-----	--	----

# Lista de Siglas e Símbolos

<b>AC</b>	Corrente alternada ( <i>Alternating Current</i> )
<b>AT</b>	Alta tensão
<b>BJT</b>	<i>Bipolar junction transistor</i>
<b>DC</b>	Corrente contínua ( <i>Direct Current</i> )
<b>GTO</b>	<i>Gate turn-off thyristor</i>
<b>IGBT</b>	<i>Insulated-gate bipolar transistor</i>
<b>MCT</b>	<i>Metal oxide semiconductor controlled thyristor</i>
<b>MOSFET</b>	<i>Metal oxide semiconductor field effect transistor</i>
<b>MPP</b>	Ponto de potência máxima
<b>MPPT</b>	<i>Maximum power point tracking</i>
<b>MT</b>	Média tensão
<b>NiCd</b>	Níquel-Cádmio
<b>PV</b>	Painel fotovoltaico
<b>PWM</b>	<i>Pulse Width Modulation</i>
<b>SOC</b>	Estado de carga ( <i>State of charge</i> )
<b>Wp</b>	Potência máxima a 25°C e irradiância 1000 W/m <sup>2</sup> de uma célula fotovoltaica (W)



# 1 Introdução

Nas subestações da EDP Distribuição, além de todo o equipamento de potência presente, podem-se encontrar sistemas auxiliares alimentados habitualmente em corrente contínua. Esse sistema auxiliar serve, essencialmente, para alimentar equipamentos de supervisão, controlo, iluminação de emergência, comunicações e proteções existentes numa subestação da rede de distribuição [1].

A necessidade de manter ininterruptamente cargas de emergência ligadas, nomeadamente os sistemas que alimentam as comunicações em caso de catástrofes ou quebras na energia da rede elétrica local, leva a que seja procurada uma fonte de energia que mantenha momentaneamente essas cargas alimentadas sem falha no serviço exigido.

As cargas presentes nas subestações de alta tensão (AT) e média tensão (MT) cujas funcionalidades são de proteger, comandar e controlar o equipamento existente são alimentadas por uma fonte retificadora AC-DC que mantém o barramento DC estável. No conjunto de equipamentos, também deve existir um conjunto de baterias que constituem um sistema de serviço auxiliar que asseguram o correto funcionamento do sistema em caso de falha de alimentação, ou seja a fonte retificadora encontra-se fora de serviço.

Nesta dissertação, a juntar ao sistema já existente composto pela fonte retificadora, o sistema de armazenamento e a carga a alimentar, pretende-se adicionar uma fonte com recurso a energia solar fotovoltaica. A idealização do projeto partiu do princípio que era possível usufruir a disponibilidade de uma fonte de energia renovável, não dependente da rede elétrica, capaz de produzir energia em caso de falha da rede, acrescentando autonomia e robustez ao sistema de alimentação ininterrupto. A necessidade de alimentação ininterrupta é reforçada pelo facto da maior parte das infraestruturas serem operadas remotamente.

Com o desenvolvimento do projeto, pretende-se idealizar um sistema de alimentação das cargas já referidas com recurso a um barramento de corrente contínua. Em caso de falha da alimentação primária desse barramento pela fonte retificadora, deve ser mantido o seu nível de tensão constante através de um conjunto de baterias e de um conjunto de painéis fotovoltaicos.

Durante o período diurno, existindo disponibilidade da energia solar fotovoltaica, logo que a alimentação da carga esteja assegurada, a restante energia disponível será utilizada no carregamento das baterias. Durante o período noturno, não existindo irradiância solar, as baterias seriam as responsáveis por manter o nível de tensão.

A última década assistiu à instalação em massa de módulos fotovoltaicos em todo o mundo devido ao interesse na procura de uma fonte de energia renovável com reduzidos custos ambientais e com capacidade de elevado aproveitamento da energia proveniente do Sol. A transformação da energia solar fotovoltaica em energia elétrica é efetuada de forma segura, sem custos de energia primária, baixa necessidade de manutenção e com elevada durabilidade.

Através do desenvolvimento evolutivo da eletrónica de potência, o processo de conversão de energia solar fotovoltaica em energia elétrica foi sendo aprimorado devido ao progresso tecnológico de dispositivos semicondutores, conversores de potência, otimização e de técnicas de controlo.

## 1.1 Motivação e Objetivos

O principal objetivo da dissertação tem o intuito de integrar no sistema já existente uma fonte renovável através de painéis fotovoltaicos nas subestações AT/MT e o dimensionamento de conversores de potência de interligação com o barramento DC de modo a manter a alimentação ininterrupta de cargas emergentes.

Por fim, pretende-se que, em adição ao sistema já existente constituído pelo módulo retificador AEG (na figura 1.1 apresentado a cinzento), pelo banco de baterias (na figura 1.1 apresentado a amarelo) e a carga que alimenta (na figura 1.1 apresentado a laranja), se interligue a alimentação através dos painéis fotovoltaicos (na figura 1.1 apresentado a verde) no barramento de 110V.

A adição dos painéis fotovoltaicos implica a instalação de um conversor DC-DC devido à necessidade de este ser controlado com base no ponto de máxima potência. Assim, para dias em que a incidência de radiação solar for elevada e consequentemente exista elevada produção de energia, pode ser necessário limitar o nível de tensão dos painéis para o nível requerido pelo sistema. Em sentido oposto, para uma menor ou insuficiente incidência de radiação solar e consequentemente reduzida produção de energia, de modo a assegurar um valor de tensão constante, pode ser necessário garantir a alimentação da carga através do módulo retificador ou do sistema de armazenamento.

O controlador (na figura 1.1 a azul) a implementar na instalação vai ter funcionalidades de

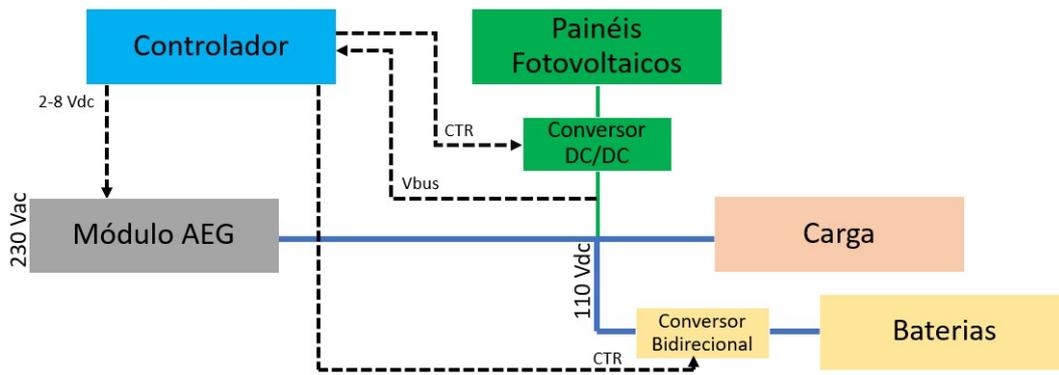


Figura 1.1: Esquema simplificado do sistema de alimentação de corrente contínua.

aquisição de valores através de um sensor de tensão no barramento de 110V garantindo que não há variações de tensão. Outra funcionalidade, é a regulação do módulo AEG através de uma fonte de tensão DC operando entre 2 e 8V contribuindo para uma tensão de saída de 83 a 166V. Por fim, é responsável por monitorizar e implementar o MPPT para o funcionamento do conversor DC-DC que interliga os painéis fotovoltaicos.

Com o objetivo de implementar o sistema de alimentação ininterrupta de cargas emergentes surge a necessidade de simular os modelos e os controlos utilizados para os diversos conversores de potência presentes. Assim os objetivos que se pretendem atingir durante a realização da dissertação são:

1. Análise dos sistemas de alimentação de corrente contínua já existentes nas subestações da EDP Distribuição.
2. Pesquisa sobre o funcionamento de células fotovoltaicas e dos principais componentes que constituem um sistema de geração fotovoltaica.
3. Pesquisa sobre o funcionamento do sistema de armazenamento e dos seus componentes constituintes.
4. Implementar um algoritmo que permita extrair a potência máxima dos painéis fotovoltaicos.
5. Dimensionar o conversor que faz a interligação dos painéis fotovoltaicos e o barramento DC.
6. Dimensionamento, modelação e controlo do conversor bidirecional do sistema de armazenamento, de forma a carregar as baterias ou fornecer energia à carga.

7. Desenvolver algoritmos de controlo que permitam interligar os painéis fotovoltaicos, o módulo retificador AEG usado pela EDP Distribuição e o sistema de armazenamento.
8. Simular e validar os algoritmos de controlo do sistema em ambiente de simulação (*Matlab/Simulink*).

## 2 Apresentação dos elementos do sistema

Neste capítulo, são apresentados os elementos que constituem o sistema global projetado para esta dissertação.

### 2.1 Fonte retificadora 230Vac/110Vdc

O módulo retificador AC-DC 230Vac/110Vdc é o elemento central neste projeto. Os conversores AC-DC ou retificadores são sistemas formados por semicondutores de potência operados como interruptores (Díodos, MOSFET, IGBT, MCT, BJT, GTO), e por elementos passivos, indutâncias ou condensadores, que têm por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída. O conversor retificador tem como função aplicar uma tensão regulada DC a uma carga variável a partir de uma fonte de tensão AC na entrada. São utilizados para acionar motores DC e carregamento de baterias.

O retificador a ser utilizado é um retificador AEG PM120-15 de 2000 W representado na figura 2.1, que desempenha um papel fundamental no sistema assegurando a alimentação de todo o sistema de automação e controle. Este equipamento pode ser aplicado em todo o tipo de instalações industriais, podendo funcionar de modo isolado, alimentando diretamente as cargas, ou ser instalado em paralelo com um banco de baterias, fornecendo um sistema de alimentação em corrente contínua constante.

A operação do retificador reside em 4 submódulos [3]:

- Um circuito de entrada com dispositivos de proteção, uma ponte retificadora, um filtro de interferência eletromagnética e um filtro capacitivo com armazenamento. O circuito de entrada inclui um conversor ativo de correção de fator de potência (Conversor DC/DC Boost de 50 KHz) que garante uma corrente de entrada sinusoidal, bem como um fator de potência superior a 0.97.



Figura 2.1: Retificador AEG PM120-15 2000 W. Fonte: [2].

- Um conversor de deslocamento de fase em ponte completa ligado a um transformador, que converte a tensão DC do condensador de armazenamento em tensão AC de alta frequência (100 KHz).
- Um circuito de saída com um filtro de interferência eletromagnética e um retificador converte a tensão AC do secundário do transformador de alta frequência em tensão DC.
- Um circuito de controle e regulação conduz a ponte completa com base na tensão de saída e nas informações de corrente usando dispositivos de PWM.

O valor de tensão na saída do retificador AEG é regulado através de uma fonte DC externa que opera na gama de 2 e 8V, resultando numa tensão de saída entre 83 e 166V. Para valores inferiores a 1.5V e valores superiores a 8.5V, a tensão na saída do retificador adota um valor de 130V.

Dentro das soluções de mercado para retificadores e para a mesma gama de potência, este é o equipamento mais simples e económico. No entanto, o correto funcionamento de todo o sistema depende deste retificador e do barramento de tensão entre 83 e 166V gerado por este, ou seja, pode ocorrer quebra total da alimentação do sistema se acontecer uma falha na alimentação do retificador.

Na simulação em *Matlab/Simulink* foi utilizado um script de um conversor AC-DC de três níveis com sinal PWM, ajustado às necessidades do sistema de modo a limitar a potência disponibilizada no retificador para os parâmetros reais com 2000 W. O papel deste elemento na simulação é idêntico ao idealizado para o sistema real, contribuindo como estabilizador do barramento e com potência disponível para alimentar a carga caso a alimentação não seja assegurada pelos painéis fotovoltaicos.

## 2.2 Sistema Solar Fotovoltaico

Atendendo a que a energia solar que chega à terra numa hora, é superior a toda a energia consumida no planeta Terra durante um ano, torna-se evidente que a produção de energia elétrica a partir do Sol em detrimento do uso de combustíveis fósseis é suficiente para satisfazer as necessidades energéticas da humanidade, a custos ambientais mais favoráveis[4],[5].

O conceito do efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, quando descobriu que as células fotovoltaicas eram capazes de converter a energia proveniente do Sol em energia elétrica. Em 1870 iniciou-se o estudo do efeito fotovoltaico no selênio, apresentando baixa eficiência de conversão energética de cerca de 1-2% e custo elevado. Em 1954, os laboratórios Bell desenvolveram células fotovoltaicas de silício cristalino com uma eficiência de 11%. Atualmente as células fotovoltaicas mais utilizadas são constituídas por uma junção P-N de silício cristalino [6]. Quando a camada de tipo N (rica em elétrons) recebe energia luminosa (fotões) é gerada uma diferença de potencial entre a camada de tipo P e N. Se o circuito entre as 2 camadas for fechado por um circuito externo, a diferença de potencial irá originar uma corrente. A corrente que será gerada depende essencialmente da intensidade luminosa que incide sobre a célula solar (irradiância). A tensão da célula depende principalmente do tipo de material que a constitui e da temperatura de operação da mesma [4].

Tipicamente uma célula individual tem uma potencial elétrica reduzida, variando entre os 2 Wp e 3 Wp (potência máxima a 25°C e irradiância de 1000  $W/m^2$ ), com uma tensão de cerca de 0.5V. De modo a obter potências elevadas, as células são associadas em série ou paralelo, formando um módulo ou painel (conjunto de módulos) fotovoltaico. Atualmente os módulos disponíveis variam numa gama de potências entre os 3 Wp e os 200 Wp[6].

A tensão obtida aos terminais de um painel fotovoltaico (PV) é contínua no tempo e não regulada. De modo a controlar a tensão de saída do painel é necessário o uso de conversores de potência DC-DC de modo a fazer a interligação ao barramento DC do sistema, possibilitando a extração da máxima potência a ser entregue no barramento, como está representado na figura 2.2.

O modelo elétrico dos painéis fotovoltaicos é apresentado em [7] e está representado na figura 2.3, ao qual é associado o modelo matemático proposto em [7] correspondente à equação 2.1.

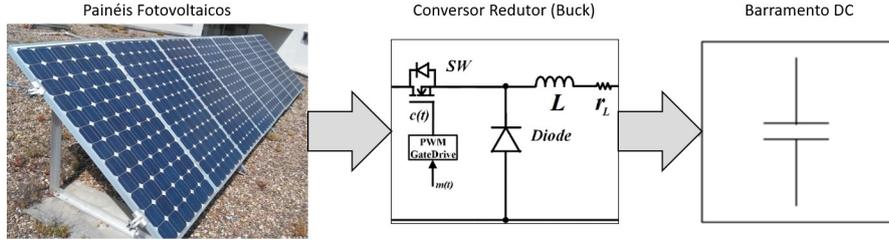


Figura 2.2: Principais componentes do sistema solar fotovoltaico.

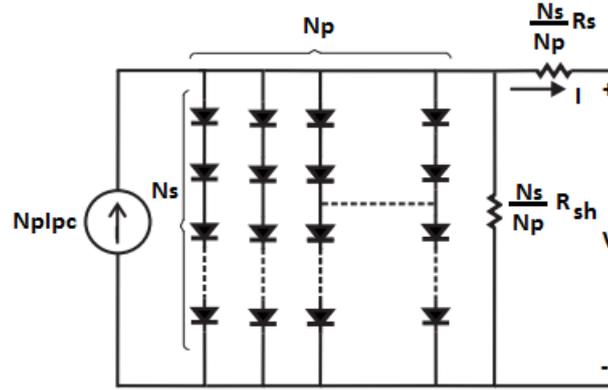


Figura 2.3: Modelo elétrico equivalente dos painéis fotovoltaicos. Fonte [7].

$$I = N_p I_{pc} - N_p I_0 \left[ \exp\left(\frac{q\left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_p}\right)}{k A_{pv} T_c}\right) - 1 \right] - \frac{N_p V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Com recurso à simulação em *Matlab/Simulink* e utilizando o bloco disponibilizado pelo software do PV Array, correspondente ao modelo dos painéis reais BP Solar BP4175 com uma matriz 4 por 2, série/paralelo, respetivamente, obtiveram-se as curvas V-I e V-P para diferentes valores de irradiância com temperatura constante de 25°C (figura 2.4) e para diferentes valores de temperatura com irradiância constante de 1000 W/m<sup>2</sup> (figura 2.5).

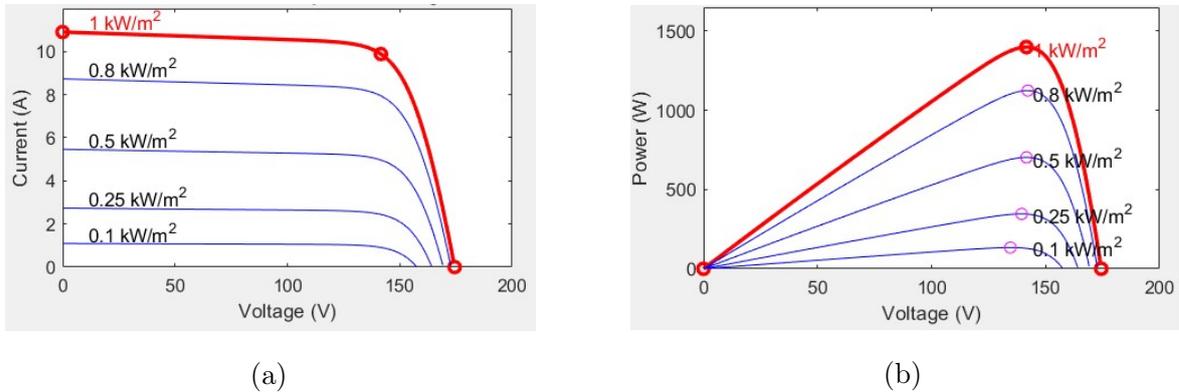


Figura 2.4: Curva V-I(a) e V-P(b) para diferentes valores de irradiância a 25°C.

A potência à saída do painel fotovoltaico  $P_{pv}$  é dada pelo produto da tensão  $V_{pv}$  pela corrente  $I_{pv}$  ( $P_{pv} = V_{pv} * I_{pv}$ ). Observando as figuras 2.4a e 2.5a, existe um ponto no "joelho"

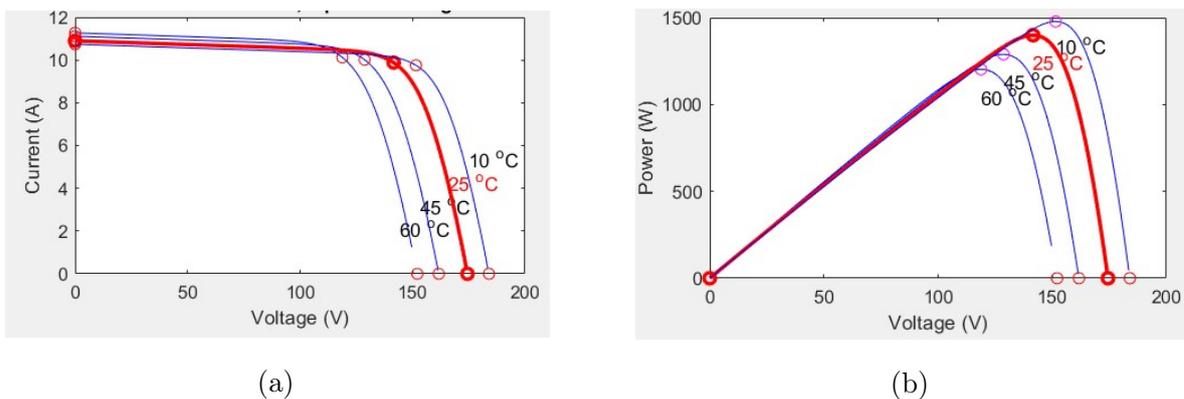


Figura 2.5: Curva V-I (a) e V-P (b) para diferentes valores de temperatura com irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

da curva denominado por ponto de potência máxima (MPP), local onde o produto das duas grandezas é máximo.

## 2.2.1 Extração da máxima potência do sistema solar fotovoltaico

A relação entre a tensão e corrente obtidas aos terminais de um painel PV é não linear devido às características elétricas das células, variando a potência consoante as condições de irradiação solar e da temperatura do módulo PV. O comportamento das curvas apresentadas na figura 2.6 é aproximadamente exponencial, concluindo que para um igual valor de irradiância, a potência aumenta com a diminuição da temperatura [8].

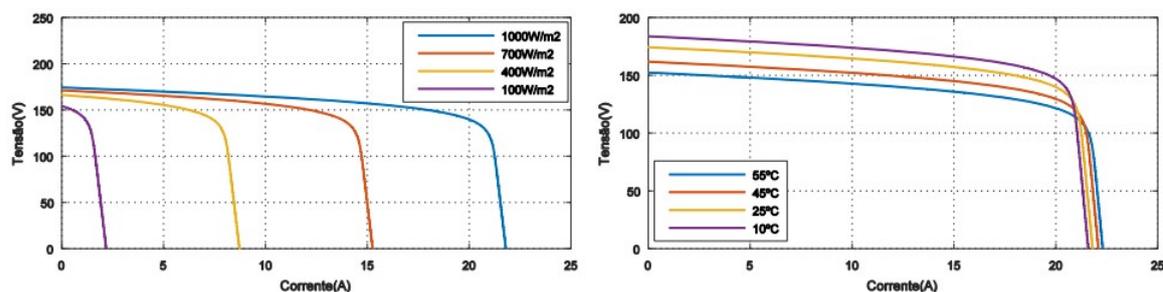


Figura 2.6: Curvas I-V para diferentes valores de irradiância a  $25^{\circ}\text{C}$  (gráfico à esquerda), e para diferentes valores de temperatura com irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  (gráfico à direita).

Fonte: [8]

A operação de um painel fotovoltaico sem um método de análise de máxima extração de potência resulta numa baixa eficiência do sistema e em desperdício energético, levando à necessidade de instalação de mais painéis fotovoltaicos de modo a atingir a potência requerida

[9].

A extração da máxima potência do sistema solar fotovoltaico (MPPT) acontece através de um microcontrolador associado a um conversor DC-DC que otimiza a eficiência do sistema e a potência do sistema PV, fazendo com que o módulo PV opere sempre no ponto de máxima potência [9].

Entre os métodos possíveis de determinação do MPP, os mais populares são os métodos classificados por "hill climbing" devido à sua simplicidade de implementação e eficiência elevada através de determinação exata do MPP, do qual faz parte o algoritmo Perturbar e Observar (P&O) escolhido para a implementação neste projeto [10]. O algoritmo ajusta a tensão,  $V_{pv}$  e através da medição das grandezas elétricas de tensão e corrente é calculada a potência do painel fotovoltaico,  $P_{pv}$ . Após o ajuste e verificação do valor de tensão, se este valor aumentar então a perturbação seguinte é no sentido de aumentar a tensão até ao ponto em que já não seja possível aumentar. Caso a perturbação dê origem a um valor de potência inferior, o algoritmo segue no sentido de tentar aumentar a potência disponibilizada pelo painel fotovoltaico.

O processo é repetido continuamente, procurando sempre o MPP que oscila com a variação de irradiância e temperatura, utilizando sempre como referência a tensão do PV.

A amplitude da oscilação em torno do MPP depende da amplitude da perturbação,  $C$ , a qual deve ser igual ou superior ao ripple da tensão no condensador de entrada do conversor dos painéis, caso contrário pode levar a perturbações em direções erradas. Também o intervalo de tempo a que a tensão de referência é atualizada precisa de ser grande o suficiente para permitir que o conversor atinja o regime permanente antes de ser introduzida uma nova perturbação [11].

O controlo do conversor dos painéis foi implementado através do algoritmo P&O, cujo fluxograma é apresentado na figura 2.7.

## 2.3 Sistema de Armazenamento

O banco de baterias é o sistema de armazenamento de energia de todo o sistema. Desempenha o papel de alimentar a carga caso não haja alimentação por parte do retificador ou por parte dos painéis fotovoltaicos assegurando a continuidade energética e melhorando a fiabilidade do sistema.

O tipo de baterias de Níquel-Cádmio (NiCd) implica uma manutenção reduzida após a instalação devido à sua reduzida densidade energética e elevado tempo de vida útil. Cada

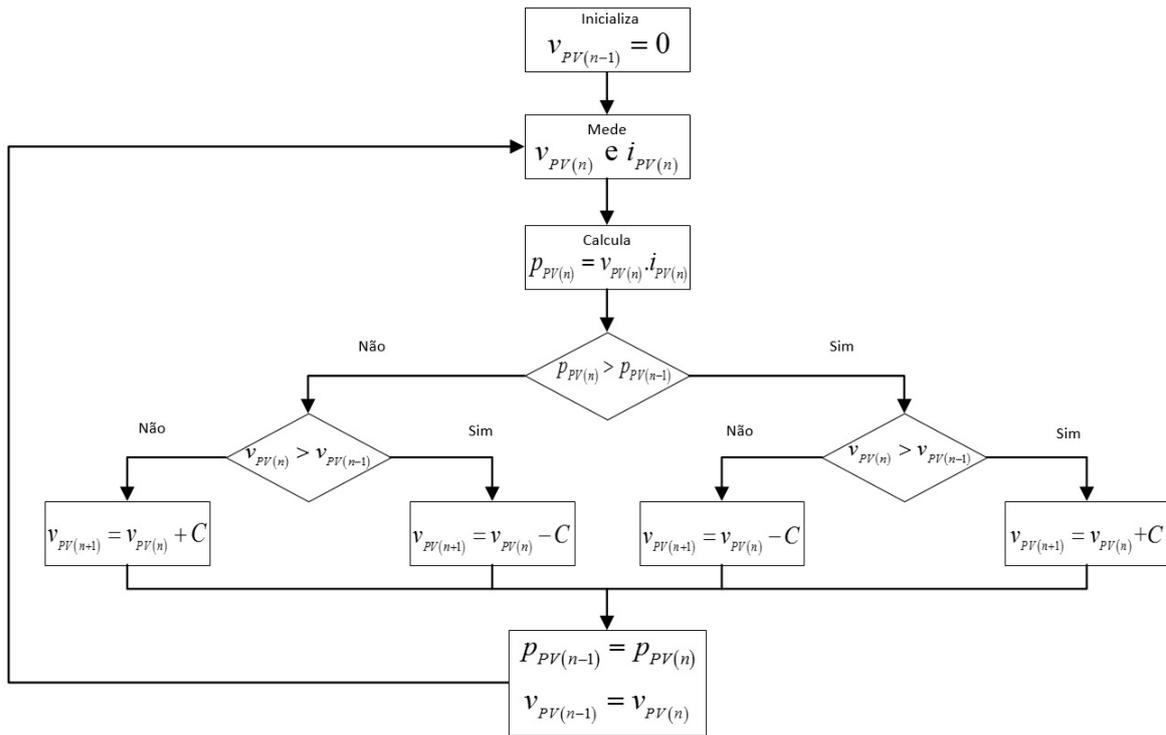


Figura 2.7: Fluxograma do algoritmo P&O. Fonte: [11].

célula de bateria de NiCd disponibiliza 1.2V na sua saída, desde o instante em que é utilizada até perto do fim da sua descarga. Na tabela 2.1 são apresentados dados relativos a este tipo de baterias.

Tabela 2.1: Características dos elementos do banco de baterias. Fonte: [12].

Característica	Requisito	
	Armário Baterias 200Ah	Armário Baterias 100Ah
elétrodos	Níquel-Cádmio (Ni/Cd)	Níquel-Cádmio (Ni/Cd)
eletrólito	Alcalino: KOH (hidróxido de potássio)	Alcalino: KOH
tensão nominal (conjunto) <sup>2)</sup>	110 Vcc	110 Vcc
tensão nominal elemento	1,2 Vcc	1,2 Vcc
capacidade	200 Ah	100 Ah
vida útil	≥ 20 anos	≥ 20 anos
tipo de descarga	Lenta (L)	Lenta (L)

### 2.3.1 Aspectos relativos ao carregamento de baterias de NiCd

Relativamente aos aspetos de carregamento das baterias de NiCd, o seu tempo de carregamento depende de diversos fatores, como o estado de carga, o estado de conservação, taxa de carregamento, entre outros. As baterias de NiCd são carregadas com corrente constante, ao contrário das baterias de Pb-ácido. A partir de um determinado estado de

carga, o carregamento efetua-se em tensão constante.

A uma taxa de carregamento de 1C, uma bateria de NiCd totalmente descarregada leva tipicamente pouco mais de uma hora a carregar. Quando uma bateria está totalmente carregada, o carregador muda para um estado de carga de manutenção. Este estado de manutenção compensa a auto-descarga da bateria.

O rendimento do carregamento de uma bateria NiCd é maior para taxas de carregamento elevadas e quanto mais próximo da capacidade da bateria. A uma taxa de carregamento de 1C, o rendimento de carregamento típico é de cerca de 90%, enquanto a 0.1C o rendimento decai para aproximadamente 70%.

Durante os períodos iniciais de carregamento, o rendimento do carregamento de uma bateria NiCd é próximo de 100%. Quase toda a energia é absorvida e a bateria não sofre um aumento de temperatura, mesmo quando aplicadas correntes elevadas. Os 'fast chargers' tiram proveito deste fenómeno, carregando a bateria até 70% dentro de alguns minutos. Depois, o processo continua a uma taxa mais baixa até que a bateria esteja completamente carregada. Após os 70%, a bateria vai perdendo gradualmente a capacidade de aceitar carga e a pressão e a temperatura aumentam.

Na figura 2.8 é apresentada a relação entre a tensão, pressão e temperatura da célula de NiCd durante o carregamento. A partir dos 70%, a eficiência de carregamento decresce e a temperatura e a pressão aumenta rapidamente.

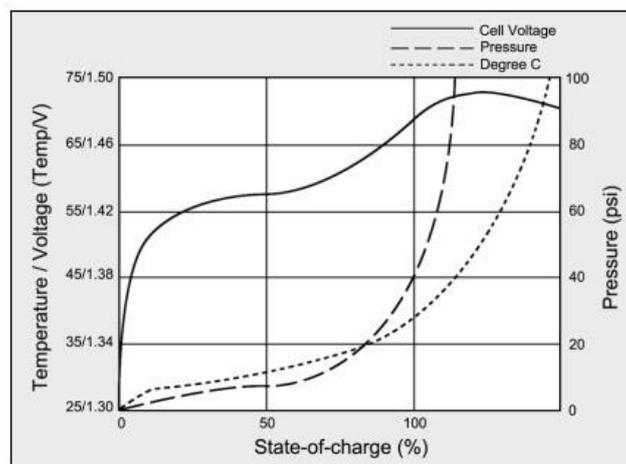


Figura 2.8: Características do carregamento de células de NiCd. Fonte: [13].

Outro aspeto importante relativo ao carregamento de baterias NiCd, é o facto de impulsos de descarga intercalados com os impulsos de carregamento melhorarem a capacidade de receção de carga. Normalmente designado por "reverse load", este método resulta num melhor desempenho da bateria e no aumento da sua vida útil.

### 2.3.2 Aspectos relativos à descarga de baterias de NiCd

De modo a estimar a capacidade da bateria com um teste de descarga, deve-se aplicar uma taxa de descarga  $C$  próxima do valor a que a bateria estará sujeita em condições de operação reais. A tensão típica no fim da descarga para baterias de NiCd é cerca de 1V por cada célula. Neste nível de tensão, cerca de 99% da energia já foi gasta e se a descarga continuar a tensão começa a cair rapidamente. A descarga após atingir a tensão de 'cut-off' deve ser evitada, especialmente sob correntes elevadas.

Quando se dá o 'cut-off' e a se a descarga continuar além do ponto de interrupção, ocorre a reversão de célula, ou seja, ocorre uma tensão negativa que vai originar a inversão da polaridade dos elétrodos da bateria, aumentando a pressão e temperatura das células, e resultando num curto circuito que vai danificar o banco de baterias.

A figura 2.9 reflete o tempo de descarga de uma bateria de NiCd com diferentes taxas de descarga e o andamento da tensão com o decorrer do tempo para as diferentes taxas.

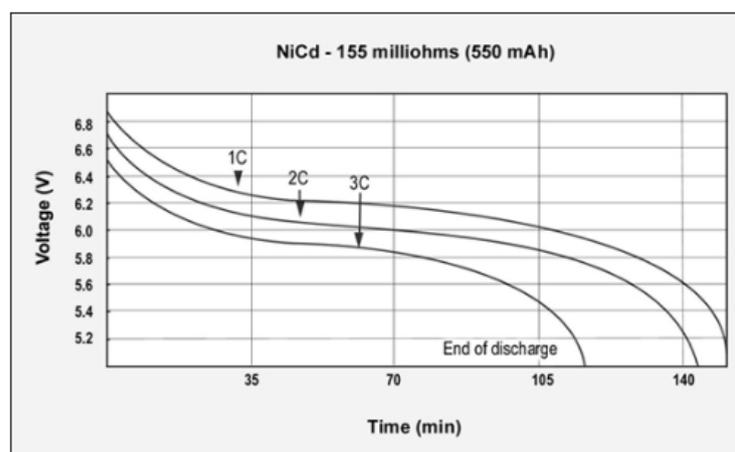


Figura 2.9: Características do descarregamento de células de NiCd. Fonte: [14].

Neste sistema em particular, o barramento DC e o banco de baterias estão interligados através de um conversor DC-DC bidirecional composto por dois MOSFETs e uma bobina que permite o fluxo de potência das baterias para o barramento DC e do barramento DC para as baterias. Quando o banco de baterias fornece energia, o pressuposto é manter a tensão no barramento constante, alimentando a carga ou em caso de circuito aberto manter o nível de tensão constante. Quando o banco de baterias armazena energia são impostos os modos de controlo com corrente constante e com tensão constante dependendo do estado de carga (SOC) das baterias.

O conversor das baterias tem o objetivo de manter o carregamento ou o descarregamento do banco de baterias através do comando de carga ou descarga enviado pelo controlador

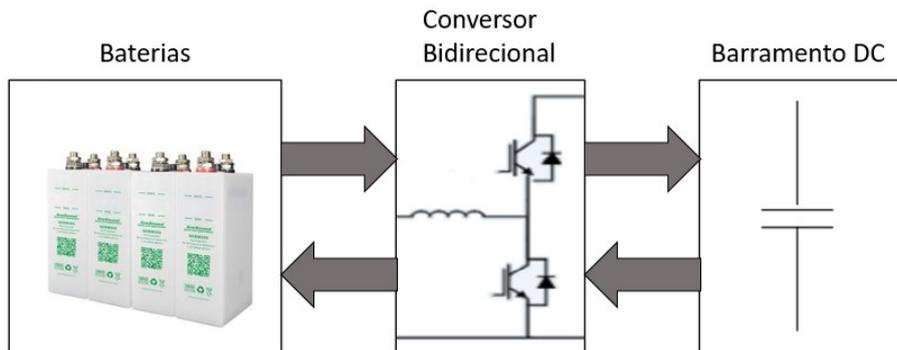


Figura 2.10: Principais componentes do sistema de armazenamento.

aplicado aos semicondutores de potência, que podem ser GTO's, MOSFET's ou IGBT's, funcionando o conversor das baterias como *Buck* ou *Boost* [15].

### 2.3.3 Funcionamento do conversor dos baterias

O conversor das baterias é um conversor híbrido buck-boost em meia ponte em que os interruptores semicondutores utilizados na simulação foram MOSFET's identificados por Q1, Q2 e Q3. A escolha desta topologia de conversor acontece devido ao facto de ser a topologia mais simples e conseqüentemente de custos mais reduzidos para a implementação do sistema pretendido, carecendo de isolamento galvânico. O esquema elétrico do conversor bidirecional é apresentado na figura 2.11 e consiste nos dois semicondutores em meia ponte referidos anteriormente, por um filtro LC e um semicondutor Q1 necessário para interromper o fluxo de energia, que fazem a interligação barramento DC - baterias.

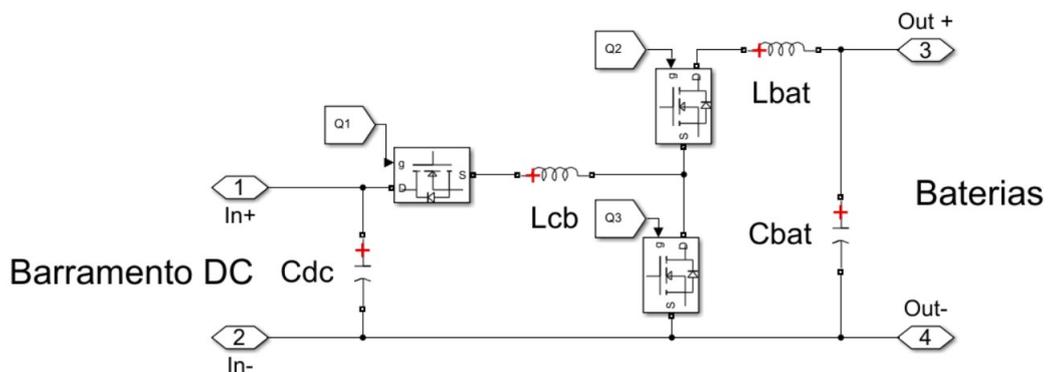


Figura 2.11: Esquema elétrico do conversor bidirecional DC-DC. Fonte: [16].

Considerando o modelo do conversor de potência bidirecional DC-DC, obtêm-se dois modos de operação distintos:

## Modo de operação Buck

Neste modo de operação, a energia flui no sentido baterias - barramento DC, pois apesar da tensão nominal das baterias ser igual ao barramento DC, quando o estado de carga das baterias é elevado a tensão aos terminais das baterias é superior aos 110 V pretendidos no barramento DC. O interruptor Q1 é controlado através de um sinal de controlo PWM ( $u_1=1$ ), o interruptor Q2 é controlado através de um sinal de controlo PWM ( $u_2=[0,1]$ ) enquanto o interruptor Q3 se mantém aberto ( $u_3 = 0$ ).

Nesta situação, o esquema elétrico está representado na figura 2.12 e a corrente da bobina  $i_{Lcb}$  assume valores negativos, figura 2.14a.

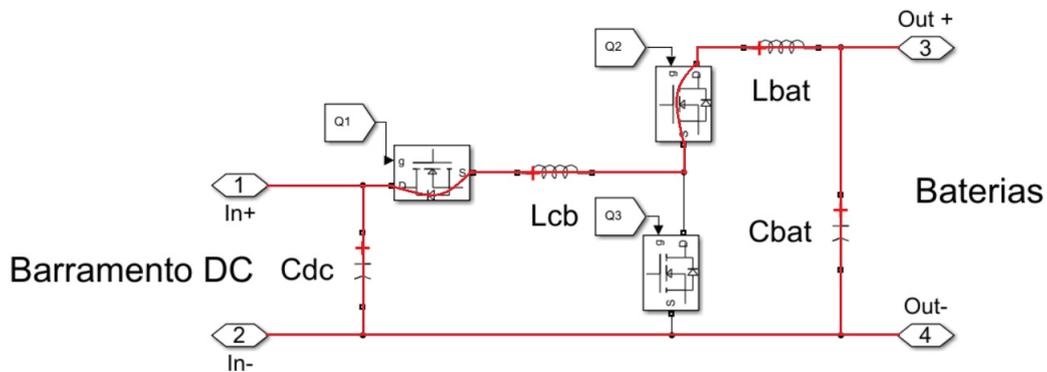


Figura 2.12: Esquema elétrico do conversor bidirecional DC-DC em modo de operação Buck.

Este modo de operação tem por objetivo controlar a tensão no barramento DC quando se dá a descarga do banco de baterias garantindo a estabilização do nível de tensão no barramento e em caso de necessidade fornecer energia a cargas que se encontrem ligadas.

## Modo de operação Boost

Neste modo de operação, a energia flui no sentido barramento DC - baterias com o objetivo de proceder ao seu carregamento, elevando a tensão disponibilizada no barramento DC até à tensão máxima suportada pelas baterias. O interruptor Q1 é controlado através de um sinal de controlo PWM ( $u_1 = 1$ ), o interruptor Q2 mantém-se aberto ( $u_2 = 0$ ), enquanto o interruptor Q3 é controlado através de um sinal de controlo PWM ( $u_3 = [0,1]$ ).

Nesta situação, o esquema elétrico está representado na figura 2.13 e a corrente da bobina  $i_{Lcb}$  assume valores positivos, figura 2.14b.

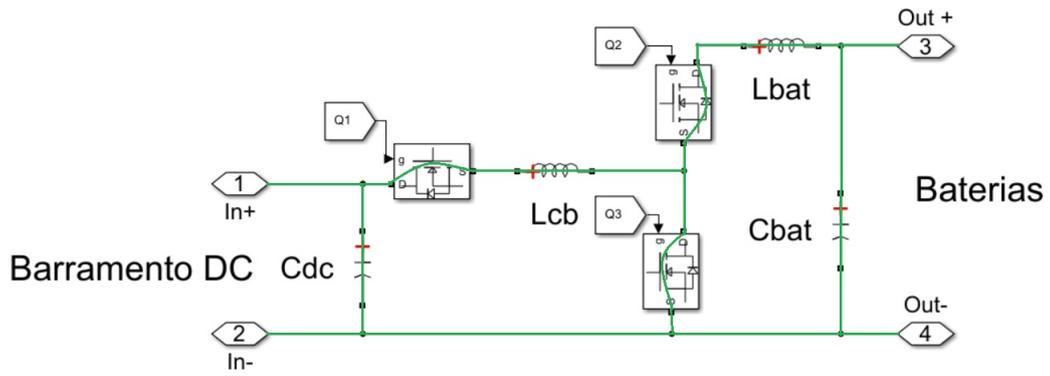


Figura 2.13: Esquema elétrico do conversor bidirecional DC-DC em modo de operação Boost.

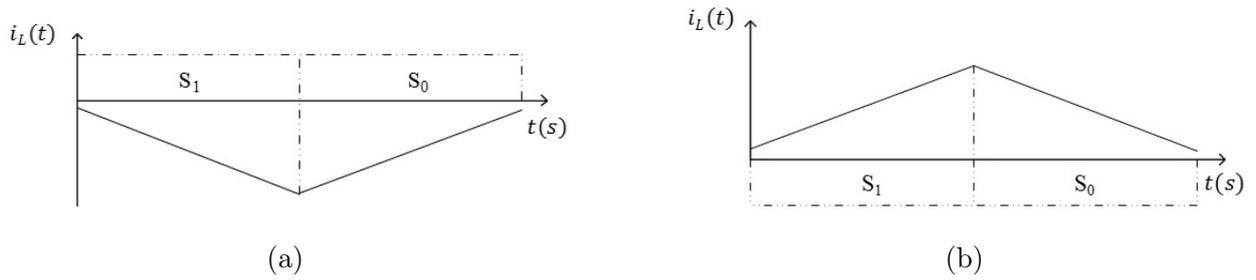


Figura 2.14: Corrente na bobina Lcb: (a) Funcionamento como *Buck*. (b) Funcionamento como *Boost*.

# 3 Dimensionamento dos Conversores de Potência

Neste capítulo são apresentados os cálculos efetuados para o dimensionamento dos conversores DC-DC que fazem a interligação entre painéis fotovoltaicos e o barramento DC e a interligação das baterias com o barramento DC, recorrendo às fórmulas apresentadas no Apêndice B.

## 3.1 Dimensionamento do conversor dos painéis

O conversor dos painéis trata-se de um conversor *Buck* em que o interruptor de potência é controlado por um *duty-cycle* (D) imposto pelo algoritmo P&O. No dimensionamento da bobina assumiu-se que a frequência de comutação é de 1 kHz ( $T_s = 1/f$ ) e a variação máxima da corrente  $\Delta i_L$  na bobina de 10% da corrente máxima que os painéis podem fornecer (10 A).

Começando por determinar o duty-cycle D obtido através da equação B.1. Sendo necessária a tensão dos painéis  $V_{PV}$ , através do gráfico 2.4b) para o menor valor de irradiância, obtém-se uma tensão no MPP de 134 V. Assumindo a tensão  $V_{DC}$  igual a 110 V.

$$D = \frac{110}{134} = 0.82 \quad (3.1)$$

Assim, determinando o valor da bobina do conversor dos painéis fotovoltaicos:

$$L_{cp} = \frac{(1 - 0.82) * 110 * 1 * 10^{-3}}{1} = 19.8mH \quad (3.2)$$

## 3.2 Dimensionamento do conversor das baterias

O conversor das baterias trata-se de um conversor bidirecional em meia ponte que funciona ora como *Buck* ora como *Boost*.

Admitindo que a frequência de comutação é de 1 kHz, uma variação máxima da corrente  $\Delta i_L$  na bobina de 10% da corrente nominal de descarga (20 A), variação máxima da tensão do barramento DC  $\Delta V_{DC}$  de 10% e uma variação máxima da tensão nas baterias  $\Delta V_{Bat}$  de 1 V.

Começando pelo funcionamento como *Buck* em que o fluxo de potência acontece no sentido baterias - barramento, em que as baterias atingem uma tensão máxima de 126 V:

$$D = \frac{110}{126} = 0.87 \quad (3.3)$$

Assim, determinando o valor da bobina do conversor  $L_{cb}$  e do condensador do barramento DC:

$$L_{cb} = \frac{(1 - 0.87) * 110 * 1 * 10^{-3}}{2} = 7.2mH \quad (3.4)$$

$$C_{dc} = \frac{(1 - 0.87) * 110 * (1 * 10^{-3})^2}{11 * 8 * 7.2 * 10^{-3}} = 22.6\mu F \quad (3.5)$$

Para o funcionamento do conversor como *Boost* em que o fluxo de potência acontece no sentido barramento - baterias:

$$D = 1 - \frac{110}{126} = 0.13 \quad (3.6)$$

Assim, determinando o valor da bobina do conversor  $L_{cb}$ , da bobina e do condensador do filtro passa baixo aos terminais do sistema de armazenamento:

$$L_{cb} = \frac{0.13 * 110 * 1 * 10^{-3}}{2} = 7.2mH \quad (3.7)$$

$$C_{bat} = \frac{0.13 * 20 * 1 * 10^{-3}}{1} = 2.6mF \quad (3.8)$$

$$L_{bat} = \frac{1}{(2\pi * 1000)^2 * 2.6 * 10^{-3}} = 9.4\mu H \quad (3.9)$$

# 4 Análise parcial aos componentes do sistema

Com o objetivo de estudar e simular o comportamento dos constituintes do sistema, tendo em conta os modelos analisados anteriormente, foram realizadas simulações em *Matlab/Simulink v2020b* que são apresentadas neste capítulo. Em análise foram estudados os componentes que constituem o sistema de forma isolada.

## 4.1 Módulo retificador AEG

O modelo utilizado nesta dissertação para simular o comportamento do módulo retificador AEG PM120-15 tinha necessidade de ser um sistema que, de modo a ir de encontro às saídas do componente real, fornecesse 2000 W de potência limitada nesse valor e capaz de manter fixa a tensão nos 110 V no barramento DC. Para isso, foi utilizado o script disponibilizado na página *Mathworks* referente a um conversor PWM de três níveis AC/DC, representado na figura 4.1 com as devidas alterações aos parâmetros de controlo e referência de tensão para o sistema pretendido [17].

No conjunto de resultados obtidos, figura 4.2, existe uma ligeira variação de tensão no instante 1 s em que o contactor (breaker1) presente na figura 4.1 fecha ligando uma carga de 2000 W no barramento DC, ainda dentro dos limites admissíveis da variação de tensão do módulo retificador.

Quando ocorre uma falha de energia ao nível da rede elétrica, o retificador AEG deve ser o único componente no sistema a ser afetado, ficando a gestão do barramento DC a cargo do sistema de armazenamento, responsável por mantê-lo estável.

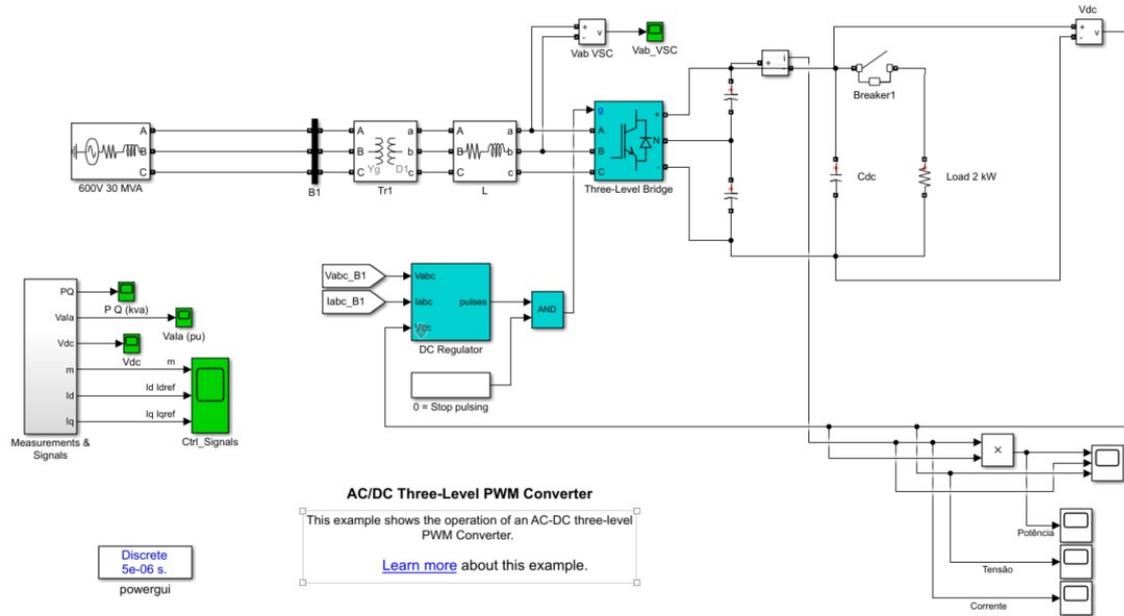


Figura 4.1: Esquema da simulação do módulo retificador AEG (Conversor AC-DC PWM de três níveis).

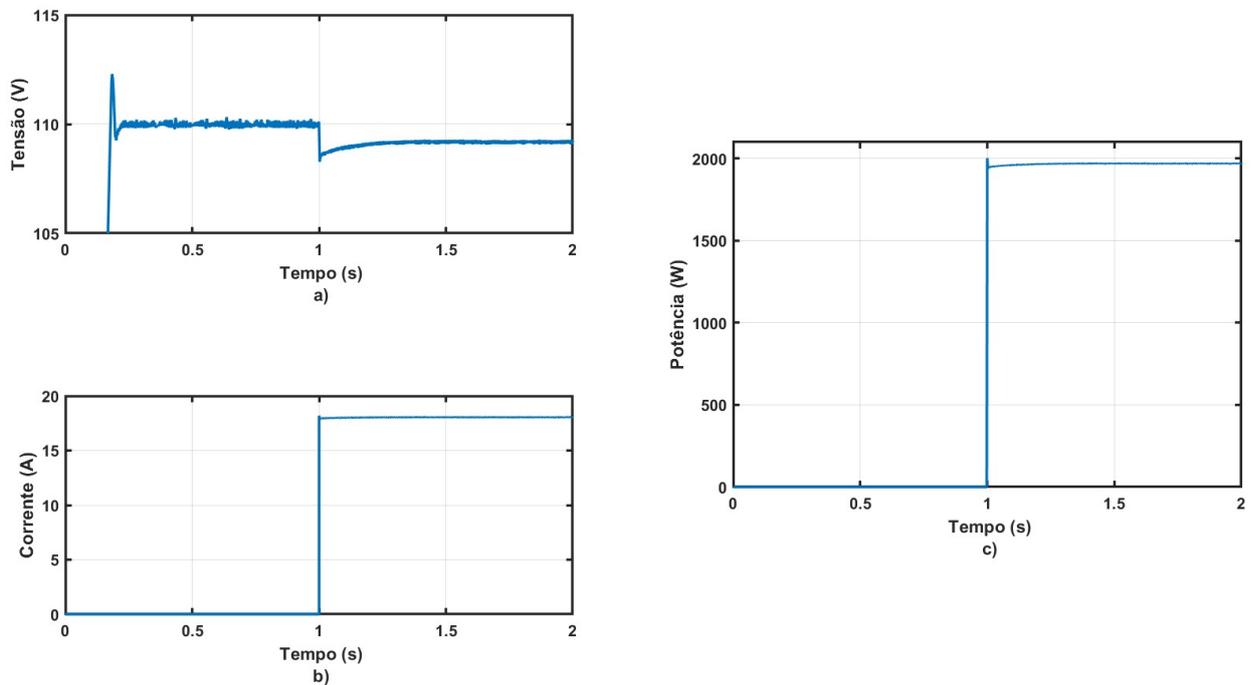


Figura 4.2: Dinâmica do módulo retificador em circuito aberto até ao instante 1 s e com carga de 2000 W após 1 s de tempo de simulação. (a) Tensão no barramento DC. (b) Corrente na carga. (c) Potência da Carga.

## 4.2 Sistema Solar Fotovoltaico

O modelo do sistema solar fotovoltaico é apresentado na figura 4.3. Sabendo as características dos painéis, nomeadamente as curvas V-I para diferentes condições de irradiância e temperatura, mencionadas na secção 2.2 figura 2.4 e figura 2.5, projetou-se o conversor dos painéis, tendo em conta o objetivo de obter uma tensão de 110 V no barramento DC.

Considerando uma irradiância mínima de  $100 \text{ W/m}^2$  e variável no tempo, cuja tensão no MPP é de 134 V, foi utilizado um conversor redutor (*buck*). Por forma a garantir a operação do conversor no modo de condução contínuo, a bobina foi dimensionada para uma frequência de comutação de 1 kHz, no ponto em que o *duty-cycle* do conversor deve ser menor, isto é, quando a irradiância atinge os  $1000 \text{ W/m}^2$ .

De forma a implementar o algoritmo P&O referido na secção 2.2, foi utilizado um bloco *matlab function* cujo código é apresentado no Apêndice A.

As fórmulas utilizadas no dimensionamento da bobina e do condensador estão indicadas no Apêndice B.

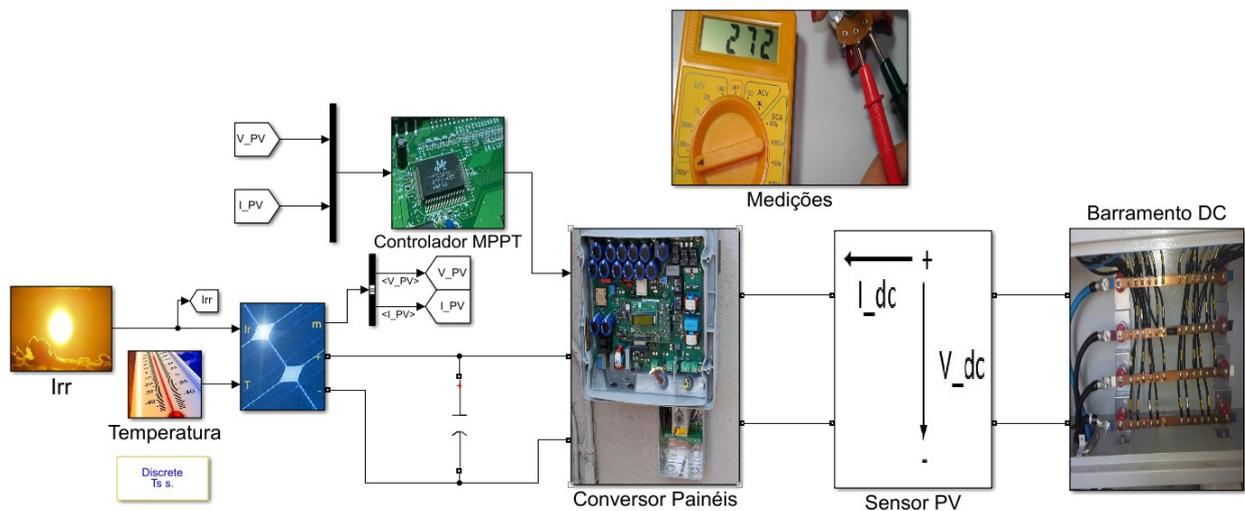


Figura 4.3: Esquema do sistema solar fotovoltaico.

Perante alterações nos parâmetros de entrada do sistema fotovoltaico, nomeadamente da irradiância, a tensão e a corrente extraídas pelos painéis fotovoltaicos sofrem alterações devido às perturbações impostas pelo algoritmo P&O do MPPT, resultando numa proporcional variação da potência extraída do sistema solar fotovoltaico. De acordo com o critério do consumidor, a potência no gráfico 4.4a) assume valores negativos visto que os painéis se consideram uma fonte que fornece energia. Nos resultados obtidos para a dinâmica do sistema

solar fotovoltaico presentes na figura 4.4 a potência extraída pelos painéis é aproximadamente igual à potência média de referência obtida nas curvas V-P para os diferentes valores de irradiância.

Com base nas curvas V-I e V-P presentes na figura 2.4, é de notar que a tensão na saída dos painéis assume um valor praticamente constante ao passo que a corrente varia consoante a variação da irradiância e admitindo um valor constante de temperatura nesta situação.

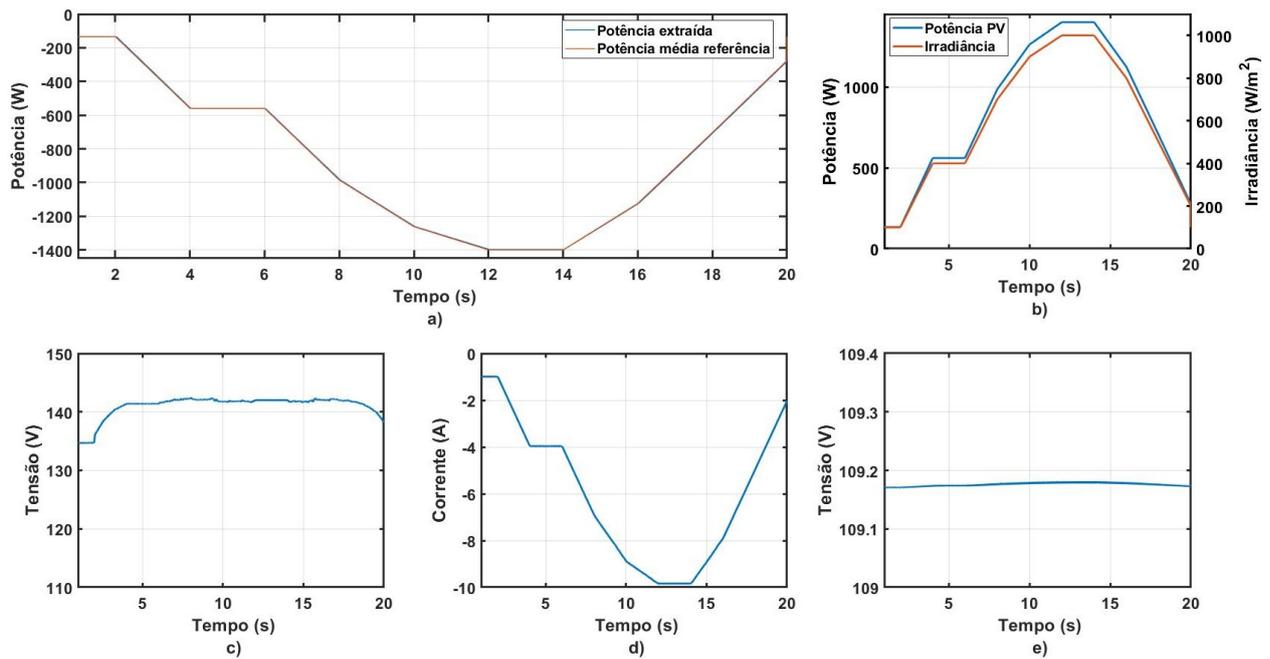


Figura 4.4: Dinâmica do sistema solar fotovoltaico: (a) Comparação entre o valor médio de potência à saída dos painéis e a potência média de referência. (b) Comparação entre a irradiância solar e a potência extraída. (c) Tensão à saída dos painéis. (d) Corrente à saída dos painéis. (e) Tensão do barramento DC.

### 4.3 Sistema de armazenamento

O sistema de armazenamento é estabelecido como sendo um banco de baterias, que fazem a interligação com o barramento DC através de um conversor bidirecional explicado na secção 2.3.3. O modelo foi desenvolvido utilizando baterias de tensão nominal de 110 V, alimentando cargas variáveis quando se encontra a descarregar, ou seja, funcionando como *Buck*. Numa segunda análise, com uma bateria ligada ao barramento DC simula a energia proveniente dos painéis fotovoltaicos e do módulo retificador AEG, ou seja funcionando o conversor como *Boost*. Para ambos os casos os parâmetros escolhidos e de dimensionamento

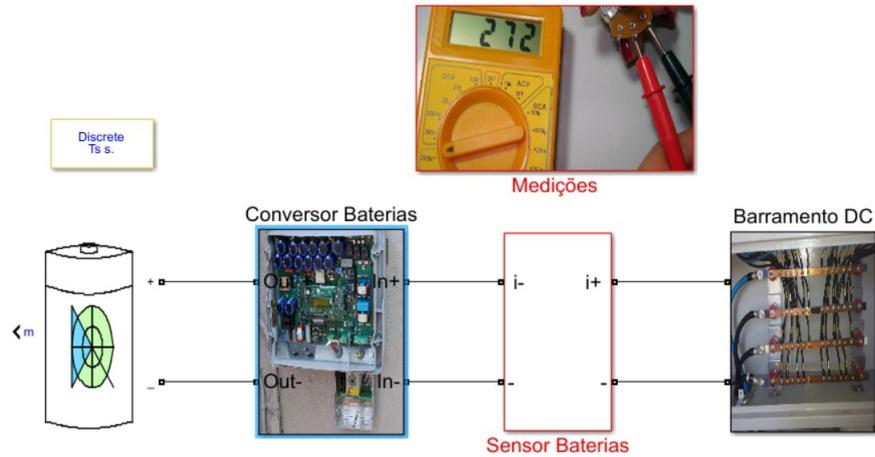


Figura 4.5: Esquema do sistema de armazenamento.

dos elementos passivos como as bobinas e o condensador, foram dimensionados de modo a garantir a condução contínua.

De forma a controlar a energia disponibilizada pelas baterias ao barramento DC, implementou-se em código *Matlab* através de uma *Matlab function* do *Simulink* uma malha de controle de tensão para o funcionamento do conversor em modo *Buck*, tendo como referência a tensão requerida no barramento de 110 V, e disponibilizando a energia necessária. Na figura 4.6 são apresentados os resultados da evolução da tensão no barramento DC, inicialmente em aberto e posteriormente alimentando cargas de 2000 W, 1500 W e 1000 W.

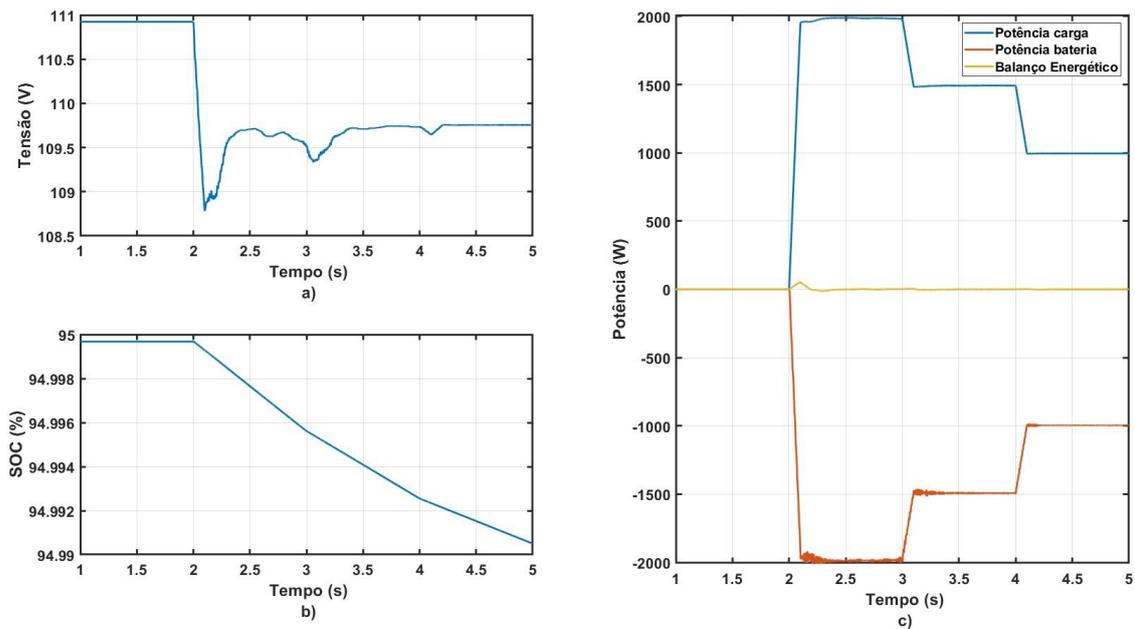


Figura 4.6: Dinâmica do sistema de armazenamento em operação em *Buck*: (a) Tensão no barramento DC. (b) Estado de carga das baterias. (c) Balanço energético do sistema.

Uma vez que o conversor se encontra em modo de operação *Buck*, as baterias fornecem energia para alimentar a carga, resultando num decréscimo do SOC (gráfico 4.6b)) e na potência apresentada no gráfico 4.6c) a vermelho com valores negativos, de acordo com o critério do consumidor.

Na figura 4.7 está representada a dinâmica do sistema de armazenamento quando o conversor das baterias funciona em modo *Boost*. A corrente de referência utilizada no carregamento foi de 20 A até ao instante  $t = 2$  s, de 15 A de  $t = 2$  s até  $t = 3$  s, de 10 A de  $t = 3$  s até  $t = 4$  s e de 5 A de  $t = 4$  s até ao fim da simulação. A corrente nominal das baterias é de 20 A, em que para as baterias em estudo de 100 Ah equivale uma taxa de carregamento a 0.2C, em corrente constante até ao instante em que as baterias atingem 98% do seu estado de carga. A partir desse instante o controlo aplicado é um controlo de tensão impondo um *duty-cycle* fixo obtido através da relação entre a tensão do barramento DC e a tensão máxima das baterias.

O SOC das baterias representado no gráfico 4.7b) aumenta com taxas de crescimento diferentes, resultantes das alterações da corrente de referência de carregamento.

No gráfico 4.7c) toda a potência fornecida pelo barramento é enviada para a bateria, daí o traçado a azul para a potência imposta pelo barramento apresentar valores negativos, segundo o critério do consumidor, que variam com a alteração da corrente de referência de carregamento.

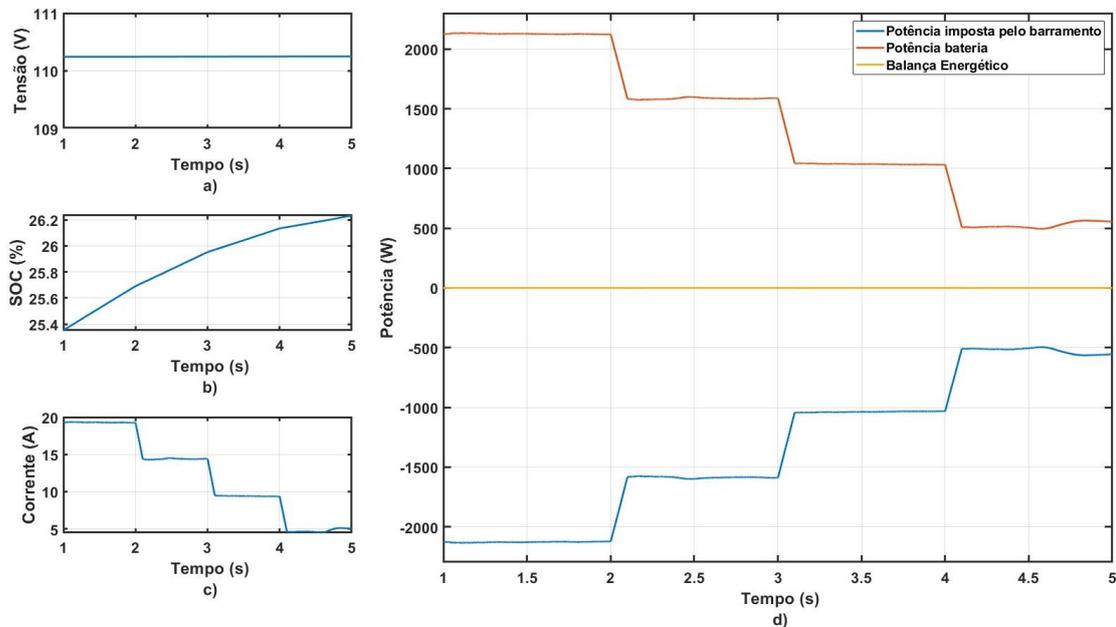


Figura 4.7: Dinâmica do sistema de armazenamento em operação em *Boost*: (a) Tensão no barramento DC. (b) Estado de carga das baterias. (c) Corrente de carregamento. (d) Balanço energético do sistema.

# 5 Análise global dos sistemas interligados

Nas secções anteriores analisaram-se os comportamentos de cada constituinte do sistema individualmente, aplicando e testando os métodos de controlo para cada tipo de conversor. Nesta secção, com vista a analisar o funcionamento do sistema completo, ligando cada constituinte no ponto comum do barramento DC, analisou-se o fluxo de potência do sistema global apresentado na figura 5.1.

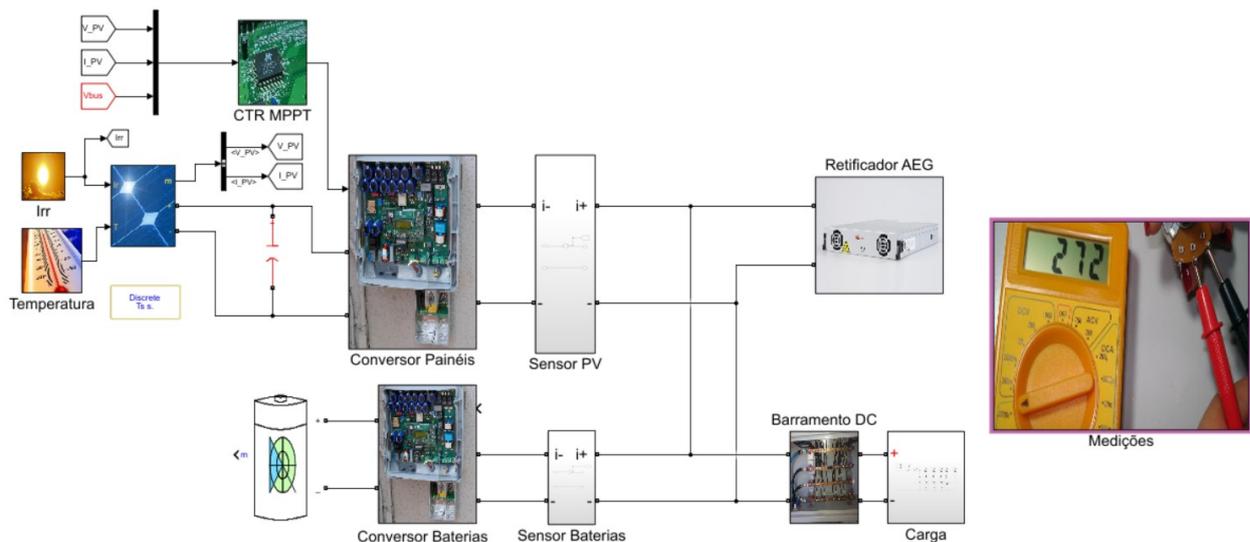


Figura 5.1: Esquema do sistema global.

## 5.1 Instrumentação do sistema global

Os controladores associados aos conversores DC-DC em utilização necessitam de informação proveniente da aquisição de valores obtidos com recurso a sensores.

Para o conversor dos painéis, como o algoritmo P&O provoca as perturbações na tensão e na corrente dos painéis são necessários dois sensores para o algoritmo estar funcional.

Adicionou-se também a leitura proveniente do sensor de tensão do barramento DC de modo a poder limitar o MPPT.

- Sensor de tensão na saída dos painéis.
- Sensor de corrente à saída dos painéis.
- Sensor de tensão do barramento DC.

Para o conversor das baterias, uma vez que este controlador impõe controlo de carregamento em corrente constante e em tensão constante e controlo de descarregamento com referência de tensão do barramento DC, e sendo a alternância entre os modos do conversor estabelecida pelo estado de carga das baterias, foram utilizados três sensores:

- Sensor de tensão do barramento DC.
- Sensor de estimador do estado de carga das baterias.
- Sensor de corrente na bobina  $L_{cb}$  do conversor.

De modo a ter informação sobre o estado de operação do sistema e analisar a alimentação da carga inserida no barramento DC são necessários dois sensores:

- Sensor de corrente fornecida à carga.
- Sensor de tensão do barramento DC.

Com a instrumentação do sistema selecionada, não serão necessários três sensores de tensão diferentes para o barramento DC, um único sensor é responsável pelas leituras para os dois controladores e para disponibilizar a informação do sistema.

Deste ponto em diante, de acordo com o critério do consumidor, estabelece-se que valores de potência negativos significam potência fornecida por uma fonte e potências de valores positivos significam potência recebida ou pela carga ou pelas baterias.

## 5.2 Cenários em estudo

Com a integração dos painéis fotovoltaicos, o fluxo de potência é controlado de modo a satisfazer as condições de operação das cargas e minimizar o consumo de energia proveniente da rede, ou seja, do módulo retificador AEG. Dado que, este sistema é aplicado a cargas de

emergência do tipo relés de controlo de subestações e interfaces de comunicação não houve uma necessidade primária de implementar um algoritmo que fizesse a gestão energética de modo a que o carregamento das baterias apenas acontecesse em períodos de tarifa energética da rede mais reduzida, bem como a energia excedente do sistema fosse introduzida na rede através de um inversor DC-AC. Essas abordagens não foram implementadas na dissertação.

Contudo, foi implementado o algoritmo de forma a poder demonstrar os fluxos de potência entre os diferentes sistemas, para os diferentes cenários possíveis que podem ocorrer. Admitindo que as cargas emergentes a alimentar serão interfaces de comunicação ou relés foi admitida uma variação máxima da tensão do barramento DC de -10% a +10%.

## Cenário 1

Considerando como primeiro cenário a analisar representado na figura 5.2, um sistema isolado em que a energia proveniente da rede elétrica não existe e com o objetivo de alimentar uma carga de potência variável. Perante a não existência da carga no barramento DC, a prioridade é carregar as baterias com a potência disponível pelos painéis fotovoltaicos. Contando apenas com o sistema solar fotovoltaico, o sistema alimenta a carga de potência variável e com a potência que produz a mais que a potência da carga, envia o excedente para o carregamento das baterias. Caso o sistema solar fotovoltaico não possua potência suficiente para alimentar a carga, o banco de baterias descarrega de modo a garantir a alimentação da mesma. Na eventualidade de não ser possível alimentar a carga com os dois sistemas, e ocorrendo a redução de tensão no barramento DC, o sistema deve imediatamente desligar para evitar danos nos equipamentos.

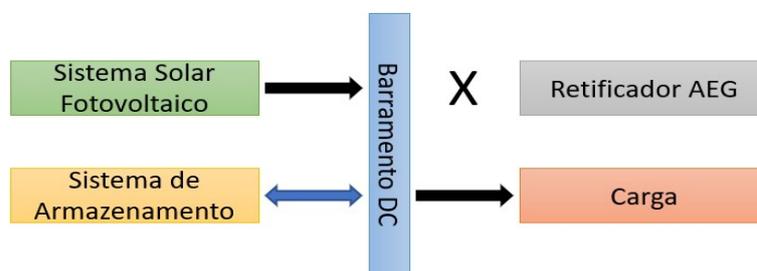


Figura 5.2: Esquema do fluxo de potência para o cenário 1.

## Cenário 2

Num segundo cenário, a análise é feita para o período noturno, ou seja, não há produção de energia através dos painéis fotovoltaicos, e introduzindo o módulo retificador AEG com

2000 W de potência, representado na figura 5.3. De modo semelhante ao cenário 1, perante a não existência da carga ligada no barramento DC a prioridade é carregar as baterias com a máxima corrente nominal destas. Com a ligação da carga, o módulo retificador alimenta a mesma e caso haja excedente de energia e aproveitando a potência total do equipamento é fornecida para carregar as baterias. Para uma carga superior à potência disponibilizada pelo módulo retificador, as baterias compensam, descarregando e fornecendo a energia necessária a manter a alimentação da carga. Para este cenário é também analisada a situação de uma falha de abastecimento da rede elétrica ficando o módulo retificador AEG fora de serviço.

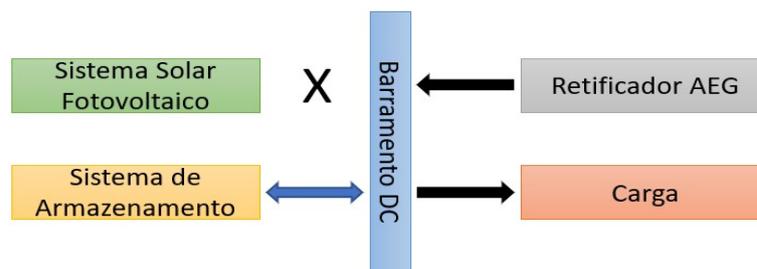


Figura 5.3: Esquema do fluxo de potência para o cenário 2.

### Cenário 3

No terceiro cenário presente na figura 5.4, todos os constituintes do sistema global encontram-se ligados no barramento DC. A gestão de alimentação da carga é feita numa cadeia de prioridades começando pelo sistema solar fotovoltaico, seguido do módulo retificador AEG e por fim o sistema de armazenamento. Esta ordem de prioridades é estabelecida com vista à redução dos custos energéticos comprados à rede elétrica e manter o estado de carga das baterias o mais elevado possível para fazer face a uma possível ocorrência de falha da rede elétrica ou fraca/inexistente irradiância solar.

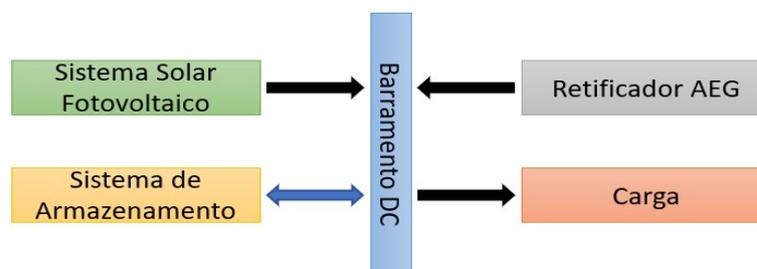


Figura 5.4: Esquema do fluxo de potência para o cenário 3.

## Cenário 4

No quarto cenário, no sistema global a análise é feita quando o estado de carga das baterias é máximo, presente na figura 5.5. Neste cenário a tendência é para que a tensão no barramento aumente, no entanto não pode ultrapassar a variação máxima estabelecida, não excedendo 121 V. Com a alimentação da carga garantida, o módulo retificador e o banco de baterias não podem fornecer mais energia ao barramento. Posto isto, é necessário diminuir o fornecimento de energia pelos painéis fotovoltaicos atuando no controlo do conversor reduzindo o valor do MPPT.

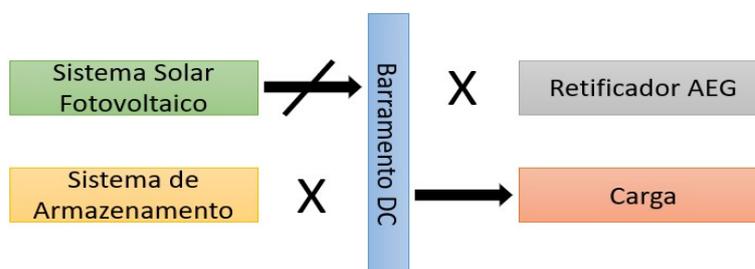


Figura 5.5: Esquema do fluxo de potência para o cenário 4.

## Cenário 5

Por fim, o quinto cenário é relativo ao sistema global na situação em que a potência da carga a alimentar é superior a toda a potência disponível pelos restantes elementos: painéis fotovoltaicos, retificador AEG e baterias. Nesta situação a tensão do barramento vai diminuir e é preciso garantir que não fique à quem de 99 V, limite mínimo para o funcionamento correto do sistema. Quando ocorre a situação, todo o sistema é desligado evitando a deterioração dos equipamentos.

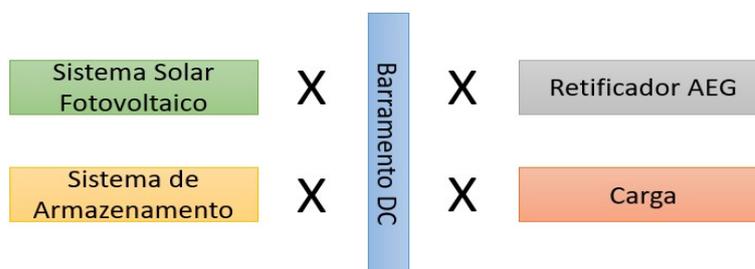


Figura 5.6: Esquema do fluxo de potência para o cenário 5.

## 5.3 Resultados obtidos

Para os cenários anteriormente apresentados, foram testados e simulados de modo a dar resposta às necessidades de cada situação.

### Cenário 1

No cenário 1, para dados de simulação foi utilizada uma carga variável entre 250 W e 2000 W, irradiância solar variável a incidir nos painéis fotovoltaicos, temperatura de operação dos painéis constante e SOC do sistema de armazenamento inicialmente a 45%.

Com base nos resultados obtidos na figura 5.7 concluí-se que nos instantes em que a potência dos painéis fotovoltaicos é superior à potência requerida pela carga, acontece o carregamento das baterias, desde o instante inicial até  $t = 4$  s e desde o instante  $t = 8$  s a  $t = 10$  s, como é possível observar no gráfico 5.7c) em que o SOC das baterias aumenta nesses intervalos de tempo.

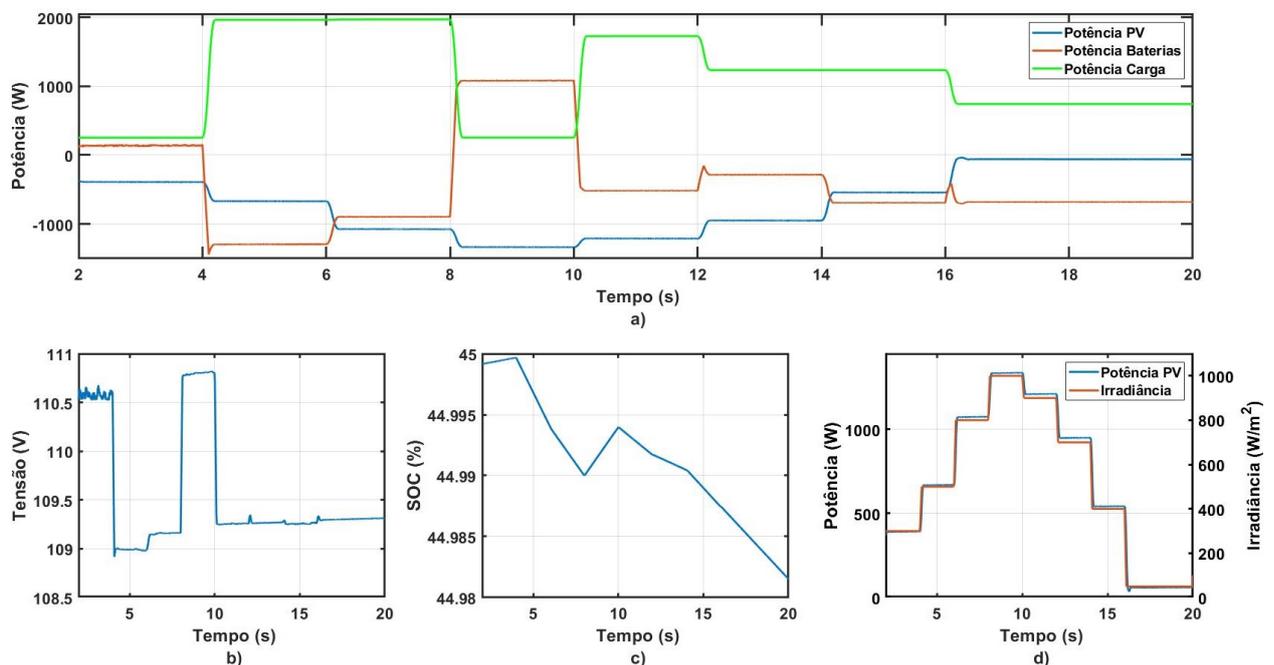


Figura 5.7: Comportamento do sistema isolado para o cenário 1. (a) Balanço energético do sistema. (b) Tensão no barramento DC. (c) SOC das baterias. (d) Comparação da potência extraída pelos painéis fotovoltaicos com a irradiância solar incidente.

No intervalo de tempo entre  $t = 4$  s e  $t = 8$  s e entre  $t = 10$  s até ao fim da simulação, como a potência dos painéis fotovoltaicos não é suficiente para manter a alimentação da carga

estável, as baterias fornecem a potência restante necessária, descarregando com corrente de descarga variável devido à variação da carga e variação também da corrente que os painéis conseguem fornecer. Neste intervalo de tempo, o conversor das baterias, encontra-se a operar em modo *Buck*.

Relativamente à tensão no barramento DC, as oscilações existentes no gráfico 5.7b) são resultantes das alterações da carga variável. No entanto, como se admitiu o barramento poder ter uma oscilação de -10% e +10%, encontra-se a funcionar dentro do intervalo de operação estipulado.

## Cenário 2

No cenário 2, dado que a potência do módulo retificador AEG tem 2000 W de potência, foi preciso ajustar a carga para uma carga de potência variável superior (250 a 2000 W) de modo a conseguir observar o comportamento do sistema.

Analisando o gráfico 5.8a) é possível observar as variações de potência da carga, alimentada pelo módulo retificador e também pelas baterias.

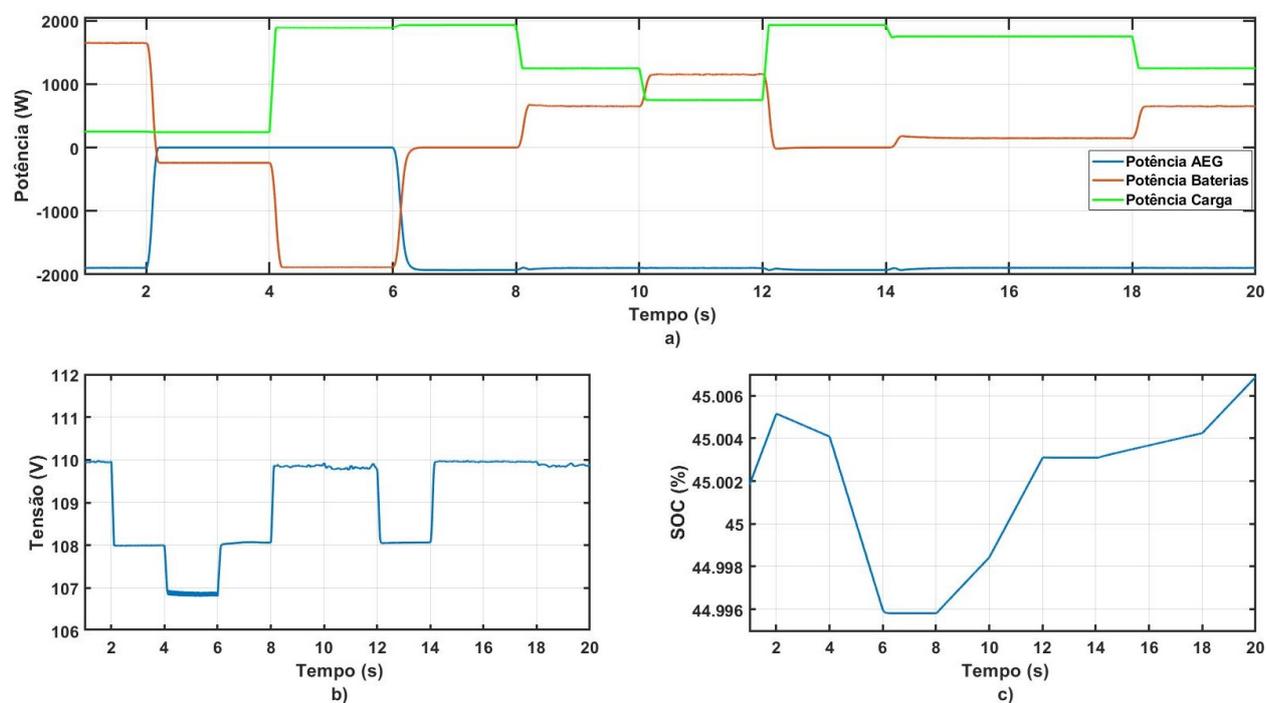


Figura 5.8: Comportamento do sistema para o cenário 2. (a) Balanço energético do sistema. (b) Tensão no barramento DC. (c) SOC das baterias.

Neste cenário foi simulada uma falha na rede elétrica no instante  $t = 2$  s com retorno da mesma em  $t = 6$  s, resultando em potência fornecida pelo retificador igual a 0, ficando a

alimentação da carga imposta pelas baterias. Quando a rede está disponível o ideal é que o módulo retificador forneça sempre os 2000 W com vista ao carregamento das baterias.

Relativamente à tensão no barramento DC, apresentada no gráfico 5.8b), existe uma pequena variação na tensão, nos instantes em que a bateria descarrega, motivada pela mudança no controlo associado ao descarregamento das baterias. Como a variação não ultrapassa os limites estipulados pode-se afirmar que o sistema funciona em operação normal.

Nos instantes  $t = 2$  s a  $t = 6$  s, a potência da carga é superior à potência fornecida pelo AEG, logo as baterias fornecem a potência necessária restante de modo a garantir a alimentação contínua da carga. Este fenómeno é perceptível no gráfico 5.8c) em que é apresentado o SOC das baterias com destaque nos instantes em que decresce, referidos anteriormente.

### Cenário 3

No cenário 3, os componentes estão todos inseridos no sistema global, ou seja, é o produto final pretendido com esta dissertação. Neste cenário de modo a obter resultados que pudessem refletir os diversos modos de controlo foi alterada a carga de modo a ter uma potência variável de 250 W a 5000 W e alterado o SOC do banco de baterias para cerca de 95%. Os valores de irradiância e temperatura dos painéis fotovoltaicos mantiveram-se inalterados, bem como do módulo retificador AEG.

Ao longo do tempo de simulação, visível no gráfico 5.9a), com a variação da potência da carga, ocorrem diversas alterações nas potências fornecidas pelas restantes fontes. Desde o instante inicial até ao instante  $t = 6$  s, o sistema de armazenamento está a receber energia carregando em modo de tensão constante, uma vez que foi definido que a partir dos 95% do seu SOC, ocorria a mudança de modo de corrente constante para tensão constante.

Estabelecendo como ordem de prioridades da alimentação, a carga deve ser alimentada em primeiro lugar através dos painéis fotovoltaicos, seguido do módulo retificador e por fim as baterias, de modo a garantir uma maior autonomia do sistema. Esta gestão é feita através dos controladores de tensão e corrente do módulo retificador e do algoritmo de controlo do conversor das baterias.

No instante  $t = 6$  s ocorreu uma falha na rede elétrica com duração de 4 s, retornando no instante  $t = 10$  s, retirando de serviço o módulo retificador. Nesse intervalo de tempo as baterias começam a descarregar compensando a energia proveniente dos painéis fotovoltaicos garantindo a alimentação estável da carga.

A partir do instante  $t = 10$  s até ao final do tempo de simulação, a rede elétrica retoma

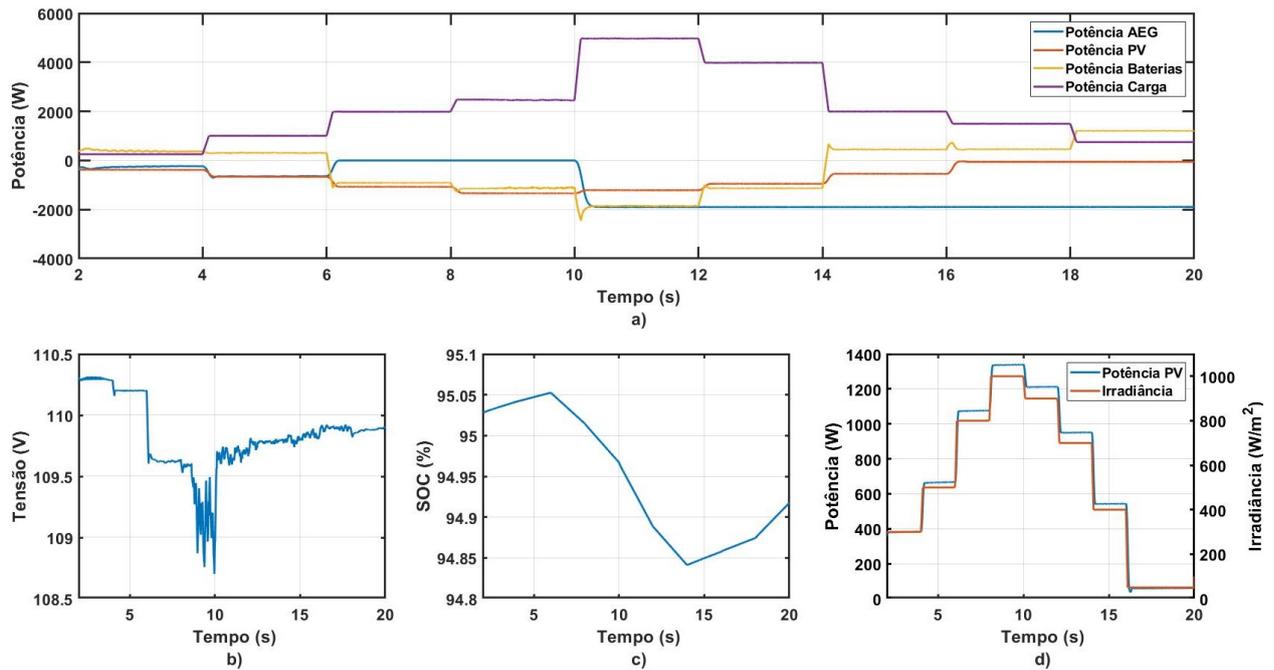


Figura 5.9: Comportamento do sistema para o cenário 3. (a) Balanço energético do sistema. (b) Tensão no barramento DC. (c) SOC das baterias. (d) Comparação entre a potência extraída dos painéis e a irradiância solar.

fazendo com que o módulo retificador fique novamente disponível. No mesmo instante, foi introduzida uma carga de potência muito superior à que pode ser alimentada somente pelo módulo retificador e pelos painéis fotovoltaicos, fazendo com que as baterias descarreguem com corrente superior.

No instante  $t = 14$  s, a carga a alimentar é de 2000 W, os painéis fotovoltaicos não conseguem manter exclusivamente a alimentação da carga, mas com a energia proveniente do módulo retificador fica assegurada a alimentação e ainda é possível proceder ao carregamento das baterias com a energia disponível, carregando em modo de corrente constante, uma vez que o SOC se encontra abaixo do valor estipulado para mudar o controlo.

Após o instante  $t = 16$  s, a produção de energia solar fotovoltaica é nula, ficando assim a alimentação da carga e carregamento das baterias garantidas pelo módulo AEG.

Relativamente à tensão do barramento DC, apresentada no gráfico 5.9b), as oscilações acontecem com as variações da carga e com as mudanças de controlo estabelecidas, nunca ultrapassando os valores limite admitidos de - 10% a +10% e como tal pode-se afirmar que o sistema se encontra em funcionamento normal. Com o aumento da potência da carga variável, foi previsto que a tensão no barramento diminuísse, facto observável na simulação.

O SOC das baterias, apresentada no gráfico 5.9c), varia consoante o gráfico da potência

das baterias. Até ao instante  $t = 6$  s, as baterias carregam em modo de tensão constante com *duty-cycle* fixo. Desde o instante  $t = 6$  s até ao instante  $t = 14$  s, as baterias descarregam com taxas de descarregamento variáveis consoante as necessidades da carga, a carga varia três vezes e são perceptíveis três declives diferentes no SOC nesse período de tempo. A partir do instante  $t = 14$  s e até ao fim do tempo de simulação as baterias carregam no modo de corrente constante, alterando de taxa de carregamento duas vezes consoante a mudança da carga variável, levando ao aumento do SOC.

Relativamente ao gráfico 5.9d) é representada a potência extraída pelos painéis fotovoltaicos perante as variações da irradiância solar incidente.

## Cenário 4

Os resultados obtidos para o sistema inicial sem limitação do *duty-cycle* do conversor dos painéis fotovoltaicos são apresentados na figura 5.10. Acontece que nesta situação, com o SOC das baterias no valor máximo, e a carga a alimentar é uma carga de baixa potência, é necessário diminuir o valor do MPPT de modo que o conversor dos painéis forneça menos potência para que a tensão no barramento não aumente para valores indesejados comprometendo o bom funcionamento da carga.

O algoritmo de MPPT, cujo código implementado está presente no Apêndice A, foi alterado de modo a limitar a potência a fornecer pelos painéis, resultando numa tensão no barramento DC no valor máximo permitido de 121 V, quando as baterias já se encontram no seu estado de carga máximo e o módulo AEG não fornece mais potência ao sistema, apresentados na figura 5.11.

## Cenário 5

No cenário 5, avalia-se a resposta do sistema perante a alimentação de uma carga variável de potência mais elevada (4000 W) do que as fontes, módulo AEG, painéis fotovoltaicos e baterias, podem fornecer. A carga elevada vai provocar uma redução na tensão no barramento DC, e o objetivo é limitar a redução da tensão acima do valor mínimo estipulado de 99 V. Nesta simulação o SOC das baterias encontra-se num valor próximo do mínimo estabelecido para acontecer o *cut-off* das mesmas impedindo que se deteriorem rapidamente com o passar do tempo.

Na análise do gráfico 5.12a) dos fluxos de potência, verifica-se que os painéis fotovoltaicos e o módulo retificador fornecem a máxima potência disponível de modo a manter a alimentação

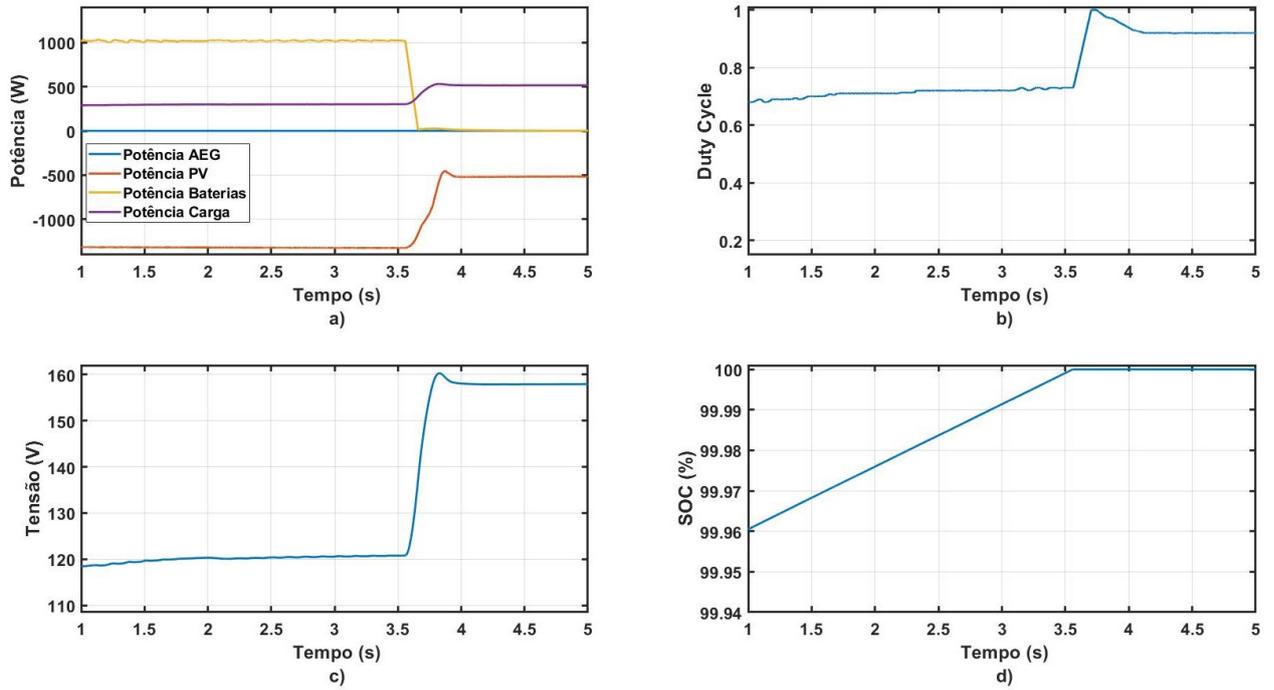


Figura 5.10: Comportamento do sistema para o cenário 4 sem limitação do *duty-cycle*. (a) Balanço energético do sistema. (b) *Duty-Cycle* do MPPT. (c) Tensão no barramento DC. (d) SOC das baterias.

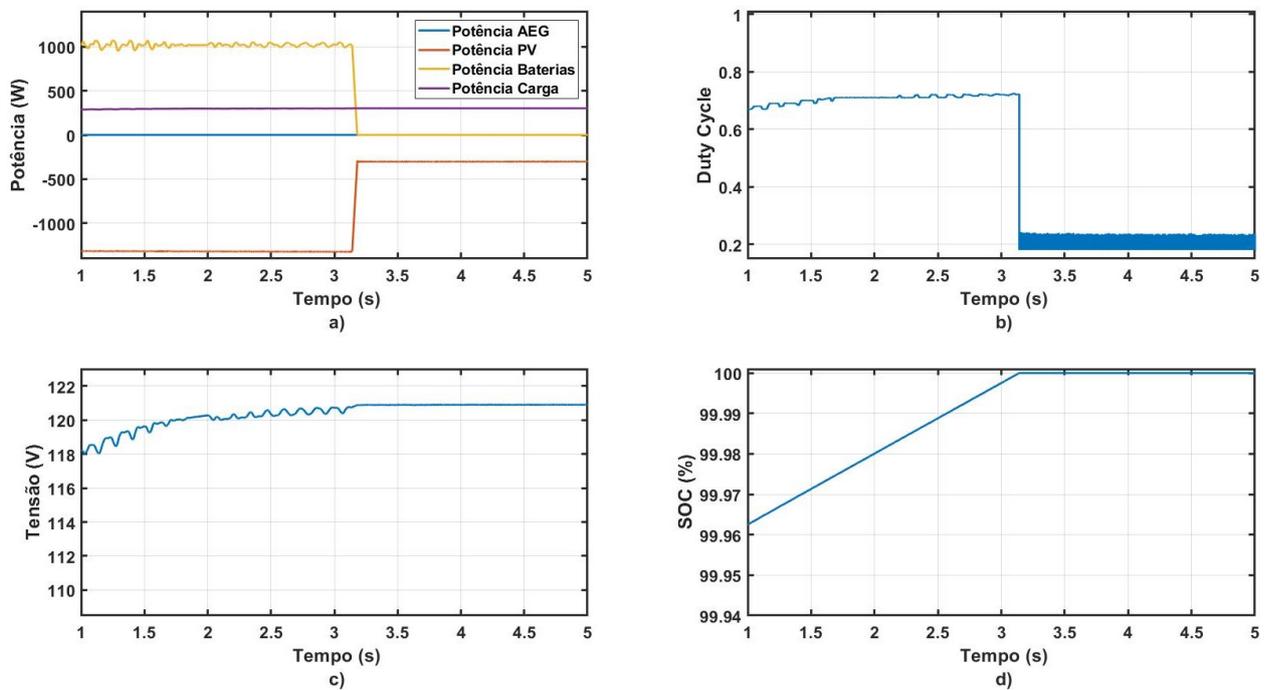


Figura 5.11: Comportamento do sistema para o cenário 4 com limitação do *duty-cycle*. (a) Balanço energético do sistema. (b) *Duty-Cycle* do MPPT. (c) Tensão no barramento DC. (d) SOC das baterias.

da carga estável. As baterias encontram-se no limite mínimo do estado de carga, e por segurança, o controlo do conversor bidirecional retira as mesmas do sistema. A partir desse instante, a carga passa a ser alimentada apenas pelos painéis fotovoltaicos e pelo módulo retificador, com a potência máxima que estes conseguem fornecer. Nos instantes  $t = 2$  s até  $t = 4$  s, admitindo que a soma da potência do módulo retificador e dos painéis é de cerca 2400 W, e sendo a carga de 4000 W, a carga é alimentada apenas com a potência disponível, contribuindo para que a tensão no barramento diminua.

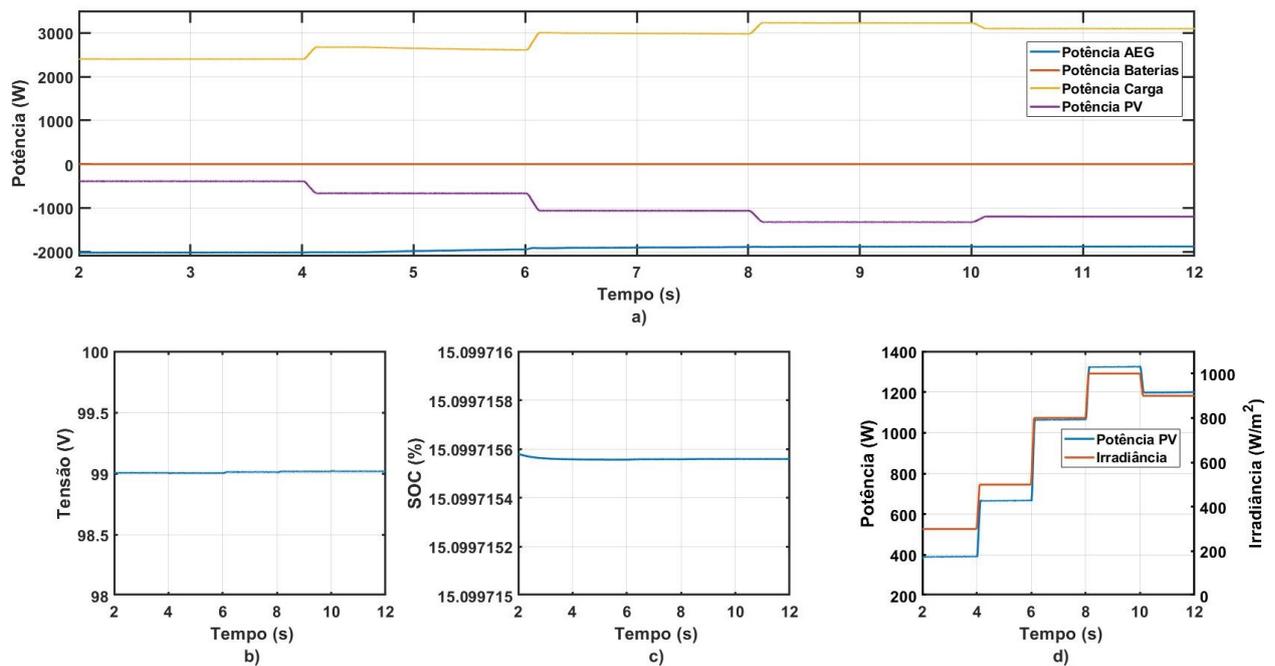


Figura 5.12: Comportamento do sistema para o cenário 5. (a) Balanço energético do sistema. (b) Tensão no barramento DC. (c) SOC das baterias. (d) Comparação da potência extraída dos painéis com a irradiância solar.

Relativamente à tensão do barramento DC, assume valores compreendidos entre o intervalo admissível, decrescendo para os 99 V, quando as baterias são retiradas de serviço e o barramento é mantido pelo módulo retificador. Com a presença do módulo retificador, o barramento mantém-se estável ainda que no limite da sua operação. De modo a fornecer a potência necessária à carga e colocando a tensão em operação mais próxima dos 110 V seria necessário acrescentar uma nova fonte ao sistema capaz de fornecer mais energia.

Como já foi analisado, o SOC das baterias mantém-se no mesmo nível, uma vez que estas foram retiradas de serviço, até ao limite estipulado de 15%, em que por questões de segurança e de modo a não danificar os equipamentos com consequente redução no tempo de vida útil, são retiradas de serviço. A interrupção do fluxo bidirecional acontece ao nível do controlo do

conversor bidirecional, através de código implementado em *Matlab*, presente no Apêndice C.



# 6 Conclusões e Trabalho Futuro

## 6.1 Conclusões

Nesta dissertação começou-se por estudar os sistemas de alimentação em corrente contínua e associando ao objetivo do projeto fez-se um estudo em separado dos elementos que constituem o projeto final de alimentação de cargas emergentes com a introdução de uma nova fonte renovável no sistema existente. A separação permitiu analisar individualmente os constituintes como os painéis fotovoltaicos, o módulo retificador AEG e o sistema de armazenamento de energia. Estudou-se também a extração da máxima potência associada aos painéis fotovoltaicos e os sinais de comando a enviar ao conversor correspondente de forma a funcionar como *Buck*. O estudo também foi feito ao nível dos sinais de comando para o conversor das baterias de modo a ser capaz de ter comportamento bidirecional e controlar o fluxo de potência entre o barramento DC e o banco de baterias. O sistema implementado permitiu analisar estratégias de modo a controlar a tensão no barramento mantendo um valor dentro dos limites admitidos garantindo o bom funcionamento do mesmo.

O módulo retificador AEG prova ser uma fonte de energia robusta, fiável, de fácil utilização e montagem, garantindo uma tensão de referência estável, fornecendo uma potência máxima constante se necessário, ou garantindo apenas a necessidade de alimentação das cargas a alimentar.

O conversor DC-DC dos painéis fotovoltaicos faz a redução da tensão entre os painéis e o barramento DC, extraindo a máxima potência através do algoritmo P&O. Concluiu-se que de acordo com a matriz de painéis, a irradiância solar e a temperatura de operação, as curvas características dos painéis para as quais a potência máxima é extraída é função dessas variáveis. De modo a que o algoritmo P&O não provoque grandes interferências na tensão do barramento, procurou-se escolher uma amplitude de perturbação adequada e em intervalo de tempo de atualização da tensão de referência.

O conversor bidirecional das baterias, responsável por controlar o fluxo de potência do

sistema de armazenamento através de um controlo de corrente ou tensão constantes, efetuando um carregamento a taxa constante, dependendo das fontes que alimentam o barramento. Em descarga, as baterias controlam a tensão no barramento seguindo a tensão de referência de 110 V, fornecendo a energia necessária para alimentar a carga.

Depois de projetados os controladores, a análise ao sistema global implementado em *Matlab/Simulink*, foi feita de forma a estudar a sua dinâmica. Verificou-se que a tensão no barramento se mantém estável próxima da tensão de referência nunca ultrapassando os valores limite admitidos. Nos métodos de controlo as referências para a corrente do conversor bidirecional das baterias quando é armazenada energia e para a tensão quando é fornecida energia são seguidas, obtendo um controlo eficaz do fluxo de potência. A simulação do sistema demonstrou boa dinâmica perante as alterações impostas aos valores de irradiância ou temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos.

O grande desafio nesta dissertação foi de facto, encontrar uma forma de gestão dos fluxos de potência, com a possibilidade de alimentação de cargas através de três fontes distintas ou garantir a alimentação das cargas e carregar as baterias com a energia restante.

## 6.2 Trabalho Futuro

Como sugestões de trabalho futuro de complemento a esta dissertação apresentam-se os seguintes pontos:

- Escolha de uma plataforma de baixo custo com microcontrolador capaz de fazer a gestão de todo o sistema.
- Implementação de um método de estimação do estado de carga das baterias.
- Implementação prática do sistema.
- Implementação de um algoritmo de redução de custos de energia contratada à rede elétrica associada à alimentação do módulo retificador.
- Estudo de avarias nos conversores de potência.
- Análise de proteções a implementar no sistema.

# Bibliografia

- [1] INESCTEC. *Otimização da Arquitetura dos Sistemas de Alimentação em Corrente Contínua*, 2017.
- [2] AEG Power Solutions USA Inc. *PM2000 Datasheet - AEG Power Solutions USA, Inc. - Switch Mode Power Supply Module*.
- [3] EFACEC Sistemas de Eletrónica S.A. *Projeto de Rack para módulos 110 Vcc da AEG*, 2010.
- [4] Filipe Manuel Rodrigues Romero. Sistema de Energia Fotovoltaico Baseado num Conversor Multínivel em Cascata com Controlo Preditivo. Master's thesis, DEEC, Universidade de Coimbra, 2019.
- [5] Fábio Patrício Domingues Gonçalves. Conversor Multinível Monofásico para Sistemas Fotovoltaicos. Master's thesis, DEEC, Universidade de Coimbra, 2015.
- [6] M.H. Rashid. *Electric Renewable Energy Systems*. Academic Press, 2015.
- [7] P. Acharya, M. N. Shaikh, S. K. Jha, and A. P. Papadakis. Electrical Modelling Of a Photovoltaic Module, 2016.
- [8] Diogo José Simões Bacalhau. Modelação e controlo de conversores de potência para produção e armazenamento de energia. Master's thesis, DEEC, Universidade de Coimbra, 2017.
- [9] V C Kotak, Preti Tyagi, and Associate Professor. DC to DC Converter in Maximum Power Point Tracker. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (An ISO Certified Organization)*, 3297, 2007.
- [10] Osisioma Ezinwanne, Fu Zhongwen, and Li Zhijun. Energy Performance and Cost Comparison of MPPT Techniques for Photovoltaics and other Applications. *Energy Procedia*, 107(September 2016):297–303, 2017.

- [11] Haitham Abu-Rub, Mariusz Malinowski, and Kamal Al-Haddad. *POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS*, volume 148. Wiley, 2014.
- [12] DAT DMN DTI. *INSTALAÇÕES AT E MT Sistemas de Alimentação de Corrente Contínua 110 / 48 V CC*, 3rd edition, jan 2017.
- [13] Battery University. Bu-407: Charging nickel-cadmium. [https://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_nickel\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/charging_nickel_based_batteries).
- [14] Battery University. Bu-802a: How does rising internal resistance affect performance? [https://batteryuniversity.com/learn/article/rising\\_internal\\_resistance](https://batteryuniversity.com/learn/article/rising_internal_resistance).
- [15] R. D. Bhagiya and D. R.M. Patel. PWM based Double loop PI control of a bidirectional DC-DC converter in a standalone PV/Battery DC power system. *2019 IEEE 16th India Council International Conference, INDICON 2019 - Symposium Proceedings*, pages 2019–2022, 2019.
- [16] A Rachid, H El Fadil, K Gaouzi, and F Z Belhaj. Output Feedback Control of Bidirectional DC-DC Power Converter for BEV Charger. *Proceedings of Engineering & Technology (PET)*, 19(Special Issue):46–51, 2017.
- [17] G. Sybille Hydro-Quebec P. Giroux. Ac/dc three-level pwm converter. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/ac-dc-three-level-pwm-converter.html;jsessionid=dfbf5f83b024297ce85e675439db>.

# Apêndice A

## Algoritmo P&O

De forma a implementar o algoritmo P&O para a extração da máxima potência dos painéis fotovoltaicos e limitando, em caso de necessidade, a energia a enviar para o barramento DC, foi implementado o código seguinte:

```
function Dpv = MPPT(Vpv, Ipv, vbus)

persistent Dprev Pprev Vprev
if isempty(Dprev)
    Dprev = 0.55;%Duty-cycle
    Vprev = 140;%Tensao
    Pprev = 1400;%Potencia
end
%Variacao do duty-cycle
delta = 100e-6;

Ppv = Vpv*Ipv;
if (vbus < 121)
    if (Ppv-Pprev) ~= 0
        if (Ppv - Pprev) > 0
            if (Vpv - Vprev) > 0
                Dpv = Dprev - delta;
            else
                Dpv = Dprev + delta;
            end
        else
            Dpv = Dprev;
        end
    end
end
```

```

        if (Vpv-Vprev) > 0
            Dpv = Dprev + delta;
        else
            Dpv = Dprev - delta;
        end
    end
else
    Dpv = Dprev;
end
else
    Dpv = 0.18;
end
if (Dpv > 1)
    Dpv = 1;
elseif (Dpv < 0)
    Dpv = 0;
end

Dprev = Dpv;
Vprev = Vpv;
Pprev = Ppv;

```

# Apêndice B

## Dimensionamento Conversor DC-DC

Nesta secção são apresentadas as fórmulas utilizadas no dimensionamento do conversor das baterias e dos painéis fotovoltaicos.

O *duty-cycle* do conversor dos painéis fotovoltaicos a funcionar como *Buck* é dado pela expressão B.1. O *duty-cycle* do conversor a funcionar como *Buck* é dado pela expressão B.2 e do conversor a funcionar como *Boost* é dado pela expressão B.3.

$$D = \frac{V_{DC}}{V_{PV}} \quad (\text{B.1})$$

$$D = \frac{V_{DC}}{V_{Bat}} \quad (\text{B.2})$$

$$D = 1 - \frac{V_{DC}}{V_{Bat}} \quad (\text{B.3})$$

O dimensionamento da bobina e do condensador para os conversores a funcionarem como *Buck* foi obtido através das expressões B.4 e B.5, respetivamente.

$$L_{cb} = \frac{(1 - D) \cdot V_{DC} \cdot T_s}{\Delta i_L} \quad (\text{B.4})$$

$$C_{dc} = \frac{(1 - D) \cdot V_{DC} \cdot T_s^2}{\Delta V_{DC} \cdot 8 \cdot L} \quad (\text{B.5})$$

O dimensionamento da bobina e do condensador para os conversores a funcionarem como *Boost* foi obtido através das expressões B.6 e B.7, respetivamente.

$$L_{cb} = \frac{D \cdot V_{DC} \cdot T_s}{\Delta i_L} \quad (\text{B.6})$$

O dimensionamento do condensador e da bobina constituintes do filtro passa baixo, foi obtido através das expressões B.7 e B.8, respetivamente.

$$C_{bat} = \frac{D \cdot I_{Bat} \cdot T_s}{\Delta V_{Bat}} \quad (\text{B.7})$$

$$L_{bat} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} \quad (\text{B.8})$$

# Apêndice C

## Controlador das Baterias

De forma a implementar o controlador das baterias aplicado ao conversor bidirecional foi utilizado o seguinte código:

```
function [s1,s2,s3,mod] = fcn(vbus,soc,ibat)
dt = 50e-6;
s1 = 0;
s2 = 0;
s3 = 0;
mod = 0;
persistent integral previous_error
if isempty(integral)
    integral = 0;
end
if(soc >= 15 && soc <= 95)
    if(vbus >= 110 && vbus <= 112)
        s1 = 0;
        s2 = 0;
        s3 = 0;
        mod = 1;
    elseif(vbus > 112)
        Kp = 5;
        Ki = 0.01;
        error = 21 - ibat;
        integral = integral + error*dt;
        output = Kp*error + Ki*integral;
```

```

previous_error = error;
duty = output;
if(duty > 1)
    duty = 1;
end
if(duty < 0)
    duty = 0;
end
s1 = 1;
s2 = 0;
s3 = duty;
mod = 2;
elseif(vbus < 110 && vbus >= 99)
    Kp = 10;
    Ki = 0.01;
    error = 110 - vbus;
    integral = integral + error*dt;
    output = Kp*error + Ki*integral;
    previous_error = error;
    duty = output;
    if(duty > 1)
        duty = 1;
    end
    if(duty < 0)
        duty = 0;
    end
    s1 = 1;
    s2 = duty;
    s3 = 0;
    mod = 3;
elseif(vbus < 99)
    s1 = 0;
    s2 = 0;

```

```

        s3 = 0;
        mod = 4;
    end
elseif(soc > 95 && soc < 100)
    if(vbus >= 110 && vbus <= 120)
        duty = 0.12;
        s1 = 1;
        s2 = 0;
        s3 = duty;
        mod = 5;
    elseif (vbus < 110 && vbus >= 99)
        Kp = 2;
        Ki = 0.1;
        error = 110 - vbus;
        integral = integral + error*dt;
        output = Kp*error + Ki*integral;
        previous_error = error;
        duty = output;
        if(duty > 1)
            duty = 1;
        end
        if(duty < 0)
            duty = 0;
        end
        s1 = 1;
        s2 = duty;
        s3 = 0;
        mod = 6;
    elseif (vbus < 99 || vbus > 120)
        s1 = 0;
        s2 = 0;
        s3 = 0;
        mod = 7;
    end
end

```

```
    end
elseif((soc == 100 && vbus > 120))
    s1 = 0;
    s2 = 0;
    s3 = 0;
    mod = 8;
elseif(soc < 15)
    s1 = 0;
    s2 = 0;
    s3 = 0;
    mod = 9;
end
end
```