

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VICTOR EMANUEL SOARES BARBOSA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE USO DE  
SUPERCAPACITORES EM CARREGADORES DE  
BATERIAS COM PAINEL FOTOVOLTAICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

VICTOR EMANUEL SOARES BARBOSA

# **ANÁLISE DA VIABILIDADE DE USO DE SUPERCAPACITORES EM CARREGADORES DE BATERIAS COM PAINEL FOTOVOLTAICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - CO-ELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Giovani Carati

PATO BRANCO

2017

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ANÁLISE DA VIABILIDADE DE USO DE SUPERCAPACITORES EM CARREGADORES DE BATERIAS COM PAINEL FOTOVOLTAICO**, do aluno **Victor Emanuel Soares Barbosa** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora **Nº 136** de 2017.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

**Prof. Dr. Emerson Giovani Carati**

**Prof. Dr. Carlos M. O. Stein**

**Prof. Dr. Rafael Cardoso**

Dedico a Deus, pois "Pelas vitórias que lhe deste, grande é a sua glória; de esplendor e majestade o cobriste."  
(Salmos 21:5)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu condições para concretização deste importante passo em minha jornada pela vida terrena. Agradeço o Professor Me. Everton Luiz Aguiar por ter dado crédito no meu desenvolvimento desde o quarto período do curso, proporcionando a oportunidade de entrar na iniciação científica.

Não poderia esquecer do Professor orientador Dr. Emerson Giovani Carati, agradeço-lhe por não ter desistido de me orientar nos primórdios da minha iniciação científica, por ter direcionado e aperfeiçoado meus projetos com paciência e respeito, além também de ter sugerido o tema deste TCC. Agradeço à banca deste trabalho pelas críticas e conselhos que em muito contribuíram para o meu aperfeiçoamento.

Agradeço concomitantemente aos meus companheiros de curso, não apenas aqueles que iniciaram esta jornada comigo, como também os muitos que encontrei durante os percalços desta caminhada; agradeço-lhes pelo apoio, sugestões de melhorias e companheirismo.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio estrutural, educacional e financeiro, bem como ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UTFPR campus Pato Branco, pela cessão de suas dependências e programas computacionais para a realização desta pesquisa.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, desde meus pais, o Sr. José Geraldo Soares e a Sra. Maria Rosa Barbosa, como também meu irmão Callebe Soares Barbosa, e minha amada companheira Micheli Correa da Silva; pelo apoio, creditação de confiança nos meus estudos e criação de um ambiente sadio para o meu desenvolvimento pessoal.



*O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um vasto oceano. O arranjo maravilhoso e a harmonia do universo não poderiam senão sair de um ser onisciente e onipotente.*

Isaac Newton

## RESUMO

SOARES BARBOSA, Victor Emanuel. Análise da viabilidade técnica de uso de supercapacitores em carregadores de baterias com painel fotovoltaico. 2017. 134 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho apresenta uma análise da viabilidade técnica do uso de supercapacitores para auxiliar no carregamento de baterias de Li-íon em sistemas fotovoltaicos. Inicialmente são apresentados os fundamentos teóricos que permearam o desenvolvimento do trabalho, a saber, conhecimentos das células fotovoltaicas, baterias de Li-íon, supercapacitores e conversores estáticos de energia. Na sequência é apresentado a estrutura do sistema de conversão de energia, definindo as configurações dos conversores e demais componentes do sistema, além do projeto e implementação de simulação dos conversores de maneira isolada. Também foi desenvolvido o sistema de gerenciamento da energia e implementação em simulação do sistema completo, apresentando os resultados. Logo após foi realizada a análise e verificação da configuração proposta, como também as comparações do uso ou não do supercapacitor. A partir das análises realizadas, conclui-se que a utilização do supercapacitor neste sistema fotovoltaico para carregamento de bateria pode apresentar melhores condições de carregamento, como menores tempos de carregamento e melhor rendimento do sistema, sendo possível sua utilização em uma vasta área de aplicações.

**Palavras-chave:** Carregador de Bateria. Controle Digital. Painel Fotovoltaico.



## ABSTRACT

SOARES BARBOSA, Victor Emanuel. Analysis of the technical feasibility of using supercapacitors in battery chargers with photovoltaic panels. 2017. 134 f. Course Conclusion Work - Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2017.

This work presents an analysis of the technical feasibility of the use of supercapacitors to aid in the charging of Li-ion batteries in photovoltaic systems. Initially the theoretical foundations that permeate the development of the work are presented, namely knowledge of photovoltaic cells, Li-ion batteries, supercapacitors and static converters of energy. In the sequence, the structure of the energy conversion system is presented, defining the configurations of the inverters and other components of the system, besides the design and implementation of simulation of the inverters in an isolated way. The system of energy management and simulation implementation of the complete system was also developed, presenting the results. Afterwards, the analysis and verification of the proposed configuration was carried out, as well as the comparisons of the use of the supercapacitor. Based on the analysis, it was concluded that the use of supercapacitor in this photovoltaic system for battery charging can present better charging conditions, such as shorter charging times and better system performance, being possible to use in a wide range of applications.

**Keywords:** Battery Charger. Digital Control. Photovoltaic Panel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Eletricidade global em 2011 e em 2050 em três cenários ETP 2014. . . . .	19
Figura 2:	Capacidade de baterias de Li-ion em relação ao número de ciclos completos de carga e descarga. . . . .	20
Figura 3:	Comparação entre a potência extraída do painel fotovoltaico e a necessária para o carregamento de uma bateria. Curva típica de potência de um painel em a) e curva de carga típica de uma bateria em b). . . . .	21
Figura 4:	Correntes do sistema. . . . .	22
Figura 5:	Diagrama geral do projeto proposto. . . . .	22
Figura 6:	Modelo simplificado de uma célula fotovoltaica comum. . . . .	27
Figura 7:	Células fotovoltaicas policristalina e monocristalina. . . . .	28
Figura 8:	Circuito simplificado de uma célula fotovoltaica. . . . .	29
Figura 9:	Curvas características de corrente por tensão e potência por tensão de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas. . . . .	31
Figura 10:	Curvas característica de corrente por tensão de um painel fotovoltaico para diversos níveis de irradiações. . . . .	31
Figura 11:	Diagrama do algoritmo para implementação do método de perturbar e observar. . . . .	32
Figura 12:	Ilustração do processo de carga e descarga de uma bateria de Li-íon. . . . .	34
Figura 13:	Circuito simplificado de uma bateria. . . . .	35
Figura 14:	Curva de descarga de uma bateria de Li-íon. . . . .	37
Figura 15:	Desenho ilustrativo de um supercapacitor de camada elétrica dupla. . . . .	38
Figura 16:	Taxonomia dos supercapacitores. . . . .	39
Figura 17:	Circuito simplificado de um supercapacitor. . . . .	40

Figura 18:	Circuito simplificado de um supercapacitor para simulação em Psim. . . . .	41
Figura 19:	Curva de carga e descarga de supercapacitores. . . . .	41
Figura 20:	Circuito simplificado do conversor Sepic. . . . .	43
Figura 21:	Circuito para Q1 ligada do conversor Sepic. . . . .	43
Figura 22:	Circuito para Q1 desligada do conversor Sepic. . . . .	43
Figura 23:	Ondas de tensão no conversor Sepic em MCC. . . . .	44
Figura 24:	Ondas de corrente no conversor Sepic em MCC. . . . .	44
Figura 25:	Circuito simplificado do <i>Buck</i> . . . . .	47
Figura 26:	Circuito para Q1 ligada do conversor <i>Buck</i> . . . . .	47
Figura 27:	Circuito para Q1 desligada do conversor <i>Buck</i> . . . . .	48
Figura 28:	Ondas de tensão no conversor <i>Buck</i> em MCC. . . . .	48
Figura 29:	Ondas de corrente no conversor <i>Buck</i> em MCC. . . . .	48
Figura 30:	Circuito simplificado do <i>Buck</i> Bidirecional. . . . .	50
Figura 31:	Circuito para $Q_{1BB}$ ligada do <i>Buck</i> Bidirecional em modo <i>Buck</i> . . . . .	51
Figura 32:	Circuito para $Q_{1BB}$ desligado do <i>Buck</i> Bidirecional em modo <i>Buck</i> . . . . .	51
Figura 33:	Ondas de tensão no conversor <i>Buck</i> Bidirecional, operando em modo <i>Buck</i> e em MCC. . . . .	51
Figura 34:	Ondas de corrente no conversor <i>Buck</i> Bidirecional, operando em modo <i>Buck</i> e em MCC. . . . .	52
Figura 35:	Circuito para $Q_{2BB}$ ligada do <i>Buck</i> Bidirecional em modo <i>Boost</i> . . . . .	52
Figura 36:	Circuito para $Q_{2BB}$ desligado do <i>Buck</i> Bidirecional em modo <i>Boost</i> . . . . .	52
Figura 37:	Ondas de tensão no conversor <i>Buck</i> Bidirecional, operando em modo <i>Boost</i> e em MCC. . . . .	53
Figura 38:	Ondas de corrente no conversor <i>Buck</i> Bidirecional, operando em modo <i>Boost</i> e em MCC. . . . .	53
Figura 39:	Curvas de tensão por tempo do supercapacitor BMOD0058 E016 B0 para variadas correntes de carga. . . . .	59
Figura 40:	Curva de descarga da bateria através de simulação em Simulink para corrente nominal em 0,43478C (1,087A). . . . .	61

Figura 41:	Curva de descarga da bateria através de simulação em Simulink e em Psim. . . . .	61
Figura 42:	Curvas obtidas pela emulação do módulo fotovoltaico KM(P)20 em Matlab. . . . .	63
Figura 43:	CCC1 simulado em Psim em malha aberta. . . . .	66
Figura 44:	Curva de corrente de entrada para máxima potência, com valor médio em regime permanente de 1,1456 A. . . . .	66
Figura 45:	Curva de corrente de entrada para mínima potência, com valor médio em regime permanente de 1,230 A. . . . .	67
Figura 46:	CCC1 simulado em Psim em malha fechada. . . . .	69
Figura 47:	Potência obtida com o MPPT, potência máxima extraível do painel, corrente de entrada do CCC1 e a referência de corrente. . .	70
Figura 48:	CCC3 simulado em Psim em malha aberta. . . . .	71
Figura 49:	CCC3 simulado em Psim em malha fechada. . . . .	73
Figura 50:	SOC da bateria, corrente na bateria e referência de corrente, tensão na bateria, e ações de controle do CCC3 simulado. . . .	74
Figura 51:	CCC2 simulado em Psim em malha aberta. . . . .	76
Figura 52:	CCC2 simulado em Psim em malha fechada. . . . .	77
Figura 53:	Tensão no supercapacitor, corrente de saída do CCC2, sinal de modo, erro, ação de controle e referência na simulação do CCC2 em malha fechada. . . . .	78
Figura 54:	Vista ampliada da tensão no supercapacitor quando este está descarregando. . . . .	79
Figura 55:	Diagrama geral do projeto proposto com detalhes. . . . .	80
Figura 56:	Máquina de estados do sistema de gerenciamento da energia. .	82
Figura 57:	Máquina de estados dos estados internos do E3. . . . .	83
Figura 58:	Máquina de estados dos estado interno do E4. . . . .	83
Figura 59:	Máquina de estados dos estados internos do E5. . . . .	84
Figura 60:	Máquina de estados dos estados internos do E6. . . . .	84
Figura 61:	Painel fotovoltaico no Psim. . . . .	87
Figura 62:	CCC1 como sub circuito implementado em Psim. . . . .	88

Figura 63: CCC2 como sub circuito implementado em Psim. . . . .	88
Figura 64: Supercapacitor como sub circuito implementado em Psim. . . .	89
Figura 65: CCC3 como sub circuito implementado em Psim. . . . .	89
Figura 66: CSBS implementado em Psim. . . . .	90
Figura 67: Curvas das variáveis do CSBS para o tempo de 0 a 120 segundos.	91
Figura 68: Curvas das variáveis do CSBS com sinais de saída do GE para o tempo de 0 a 120 segundos. . . . .	92
Figura 69: Curvas das variáveis do CSBS para o tempo de 0 a 75,5 segundos. . . . .	94
Figura 70: Curvas das variáveis do CSBS para o tempo de 0 a 300 segundos.	95
Figura 71: Curvas das variáveis do CSBS sem o supercapacitor para a simulação de 0 a 300 segundos. . . . .	96
Figura 72: Curvas de irradiação solar diárias para diferentes padrões de dias.	100
Figura 73: Esquema ilustrativo da energia em aceleração e desaceleração de veículos. . . . .	100
Figura 74: Principais componentes do sistema de regeneração de frenagem em um Mazda6. . . . .	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	<b>Comparação entre tipos de células fotovoltaicas</b>	28
Tabela 2:	<b>Comparação entre supercapacitor e capacitores convencionais</b>	39
Tabela 3:	<b>Parâmetros do supercapacitor BMOD0058 E016 B0</b>	58
Tabela 4:	<b>Parâmetros do modelo do módulo solar KM(P)20 obtidos em Psim</b>	59
Tabela 5:	<b>Parâmetros do módulo solar KM(P)20</b>	60
Tabela 6:	<b>Parâmetros da bateria de Li-íon 1865HE2 2500</b>	60
Tabela 7:	<b>Parâmetros do modelo da bateria 1865HE2 2500 obtidos em Simulink</b>	61
Tabela 8:	<b>Parâmetros do modelo da bateria 1865HE2 2500 utilizados no Psim</b>	62
Tabela 9:	<b>Parâmetros para projeto do CCC1</b>	64
Tabela 10:	<b>Parâmetros do CCC1 para potência mínima e máxima</b>	65
Tabela 11:	<b>Constantes para projeto do CCC1 em tempo contínuo.</b>	67
Tabela 12:	<b>Constantes para projeto do CCC1 em tempo discreto.</b>	68
Tabela 13:	<b>Parâmetros para projeto do CCC3</b>	70
Tabela 14:	<b>Parâmetros do CCC3 para os dois estágios de carregamento da bateria</b>	72
Tabela 15:	<b>Constantes para projeto do CCC1 em tempo contínuo para controle de corrente e tensão.</b>	72
Tabela 16:	<b>Constantes para projeto do CCC3 em tempo discreto para controle da corrente e tensão.</b>	73
Tabela 17:	<b>Parâmetros para projeto do CCC2</b>	75
Tabela 18:	<b>Constantes para projeto do CCC2 em modo <i>buck</i> e <i>boost</i>, em tempo contínuo.</b>	76

Tabela 19: <b>Constantes para projeto do CCC2 em modo <i>buck</i> e <i>boost</i>, em tempo discreto.</b> . . . . .	77
Tabela 20: <b>Tempo de carregamento do primeiro estágio de uma bateria, em minutos, no CSBS proposto e em um CSBsS.</b> . . . . .	98
Tabela 21: <b>Aproveitamento em porcentagem com o CSBS e um CSBsS.</b>	99
Tabela 22: <b>Componentes necessários para um protótipo do CSBS</b> . . .	102

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCC	Conversor de Corrente Contínua.
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> (Captura e Armazenamento de Carbono).
CSBS	Carregador Solar de Bateria com Supercapacitor.
CSBsS	Carregador Solar de Bateria sem Supercapacitor.
GE	Gerenciador de Energia.
MCC	Modo de Condução Contínua.
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Máxima Potência).
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência).
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Sepic	<i>Single Ended Primary Inductance Converter</i> (Conversor de Indutância Primária com Término Simples).
SOC	<i>State Of Charge</i> (Estado de Carregamento).
UPS	<i>Uninterruptible Power Supplies</i> (Fonte de Alimentação Ininterrupta).



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS	18
1.2 CARACTERIZAÇÃO	22
1.2.1 Objetivos	24
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	24
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>26</b>
2.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	26
2.1.1 Princípios de funcionamento	26
2.1.2 Principais tecnologias de células fotovoltaicas	27
2.1.2.1 Células cristalinas	27
2.1.2.2 Células de filmes finos	28
2.1.2.3 Células de multijunção	29
2.1.2.4 Novos conceitos	29
2.1.3 Modelo elétrico equivalente	29
2.1.4 Rastreamento do ponto de máxima potência	32
2.2 BATERIAS	33
2.2.1 Princípios de funcionamento e principais tipos de baterias de Li-íon	33
2.2.2 Modelo elétrico equivalente	34
2.3 SUPERCAPACITORES	37
2.3.1 Principais tipos e princípios de funcionamento	37
2.3.2 Modelo elétrico equivalente	39
2.4 CONVERSORES ESTÁTICOS DE ENERGIA	42
2.4.1 Conversor Sepic	42
2.4.1.1 Princípios de funcionamento	43
2.4.1.2 Metodologia de projeto	45
2.4.2 Conversor <i>Buck</i>	47
2.4.2.1 Princípios de funcionamento	47
2.4.2.2 Metodologia de projeto	49
2.4.3 Conversor <i>Buck</i> Bidirecional	50

2.4.3.1	Princípios de funcionamento .....	50
2.4.3.2	Metodologia de projeto .....	53
2.5	SUMÁRIO DO CAPÍTULO .....	54
<b>3</b>	<b>ESTRUTURA DO SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA .....</b>	<b>56</b>
3.1	DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE CONVERSORES .....	56
3.1.1	Definição das especificações .....	56
3.1.1.1	Supercapacitor .....	58
3.1.1.2	Módulo fotovoltaico .....	59
3.1.1.3	Bateria .....	60
3.1.2	Escolha das topologias .....	62
3.2	PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO DO CCC1 .....	63
3.2.1	Especificações e dimensionamento .....	63
3.2.2	Projeto do sistema de controle .....	64
3.2.3	Implementação de simulação em malha fechada .....	68
3.3	PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO DO CCC3 .....	69
3.3.1	Especificações e dimensionamento .....	69
3.3.2	Projeto do sistema de controle .....	69
3.3.3	Implementação de simulação em malha fechada .....	72
3.4	PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO DO CCC2 .....	74
3.4.1	Especificações e dimensionamento .....	74
3.4.2	Projeto do sistema de controle .....	75
3.4.3	Implementação de simulação em malha fechada .....	76
3.5	SUMÁRIO DO CAPÍTULO .....	79
<b>4</b>	<b>PROJETO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA ENERGIA .....</b>	<b>81</b>
4.1	ESPECIFICAÇÕES DAS ETAPAS E PROCESSOS .....	81
4.2	IMPLEMENTAÇÃO EM SIMULAÇÃO .....	87
4.2.1	Resultados de simulação .....	91
4.3	SUMÁRIO DO CAPÍTULO .....	93
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO .....</b>	<b>96</b>
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS ANTERIORES .....	96
5.2	ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA UM PROTÓTIPO .....	101
5.3	SUMÁRIO DO CAPÍTULO .....	102

<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE A - CÓDIGO DE EMULAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE B - CÓDIGOS DOS BLOCOS C DA SIMULAÇÃO DO CSBS .....</b>	<b>112</b>
B.1 BLOCO CCC1 .....	112
B.2 BLOCO CCC2 .....	116
B.3 BLOCO CCC3 .....	120
B.4 BLOCO GE.....	124

## 1 INTRODUÇÃO

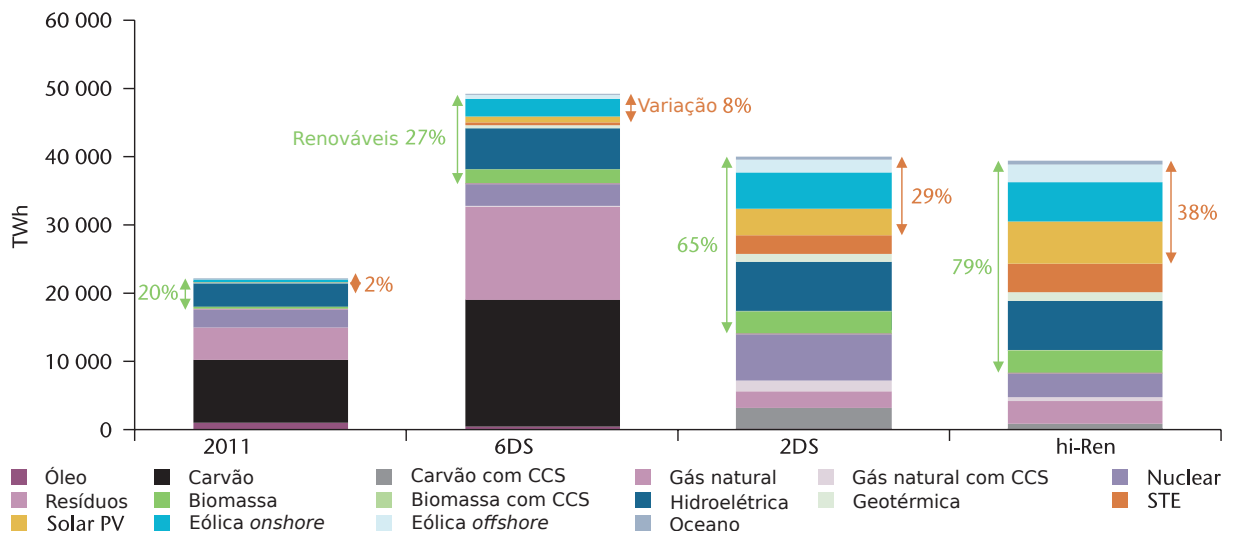
Este capítulo foi dividido em duas seções: contextualização e justificativas; e caracterização. Na contextualização e justificativas é introduzido o tema e explicados os motivos que levaram à escolha deste tema e sua potencial importância no contexto de aplicação. Por fim, na caracterização é explanada de forma geral a proposição do trabalho a ser realizado e os objetivos a serem alcançados.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

O crescimento das fontes renováveis para consumo final de eletricidade no mundo tem projeções de crescimento, para 2050, como nos cenários 6DS, 2DS e hi-Ren, conforme pode-se ver na Figura 1. O cenário 6DS se caracteriza por aquele que acompanha as tendências atuais, com isso a temperatura média mundial se elevaria em 6 °C, baseado nas emissões de CO<sub>2</sub>. O cenário 2DS é caracterizado por reduções de emissão de CO<sub>2</sub> em sistemas energéticos com o objetivo de limitar o aumento da temperatura mundial até 2 °C. Por fim, o cenário hi-Ren (*high-renewables*, do inglês que significa altamente-renováveis) é o cenário com maior atuação de fontes renováveis, requerendo um rápido e forte desenvolvimento tecnológico de sistemas fotovoltaicos, eólicos e térmico solar (STE, *Solar Thermal Electricity*), observando uma participação de até 38% de geração solar PV (solar por painel fotovoltaico), eólica e a proveniente de aproveitamentos no oceano, como a maremotriz na produção mundial de eletricidade.

Os cenários ETP 2014, da Figura 1, são baseados no modelo *bottom-up TIMES*, tal modelo busca a otimização dos custos das tecnologias de geração de energia e combustíveis, cobrindo 28 regiões do mundo e levando em considerações demandas detalhadas do uso final em indústrias, prédios e setores de transporte (IEA, 2014). A sigla *Carbon Capture and Storage* (CCS), utilizada na Figura 1, é uma tecnologia de captura e armazenamento de dióxido de carbono de processos industriais em campos de petróleo e gás vazios ou em formações de aquíferos salinos profundos (CCSA, 2010).

Enquanto as fontes renováveis tem projeção de crescimento, as demais



**Figura 1: Eletricidade global em 2011 e em 2050 em três cenários ETP 2014.**

**Fonte: (IEA, 2014) com modificações.**

como carvão, hidroeletricidade, gasolina e petróleo, tem tendências menores de crescimento, estabilizando ou até mesmo reduzindo como o carvão.

A motivação para o estudo da energia solar se encontra no custo menor da energia na natureza e a possibilidade de aproveitamento em localidades sem o suprimento da rede elétrica, ou até mesmo para situações de falha no sistema de distribuição de energia elétrica (HOFFMANN, 2006). Outro ponto importante para o investimento em desenvolvimento da energia fotovoltaica é que ela é uma energia renovável, e segundo projeções da Shell, Grundy (2008), para 2025 e 2050 este tipo de energia terá crescimento cada vez maior.

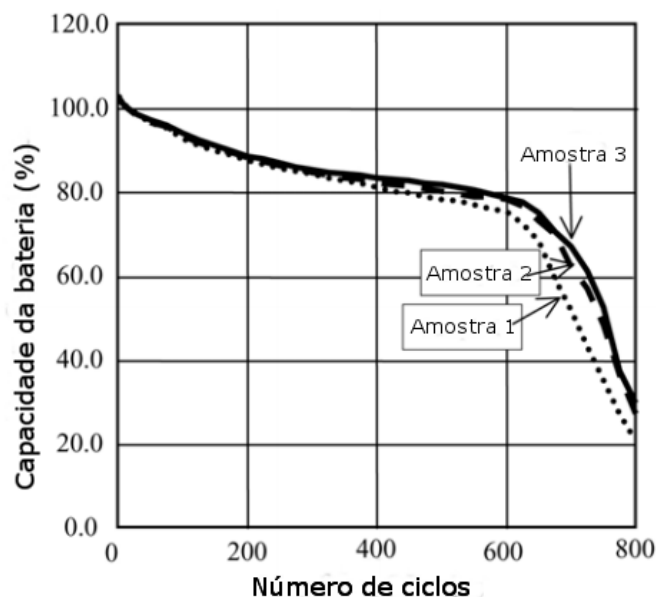
Para compreensão da problemática do trabalho é necessário compreender como se obtém energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, bem como as limitações das baterias. Tais temas serão explanados de forma sucinta nos próximos parágrafos.

Os painéis fotovoltaicos são estruturas compostas por módulos constituídos de várias células fotovoltaicas em arranjos em série e/ou paralelo, em sua maioria constituídas de uma junção p-n de material semicondutor. São estas células que geram corrente elétrica devido ao efeito de irradiação solar (CARVALHO, 2014).

O princípio básico das células fotovoltaicas ocorre quando os elétrons da banda de valência que estão no material tipo n na direção do sol, recebem os fótons da radiação. Com essa absorção de fótons são liberados elétrons que percorrem um circuito externo ligando as duas camadas, logo surge a corrente elétrica fornecida pela célula (CARVALHO, 2014).

A partir da análise de casos em que usuários de dispositivos eletrônicos portáteis têm a necessidade cada vez mais frequente de recarregarem as baterias dos seus dispositivos foi o ponto inicial para a proposta deste trabalho. Esta necessidade cada vez mais frequente de recarregar as baterias pode ser explicada pelo limite prático de armazenamento de energia nas baterias de Li-ion (estas serão melhor discutidas no capítulo 2), que atualmente está em torno de 2 MJ/kg (um limite teórico seria de cerca de 3 MJ/kg), porém isso representa cerca de apenas 6% da capacidade de armazenamento de energia do petróleo bruto, por exemplo (HOUSE, 2009).

Um fator que influencia na deterioração das baterias de Li-ion é a quantidade de ciclos completos de carga e descarga que a bateria é submetida, ou seja, ao longo do tempo a bateria vai perdendo sua capacidade de armazenamento de energia, necessitando o seu carregamento em intervalos de tempo cada vez mais curtos. Isso é mostrado na Figura 2, onde foi aferida a capacidade de uma bateria de Li-ion comercial de acordo com o número de ciclos, verificando que a vida útil da bateria com 80% de carga nominal é aproximadamente de 600 ciclos. (TAKENO *et al.*, 2005).

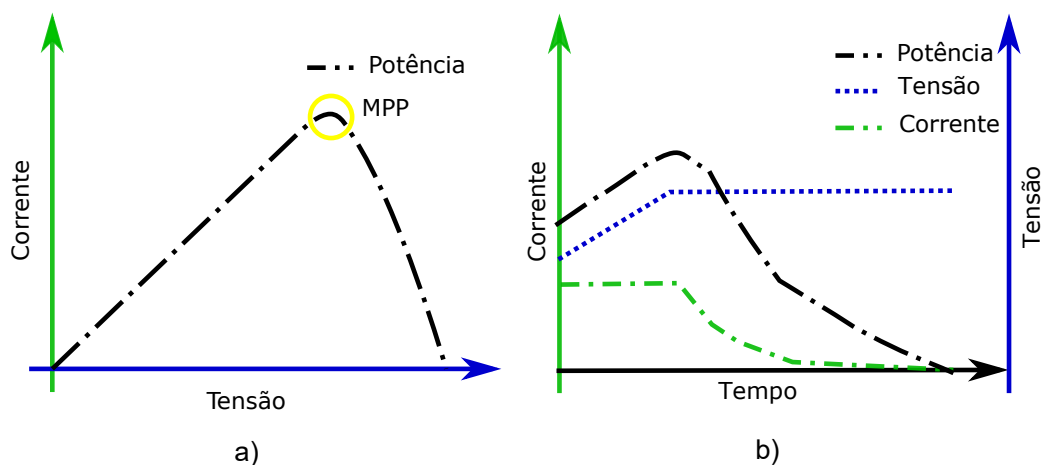


**Figura 2: Capacidade de baterias de Li-ion em relação ao número de ciclos completos de carga e descarga.**  
Fonte: (TAKENO *et al.*, 2005) com modificações.

Os supercapacitores já são usados em aplicações onde são requeridas entregas rápidas de potência elétrica ou armazenamento elétrico. Atualmente, em muitas aplicações, os supercapacitores são empregados nos lugares das baterias de chumbo-ácido, como em veículos híbridos. Isso se deve ao fato de que os supercapacitores têm controle melhor de potência elétrica e aceitação ambiental.

Os supercapacitores são também utilizados em *Uninterruptible Power Supplies* (UPS) <sup>1</sup>, brinquedos, eletrônicos em geral, substitutos de baterias em aplicações que requerem pequena quantidade de energia armazenada e demandam altos pulsos de potência, como furadeiras elétricas. Também são utilizados em sistemas de freio regenerativo, além de sistemas de energias renováveis (LEONARD, 2016; SCHNEUWLY; GALLAY, 2000).

A questão motivadora deste projeto veio a partir da barreira existente entre conseguir extrair a máxima potência elétrica de um painel fotovoltaico e seguir o carregamento ideal de uma bateria de Li-ion utilizando um carregador alimentado por energia solar. Para encontrar o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico é necessário realizar o *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) <sup>2</sup>, porém para seguir o carregamento de uma bateria é necessário passar por dois estágios, um de corrente constante e outro de tensão constante, o que se torna inviável quando executado conjuntamente com o algoritmo de MPPT, como mostrado na Figura 3 onde a tensão da bateria nem sempre coincide com o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico, sem uma etapa intermediária de armazenamento rápido de energia, a qual pode ser provida pelo uso do supercapacitor (BONKOUNGOU *et al.*, 2013).



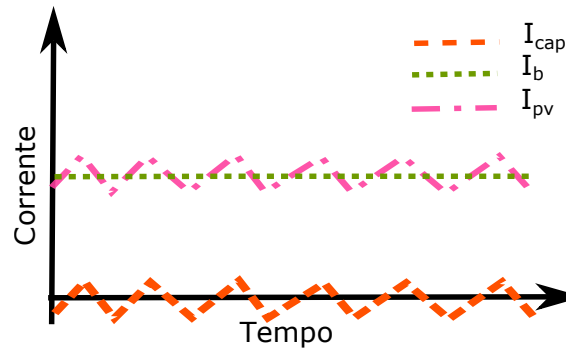
**Figura 3: Comparação entre a potência extraída do painel fotovoltaico e a necessária para o carregamento de uma bateria. Curva típica de potência de um painel em a) e curva de carga típica de uma bateria em b).**

Fonte: (SEGUEL, 2009; ELETRONICA, 2016) com modificações.

A ideia de utilizar o supercapacitor é suprir a corrente necessária para carregar a bateria quando o painel fotovoltaico não produz toda a corrente necessária, ou absorver excessos de geração do painel fotovoltaico, estando o mesmo em MPPT, como ilustrado na Figura 4, onde  $I_{cap}$  é a corrente no capacitor,  $I_b$  é a corrente na bateria e  $I_{pv}$  é a corrente no painel fotovoltaico.

<sup>1</sup>Do inglês *Uninterruptible Power Supplies*, ou fonte de alimentação ininterrupta

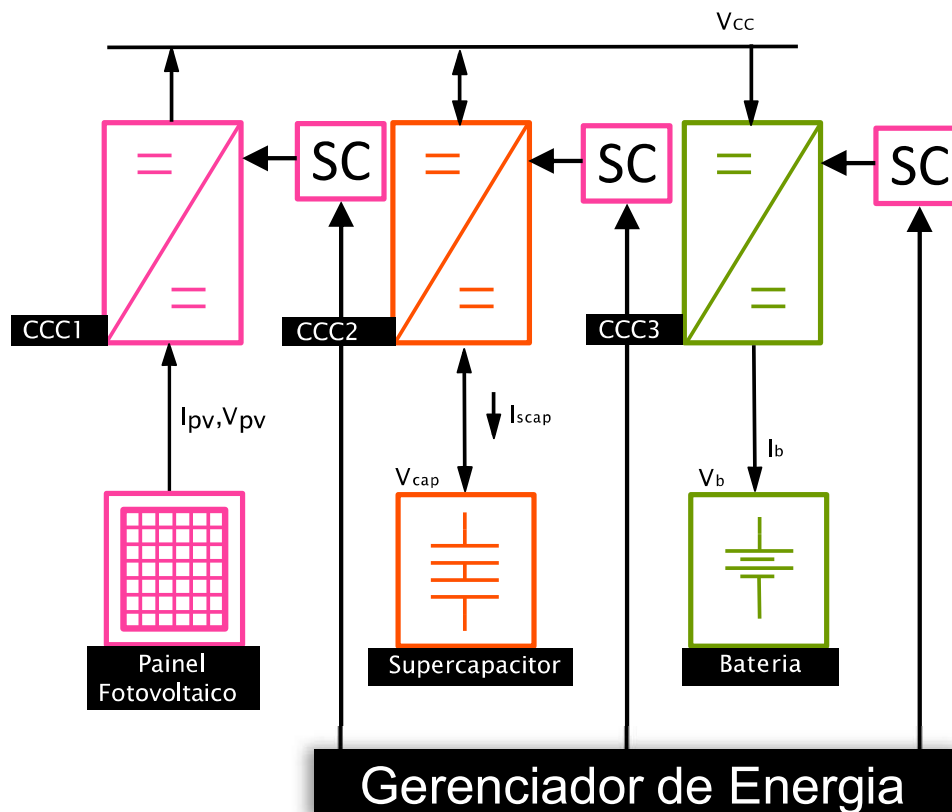
<sup>2</sup>Do inglês *Maximum Power Point Tracking*, ou rastreamento do ponto de máxima potência



**Figura 4: Correntes do sistema.**  
Fonte: Autoria própria.

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO

O projeto proposto envolve o uso de supercapacitor em um carregador de baterias de Li-ion. Tal carregador, que utiliza a energia proveniente do sol captada através de um painel fotovoltaico, será chamado de Carregador Solar de Bateria com Supercapacitor (CSBS). A proposta desse tipo de carregador está mostrada na Figura 5, onde estão representados os sistemas de controle (SC), que controlam os conversores a fim de realizar o objetivo geral de carregar a bateria. Estes sistemas de controle são coordenados através do gerenciador de energia.



**Figura 5: Diagrama geral do projeto proposto.**  
Fonte: Autoria própria.



No diagrama da Figura 5:

- O painel fotovoltaico converte a energia necessária para o carregamento da bateria;
- o conversor de corrente contínua (CCC) converte entre dois níveis de tensão contínua. O CCC1 é o CCC que realiza o rastreamento do ponto de máxima potência extraída do painel;
- o conversor bidirecional, CCC2, tem a função de armazenar energia no supercapacitor quando há sobra de geração e não é possível direcioná-la para a bateria. Além de fornecer energia para o carregamento da bateria quando o painel solar não produz o necessário, isso nas pequenas oscilações, maximizando o aproveitamento de energia gerada pelo painel. Essa função do supercapacitor também é chamada de *energy buffer*, que significa um armazenador temporário de energia (ONGARO *et al.*, 2012).
- o conversor, o CCC3, tem o objetivo de realizar o carregamento correto da bateria segundo descrição do fabricante da mesma, seguindo curvas ótimas de carregamento (PARK *et al.*, 2013; ONGARO *et al.*, 2012).

O funcionamento básico desse sistema se baseia em quatro principais estados: carregar apenas a bateria, carregar a bateria e descarregar o supercapacitor, carregar a bateria e supercapacitor, e carregar apenas o supercapacitor. Além dos estados de ligar e desligar o MPPT do painel, o sistema varia entre os estados, de acordo com as condições.

O supercapacitor atua no carregamento da bateria quando a potência gerada pelo painel for abaixo da mínima requerida pela bateria,  $P_{bmin}$ . O supercapacitor é carregado quando a potência gerada pelo painel é maior do que  $P_{bmin}$ . Isso acontece pois o MPPT do painel está em execução juntamente com estas etapas, portanto o supercapacitor fica carregando e descarregando.

Segundo Ongaro *et al.* (2012) um dos principais cuidados que se deve ter ao carregar uma bateria típica de Li-íon é de não ocasionar sobretensão, por conta desse cuidado a tensão é monitorada. Por fim, quando a bateria atingir sua corrente do estágio de carga flutuante,  $I_{bmin}$ , significa que ela atingiu sua carga total e então o carregador é desligado, conforme Figura 3 b) (CHEM, 2013).

### 1.2.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do projeto proposto é de analisar a viabilidade técnica de se utilizar supercapacitores em sistemas de carregamento de baterias de Li-íon no qual a energia é gerada a partir de um painel fotovoltaico. Para realização deste objetivo principal é necessário que os seguintes objetivos específicos sejam alcançados:

- Revisão da literatura para análise e simulação dos seguintes sistemas:
  - Painéis fotovoltaicos,
  - Baterias de Li-íon,
  - Conversores estáticos a serem utilizados para carregamento de baterias,
  - Supercapacitores.
- Definição de uma configuração de conversores para carregamento de baterias e supercapacitores de forma a otimizar a energia convertida por um painel fotovoltaico;
- Projeto e implementação em simulação do conversor e do sistema de controle digital correspondente para maximização da potência gerada pelo painel;
- Projeto e implementação em simulações do conversor e do sistema de controle digital correspondente para carregamento da bateria;
- Projeto e implementação em simulações do conversor bidirecional e do sistema de controle digital correspondente para controle da corrente do supercapacitor;
- Projeto do sistema de gerenciamento da energia dos conversores;
- Análise e verificação da funcionalidade dos conversores, individualmente, e da configuração proposta;
- Análise da viabilidade técnica para implementação de um protótipo.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentado a revisão de literatura. No capítulo 3 é mostrada a estrutura do sistema de conversão de energia, definindo as configurações dos conversores e demais componentes do sistema, além do projeto e implementação de simulação dos conversores de maneira isolada. No capítulo 4 é desenvolvido o

sistema de gerenciamento da energia e a implementação em simulação do sistema completo, apresentando os resultados. Após, no capítulo 5, é realizada a análise e verificação da configuração proposta e efetuada as comparações do uso ou não do supercapacitor. Por fim, a conclusão no capítulo 6.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O embasamento teórico traz uma breve revisão de literatura acerca dos principais componentes que o projeto irá abordar: células fotovoltaicas, baterias, supercapacitores e os conversores estáticos de energia, ou conversores de corrente contínua.

### 2.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

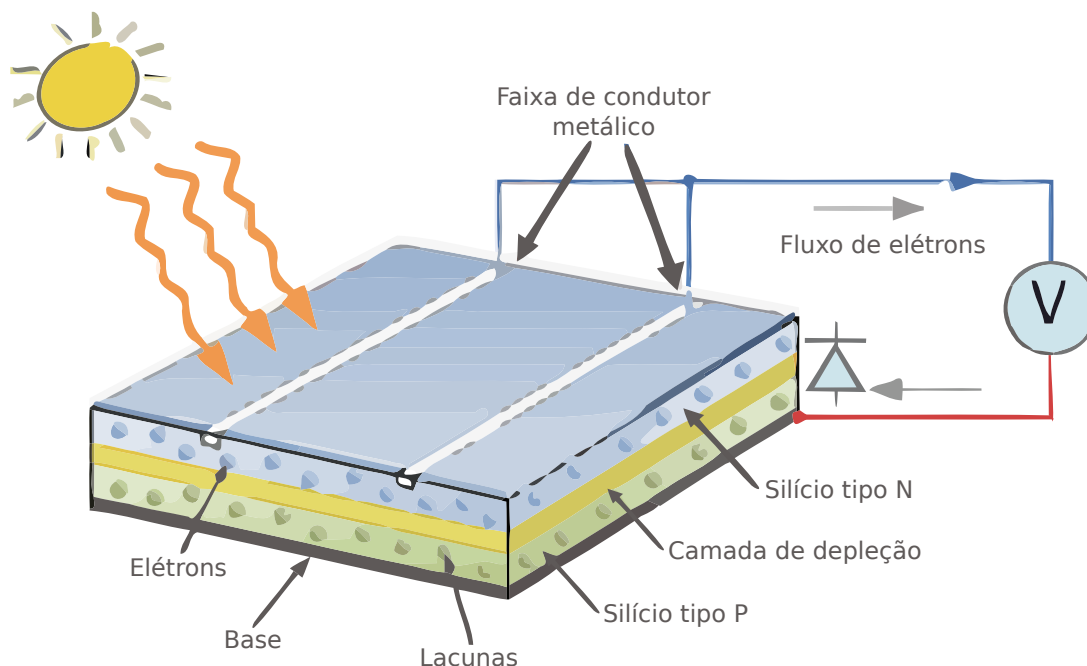
As células fotovoltaicas são dispositivos que convertem a energia da luz em energia elétrica através do fenômeno denominado efeito fotovoltaico. Este efeito fotovoltaico foi relatado inicialmente por Edmond Becquerel em 1839, onde ele constatou que há o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de um material semicondutor, causada pela incidência da luz (NASCIMENTO, 2004). No entanto, apenas com a física clássica, em especial com a teoria ondulatória da luz, não foi possível desenvolver uma explicação para o efeito fotovoltaico e fotoelétrico. Apenas em 1905, com o artigo sobre o efeito fotoelétrico de Albert Einstein reconsiderando a natureza corpuscular da luz, que foi possível explicar esses efeitos, pois considerando as ondas eletromagnéticas, inclusive a luz, formadas por fótons, pequenos pacotes de energia, é que foi plausível falar que a luz transporta energia (SANTOS, 2002; EINSTEIN, 1965).

#### 2.1.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Com a incidência da luz sobre uma junção de semicondutores, junção P-N no efeito fotovoltaico, cada fóton incidente é absorvido por um elétron da banda de valência dos átomos do material, se a energia do fóton for suficiente para que o elétron ultrapasse a banda proibida, o elétron então se desloca para a banda de condução e forma-se a corrente elétrica que pode ser aproveitada, também chamada de fotocorrente (CARVALHO, 2014).

Na Figura 6 são mostradas algumas das partes principais de uma célula fotovoltaica, constituída basicamente por uma camada de semicondutor do tipo N, com elétrons em excesso, e outra do tipo P, com lacunas em excesso. Quando ambas camadas estão juntas, é formada uma região neutra chamada de camada de depleção,

em decorrência disso os elétrons da camada N não conseguem ir para a camada P, a não ser pelos condutores metálicos externos, por isso a junção P-N se comporta como um diodo. Quando o material do tipo N que está voltado para cima, recebe os fótons da radiação solar, os elétrons do material tipo N recebem energia e então se desprendem dos seus átomos e circulam pelo circuito externo, gerando uma corrente elétrica (CARVALHO, 2014).



**Figura 6: Modelo simplificado de uma célula fotovoltaica comum.**  
Fonte: (TUTORIALS, 2016) com modificações.

### 2.1.2 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

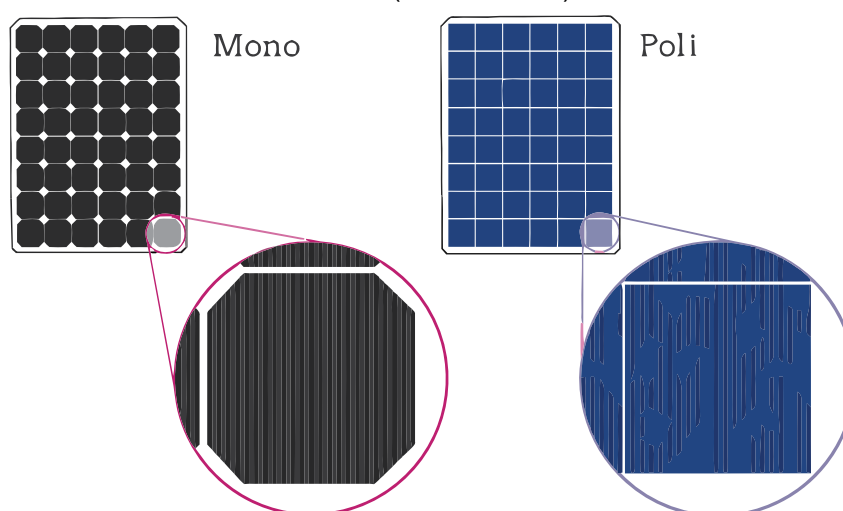
Existem basicamente quatro principais tecnologias, ou gerações de células fotovoltaicas: cristalinas, filmes finos, multijunção e novos conceitos (HOFFMANN, 2006; CARVALHO, 2014).

#### 2.1.2.1 CÉLULAS CRISTALINAS

As células cristalinas são também conhecidas como de primeira geração. São compostas de finas fatias de um material semiconductor, comumente utilizado o silício (Si) ou o arsenieto de gálio (GaAs). As células cristalinas se dividem em monocristalinas ou policristalinas. As de silício são as mais comercializadas, tendo as monocristalinas de silício uma eficiência de até 25% e as policristalinas de até 15%. As células monocristalinas de arsenieto de gálio podem ter eficiência de até 30%, entretanto são mais caras do que as de silício. As policristalinas têm eficiência menor por

terem regiões com orientações cristalográficas diferentes, entretanto são mais baratas em relação às monocristalinas (CARVALHO, 2014).

O processo de fabricação desse tipo de célula necessita de técnicas sofisticadas. Para a produção da monocristalina, o silício puro é colocado em barras e cortado em finas fatias; enquanto que para a policristalina, fragmentos de silício são colocados juntos para formar as finas fatias, sendo um processo menos sofisticado do que para produção da monocristalina. Na Figura 7 é mostrado a célula fotovoltaica nos tipos policristalina e monocristalina (SAGE, 2016).



**Figura 7: Células fotovoltaicas policristalina e monocristalina.**  
Fonte: (SAGE, 2016) com modificações.

### 2.1.2.2 CÉLULAS DE FILMES FINOS

As células fotovoltaicas de filmes finos são também conhecidas como de segunda geração. Essas células são fabricadas utilizando finos filmes de materiais semicondutores, como por exemplo, as células de telureto de cádmio (CdTe), seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS) e de silício amorfo (a-Si). Estas células têm rendimento em torno de 10% e baixa vida-útil, entretanto são mais baratas do que as cristalinas (CARVALHO, 2014). Na Tabela 1 é mostrada uma comparação de custo e eficiência entre as células fotovoltaicas nos tipos policristalino, monocristalino e filmes finos.

**Tabela 1: Comparação entre tipos de células fotovoltaicas**

<b>Tipo</b>	<b>Eficiência energética típica</b>	<b>Menores custos por Watt</b>
Célula monocristalina	15 a 27,6 %	USD \$ 3,48
Célula policristalina	12 a 21,9 %	USD \$ 3,29
Filmes finos	4 a 28,8 %	USD \$ 2,47

Fonte: (HREN, 2009; NREL, 2017).

### 2.1.2.3 CÉLULAS DE MULTIJUNÇÃO

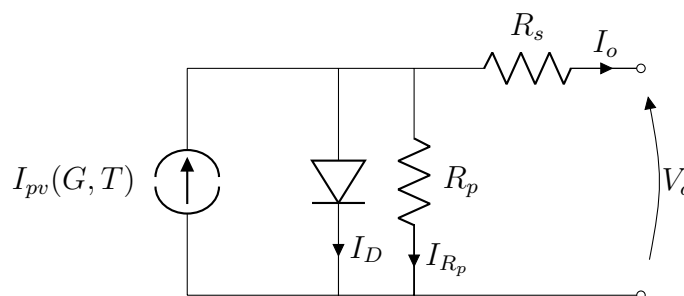
As células multijunção são também conhecidas como da terceira geração. Tais células são compostas de múltiplas junções P-N de diversos materiais semicondutores. Cada junção reage a diferentes comprimentos de onda da luz, em decorrência disso a eficiência deste tipo de célula aumenta em relação aos demais tipos, podendo chegar em torno de 30%. Um entrave para fins comerciais ainda é o alto custo de fabricação (CARVALHO, 2014).

### 2.1.2.4 NOVOS CONCEITOS

Ainda estão em desenvolvimentos algumas outras tecnologias, entre as mais promissoras estão as: células orgânicas e poliméricas, células de ponto quântico, células fotoeletroquímicas sensibilizadas por corante, células com materiais como a perovskita e o arsenieto de gálio; e as células feitas com absorventes solares (CARVALHO, 2014; KATZ, 2014).

### 2.1.3 MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE

O modelo de uma célula fotovoltaica está representado simplificada no circuito da Figura 8, onde  $I$  e  $I_{pv}$  são correntes e  $V$  é a tensão de saída da célula (nos circuitos elétricos desde documento, as setas apontam para a polaridade convencionalizada como positiva naquelas que indicam tensão elétrica). Este circuito é composto por uma fonte de corrente dependente da temperatura  $T$  e da irradiação solar  $G$ , de um diodo em paralelo com a fonte de corrente, um resistor de saída  $R_s$  e o resistor  $R_p$  em paralelo. Os parâmetros de tensão e corrente elétrica da célula são determinados por ensaios de circuito aberto e curto-circuito respectivamente (WALKER, 2001; BONKOUNGOU *et al.*, 2013).



**Figura 8: Circuito simplificado de uma célula fotovoltaica.**  
**Fonte: (BONKOUNGOU *et al.*, 2013)**

A corrente de saída  $I_o$  de uma célula fotovoltaica, mostrada na Figura 8,

pode ser obtida pela subtração da  $I_{pv}$  pela corrente que passa pelo diodo,  $I_D$  e a que passa pelo resistor  $R_p$ . Conforme descrito,

$$\begin{aligned} I_o &= I_{pv} - I_D - I_{R_p} \\ I_o &= (I_{cc} + K_i(T - T_n)) \frac{G}{G_n} - I_{0D} \left( e^{\frac{V_o + R_s \cdot I_o}{A \cdot V_T}} - 1 \right) - \left( \frac{V_o + R_s \cdot I_o}{R_p} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $I_{0D}$  é a corrente de saturação reversa do diodo, pode ser descrita como

$$I_{0D} = I_{0,n} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 e^{\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K_i} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}. \quad (2)$$

Na equação 2 o termo  $I_{0,n}$  é a corrente nominal de saturação do diodo, que pode ser descrita como

$$I_{0,n} = \frac{I_{cc} + K_i(T - T_n)}{e^{\frac{V_{oc} + K_v(T - T_n)}{A \cdot V_T}} - 1}. \quad (3)$$

Nas equações 1, 2 e 3, os termos utilizados são:

$A$  = fator de qualidade do diodo, entre 0 a 2,

$E_g$  = energia da banda proibida do semicondutor da célula, 1,12 eV para o silício policristalino,

$G$  = irradiação solar em  $W/m^2$ ,

$G_n$  = irradiação solar nominal em  $W/m^2$ ,

$I_{cc}$  = corrente de curto circuito da célula em A,

$V_{oc}$  = tensão de circuito aberto da célula em V,

$K_i$  = coeficiente de temperatura para curto circuito do diodo,

$K_v$  = coeficiente de temperatura para circuito aberto do diodo,

$N_s$  = número de células conectadas em série,

$T$  = temperatura da junção p-n em K,

$T_n$  = temperatura nominal da junção em K,

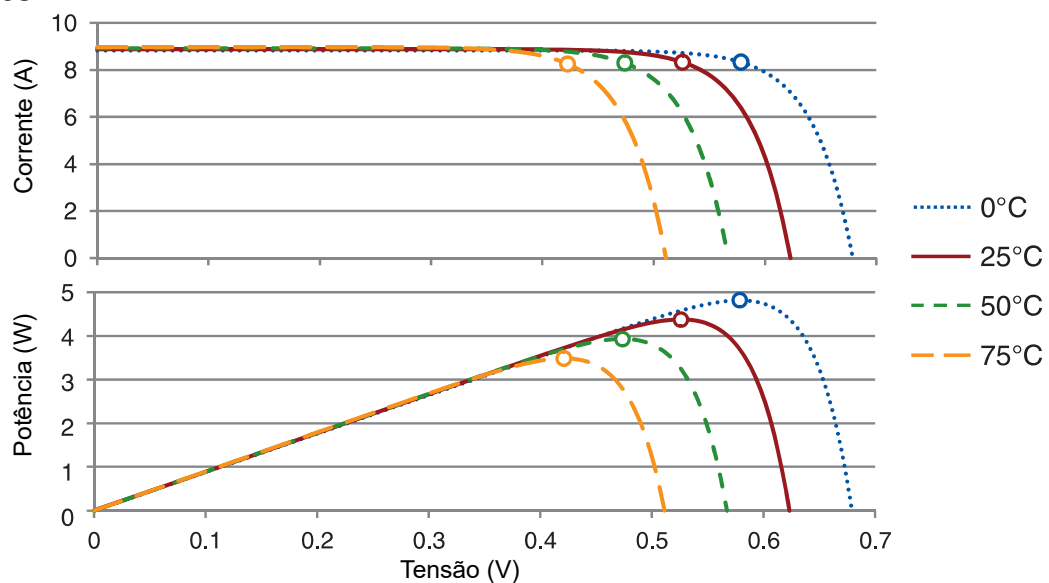
$k$  = constante de Boltzman,  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K,



$q$  = carga do elétron,  $1.60 \cdot 10^{-19}$  C,

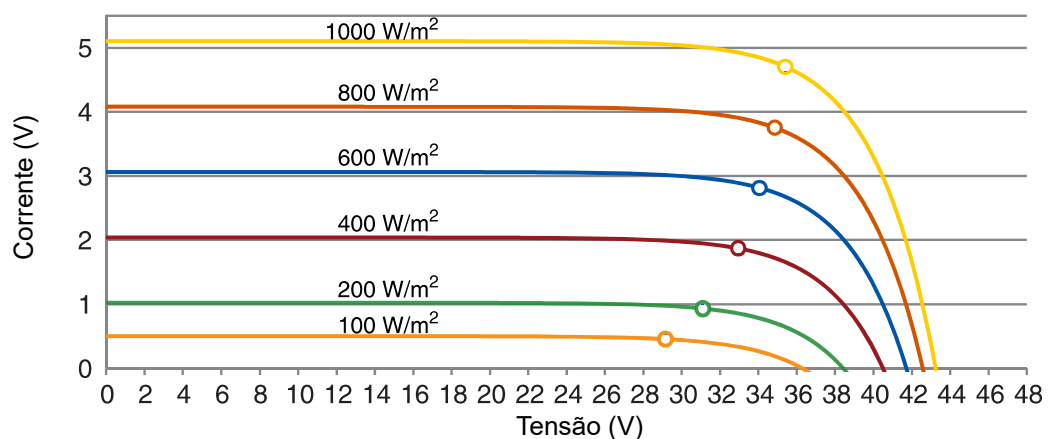
$$V_T = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q}$$

Um painel fotovoltaico tem curvas características de tensão e corrente para diferentes níveis de irradiação solar e temperatura. Na Figura 9 são mostradas curvas de corrente por tensão e potência por tensão para diferentes temperaturas; enquanto que na Figura 10 estão desenhadas curvas de corrente por tensão para diferentes níveis de irradiação solar. Os pontos de máxima potência (MPP) estão indicados por círculos.



**Figura 9: Curvas características de corrente por tensão e potência por tensão de um painel fotovoltaico para diferentes temperaturas.**

Fonte: (MERTENS, 2013) com adaptações.

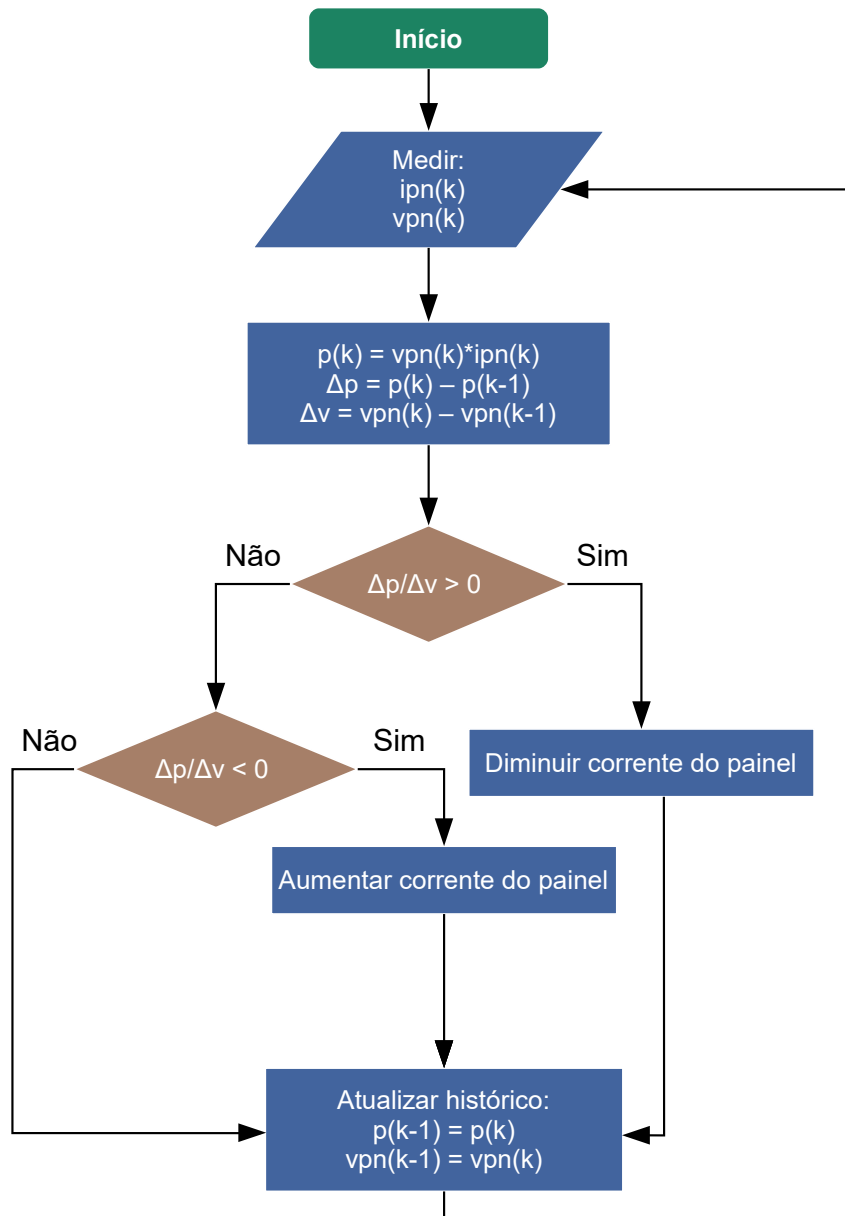


**Figura 10: Curvas característica de corrente por tensão de um painel fotovoltaico para diversos níveis de irradiações.**

Fonte: (MERTENS, 2013) com adaptações.

## 2.1.4 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Geralmente são empregados métodos para garantir a operação do painel na máxima potência disponível. O método de perturbar e observar é um dos mais simples métodos para rastrear o ponto de máxima potência de um painel fotovoltaico. Ele consiste em pequenas variações na tensão ou corrente do painel e com isso a leitura da diferença de potência extraída do painel.



**Figura 11: Diagrama do algoritmo para implementação do método de perturbar e observar.**

**Fonte: (ARUMUGAM.R *et al.*, 2012) com modificações.**

Nesse método, se a diferença de potência é positiva, quer dizer que a variação da tensão ou corrente está no caminho de alcançar o MPP, se for negativa, a variação está fazendo com que o MPP se distancie. O algoritmo que realiza esta

lógica está esquematizado no diagrama da Figura 11 (ARUMUGAM.R *et al.*, 2012), onde  $i_{pn}(k)$  e  $v_{pn}(k)$  são a corrente e a tensão atual do painel, respectivamente.  $p(k)$  é a potência atual extraída do painel,  $(k-1)$  significa o valor anterior da variável.

## 2.2 BATERIAS

Segundo Grbović (2014) as baterias são formas indiretas de armazenar energia elétrica, pois estocam energia em uma dada forma e para disponibilizar em forma elétrica, é necessário a conversão entre formas de energia. Elas podem ser classificadas de uma forma geral em primárias ou secundárias, sendo as primárias aquelas que não são recarregáveis e as secundárias as recarregáveis. Por definição as baterias secundárias são aquelas que suportam no mínimo 300 ciclos completos de carga e descarga com 80% de sua capacidade, exemplo destas têm-se as de íons de lítio, ou também chamadas Li-íon (BOCCHI *et al.*, 2000). Considerando o acentuado índice de utilização deste tipo de bateria, o projeto proposto irá dar maior enfoque no estudo deste tipo de bateria (BOCCHI *et al.*, 2000).

### 2.2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E PRINCIPAIS TIPOS DE BATERIAS DE LI-ÍON

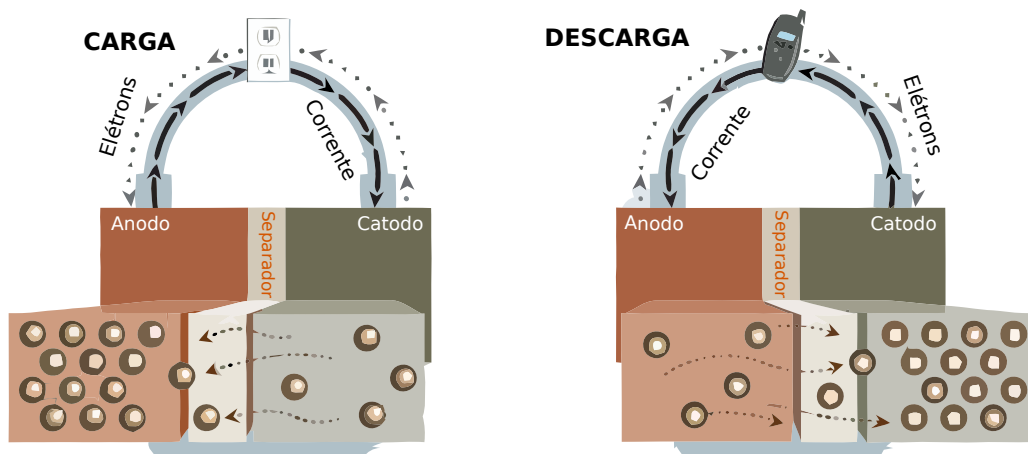
As baterias recarregáveis de Li-íon começaram a ser usadas em meados de 1991. Atualmente são largamente utilizadas em dispositivos portáteis devido suas características mais confiáveis, não utilizarem compostos tóxicos, terem densidade de energia mais elevada e não sofrerem do efeito memória (BOCCHI *et al.*, 2000).

As baterias de Li-íon são compostas por uma ou mais células, sendo que cada célula é constituída basicamente por um eletrodo positivo (catodo), geralmente composto de óxido de lítio-cobalto ( $LiCoO_2$ ), um eletrodo negativo (anodo), comumente de grafite e um composto químico chamado eletrólito entre os eletrodos (WOODFORD, 2014; LINDEN; REDDDY, 2002). Dentre as baterias deste tipo, se ramificam algumas com eletrodos de diferentes compostos químicos (NETZSCH, 2015). Dos tipos de catodo, existem alguns como:

- **Óxido de Lítio-Cobalto ( $LiCoO_2$ ):** Oferece uma grande densidade de energia, mas com riscos de segurança associados, principalmente quando danificadas.
- **Fosfato de Lítio-Ferro ( $LiFePO_4$ ):** Oferece baixa densidade de energia. Em contrapartida tem uma alta durabilidade com uma segurança inerente.

- **Sulfeto de Lítio ou Lítio/Carbono-Enxofre ( $Li_2S - C$ ):** Ainda em fase de pesquisas, apresenta já uma energia específica extraordinária para as baterias atuais (cerca de quatro vezes mais que as convencionais baterias de Li-íon) (GEEK, 2010). Este tipo de bateria promete uma alta capacidade de armazenamento com um peso relativamente médio (o peso relacionado neste contexto se refere aos elementos envolvidos na reação química em comparação com a densidade da água).
- **Carbono/Lítio-Enxofre:** Em 2010, pesquisadores de Stanford publicaram acerca de uma bateria com alta energia específica utilizando nanotubos de silício no anodo e nano composições de Carbono/Lítio-Enxofre no catodo (YANG *et al.*, 2010).

O processo de carga da bateria de Li-íon acontece quando íons de lítio se deslocam do eletrodo positivo para o negativo e os elétrons pelo circuito externo. Já o processo de descarga ocorre no sentido contrário, quando íons de lítio se deslocam do eletrodo negativo para o positivo e os elétrons pelo circuito externo, como ilustrado na Figura 12 (WOODFORD, 2014).

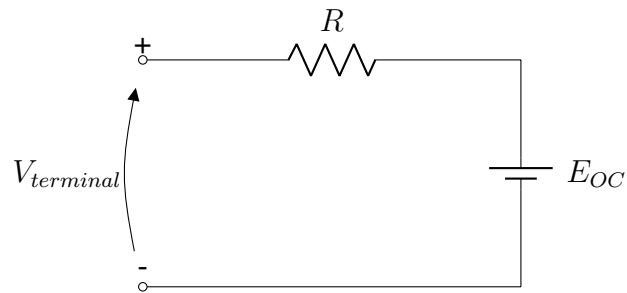


**Figura 12: Ilustração do processo de carga e descarga de uma bateria de Li-íon.**  
**Fonte: (POWERSIM, 2016b) com adaptações.**

### 2.2.2 MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE

Um circuito equivalente simplificado de uma bateria está mostrado na Figura 13, onde  $E_{OC}$  é a tensão de circuito aberto e  $R$  representa uma resistência intrínseca à bateria (IGLESIAS *et al.*, 2012).

A fonte de tensão  $E_{OC}$  é uma fonte dependente que tem sua tensão para



**Figura 13: Circuito simplificado de uma bateria.**  
**Fonte: (IGLESIAS et al., 2012) com adaptações.**

descarga expressa por

$$E_{OC} = E_o - K \frac{Q}{Q - it} i_f - K \frac{Q}{Q - it} it + Ae^{-B it}, \quad (4)$$

e para a carga expressa através de (TREMBLAY; DESSAINT, 2009)

$$E_{OC} = E_o - K \frac{Q}{Q + 0,1 it} i_f - K \frac{Q}{Q - it} it + Ae^{-B it}, \quad (5)$$

onde:

$E_o$  = constante de tensão da bateria em V,

$K$  = constante de polarização em V/Ah,

$Q$  = capacidade da bateria em Ah,

$it = \int i dt$ , carga atual da bateria em Ah,

$i_f$  = corrente filtrada por um filtro passa baixas em A (Amperes),

$A$  = Amplitude da zona exponencial da curva de descarga, em V.

$B$  = Constante de tempo inverso da zona exponencial da curva de descarga, em  $(Ah)^{-1}$ .

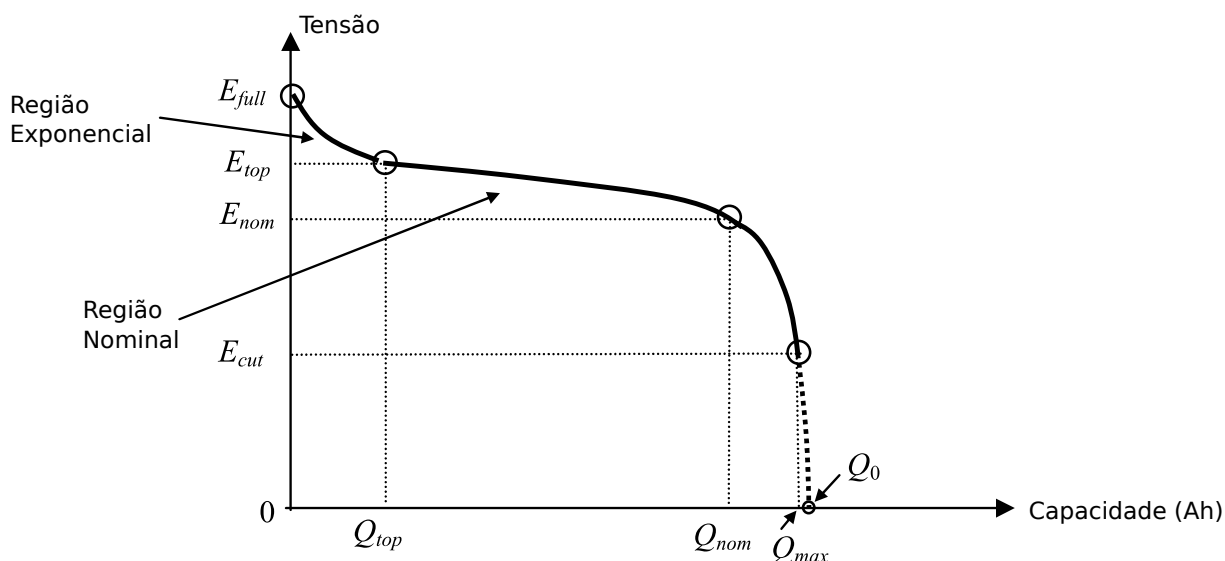
Para implementação do modelo da bateria de Li-íon no Psim, programa de simulação de eletrônica de potência, utiliza-se o modelo físico disponível no próprio programa, a partir da versão 9.3, onde são requeridos alguns parâmetros da bateria a ser simulada. Tais parâmetros estão descritos abaixo (PSIM, 2016):

- $N_s$ : número de células em série,
- $N_p$ : número de células em paralelo,

- $K_s$ : fator de redução da tensão, considerado um fator de segurança para a tensão em modo *standby* (ASSOCIATION, 2009),
- $K_p$ : fator de redução da capacidade, comumente utilizado 1,25, pois considera-se que 80% é o fim da vida de serviço da bateria (SOCIETY, 2006),
- $E_{rated}$ : tensão nominal em V,
- $E_{cut}$ : tensão de corte de descarga em V,
- $Q_{rated}$ : capacidade nominal em Ah,
- $R_{batt}$ : resistência interna em  $\Omega$ ,
- $I_{dischg}$ : corrente de descarga, é a corrente para a qual foi obtida a curva de descarga, em A,
- $K_c$ : fator de capacidade, comumente 1,01 (PSIM, 2016),
- $E_{full}$ : máxima tensão da bateria em V,
- $E_{top}$ : tensão do ponto exponencial em V,
- $E_{nom}$ : tensão nominal da curva em V,
- $Q_{max}$ : capacidade máxima para  $E_{cut}$ , em Ah,
- $Q_{top}$ : capacidade de ponto exponencial em Ah,
- $Q_{nom}$ : capacidade nominal da curva em Ah.

Os parâmetros de  $E_{rated}$ ,  $E_{cut}$ ,  $R_{batt}$  e  $Q_{rated}$  são obtidos através da folha de dados do fabricante da bateria, os outros parâmetros são obtidos através de ensaio de descarga da bateria para uma dada corrente,  $I_{dischg}$ , obtendo uma curva de acordo com a da Figura 14, onde são mostrados os parâmetros a serem extraídos da curva.

Nesta seção, 2.2, foram apresentados os princípios de funcionamento das baterias de Li-íon, além dos principais tipos encontrados comercialmente, e por fim, o modelo elétrico equivalente e explanado o procedimento para obtenção dos parâmetros de uma bateria para simulação em Psim. Considerando as limitações existentes, principalmente em relação ao número de ciclos e carga/descarga de baterias, na próxima seção serão abordados os supercapacitores, que podem ser uma opção para reduzir este problema.



**Figura 14: Curva de descarga de uma bateria de Li-íon.**

Fonte: (PSIM, 2016) com adaptações.

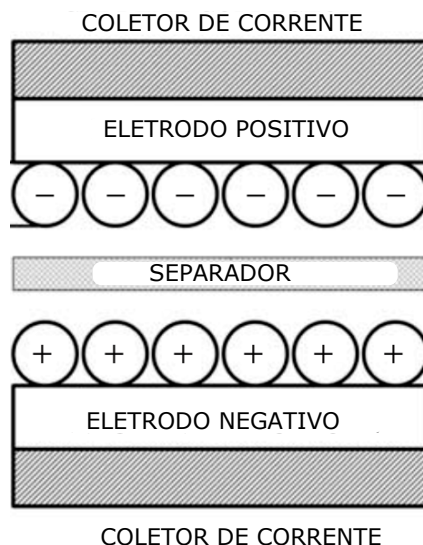
## 2.3 SUPERCAPACITORES

Supercapacitor, também referido como ultracapacitor, é um sistema de armazenamento de energia que une duas características interessantes para diversas aplicações: a alta densidade de potência dos capacitores dielétricos e a alta densidade de energia das baterias químicas. Segundo Grbović (2014), os supercapacitores são formas diretas de armazenar energia elétrica, porque não necessitam da conversão da energia armazenada para a elétrica. No caso dos supercapacitores a energia é armazenada em campo eletro-magnético.

### 2.3.1 PRINCIPAIS TIPOS E PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Um capacitor comum contém um material dielétrico entre suas placas e, quando carregado, cria-se um campo elétrico entre elas. Ao polarizar o dielétrico, as moléculas dele se alinham em direção oposta ao campo, armazenando cargas em um campo elétrico. No supercapacitor as placas são submersas em um eletrólito e separadas por um isolante bem fino, que pode ser de carbono, papel ou plástico (BURKE, 2000).

Quando as placas são carregadas, uma carga oposta se forma em cada lado do isolante, que funciona como separador, criando o que é chamada de camada elétrica dupla (em inglês, *electric double-layer*). Esta configuração faz com que a capacitância seja diretamente proporcional a área e inversamente proporcional a distância entre as placas, como ilustra a Figura 15 (GRBOVIĆ, 2014).



**Figura 15: Desenho ilustrativo de um supercapacitor de camada elétrica dupla.**

Fonte: (GRBOVIĆ, 2014).

Segundo Halper e Ellenbogen (2006) os supercapacitores podem ser divididos em supercapacitores eletroquímicos de dupla camada, pseudocapacitores e capacitores híbridos, a diferença está no mecanismo de estocar a carga elétrica.

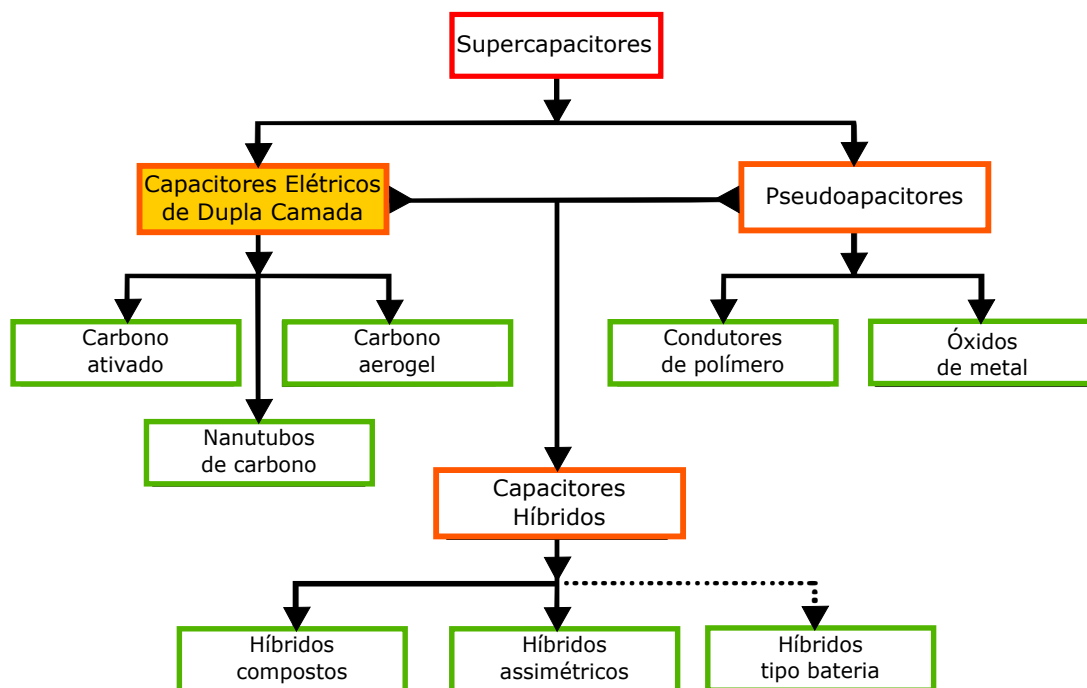
Nos eletroquímicos de dupla camada as cargas elétricas são distribuídas na superfície por processos físicos que não envolvem a quebra ou junção de ligações químicas, este tipo será o utilizado nos trabalhos do projeto proposto. Nos pseudocapacitores existe reações de óxido-reduções que envolvem a transferência entre eletrodo e eletrólito. Os híbridos são uma combinação dos dois anteriores. As três classificações gerais dos supercapacitores são subdivididas em outras, mostradas na Figura 16 (HALPER; ELLENBOGEN, 2006).

Capacitores eletroquímicos de dupla camada são constituídos de dois eletrodos porosos separados por um dielétrico com uma placa metálica para coletar a corrente elétrica, criando um equivalente a dois capacitores em paralelo como uma dupla camada. Eles ainda são capacitores não lineares, com capacitância dependente da tensão, descrita por

$$C(v) = C_0 + k_C v \quad (6)$$

onde,  $C(v)$  é a capacitância em função da tensão aplicada no supercapacitor,  $C_0$  é a capacitância inicial, representando a capacitância eletrostática,  $k_C$  é uma constante que representa os efeitos da camada de difusão do supercapacitor e  $v$  é a tensão aplicada. Segundo Grbović (2014) a energia armazenada,  $W(v)$ , quando aplicada





**Figura 16: Taxonomia dos supercapacitores.**

Fonte: (HALPER; ELLENBOGEN, 2006).

uma tensão  $v$ , pode ser descrita por:

$$W(v) = \frac{1}{2} \left( C_0 + \frac{4}{3} k_c v \right) v^2 \quad (7)$$

O valor comum de  $C_0$  pode estar na ordem de centenas de Farads, podendo gerar grandes valores de capacitância e de energia, enquanto que o valor de  $v$  é da ordem de dezenas de Volts. Na Tabela 2 são mostrados alguns valores comuns de tensão aplicada, capacitância em Farads e de energia armazenada de: supercapacitores (S), capacitores de filme eletrostático (CFE) e capacitores eletrolíticos (CE) (GRBOVIĆ, 2014; BURKE, 2000).

**Tabela 2: Comparação entre supercapacitor e capacitores convencionais**

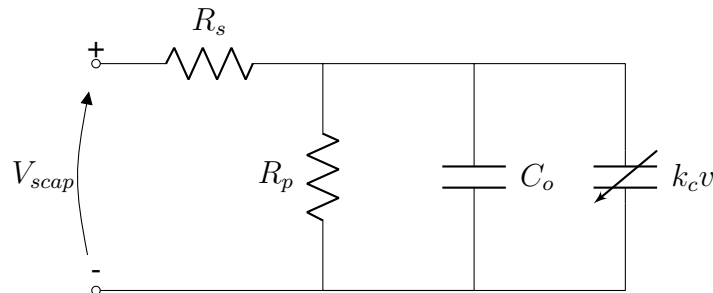
Tipo	Tensão aplicada(V)	Capacitância	Energia
S	2,8	5000-7500 F/dm <sup>3</sup>	19-30 kJ/dm <sup>3</sup>
CFE	880	700-900 μF/dm <sup>3</sup>	270-350 J/dm <sup>3</sup>
CE	450	5000-7500 μF/dm <sup>3</sup>	500-750 J/dm <sup>3</sup>

Fonte: (GRBOVIĆ, 2014).

### 2.3.2 MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE

Um circuito elétrico equivalente para o supercapacitor é mostrado na Figura 17, nele são inseridas as características comumente encontradas em superca-

pacitores de dupla camada. O resistor  $R_p$  representa os efeitos da auto-descarga do supercapacitor. Os íons livres no eletrólito desenvolvem uma alta mobilidade, e isso proporciona uma baixa resistência série, representada por  $R_s$  (JOHANSSON; ANDERSSON, 2008).



**Figura 17: Circuito simplificado de um supercapacitor.**  
**Fonte: (CULTURA; SALAMEH, 2015) com adaptações.**

Nos supercapacitores, basicamente dois conceitos da física são aplicados para explicar seu funcionamento, a difusão e a eletrostática. Quando o supercapacitor está completamente descarregado os íons são distribuídos igualmente no eletrólito por difusão. Quando ele começa a ser carregado os íons são atraídos para os eletrodos pelo campo elétrico criado (eletrostática), criando uma separação de íons. A auto-descarga é na sua maioria causada pelo efeito de difusão (JOHANSSON; ANDERSSON, 2008).

Para calcular o valor de  $C_o$  pode-se utilizar a expressão

$$C_o = C_{nom} - k_c v_{nom}, \quad (8)$$

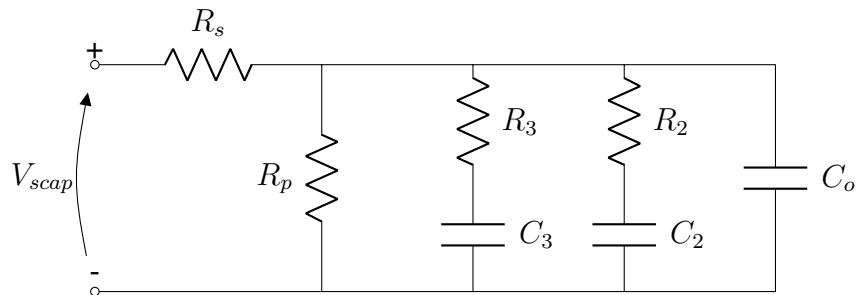
onde

$C_{nom}$  = capacitância nominal do supercapacitor especificada pelo fabricante,

$v_{nom}$  = tensão nominal do supercapacitor especificada pelo fabricante.

Uma versão simplificada do supercapacitor para implementação no programa Psim pode ser representado como na Figura 18 (POWERSIM, 2016a).

Os parâmetros mostrados na Figura 18 e na Figura 17 afetam as características de carga em intervalos de tempo diferentes. Os parâmetros  $k_c$ ,  $R_s$  e  $C_o$  afetam no período de pequena resposta, por volta de segundos, no tempo 0, t2 e t3 da Figura 19. Os parâmetros  $R_2$  e  $C_2$  afetam em período curto para médio a resposta, em torno de minutos, nos tempos t3, t5 e t6. Os parâmetros  $R_3$  e  $C_3$  afetam em um período de médio para longo, centenas de minutos, nos períodos entre t7, t8 e t9. Por

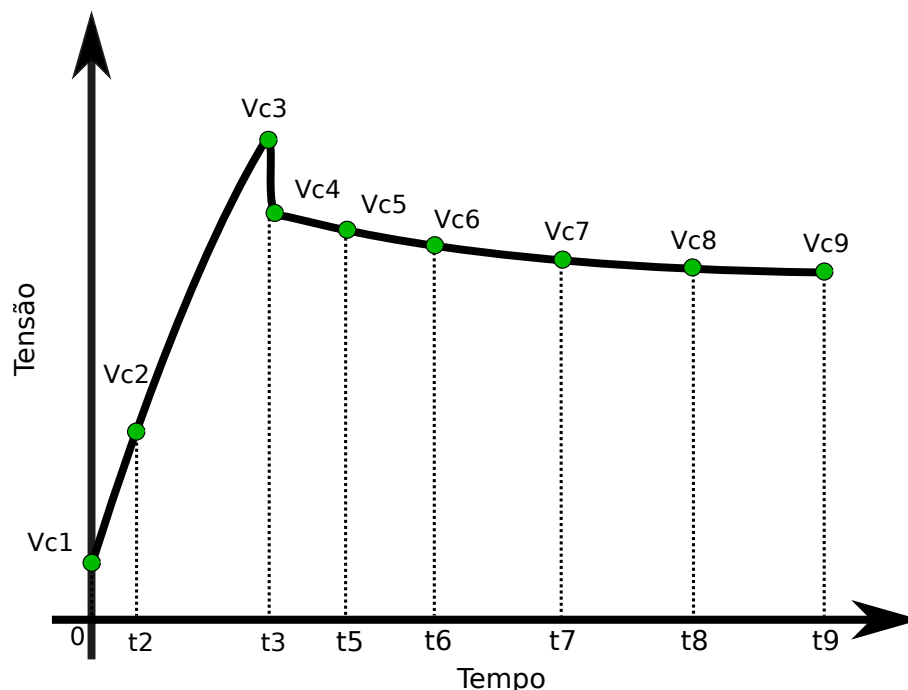


**Figura 18: Circuito simplificado de um supercapacitor para simulação em Psim.**

**Fonte: (POWERSIM, 2016a) com adaptações.**

Por fim o  $R_p$ , como mencionado anteriormente, representa as perdas de auto-descarga. O  $R_p$  é obtido através de informações da folha de dados do supercapacitor, utilizando a *leakage current* (POWERSIM, 2016a).

Estes parâmetros são obtidos através de ensaio da carga e descarga do supercapacitor, obtendo uma curva de acordo com a da Figura 19, e seus parâmetros são obtidos para uma célula. Durante o período de 0 até  $t_3$  é carregado o supercapacitor com uma corrente constante até sua tensão chegar na tensão nominal,  $V_{c3}$ , então a corrente é interrompida e ele fica em aberto. A queda de tensão de  $V_{c3}$  para  $V_{c4}$  é devido a queda de tensão no resistor  $R_s$  (BAN *et al.*, 2013).



**Figura 19: Curva de carga e descarga de supercapacitores.**

**Fonte: (POWERSIM, 2016a) com adaptações.**

Nesta seção foram abordados os conceitos envolvidos no funcionamento dos supercapacitores, bem como os principais tipos, dois modelos elétricos equivalentes, e por fim a forma de obtenção dos parâmetros para simulação em Psim. Na

seção seguinte é abordado acerca dos conversores estáticos de energia, a saber, o conversor Sepic, *Buck* e *Buck* Bidirecional.

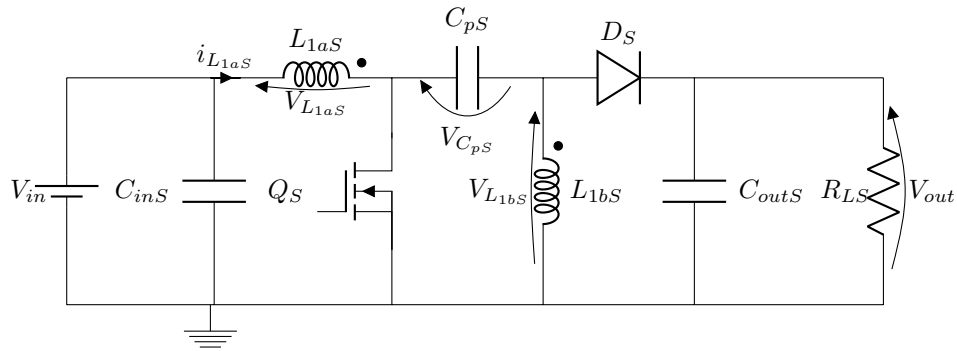
## 2.4 CONVERSORES ESTÁTICOS DE ENERGIA

Os conversores estáticos de energia são circuitos que utilizam chaves semicondutoras (durante o texto esta chave será referida também como Mosfet), e arranjos de elementos passivos para elevar ou reduzir tensões em corrente contínua. A análise de cada um deles é feita considerando os estágios da chave, para quando está fechada e quando está aberta. Uma característica comum a estes conversores é que a potência elétrica de sua entrada é muito próxima da obtida na sua saída, considerando-o em muitas aplicações com rendimento unitário para a etapa de projeto (PETRY, 2001). Dentre os vários conversores de energia elétrica existentes foram escolhidos três através das razões explicadas na seção 3.1. Esses conversores são:

- Conversor Sepic: chamado ao longo do texto de CCC1, ele eleva e abaixa a tensão de entrada. Será o utilizado para controlar a corrente do painel fotovoltaico e realizar o MPPT do painel;
- Conversor *Buck*: chamado ao longo do texto de CCC3, ele apenas abaixa a tensão de entrada. Será o utilizado para controlar a corrente da bateria, realizando o correto carregamento dela;
- Conversor *Buck* Bidirecional: chamado ao longo do texto de CCC2, ele abaixa a tensão no sentido da entrada para a saída e eleva no sentido da saída para a entrada. Será o utilizado para controlar a corrente do supercapacitor.

### 2.4.1 CONVERSOR SEPIC

O conversor Sepic (do inglês, *Single Ended Primary Inductance Converter*, (Sepic)) tem seu circuito simplificado mostrado na Figura 20, onde são utilizados dois indutores acoplados, devido o aumento da eficiência, redução da área do circuito, além de características mais benignas de controle (BETTEN, 2011). Todas estas análises são realizadas considerando em regime constante, quando os capacitores estão carregados e estão com capacidade suficientes para não diminuírem significativamente sua tensão em um período  $T$  de chaveamento de  $Q_1$ . O resistor  $R_L$  apenas representa uma carga conectada na saída do conversor. Será analisado o modo de condução contínua (MCC).

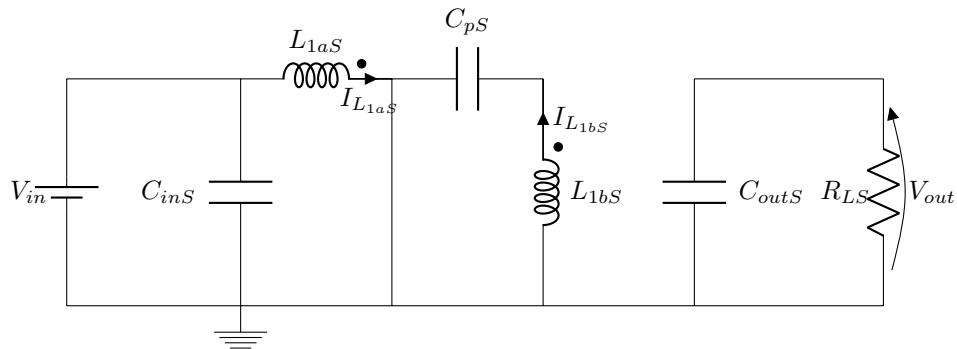


**Figura 20: Circuito simplificado do conversor Sepic.**

Fonte: (FALIN, 2008) com modificações.

#### 2.4.1.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

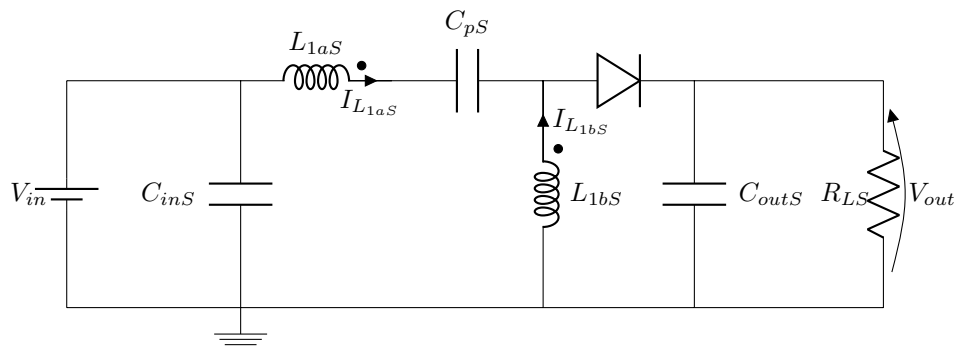
Em uma primeira etapa deste conversor, mostrado na Figura 21, a chave  $Q_S$  é ligada, ou seja, está em condução,  $L_{1aS}$  é carregado pela fonte de entrada,  $L_{1bS}$  pelo capacitor  $C_{pS}$  e a carga alimentada pelo capacitor  $C_{outS}$ . Nesta etapa, o capacitor  $C_{pS}$  inicia carregado com tensão  $V_{in}$  (FALIN, 2008).



**Figura 21: Circuito para Q1 ligada do conversor Sepic.**

Fonte: (FALIN, 2008) com modificações.

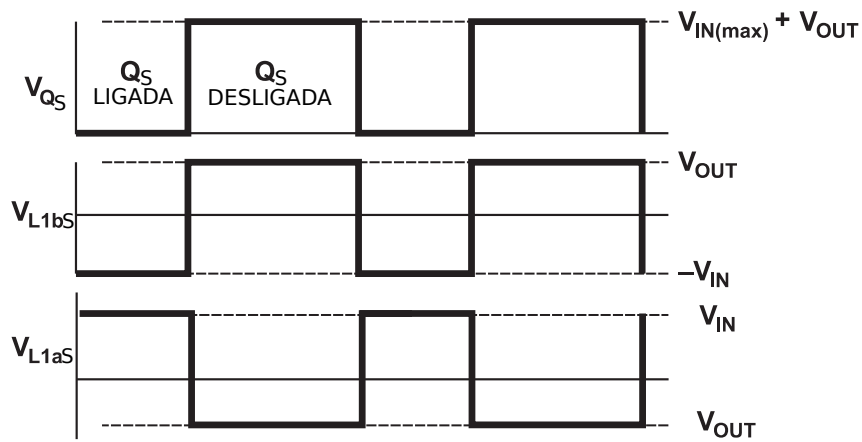
Em um segundo estágio mostrado na Figura 22, quando a chave  $Q_S$  está aberta, ou seja, não está conduzindo, o diodo  $D_S$  conduz, o indutor  $L_{1bS}$  permanece tensão  $V_{out}$ , o indutor  $L_{1aS}$  fica com a mesma tensão de  $L_{1bS}$ , pois são indutores acoplados. Logo o capacitor  $C_{pS}$  carrega com a tensão da entrada  $V_{in}$  (FALIN, 2008).



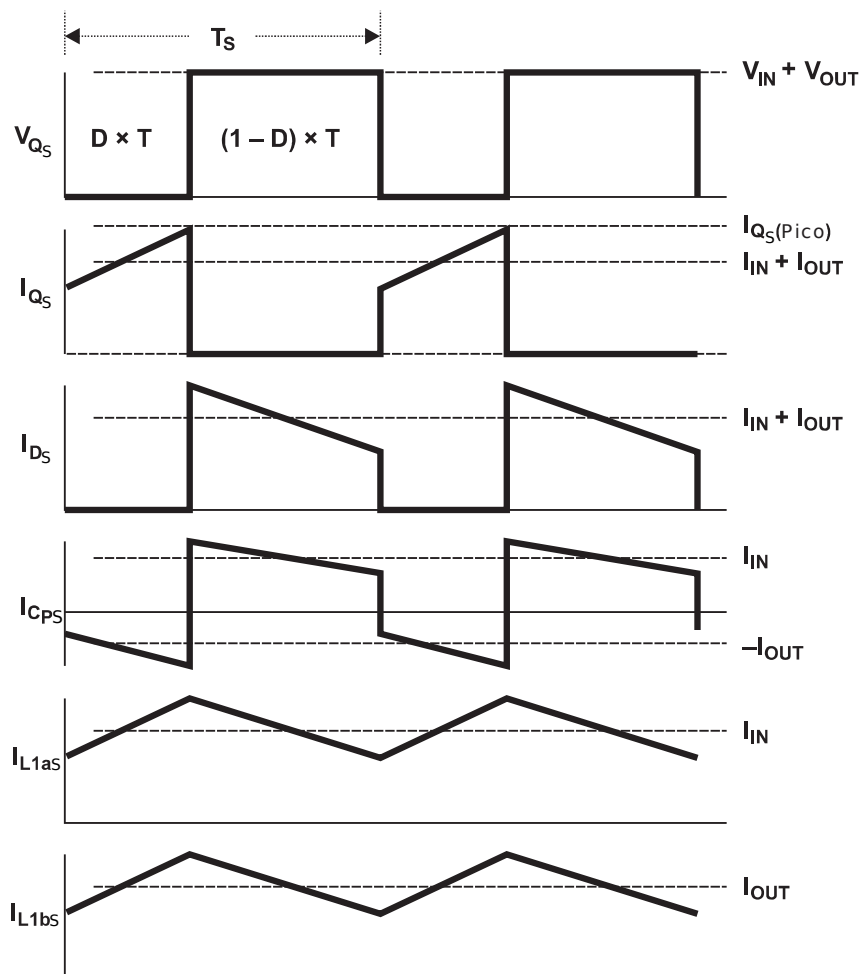
**Figura 22: Circuito para Q1 desligada do conversor Sepic.**

Fonte: (FALIN, 2008) com modificações.

As formas de onda de tensão nos elementos do Sepic estão mostrados na Figura 23 e as correntes na Figura 24, onde  $T$  é o período de chaveamento da chave  $Q_S$ .



**Figura 23: Ondas de tensão no conversor Sepic em MCC.**  
 Fonte: (FALIN, 2008) com modificações.



**Figura 24: Ondas de corrente no conversor Sepic em MCC.**  
 Fonte: (FALIN, 2008) com modificações.

## 2.4.1.2 METODOLOGIA DE PROJETO

Para esta metodologia de projeto seguiu-se Falin (2008). Para determinação do ganho estático  $G$ , e da razão de trabalho  $D$  deste conversor, pode-se partir da premissa que a tensão média no indutor é zero, ou seja, a integral da tensão no indutor em um período de amostragem é zero. Utilizando para isso o indutor  $L_{1aS}$ , a tensão média é zero, logo  $\int_0^T V_{L1aS}(t)dt = 0$ , utilizando o gráfico da Figura 23 para determinar a tensão no indutor  $L_{1aS}$  para o período  $DT$  como também para o período  $(1 - D)T$  obtêm-se a equação

$$(V_{in}DT - V_{out}(1 - D)T) = 0, \quad (9)$$

isolando a relação  $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ , encontra-se o ganho estático  $G$ ,

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = G = \frac{D}{1 - D}. \quad (10)$$

Como considera-se que o conversor tem eficiência unitária,  $P_{in} = P_{out}$ , além de  $P = V \cdot I$ , então  $I_{in} \cdot V_{in} = I_{out} \cdot V_{out}$ , logo  $\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}}$ , isolando  $D$  da equação (10) encontra-se a equação para a razão cíclica

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}}. \quad (11)$$

Para dimensionar os indutores acoplados é necessário admitir uma variação máxima da corrente no indutor, que normalmente varia de 20% a 40%, sendo condizente adotar 30%. Logo a variação da corrente no indutor acoplado,  $\Delta I_L$  fica como  $\Delta I_L = 30\%I_{in}$ , segundo Falin (2008).

Como os indutores são acoplados, esta variação de corrente corresponde aos dois indutores juntos. Portanto para encontrar o valor mínimo de cada um deles considera-se a equação básica de relação da tensão em um indutor,

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (12)$$

isolando a indutância  $L$ , adotando  $\frac{di_L}{dt}$  como sendo  $\frac{\Delta i_L}{\Delta t}$  em um período de amostragem, fica como

$$L = \frac{V_L \Delta t}{\Delta I_L}, \quad (13)$$

utilizando a variação da corrente no período  $DT$ , ou seja, quando a chave está fechada, substituindo  $T$  por  $\frac{1}{f_{sw}}$ , onde  $f_{sw}$  é a frequência de chaveamento do Mosfet

do conversor, e substituindo  $V_L$  pela tensão no indutor neste período,  $V_L = V_{in_{min}}$ , dividindo-se por 2, sendo considerado valores de tensão de entrada mínima,  $V_{in_{min}}$ , frequência de chaveamento mínima,  $f_{sw_{min}}$  e razão cíclica máxima,  $D_{max}$ , pois estas são as piores condições que os indutores acoplados devem satisfazer para que o conversor esteja em MCC, obtêm-se a indutância

$$L_{1aS_{min}} = L_{1bS_{min}} = \frac{V_{in_{min}} D_{max}}{2\Delta I_L f_{sw_{min}}}. \quad (14)$$

A corrente máxima nos indutores é calculada pela soma da corrente média neles com metade da variação da corrente  $\Delta I_L$ . A corrente de pico (máxima) no indutor  $L_{1aS}$  é dado por

$$I_{L1aS_{pico}} = I_{in} + \frac{\Delta I_L}{2} = I_{in} \left( 1 + \frac{30\%}{2} \right), \quad (15)$$

e do indutor  $L_{1bS}$  pela equação

$$I_{L1bS_{pico}} = I_{out} + \frac{\Delta I_L}{2} = I_{in} \left( \frac{1-D}{D} + \frac{30\%}{2} \right). \quad (16)$$

Para o cálculo do capacitor mínimo de saída  $C_{outS}$  utiliza-se a equação básica da relação da corrente em um capacitor,

$$I_C = C \frac{dV_C}{dt}, \quad (17)$$

isolando a capacitância  $C$ , adotando  $\frac{dV_C}{dt}$  como sendo  $\frac{\Delta V_C}{\Delta t}$  em um período de amostragem, considerando as piores condições para atender à ondulação da tensão de saída requerida para projeto,  $\Delta V_{RoutS}$ , sabendo que a tensão no capacitor  $C_{outS}$  é  $V_{out}$  e a corrente por ele é  $I_{out}$  para o período  $DT$ , quando  $Q_S$  está ligada, logo a equação que descreve a capacitância mínima de saída resulta, segundo Falin (2008), em

$$C_{outS_{min}} = \frac{I_{out} D_{max}}{\Delta V_{RoutS} f_{sw_{min}}}. \quad (18)$$

Para determinação do capacitor  $C_pS$  pode-se proceder de forma semelhante a  $C_{outS}$ , utilizando-se para o valor mínimo a equação

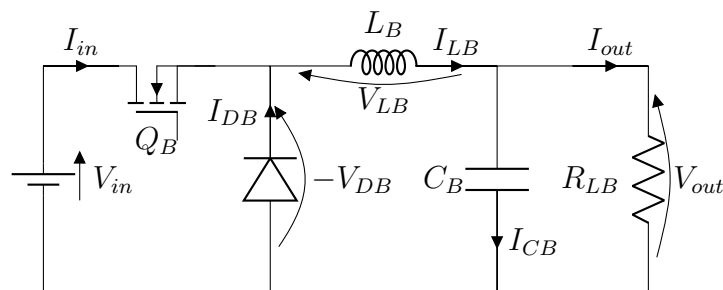
$$C_{pS_{min}} = \frac{I_{out} D_{max}}{\Delta V_{CpS} f_{sw_{min}}}, \quad (19)$$

onde  $\Delta V_{CpS}$  é a máxima variação de tensão permitida em  $C_pS$ . Para o valor de  $C_{inS}$  utiliza-se o mesmo adotado para  $C_{outS}$  durante o projeto do conversor.



## 2.4.2 CONVERSOR BUCK

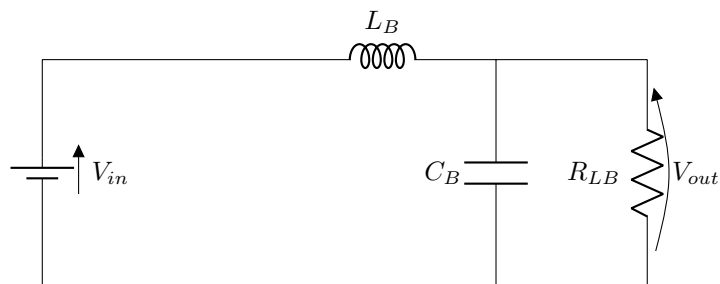
O conversor *Buck* tem seu circuito simplificado mostrado na Figura 25. Sua principal característica é de reduzir a tensão de entrada, além de ter "saída em corrente" em expressões utilizadas em eletrônica de potência. Tal fato ocorre devido ao conversor ter um capacitor em paralelo com a entrada quando a chave  $Q_B$  está fechada e um indutor em série na saída quando a chave  $Q_B$  está aberta, considerando-o em regime permanente (PETRY, 2001). O resistor  $R_{LB}$  apenas representa uma carga conectada ao conversor.



**Figura 25: Circuito simplificado do Buck.**  
**Fonte: (RASHID, 2004) com adaptações.**

## 2.4.2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

O funcionamento deste conversor pode ser explicado utilizando dois estágios. Em um primeiro estágio, mostrado na Figura 26, a chave  $Q_B$  é ligada, ou seja, está fechada, a corrente no indutor aumenta pois a tensão no mesmo é a mesma da fonte de entrada (PETRY, 2001).



**Figura 26: Circuito para Q1 ligada do conversor Buck.**  
**Fonte: (RASHID, 2004) com modificações.**

Em um segundo estágio mostrado na Figura 27, quando a chave  $Q_B$  está aberta, ou seja, desligada, o diodo  $D_B$  conduz, a corrente no indutor é reduzida e o capacitor  $C_B$  supre a carga (PETRY, 2001). As formas de onda de tensão nos elementos do *Buck* estão mostrados na Figura 28 e as correntes na Figura 29, onde  $V_{PWMB}$  é a tensão de acionamento do Mosfet.

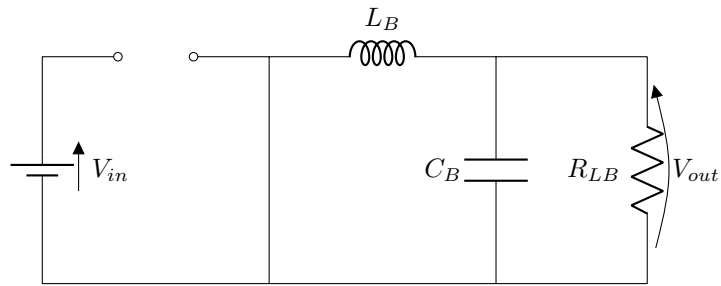


Figura 27: Circuito para Q1 desligada do conversor *Buck*.  
 Fonte: (RASHID, 2004) com modificações.

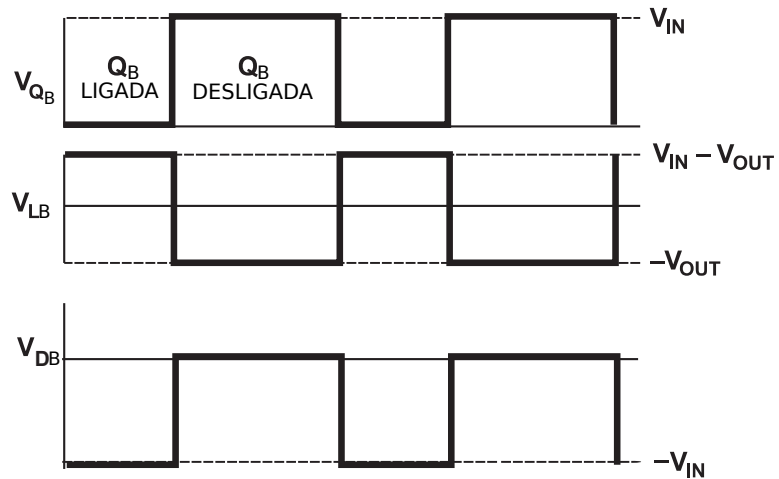


Figura 28: Ondas de tensão no conversor *Buck* em MCC.  
 Fonte: (PETRY, 2001) com modificações.

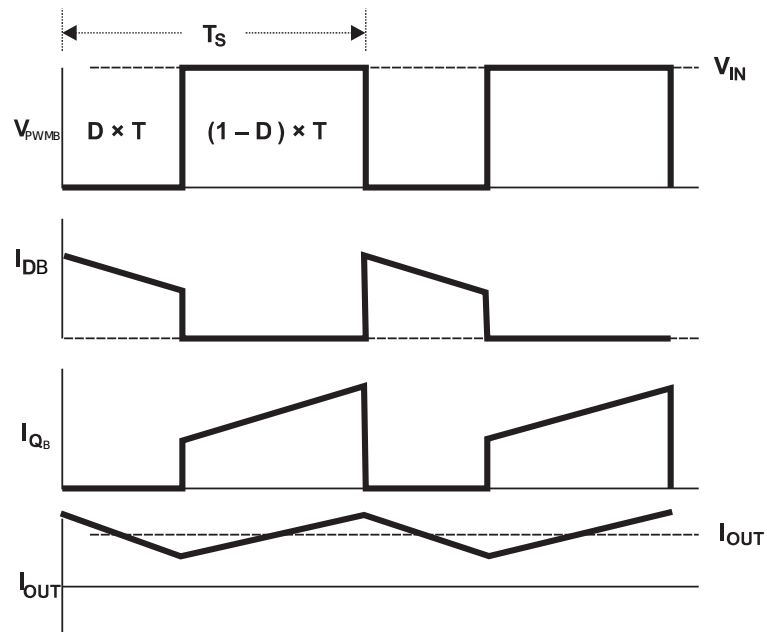


Figura 29: Ondas de corrente no conversor *Buck* em MCC.  
 Fonte: (POMILIO, 2010) com modificações.

## 2.4.2.2 METODOLOGIA DE PROJETO

Para determinação do ganho estático  $G$  e da razão de trabalho  $D$  deste conversor, pode partir da premissa que a tensão média no indutor é zero, semelhante para o conversor Sepic, utilizando para isso o indutor  $L_B$ , e o gráfico de tensão neste indutor mostrado na Figura 28, logo a expressão da tensão média fica como

$$(V_{in} - V_{out})DT - V_{out}(1 - D)T = 0, \quad (20)$$

rearranjando os termos, e isolando a reação da tensão de saída pela de entrada, obtêm-se

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = G = D \quad (21)$$

para o ganho estático, que também é a mesma expressão para a razão cíclica neste conversor.

Para dimensionar o indutor, é necessário admitir uma variação máxima da corrente nele,  $\Delta I_{LB}$ , também descrita por  $\Delta I_{out}$  que é  $2I_{out_{min}}$  no limite entre o modo de condução contínuo e descontínuo. Com isso, para encontrar o valor mínimo do indutor para condução contínua considera-se

$$I_{out_{min}} = \frac{V_{in}(1 - D)DT}{2 \cdot L_B}, \quad (22)$$

logo, o indutor mínimo por ser calculado, segundo POMILIO (2010), por

$$L_{min} = \frac{(V_{in} - V_{out})DT}{2I_{out_{min}}}. \quad (23)$$

Para determinação do capacitor de saída,  $C_B$ , é necessário calcular a variação de energia na carga e descarga do capacitor, descrita por

$$\Delta Q_C = \frac{1}{2} \left[ \frac{TD}{2} + \frac{(1 - D)T}{2} \right] \frac{\Delta I_{out}}{2} = \frac{T \cdot \Delta I_{out}}{8}, \quad (24)$$

além da variação de corrente na saída

$$\Delta I_{out} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L_B} DT = \frac{V_{in} \cdot DT(1 - D)}{L_B}, \quad (25)$$

e da variação da tensão na saída,

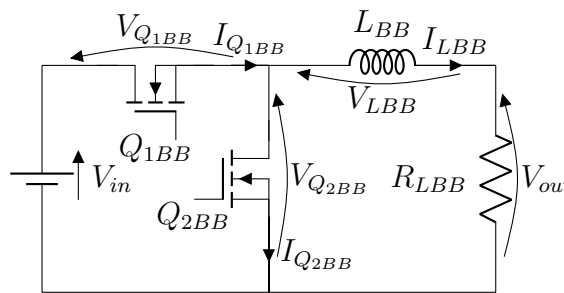
$$\Delta V_{out} = \frac{\Delta Q_{CB}}{C_B} = \frac{TD \cdot \Delta I_{out}}{8C_B} = \frac{T^2 \cdot V_{in} \cdot D(1 - D)}{8L_B C_B}. \quad (26)$$

A partir de (26), isolando  $C_B$ , obtêm-se o valor da capacitância do conversor,

$$C_B = \frac{V_{in} \cdot D(1 - D)}{f_s^2 \cdot 8L_B \cdot \Delta V_{out}} \quad (27)$$

### 2.4.3 CONVERSOR *BUCK* BIDIRECIONAL

O *Buck* Bidirecional tem seu circuito simplificado mostrado na Figura 30. Sua principal característica é de reduzir a tensão no sentido da entrada para a saída e de elevar a tensão no sentido da saída para a entrada. Simplificadamente, o conversor funciona como um *Buck* da entrada para a saída e como um *Boost* da saída para a entrada. Nas figuras desta seção este conversor será considerado sem o capacitor na saída, porém este capacitor está sendo considerado como o supercapacitor a ser utilizado.



**Figura 30: Circuito simplificado do *Buck* Bidirecional.**

**Fonte: (ONGARO *et al.*, 2012) com adaptações.**

#### 2.4.3.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

##### a. Funcionando como *Buck*

Para operar como *Buck* basta chavear o Mosfet  $Q_{1BB}$  e deixar o  $Q_{2BB}$  desligado, pois ele funcionará como um diodo. Em um primeiro estágio deste conversor, mostrado na Figura 31, o Mosfet  $Q_{1BB}$  é ligado, ou seja, está conduzindo, o Mosfet  $Q_{2BB}$  fica desligado, então  $L_{BB}$  é magnetizado pela fonte de entrada (PETRY, 2001).

Em um segundo estágio mostrado na Figura 32, quando a chave  $Q_{1BB}$  está aberta, o Mosfet  $Q_{2BB}$  permanece desligado, com isso o indutor  $L_{BB}$  é desmagnetizado (PETRY, 2001). As formas de onda de tensão nos elementos do *Buck* bidirecional quando em modo *Buck* estão mostrados na Figura 33 e as correntes na Figura 34.

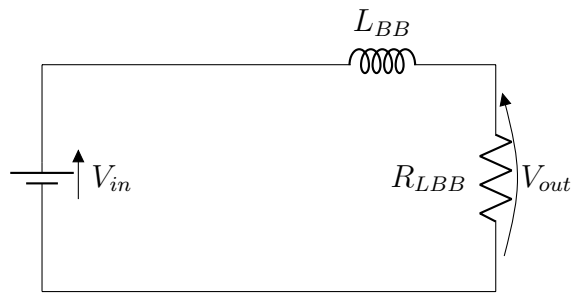


Figura 31: Circuito para  $Q_{1BB}$  ligada do *Buck* Bidirecional em modo *Buck*.

Fonte: (ONGARO *et al.*, 2012) com adaptações.

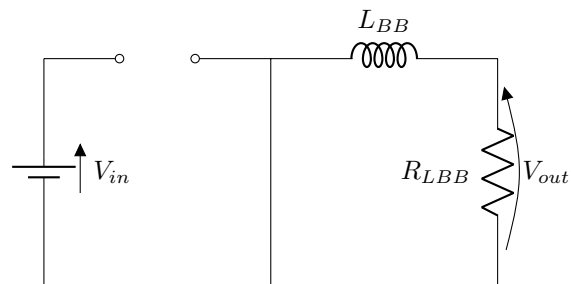


Figura 32: Circuito para  $Q_{1BB}$  desligado do *Buck* Bidirecional em modo *Buck*.

Fonte: (ONGARO *et al.*, 2012) com modificações.

### b. Funcionando como *Boost*

Para operar como *Boost* basta chavear o Mosfet  $Q_{2BB}$  e deixar o  $Q_{1BB}$  desligado, pois ele também funcionará como um diodo. Em um primeiro estágio deste conversor, mostrado na Figura 35, o Mosfet  $Q_{2BB}$  é ligado, ou seja, está fechado, o Mosfet  $Q_{1BB}$  permanece desligado, então o indutor  $L_{BB}$  é carregado pela fonte de saída (PETRY, 2001).

Em um segundo estágio mostrado na Figura 36, quando a chave  $Q_{1BB}$  per-

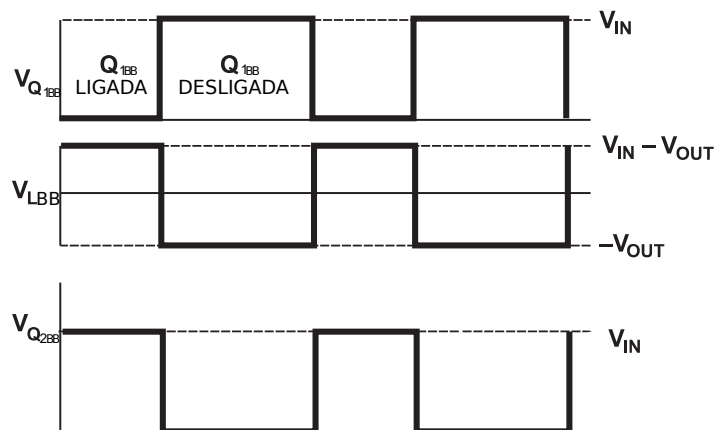
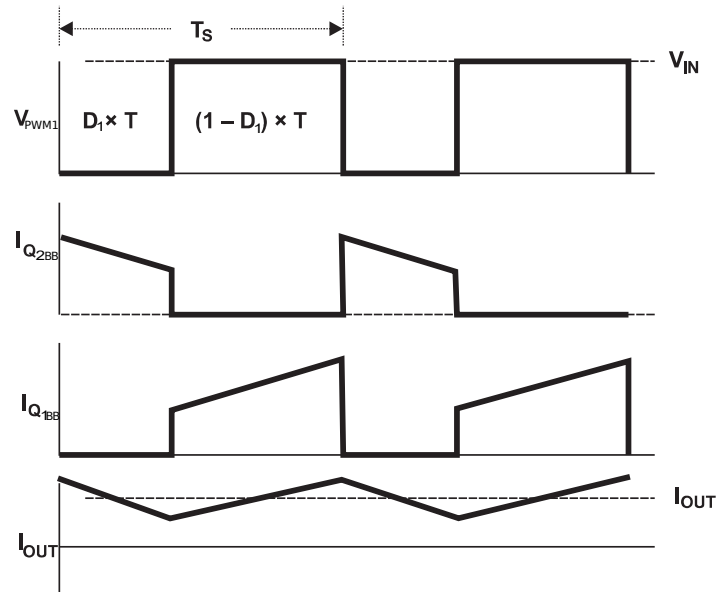
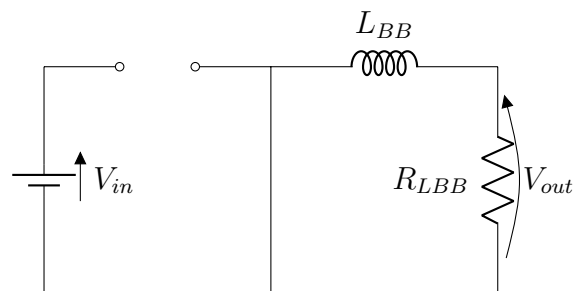


Figura 33: Ondas de tensão no conversor *Buck* Bidirecional, operando em modo *Buck* e em MCC.

Fonte: (PETRY, 2001) com modificações.

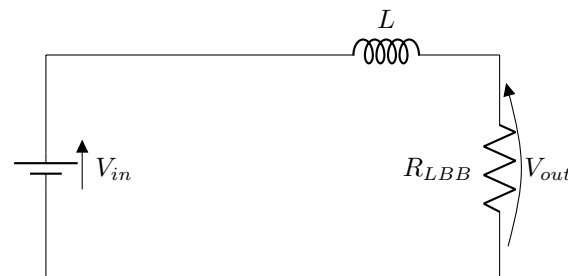


**Figura 34:** Ondas de corrente no conversor *Buck* Bidirecional, operando em modo *Buck* e em MCC.  
 Fonte: (POMILIO, 2010) com modificações.



**Figura 35:** Circuito para  $Q_{2BB}$  ligada do *Buck* Bidirecional em modo *Boost*.  
 Fonte: (ONGARO *et al.*, 2012) com adaptações.

manece aberta, ou seja, desligada, o Mosfet  $Q_{2BB}$  é desligado, com isso o indutor  $L_{BB}$  é descarregado na entrada, isso é possível, mesmo com o Mosfet  $Q_{1BB}$  desligado, porque os Mosfets reais têm um diodo anti-paralelo intrínseco (PETRY, 2001).



**Figura 36:** Circuito para  $Q_{2BB}$  desligado do *Buck* Bidirecional em modo *Boost*.  
 Fonte: (ONGARO *et al.*, 2012) com modificações.

As formas de onda de tensão nos elementos do *Buck* bidirecional quando em modo *Boost* estão mostrados na Figura 37 e as correntes na Figura 38.

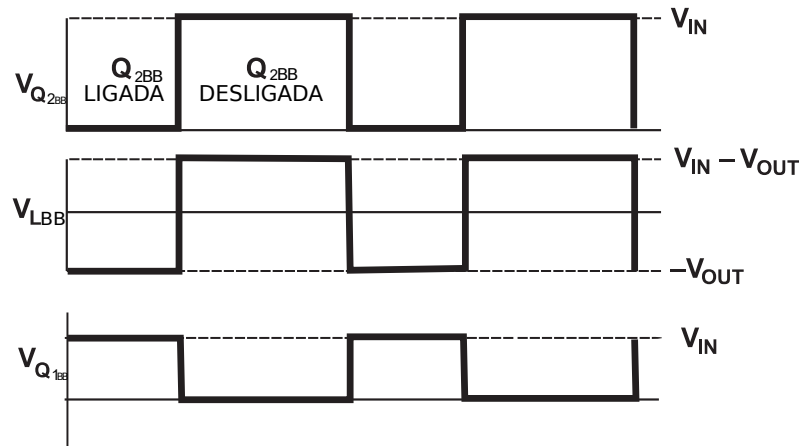


Figura 37: Ondas de tensão no conversor *Buck* Bidirecional, operando em modo *Boost* e em MCC.

Fonte: (MARTINS; BARBI, 2006) com modificações.

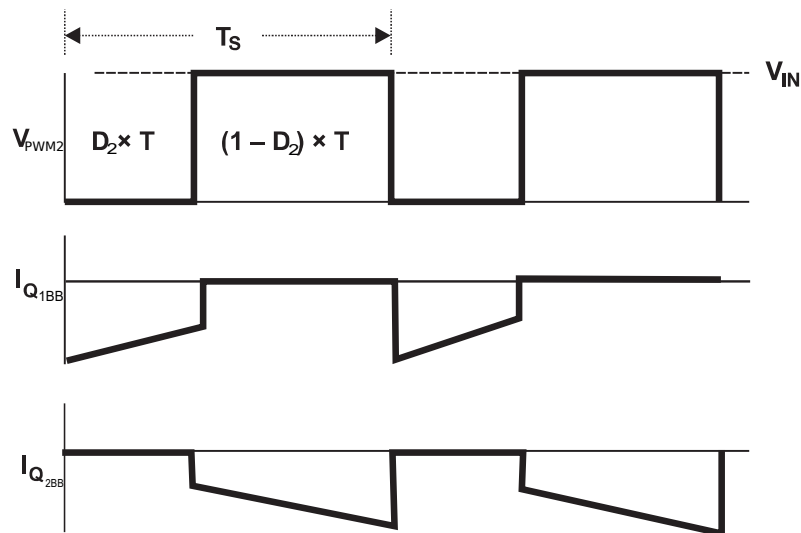


Figura 38: Ondas de corrente no conversor *Buck* Bidirecional, operando em modo *Boost* e em MCC.

Fonte: (MARTINS; BARBI, 2006) com modificações.

### 2.4.3.2 METODOLOGIA DE PROJETO

#### a. Funcionando como *Buck*

Para determinação do ganho estático  $G_1$  e razão de trabalho  $D_1$  deste conversor no modo de operação de *Buck*, pode-se partir da mesma premissa utilizada anteriormente, que a tensão média no indutor é zero, utilizando para isso o indutor  $L_{BB}$ , obtendo-se a equação

$$(V_{in} - V_{out})D_1T - V_{out}(1 - D_1)T = 0, \quad (28)$$

isolando a relação da tensão de saída pela entrada, encontra-se a expressão para o

ganho estático, que no caso é a mesma para razão cíclica,

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = G_1 = D_1. \quad (29)$$

Para dimensionar o indutor, é necessário admitir uma variação máxima da corrente no indutor, da mesma forma que no conversor *Buck*, podendo ser admitida como  $2I_{out_{min}}$  com isso para encontrar o valor mínimo do indutor para condução contínua, segundo POMILIO (2010) considera-se

$$L_{BBmin} = \frac{(V_{in} - V_{out})D_1T}{\Delta I_L} = \frac{(V_{in} - V_{out})D_1T}{2I_{out_{min}}}. \quad (30)$$

### b. Funcionando como *Boost*

Para determinação do ganho estático  $G_2$  e razão de trabalho  $D_2$  deste conversor no modo de operação de *Boost*, pode-se partir da premissa que a tensão média no indutor é zero, logo

$$(-V_{out})D_2T + (V_{in} - V_{out})(1 - D_2)T = 0, \quad (31)$$

isolando a relação da tensão de saída pela de entrada obtêm-se a expressão

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = G_2 = \frac{1}{1 - D_2}, \quad (32)$$

para o ganho estático  $G_2$ , isolando  $D_2$  nesta equação, encontra-se a expressão para a razão cíclica,

$$D_2 = 1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}. \quad (33)$$

Para dimensionar o indutor, é necessário admitir um valor mínimo, que para o caso de conversores *Boost* em MCC pode ser dado, segundo Hart (2016), por

$$L_{min} = \frac{V_{in}^2 D_2}{2 \cdot P_{out} f_s}. \quad (34)$$

## 2.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados a revisão de literatura dos elementos deste trabalho. Inicialmente foram investigadas as células fotovoltaicas, apresentando o princípio de funcionamento, principais tecnologias existentes, modelo elétrico equivalente e descrito um método de MPPT, o chamado "perturbe e observe". Logo após foram descritas as baterias de li-íon, também apresentando o princípios de funciona-



---

mento, principais tipos e modelo elétrico equivalente. Os supercapacitores também foram abordados, seguindo a mesma metodologia, princípios de funcionamento, principais tipos e circuito elétrico equivalente. Por último, os conversores estáticos de energia, em específico, o Sepic, *Buck* e *Buck* bidirecional foram apresentados, explicando os princípios de funcionamento, equacionamento básico a fim de ser possível o dimensionamento de seus componentes.

### 3 ESTRUTURA DO SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA

No capítulo anterior foram apresentados os conceitos do funcionamento do painel fotovoltaico, supercapacitor e conversores estáticos de energia. A partir deste ponto do trabalho é necessário definir a estrutura do sistema de conversão de energia, quais conversores serão utilizados, e realizar o projeto e implementação dos mesmos; os quais serão realizados neste capítulo.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE CONVERSORES

Para a definição das especificações é necessário quantizar a energia envolvida na carga de uma bateria específica, haja vista que esse é o objetivo principal do CSBS. Com esta informação da quantidade de energia requerida para a carga da bateria é possível escolher qual será o painel fotovoltaico e o supercapacitor a serem utilizados como referência para as análises posteriores.

##### 3.1.1 DEFINIÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES

Para determinar as especificações é necessário definir primeiramente a bateria, depois o supercapacitor e então o painel fotovoltaico. Para isso é necessário analisar a quantidade de energia requerida pela bateria e a disponibilizada pelos outros elementos.

A bateria a ser utilizada é uma de Li-íon de capacidade nominal de 2500 mAh e tensão nominal de 3,6 V, ou seja, ela consegue fornecer 2500 mA em um hora, com tensão de 3,6 V. Tal bateria é o modelo nº: 18650H2 2500 da LG Chem (CHEM, 2013). A energia armazenada nela é obtida através da potência em descarga normal multiplicada pelo tempo de uma hora,  $E_{bat} = P_{bat} \cdot T_{desc}$ . Sabendo que a potência em descarga pode ser dada pela multiplicação da tensão nominal e corrente nominais, a energia armazenada na bateria,  $E_{bat}$ , é dado por (CHEM, 2013)

$$\begin{aligned} E_{bat} &= (2500 \text{ mA} \cdot 3,6 \text{ V}) \cdot 1 \text{ h} \\ E_{bat} &= 2,5 \text{ A} \cdot 3,6 \text{ V} \cdot (60 \text{ s} \cdot 60) \\ E_{bat} &= 32400 \text{ J}, \end{aligned} \tag{35}$$

onde  $P_{bat}$  é a potência da bateria durante descarga normal, e  $T_{desc}$  é o tempo de descarga de uma hora.

A carga completa em modo normal da bateria a ser utilizada, segundo Chem (2013), é composto de dois estágios: um de corrente constante em 1250 mA até a tensão chegar a 4,2 V; e outro com a tensão constante até a corrente ir para 50 mA, então a carga completa está finalizada. Segundo Simpson (2011), o primeiro estágio de carregamento da bateria ocorre até sua capacidade atingir aproximadamente 65%, ou seja,  $E_{est1} = 65\% E_{bat}$ , onde  $E_{est1}$  é a energia do primeiro estágio de carga da bateria, com isso a energia armazenada na primeira etapa é de 21060 J. Na segunda etapa, a energia armazenada,  $E_{est2}$ , é a diferença entre a energia armazenada na bateria, da equação (35) e a  $E_{est1}$ , logo  $E_{est2}$  é 11340 J (SIMPSON, 2011; CHEM, 2013).

Para dimensionar o supercapacitor pode-se utilizar a equação de energia armazenada na bateria, equação (35), e a equação (7) considerando apenas a capacitância nominal do supercapacitor, além do fato que 20% da energia requerida pela bateria poderia vir do supercapacitor,  $E_{scap} = 20\% E_{bat}$ , tal fato observa-se a partir de Ongaro *et al.* (2012), sabendo que este trabalho não está voltado para uma aplicação específica, onde é conhecido o padrão de irradiação solar. Com estas considerações,

$$\begin{aligned} E_{scap} &= \frac{1}{2} C \cdot v^2 \\ 20\% \cdot E_{bat} &= \frac{1}{2} C \cdot v^2 \\ 20\% \cdot 32400 &= \frac{1}{2} C \cdot v^2 \\ 6480 \text{ J} &= \frac{1}{2} C \cdot v^2. \end{aligned} \quad (36)$$

Pela equação anterior, a energia armazenada em um supercapacitor é diretamente proporcional à capacitância e ao quadrado da tensão; logo, escolhendo uma tensão maior, pode-se utilizar uma capacitância menor, reduzindo custos. Podendo ser utilizado um supercapacitor de 58 F e 16 V, o que daria 7424 J (MAXWELL, 2014). Foi selecionado este supercapacitor porque há disponível um deste no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UTFPR campus Pato Branco (PPGEE).

A potência maior para a carga da bateria ocorre quando a corrente atinge 1250 mA e a tensão 4,2 V, com isso a potência máxima requerida pela bateria é de 5,25 W; portanto o painel fotovoltaico deverá prover no mínimo esta potência e ter corrente próxima de 1,25 A. Como os painéis fotovoltaicos são especificados pela potência máxima possível ser obtida por eles em condições ótimas de irradiação solar,

em torno de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Logo um painel de  $20 \text{ W}$  pode ser usado para suprir o sistema, dado que o primeiro estágio de carga da bateria leva em torno 40 minutos, um painel de  $20 \text{ W}$  com condições ótimas irá prover (SIMPSON, 2011)

$$E_{PV} = 20 \text{ W} \cdot 40 \text{ min} \quad (37)$$

$$E_{PV} = 20 \text{ W} \cdot (40 \cdot 60 \text{ s}) = 48000 \text{ J}, \quad (38)$$

sendo que a energia gerada pelo painel fotovoltaico,  $E_{PV}$ , é maior do que a energia requerida no primeiro estágio de carregamento da bateria,  $E_{est1}$  igual a  $21060 \text{ J}$ .

Como o segundo estágio de carga da bateria pode levar no mínimo mais de uma hora, a energia fornecida pelo painel de  $20 \text{ W}$  é suficiente para atender a carga da bateria se no mínimo levar 1 hora para ser completada, pois

$$E_{PV} = 20 \text{ W} \cdot 1 \text{ h} \quad (39)$$

$$E_{PV} = 20 \text{ W} \cdot (60 \cdot 60 \text{ s}) = 72000 \text{ J}, \quad (40)$$

que é maior do que a energia requerida para carregar a bateria completamente,  $E_{PV} = 72000 > E_{bat} = 32400$ .

### 3.1.1.1 SUPERCAPACITOR

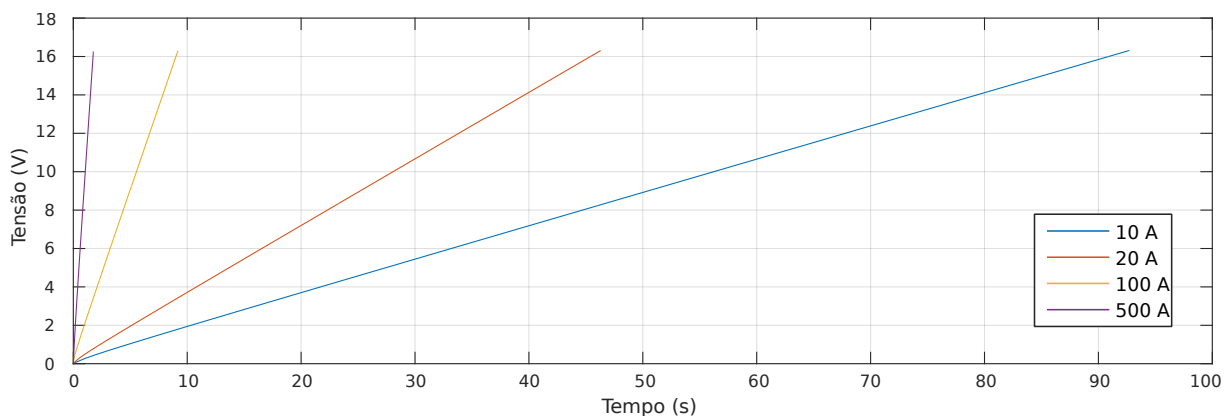
O supercapacitor a ser considerado como referência para os valores será o modelo BMOD0058 E016 B0 de  $16 \text{ V}$  e  $58 \text{ F}$  da fabricante Maxwell (MAXWELL, 2014). Seus parâmetros estão mostrados na Tabela 3. O valor de  $R_p$  foi obtido na folha de dados do supercapacitor, o valor de  $k_v$  e os demais foram obtidos através da referência (POWERSIM, 2016a). Os parâmetros se referenciam com a Figura 18.

**Tabela 3: Parâmetros do supercapacitor BMOD0058 E016 B0**

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Tensão nominal	$V_{sup}$	V	16
Capacitância nominal	$C_{Nsup}$	F	58
Resistência série	$R_s$	$\text{m}\Omega$	0,0211557
Resistência paralela	$R_p$ ou $R_4$	$\Omega$	640
Resistência 2	$R_2$	$\Omega$	281,127
Resistência 3	$R_3$	$\Omega$	20,3509
Capacitância 2	$C_2$	F	8,03923
Capacitância 3	$C_3$	F	2,80196
Constante dos efeitos de difusão	$k_v$	F/V	1,344776
Capacitância inicial	$C_o$	F	48,54

Fonte: (MAXWELL, 2014; SCHONBERGER, 2010; POWERSIM, 2016a)

O modelo elétrico do supercapacitor da Figura 18 com os parâmetros mostrados na Tabela 3, foi simulado no programa Matlab para diferentes correntes de entrada (10, 20, 100 e 500 A). As curvas resultantes de tensão nos terminais do supercapacitor são apresentadas na Figura 39. Tais curvas revelam que, quanto maior a corrente de carga do supercapacitor, mais rápido ele é carregado; características ótimas para o projeto proposto.



**Figura 39: Curvas de tensão por tempo do supercapacitor BMOD0058 E016 B0 para variadas correntes de carga.**

Fonte: Autoria própria.

### 3.1.1.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO

O módulo fotovoltaico a ser utilizado para base de valores é um de 20 W, da fabricante Komaes. Ele tem os seguintes parâmetros mostrados na Tabela 5 extraídos da folha de dados (KOMAES, 2016). Com estes valores dos parâmetros do módulo solar, ou módulo fotovoltaico, foi utilizada a ferramenta *Solar Module (physical model)* do programa Psim para obter os parâmetros do modelo teórico do painel fotovoltaico, utilizando ainda como valor da banda de energia do elétron,  $E_g = 1,12$  eV, fator de idealidade,  $A = 1,2$ , resistência *shunt*,  $R_{sh} = 1$  K $\Omega$ , e coeficiente  $K_s = 0$  POWERSIM. Os valores dos parâmetros obtidos do modelo estão mostrados na Tabela 4.

**Tabela 4: Parâmetros do modelo do módulo solar KM(P)20 obtidos em Psim**

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Resistência série	$R_s$	$\Omega$	0
Corrente de curto circuito	$I_{sc}$	A	1,23
Corrente de saturação	$I_s$	A	$4,63 \cdot 10^{-9}$
Coefficiente de temperatura	$C_t$	A/K	0

Fonte: autoria própria.

**Tabela 5: Parâmetros do módulo solar KM(P)20**

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Potência máxima	$P_{max}$	W	20
Tensão para a máxima potência	$V_m$	V	17,56
Corrente para a máxima potência	$I_m$	A	1,14
Tensão de circuito aberto	$V_{oc}$	V	21,56
Corrente de curto circuito	$I_{sc}$	A	1,23
Máxima tensão do sistema	$V_{DC}$	V	750
Eficiência da célula	$\eta_{cel}$	–	16,2%
Eficiência do módulo	$\eta_{mod}$	–	11,4%
Células por módulo	$N_{cel}$	–	36
Tipo de célula	–	–	Si Policristalino
Coeficiente de temperatura de $I_{sc}$	$C_{I_{sc}}$	%/°C	+0,05
Coeficiente de temperatura de $V_{sc}$	$C_{V_{sc}}$	%/°C	-0,34
Coeficiente de temperatura de potência	$C_W$	%/°C	-0,5
Temperatura nominal de operação da célula	NOCT	°C	$47 \pm 2$
Temperatura de operação	TO	°C	-40 até +85

Fonte: (KOMAES, 2016).

### 3.1.1.3 BATERIA

A bateria escolhida para ser utilizada no trabalho foi uma de 2500 mAh, 3,6 V de tensão nominal da fabricante LG, divisão LG Chem, modelo nº: 18650H2 2500. Os parâmetros obtidos da folha de dados do fabricante estão mostrados na Tabela 6.

**Tabela 6: Parâmetros da bateria de Li-íon 1865HE2 2500**

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Capacidade Nominal	$C_{Bnom}$	mAh	2500
Tensão nominal	$V_{Bnom}$	V	3,5
Corrente constante para a carga normal	$I_{Bcar}$	mA	1250
Tensão constante para a carga normal	$V_{Bcar}$	V	4,2
Corrente de flutuação	$I_{Bflu}$	mA	50

Fonte: (CHEM, 2013).

Para determinação dos parâmetros que descrevem o circuito elétrico equivalente de uma bateria de Li-íon segundo a Figura 13, foi utilizado o modelo físico de uma bateria de Li-íon do programa Simulink, que é um *Blockset* do Matlab; neste modelo do Simulink obteve-se os parâmetros do modelo da bateria e o gráfico da Figura 40, onde a letra C indica a capacidade nominal da bateria, no caso 2,5 A. Os valores obtidos estão mostrados na Tabela 7.

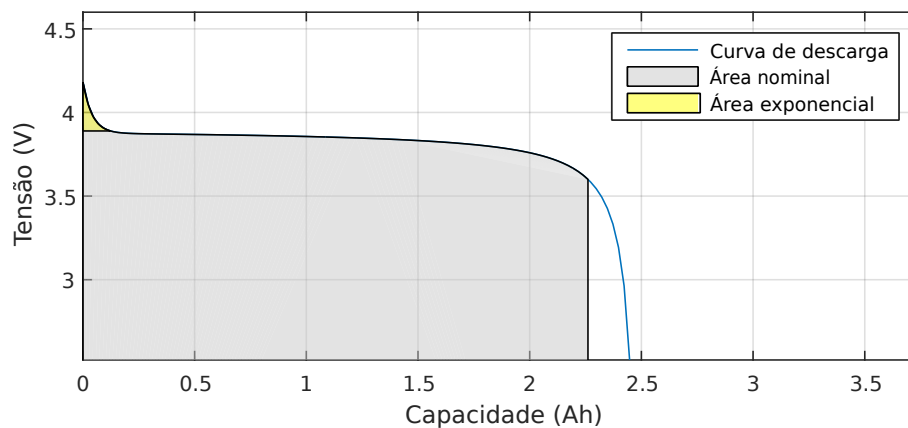
Para a simulação da bateria no programa Psim, foi utilizado os parâmetros com os valores mostrados na Tabela 8, com a mesma nomenclatura utilizada no

programa e descrito na subseção 2.2.2 (PSIM, 2016; POWERSIM, 2014). Com estes parâmetros, foi simulada a curva de descarga da bateria a fim de comparar o modelo utilizado no Psim com o do Simulink, esta comparação está mostrada na Figura 41, sendo visível a aproximação entre os dois modelos, haja vista que o maior erro entre as curvas foi de 0,03 V.

**Tabela 7: Parâmetros do modelo da bateria 1865HE2 2500 obtidos em Simulink**

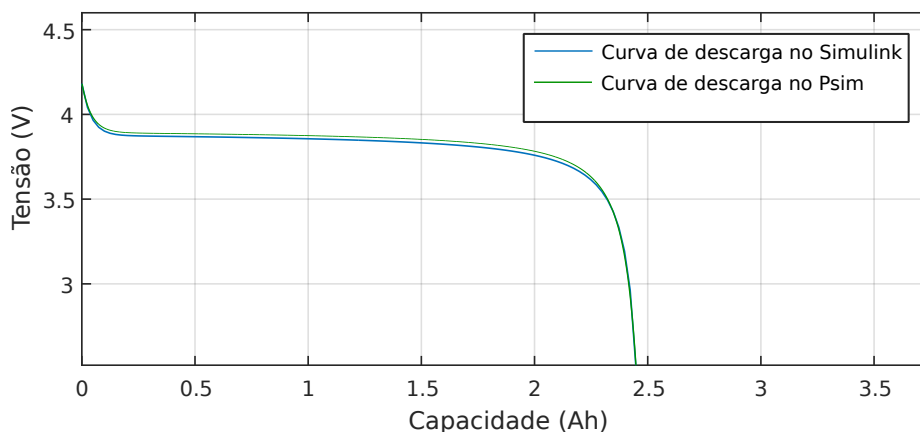
Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Constante de tensão da bateria	$E_o$	V	3,9002
Constante de polarização	$K$	V/Ah	0,008128
Capacidade da bateria	$Q$	Ah	2,5
Resistência interna da bateria	$R_s$	$\Omega$	0,0144
Amplitude da zona exponencial	$A$	V	0,30585
Constante de tempo inverso da zona exponencial	$B$	$(Ah)^{-1}$	24,4248

Fonte: autoria própria.



**Figura 40: Curva de descarga da bateria através de simulação em Simulink para corrente nominal em 0,43478C (1,087A).**

Fonte: Autoria própria.



**Figura 41: Curva de descarga da bateria através de simulação em Simulink e em Psim.**

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 8: Parâmetros do modelo da bateria 1865HE2 2500 utilizados no Psim**

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Número de células em série	$N_s$	-	1
Número de células em paralelo	$N_p$	-	1
Fator de redução da tensão	$K_s$	-	1
Fator de redução da capacidade	$K_p$	-	1
Tensão nominal	$E_{rated}$	V	3,6
Tensão de corte de descarga	$E_{cut}$	V	2,5
Capacidade nominal	$Q_{rated}$	Ah	2,5
Resistência interna	$R_{batt}$	$\Omega$	0,0144
Corrente de descarga	$I_{dischg}$	A	0,5
Fator de capacidade	$K_c$	-	1,01
Máxima tensão da bateria	$E_{full}$	V	4,194
Tensão do ponto exponencial	$E_{top}$	V	3,9
Tensão nominal da curva	$E_{nom}$	V	3,6
Capacidade máxima para $E_{cut}$	$Q_{max}$	Ah	2,45
Capacidade de ponto exponencial	$Q_{top}$	Ah	0,132
Capacidade nominal da curva	$Q_{nom}$	Ah	2,26

**Fonte: autoria própria.**

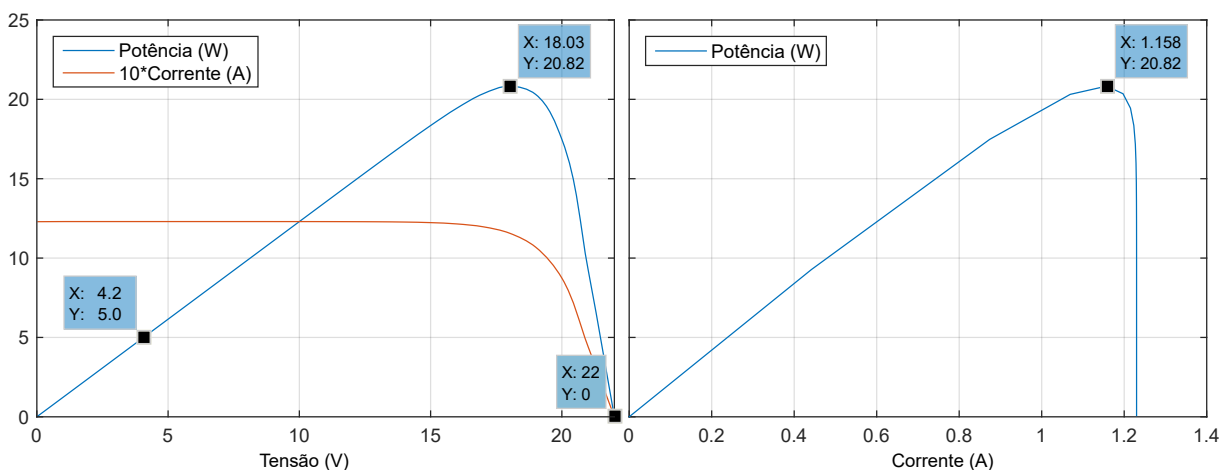
### 3.1.2 ESCOLHA DAS TOPOLOGIAS

A tensão do barramento CC,  $V_{CC}$ , será de 25 a 30 V para fins de projeto dos conversores, isso para diminuir os níveis de corrente. Considerando isso e as especificações mostradas na seção anterior, utiliza-se o conversor Sepic para realizar a função de MPPT do painel fotovoltaico, pois ele tem característica de pequena ondulação da corrente de entrada e consegue tanto elevar quanto reduzir a tensão. Para o conversor do supercapacitor é possível utilizar um *Buck* bidirecional, pela sua simplicidade de controle. Para o carregamento da bateria de Li-ion, pode-se utilizar um conversor *Buck*, pois tem saída de tensão e corrente mais constantes, e também porque o barramento  $V_{CC}$  tem tensão maior do que a da bateria (ONGARO *et al.*, 2012).

Os níveis de tensão, corrente e potência, bem como os conversores escolhidos estão mostrados na Figura 55, ao final deste capítulo. Nesta figura, os sistemas de controle de cada conversor foram colocados separadamente; o gerenciador de energia emite apenas três sinais: o de comando para ativar ou desativar o MPPT do painel ( $C_{MPPT}$ ), a referência de corrente do supercapacitor ( $I_{ref-scrap}$ ), e o sinal de comando da bateria ( $C_b$ ), se ela opera em carga normal, modo de sobretensão ou desliga o seu carregamento. Os valores para tais sinais estão descritos nos códigos implementados nos blocos C no Apêndice B.



Foram considerados 5 W como potência mínima para o funcionamento do sistema, para fins de projeto dos conversores. Para isso, foi observada a curva de potência do painel fotovoltaico escolhido, mostrado na Figura 42, para obter o nível de tensão e corrente do painel fotovoltaico para quando ele produz 5 W. Esta curva foi obtida através da emulação por código do painel fotovoltaico em Matlab. Tal código está mostrado no Apêndice A.



**Figura 42: Curvas obtidas pela emulação do módulo fotovoltaico KM(P)20 em Matlab.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Após terem sido definidos a bateria, o painel fotovoltaico, o supercapacitor e a configuração dos conversores, é então realizado o projeto e implementação de simulação dos conversores CCC1, CCC3 e CCC2, o que será realizado nas próximas seções deste capítulo.

### 3.2 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO DO CCC1

O conversor CCC1 foi definido na subseção 3.1.2 como sendo o Sepic, o qual teve suas características explanadas na subseção 2.4.1. Nesta seção serão realizados o dimensionamento deste conversor, projeto do sistema de controle além da implementação de simulação em malha fechada.

#### 3.2.1 ESPECIFICAÇÕES E DIMENSIONAMENTO

Para o projeto do conversor CCC1 é necessário definir algumas premissas e requisitos que o mesmo deverá atender. Esses itens, bem como os valores dos elementos do CCC1 projetados, estão mostrados na Tabela 9, os símbolos estão referenciados de acordo com a subseção 2.4.1. Foram considerados  $V_{in}$  e  $I_{in}$  mínimos

quando o painel fornece 5 W (KOMAES, 2016). Foi escolhido 100 kHz para a  $f_{sw}$  para os três conversores pelo fato de estar utilizando o Mosfet e a potência ser baixa (BALIGA, 2010).

**Tabela 9: Parâmetros para projeto do CCC1**

Parâmetro	Unidade	Valor
$V_{in}$	V	4 - 21,56
$V_{out}$	V	25 - 30
$f_{sw}$	kHz	100
$I_{in_{min}}$	A	0,2
$I_{out_{max}}$	A	0,8
$D$	adimensional	0,5 - 0,98
$\Delta V_{Rout}$	V	0,066
$\Delta V_{Cp}$	V	0,33
$L_{1aS_{min}}, L_{1bS_{min}}$	$\mu$ H	316,667
$C_{outS_{min}}, C_{inS_{min}}$	$\mu$ F	118,788
$C_{pS_{min}}$	$\mu$ F	23,758

**Fonte: autoria própria.**

### 3.2.2 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

O objetivo do sistema de controle do CCC1 é controlar a corrente de entrada para uma dada referência. Tal referência é criada a fim de seguir o ponto de máxima extração de potência do painel fotovoltaico. Para isso foi implementado no programa Psim o circuito do CCC1, com os valores dos componentes mostrados na Tabela 9, pois determinou-se realizar o projeto deste conversor através da resposta ao degrau, a fim de otimizar o tempo de desenvolvimento deste trabalho.

Para obter a resposta ao degrau para projetar o sistema de controle, foi realizada a simulação para uma dada corrente de referência para duas situações: quando houver potência mínima de 5 W, e outra quando houver a potência máxima de 20 W. A equivalência de corrente de entrada com a razão cíclica do PWM que aciona o Mosfet e a tensão de saída do CCC1 é obtida aplicando a premissa de eficiência unitária do conversor na Equação (10), desenvolvida abaixo,

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} = G$$

$$\frac{I_{in}}{I_{out}} = G = \frac{D}{1 - D}. \quad (41)$$

Isolando a corrente de entrada,

$$I_{in} = I_{out} \frac{D}{1-D}, \quad (42)$$

e reescrevendo a corrente de saída em função da tensão e resistência de saída, obtêm-se

$$I_{in} = \frac{V_{out}}{R_{LS}} \frac{D}{1-D}. \quad (43)$$

Para determinar a resistência de saída  $R_{LS}$  utiliza-se a lei de Ohm,  $V_{out} = R_{LS} \cdot I_{out}$ , isolando a resistência de saída e reescrevendo a corrente de saída,

$$R_{LS} = \frac{V_{out}}{I_{out}} = \frac{V_{out}}{\frac{P_{out}}{V_{out}}}, \quad (44)$$

rearranjando os termos, adotando rendimento unitário e reescrevendo a tensão de saída em termos da entrada, obtêm-se

$$R_{LS} = \frac{(V_{in} \frac{D}{1-D})^2}{P_{in}}. \quad (45)$$

Para realizar o controle do conversor, observou-se a resposta do sistema para uma potência baixa, de 5 W, e outra situação de máxima potência, 20 W, para que fosse possível escolher em qual das duas situações é mais necessário o controle, na Tabela 10 são mostrados os valores dos parâmetros do CCC1 para as duas situações de potência. Para a potência máxima, o valor da corrente do painel fotovoltaico foi obtido da folha de dados do fabricante do painel fotovoltaico selecionado (KOMAES, 2016).

**Tabela 10: Parâmetros do CCC1 para potência mínima e máxima**

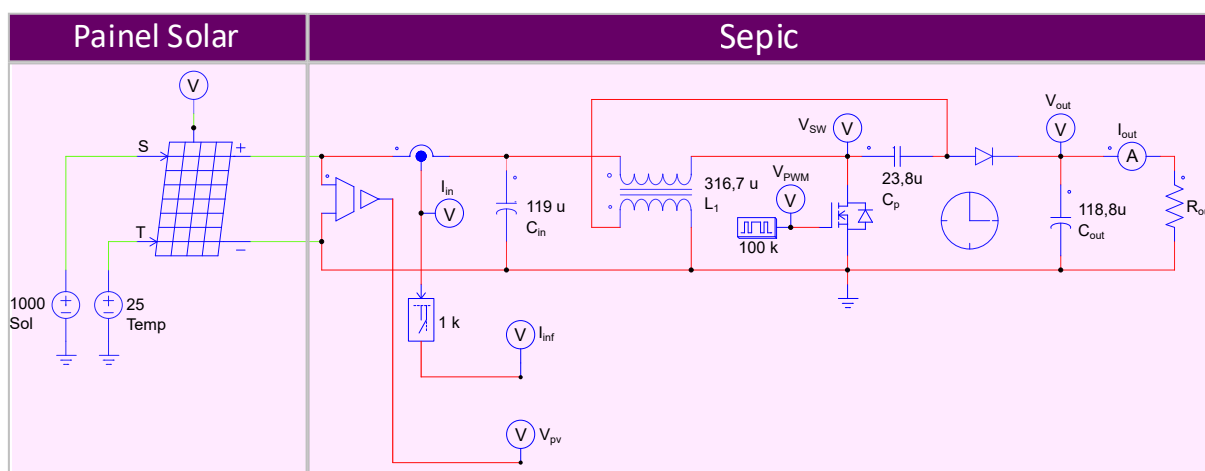
Parâmetro	Unidade	5 W	20 W
		Valor	Valor
$V_{in}$	V	4	21,56
$V_{out}$	V	25	30
$R_{LS}$ ou $R_{out}$	$\Omega$	125	13,1
$D$	–	0,862	0,487
$I_{in}$	A	1,249	1,14

**Fonte: autoria própria.**

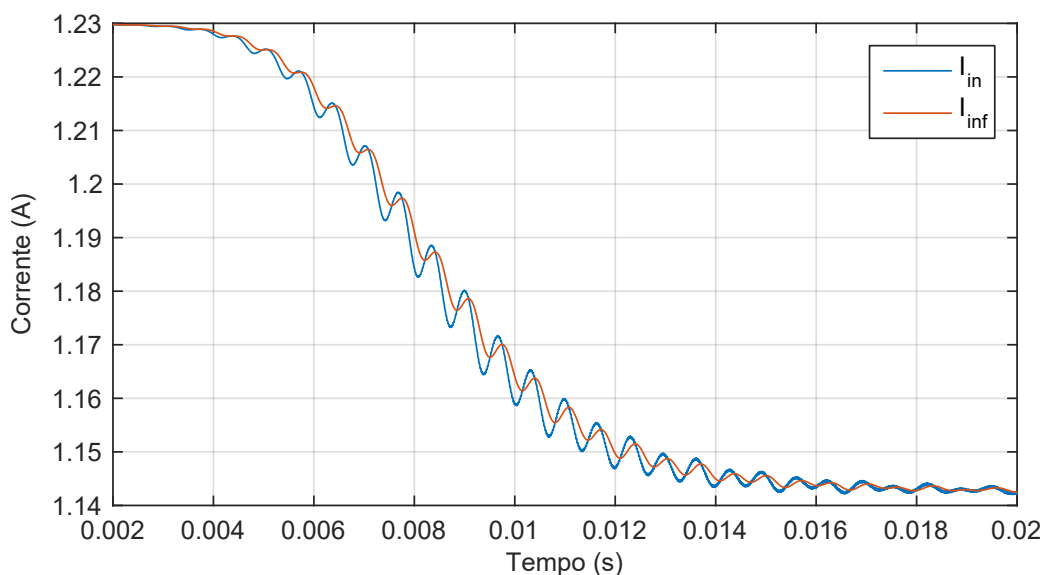
Para o projeto do sistema de controle, observou-se a resposta de corrente de entrada a um degrau de razão cíclica com valor especificado pela Tabela 10 e para

uma dada tensão de entrada, também da Tabela 10. Foi utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte de 1 kHz e ganho unitário na leitura da corrente de entrada do CCC1, a fim de cortar a frequência de chaveamento com segurança (KUGELSTADT, 2008).

O circuito simulado para potência de 20 W e de 5 W está mostrado na Figura 43, foi utilizado um transformador monofásico para representar os indutores acoplados. A curva de corrente de entrada está na Figura 44. Na Figura 45 é mostrada a curva de corrente de entrada para a potência de 5 W.



**Figura 43: CCC1 simulado em Psim em malha aberta.**  
**Fonte: Autoria própria.**

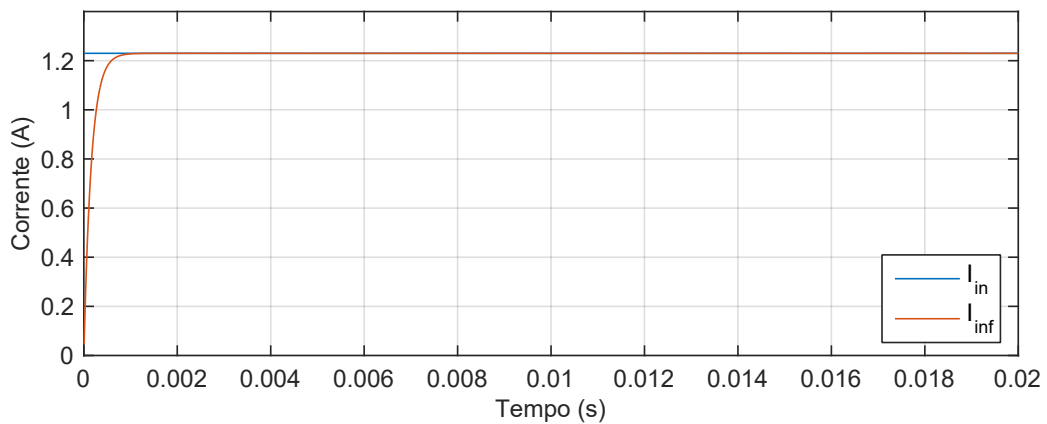


**Figura 44: Curva de corrente de entrada para máxima potência, com valor médio em regime permanente de 1,1456 A.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Utilizou-se a curva da Figura 44 para o projeto dos ganhos do PID com

base na curva da corrente de entrada depois do filtro, no gráfico indicada por " $I_{inf}$ ", pois é o pior caso a ser controlado, devido ao seu comportamento mais oscilatório e dinâmica lenta. Foi utilizado o controle PID por suas características de atenuação das oscilações, diminuição do erro em regime permanente e por reduzir o tempo de acomodação do sistema a ser controlado (OGATA, 2000).

Obteve-se os seguintes valores para as constantes da equação (46), que é a função de transferência do controlador PID, utilizando a regra de sintonia de Ziegler-Nichols através da aferição do tempo de retardo  $L$  e da constante de tempo  $T_c$ , mostradas na Tabela 11 (OGATA, 2000).



**Figura 45: Curva de corrente de entrada para mínima potência, com valor médio em regime permanente de 1,230 A.**

**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 11: Constantes para projeto do CCC1 em tempo contínuo.**

Constante	Unidade	Valor
$L$	s	0,0035
$T_c$	s	0,0054
$K$	-	1,8562
$T_i$	s	0,0070
$T_d$	s	0,0018

**Fonte: autoria própria.**

$$G_C(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (46)$$

Para a implementação em sistemas digitais, a equação que descreve o controlador PID em tempo discreto na variável  $z$  é a descrita na equação (47), (OGATA, 1995)

$$PID(z) = K_P + K_I \frac{1}{1 - z^{-1}} + K_D(1 - z^{-1}), \quad (47)$$

onde:

$$K_P = K(1 - \frac{T}{2T_i}),$$

$$K_I = K \frac{T}{T_i},$$

$$K_D = K \frac{T_d}{T},$$

$T$  : período de amostragem.

### 3.2.3 IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA

Foram calculados os ganhos do controlador PID em tempo discreto, referenciados na equação (47), obtendo os valores mostrados na Tabela 12.

**Tabela 12: Constantes para projeto do CCC1 em tempo discreto.**

Constante	Unidade	Valor
$K_P$	-	1,856
$K_I$	-	0.0001841
$K_D$	-	4811
$T$	$\mu S$	0,69444

**Fonte: autoria própria.**

Para a simulação em malha fechada deste conversor, realizando o MPPT do painel fotovoltaico, foi implementado no programa Psim o circuito da Figura 46.

Foi realizada a simulação para um sinal de irradiação solar na forma de senoide com amplitude de  $500 \text{ W/m}^2$ , frequência de 10 Hz e *offset* de  $500 \text{ W/m}^2$ . Na Figura 47 são mostradas a potência máxima extraível do painel e a obtida com o MPPT além da corrente de entrada e a referência do sistema de controle.

Com esses gráficos é possível observar que o conversor alcançou seu objetivo de rastrear o ponto de máxima potência do painel solar. Mesmo que a corrente de referência, que é gerada pelo algoritmo de MPPT, apresente variações elevadas, ainda assim, a potência extraída do painel se aproximou da máxima teórica. As variações bruscas da corrente de referência,  $I_{ref}$ , próximo do zero é devido ao algoritmo de MPPT não conseguir extrair maior potências nestas faixas baixas de corrente.

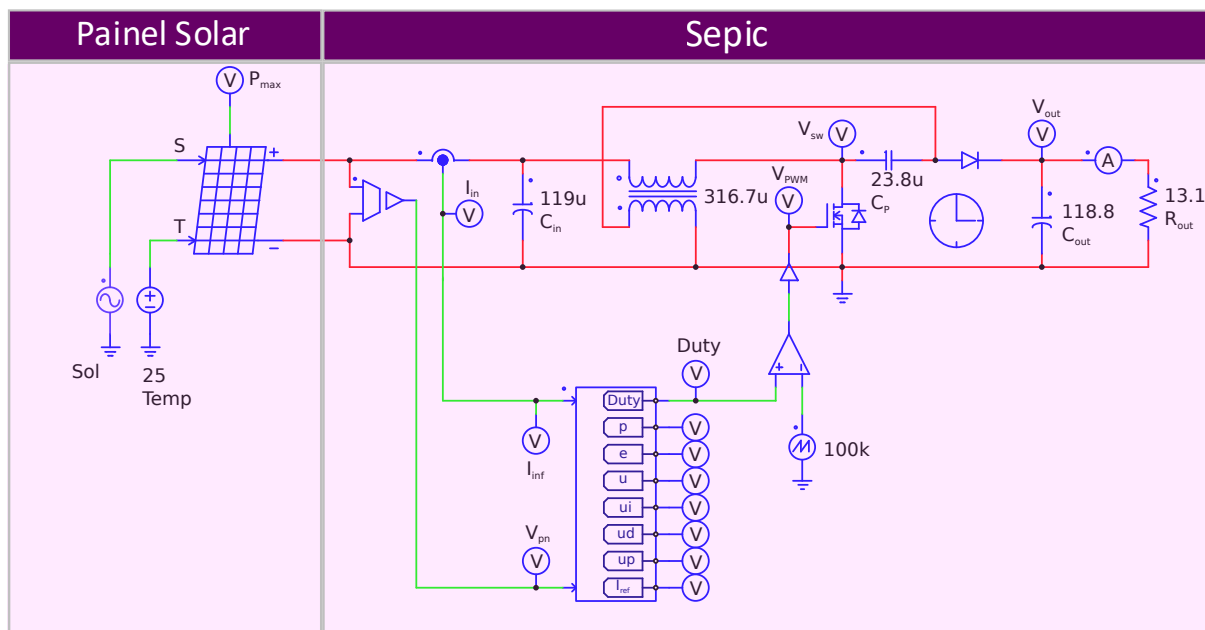


Figura 46: CCC1 simulado em Psim em malha fechada.

Fonte: Autoria própria.

### 3.3 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO DO CCC3

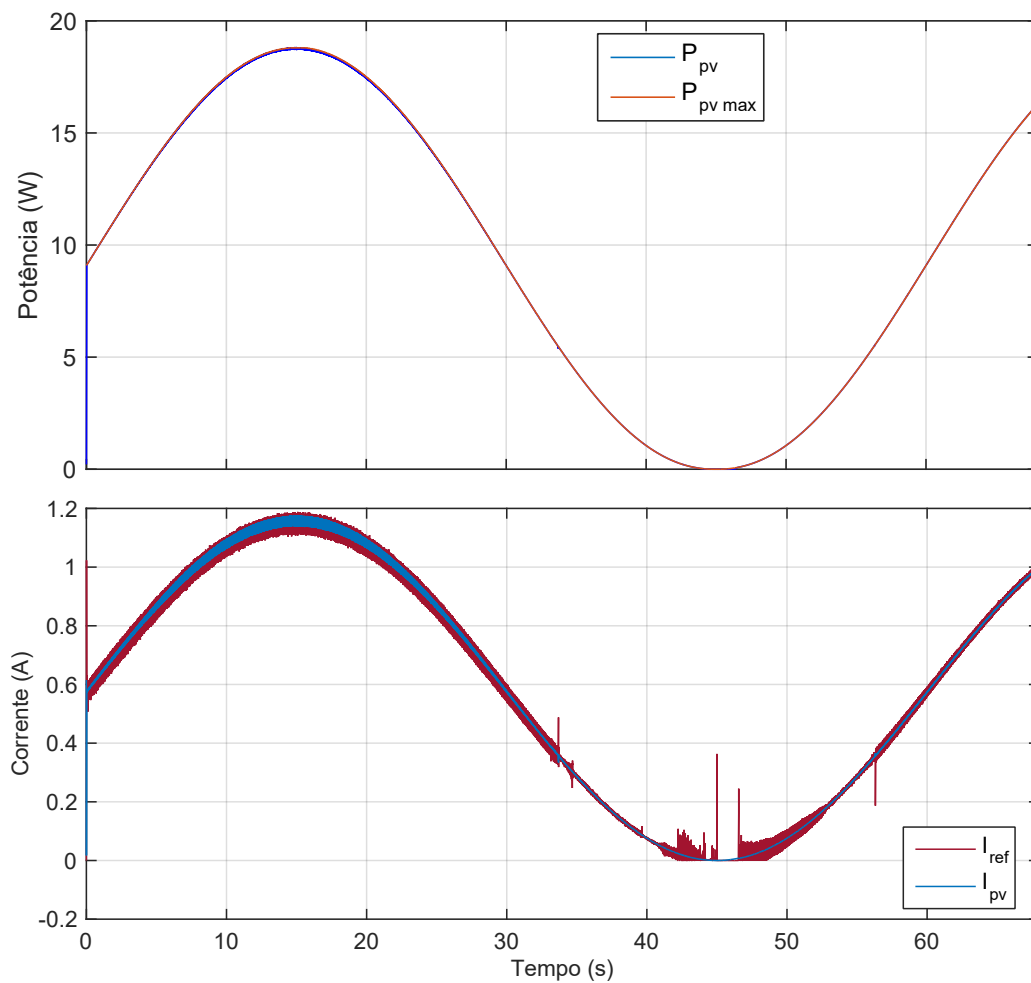
O conversor CCC3 foi definido na subseção 3.1.2 como sendo o *Buck*, o qual teve suas características explanadas na subseção 2.4.2. Nesta seção serão realizados o dimensionamento deste conversor, projeto do sistema de controle e por fim a implementação de simulação em malha fechada.

#### 3.3.1 ESPECIFICAÇÕES E DIMENSIONAMENTO

Para o projeto do conversor CCC3 é necessário definir algumas premissas e requisitos que o mesmo deverá atender. Esses itens, bem como os valores dos elementos do CCC3 projetados, estão mostrados na Tabela 13. Os símbolos estão referenciados de acordo com a subseção 2.4.2. Foram considerados  $V_{out}$  e  $I_{out}$  mínimos e máximos de acordo com as especificações de carregamento da bateria (CHEM, 2013). Para o cálculo de  $L_{min}$  utilizou-se  $V_{in}$  máximo,  $V_{out}$  mínimo e  $D$  máximo. Para o cálculo da ondulação da tensão de saída se utilizou 1% (PETRY, 2001).

#### 3.3.2 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

Os objetivos do sistema de controle do CCC3 são controlar a corrente e a tensão de saída. Para isso foi implementado no programa Psim o circuito do CCC3 com os valores dos componentes calculados anteriormente, mostrados na Tabela 13.



**Figura 47:** Potência obtida com o MPPT, potência máxima extraível do painel, corrente de entrada do CCC1 e a referência de corrente.

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 13: Parâmetros para projeto do CCC3**

Parâmetro	Unidade	Valor
$V_{in}$	V	25 - 30
$V_{out}$	V	3,5 - 4,2
$f_{sw}$	kHz	100
$I_{out_{min}}$	A	0,1
$D$	adimensional	0,117 - 0,168
$\Delta V_{out}$	V	0,042 (1% de 4,2)
$L_{B_{min}}$	$\mu$ H	222,6
$C_B$	$\mu$ F	5,606

Fonte: autoria própria.

Para determinar a resistência de saída  $R_{out}$ , apenas para simulação do conversor a fim de realizar o projeto do controle, utilizou-se a lei de Ohm, considerado o conversor com rendimento unitário, logo  $R_{LB} = \frac{V_{out}}{I_{out}}$ . Isolando a corrente de saída nesta última expressão e utilizando a equação 21, obtêm-se



$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_{LB}}$$

$$I_{out} = \frac{D}{V_{in} R_{LB}}, \quad (48)$$

que é a equação que descreve a relação entre a corrente de saída,  $I_{out}$ , com a razão cíclica,  $D$ . Sendo possível observar que quanto maior a razão cíclica, maior é a corrente de saída.

Na Tabela 14 são mostrados os valores dos parâmetros do CCC3 para duas situações: na primeira foi calculada a resistência de saída baseada na tensão média de saída e corrente de saída no primeiro estágio de carga da bateria; para a outra situação, uma corrente média e tensão no segundo estágio de carregamento da bateria. Em ambas situações foi considerado o carregamento normal da bateria, chamado de *Standard Charge* (CHEM, 2013). O circuito simulado em malha aberta para as duas situações está mostrado na Figura 48.

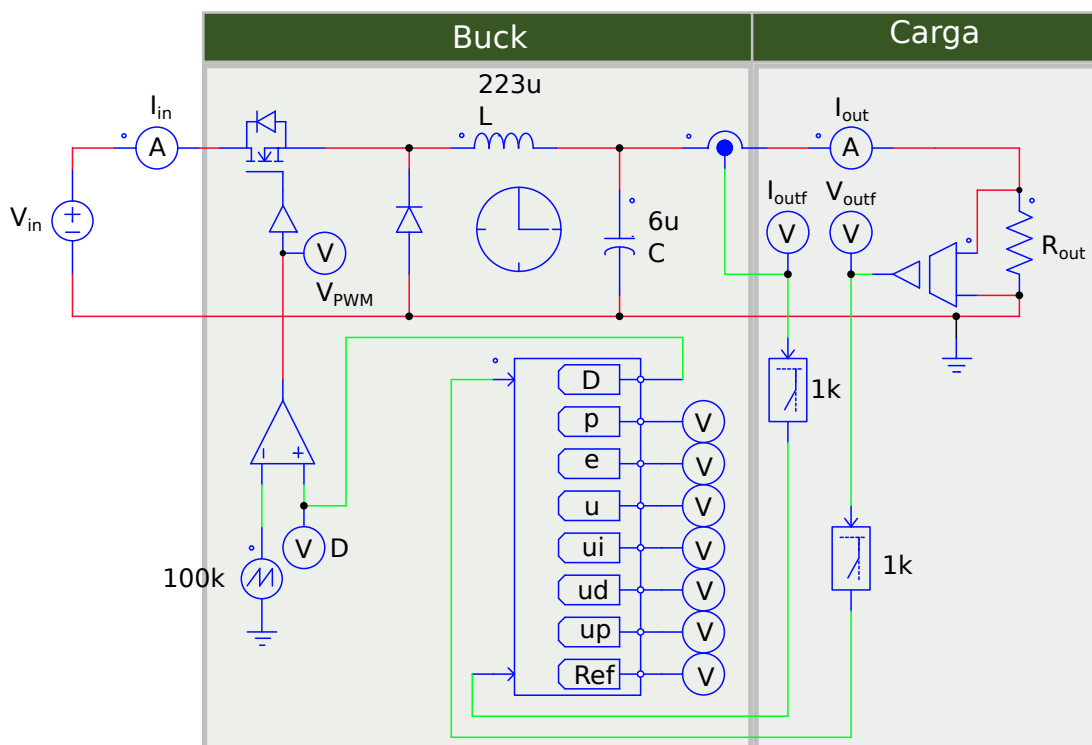


Figura 48: CCC3 simulado em Psim em malha aberta.  
Fonte: Autoria própria.

Para o projeto do controlador utilizou-se a regra de sintonia de PID de Ziegler-Nichols, segundo método, que é realizado da seguinte forma (OGATA, 2000):

1. Fechar a malha utilizando apenas o ganho proporcional  $K_p$ , observando a res-

**Tabela 14: Parâmetros do CCC3 para os dois estágios de carregamento da bateria**

Parâmetro	Unidade	Primeiro estágio	Segundo estágio
		Valor	Valor
$V_{out}$	V	3,9	4,2
$I_{out}$	A	1,25	0,875
$R_{LB}$ ou $R_{out}$	$\Omega$	3,12	4,8
$D$ para $V_{in} = 25$ V	–	0,156	0,168
$D$ para $V_{in} = 30$ V	–	0,13	0,14

**Fonte: autoria própria.**

posta ao degrau para diversos valores de  $K$ , até que se obtenha na saída um sinal com oscilações mantidas,

- este valor de  $K$  que originou estas oscilações é chamado de  $K_{cr}$ , obtém-se também o período,  $P_{cr}$ , das oscilações,
- com estas informações se determina as constantes da equação (46), sabendo que  $K = 0,6K_{cr}$ ,  $T_i = 0,5P_{cr}$  e  $T_d = 0,125P_{cr}$ .

Com esta metodologia obteve-se os seguintes valores, mostrados na Tabela 15, para o controle contínuo, considerando 30 V na entrada do CCC3 na primeira e segunda etapas de carregamento da bateria. Sendo que na primeira etapa utiliza-se o controle da corrente, e na segunda o controle da tensão.

**Tabela 15: Constantes para projeto do CCC1 em tempo contínuo para controle de corrente e tensão.**

Constante	Unidade	Controle da corrente	Controle da tensão
		Valor	Valor
$K_{cr}$	-	2,5087	1,1540
$P_{cr}$	$\mu$ S	200	200
$K$	-	1,5052	0,6924
$T_i$	$\mu$ S	100	100
$T_d$	$\mu$ S	25	25

**Fonte: autoria própria.**

### 3.3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA

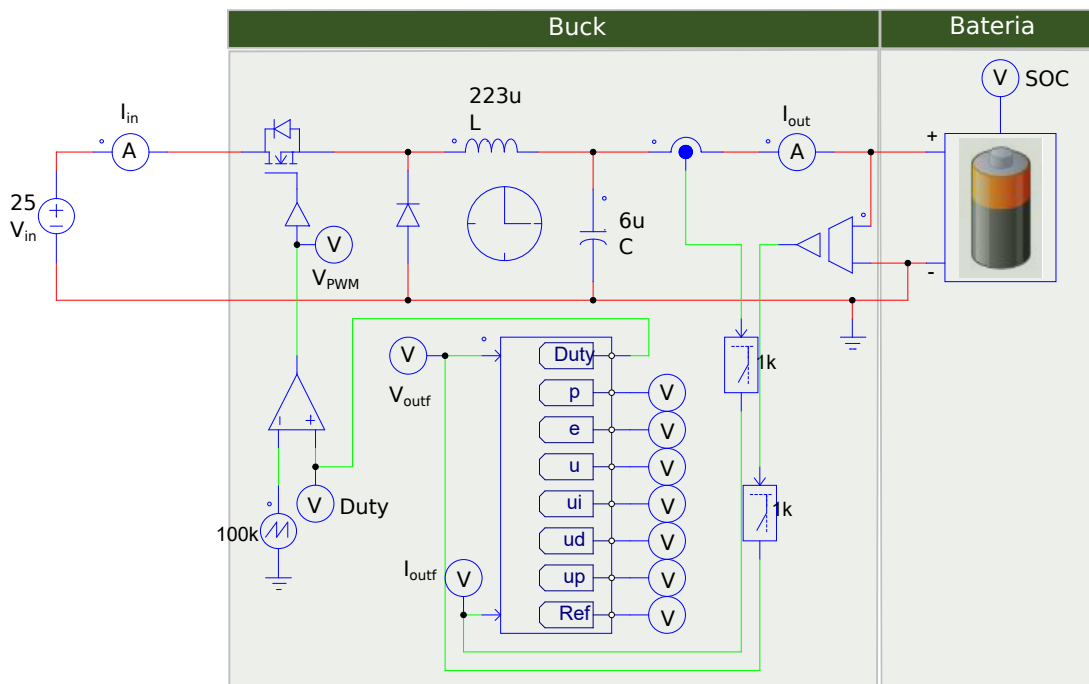
Para os ganhos discretos foram utilizados os valores contínuos descritos na Tabela 15 e a equação (47). Os valores dos ganhos discretos estão mostrados na Tabela 16.

**Tabela 16: Constantes para projeto do CCC3 em tempo discreto para controle da corrente e tensão.**

Constante	Unidade	Controle da corrente	Controle da tensão
		Valor	Valor
$K_P$	-	1,5	0,69
$K_I$	-	0,01045289	0,0047916
$K_D$	-	54,1885	24,840159
$T$	$\mu S$	0,69444	0,69444

**Fonte: autoria própria.**

Para a simulação em malha fechada deste conversor, realizando a carga da bateria, foi implementado no programa Psim o circuito da Figura 49. Obtendo na Figura 50 o gráfico da tensão na bateria, corrente de saída para a bateria, ação de controle, referência do sistema de controle, e o estado de carga da bateria.



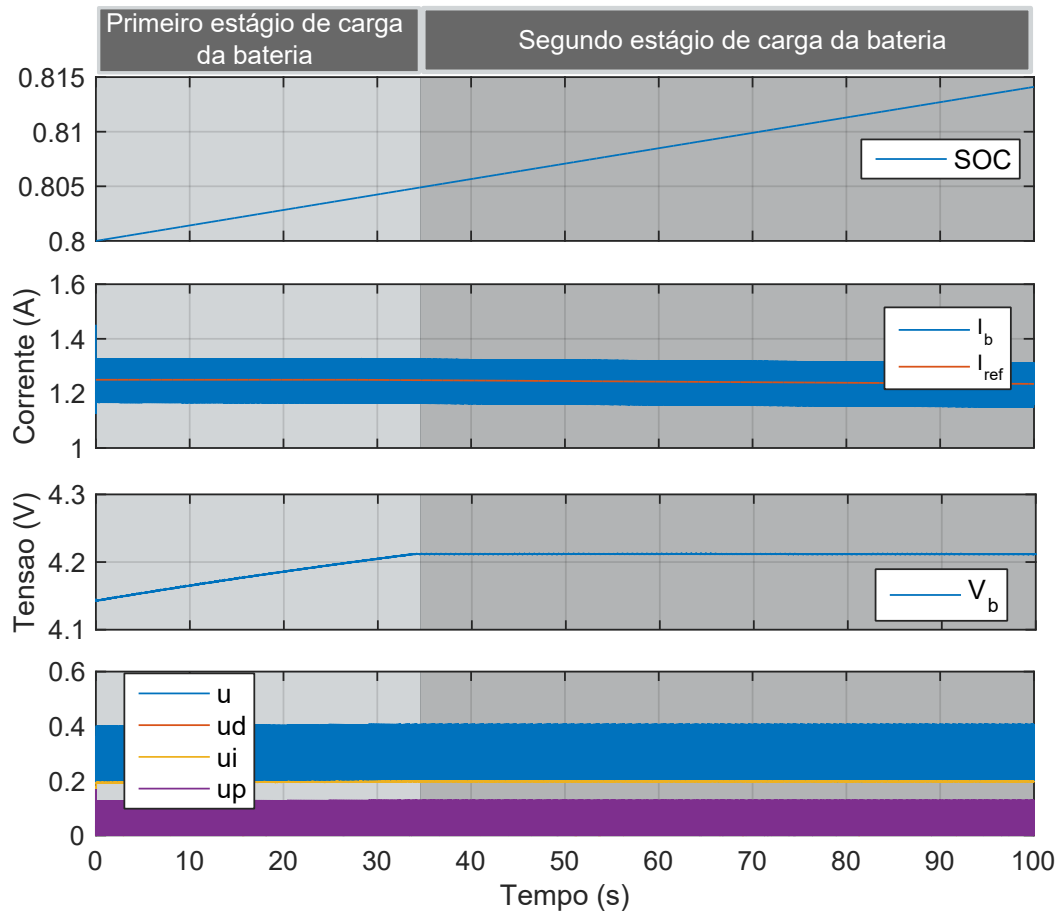
**Figura 49: CCC3 simulado em Psim em malha fechada.**

**Fonte: Autoria própria.**

Nesses gráficos é possível observar que o conversor alcançou seu objetivo de controle da carga da bateria. No primeiro gráfico de cima para baixo da Figura 50 o *State Of Charge*<sup>1</sup> (SOC) cresceu com taxa constante durante todo o período de simulação, indicando continuidade do carregamento da bateria. No segundo gráfico é mostrada a corrente para a bateria, ficando próxima da referência, 1,25 A.

No terceiro gráfico da Figura 50 é mostrado a tensão na bateria, crescendo até próximo de 4,2 V, indicando o primeiro estágio de carga da bateria e permane-

<sup>1</sup>Do inglês, *State Of Charge*, Estado de Carga



**Figura 50: SOC da bateria, corrente na bateria e referência de corrente, tensão na bateria, e ações de controle do CCC3 simulado.**

Fonte: Autoria própria.

cendo constante, indicando o segundo estágio de carga da bateria. Por fim, no último gráfico da mesma figura são mostrados os sinais de controle, sendo o controle total,  $u$ , a soma da parcela derivativa,  $ud$ , integrativa,  $ui$ , e proporcional,  $up$ .

### 3.4 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO DO CCC2

O conversor CCC2 foi definido na subseção 3.1.2 como sendo o *Buck* Bidirecional, o qual teve suas características explanadas na subseção 2.4.3. Nesta seção serão realizados o dimensionamento deste conversor, projeto do sistema de controle e implementação de simulação em malha fechada.

#### 3.4.1 ESPECIFICAÇÕES E DIMENSIONAMENTO

Para o projeto do conversor CCC2 é necessário definir algumas premissas e requisitos que o mesmo deverá atender. Esses item, bem como os valores dos elementos do CCC2 projetados, estão mostrados na Tabela 17, os símbolos estão re-

ferenciados de acordo com a subseção 2.4.3. Foram considerados  $V_{out}$  e  $I_{out}$  mínimos e máximos de acordo com as especificações do supercapacitor. Obteve-se a corrente de saída mínima considerando 5 W e tensão de 16 V no supercapacitor (MAXWELL, 2014). Para o cálculo de  $L_{BB_{min}}$  utilizou-se o maior valor calculado entre as equações (34) e (30). Para o cálculo da ondulação da tensão de saída se utilizou 1%.

**Tabela 17: Parâmetros para projeto do CCC2**

Parâmetro	Unidade	Valor
$V_{in}$	V	25 - 30
$V_{out}$	V	4 - 16
$f_{sw}$	kHz	100
$I_{out_{min}}$	A	0,3125
$D_1$	adimensional	0,133 - 0,64
$D_2$	adimensional	0,867 - 0,36
$\Delta V_{out}$	V	0,04 (1% de 4)
$L_{BB_{min}}$	$\mu$ H	780

**Fonte: autoria própria.**

### 3.4.2 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

O objetivo do sistema de controle do CCC2 é controlar a corrente de saída. Para isso foi implementado no programa Psim o circuito do CCC2 com os valores dos componentes calculados anteriormente, mostrados na Tabela 17.

A relação entre  $D_2$  e a corrente de saída pode ser descrita analisando a potência de entrada e saída do conversor,  $P_{out} = \eta P_{in}$ , reescrevendo em função da tensão e corrente de saída, isolando a corrente de saída e reescrevendo a tensão de saída em função da tensão de entrada,

$$I_{out} = \eta \frac{P_{in}}{(1 - D_2) \cdot V_{in}}. \quad (49)$$

O circuito simulado para os dois modos de operação do CCC2 está mostrado na Figura 51, onde foi incluído o modelo do supercapacitor a ser utilizado nas simulações, porém preferiu não incluir na Figura 51 com o propósito de não prejudicar a visualização do circuito do CCC2 que é o foco desta figura.

Para o projeto do controlador utilizou-se a regra de sintonia de PID de Ziegler-Nichols, segundo método (OGATA, 2000). Obtendo os seguintes valores para o controle contínuo, no modo *buck* e *boost* mostrados na Tabela 18.

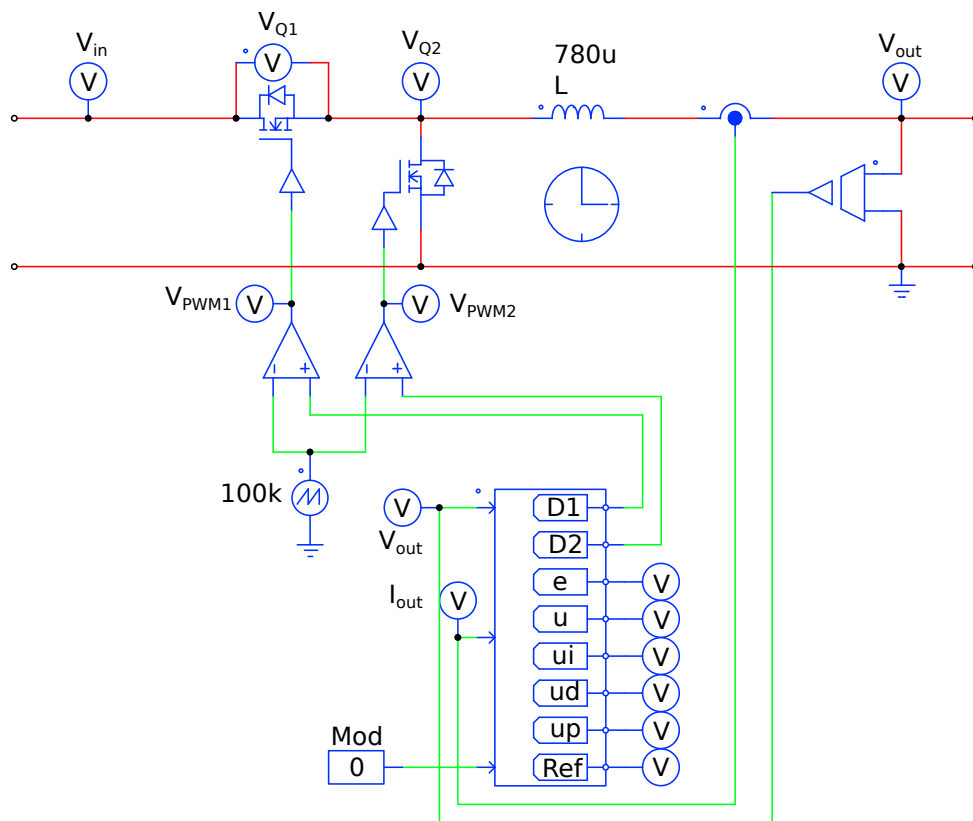


Figura 51: CCC2 simulado em Psim em malha aberta.  
Fonte: Autoria própria.

Tabela 18: Constantes para projeto do CCC2 em modo *buck* e *boost*, em tempo contínuo.

Constante	Unidade	Modo <i>buck</i>	Modo <i>boost</i>
		Valor	Valor
$K_{cr}$	-	0,1	58,744
$P_{cr}$	ms	21,7	0,0548
$K$	-	0,06	35,2467
$T_i$	ms	10,85	0,0274
$T_d$	ms	2,7125	0,00685

Fonte: autoria própria.

### 3.4.3 IMPLEMENTAÇÃO DE SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA

Para os ganhos discretos foram utilizados os valores contínuos descritos na Tabela 18 e a equação (47). Os valores dos ganhos discretos estão mostrados na Tabela 19.

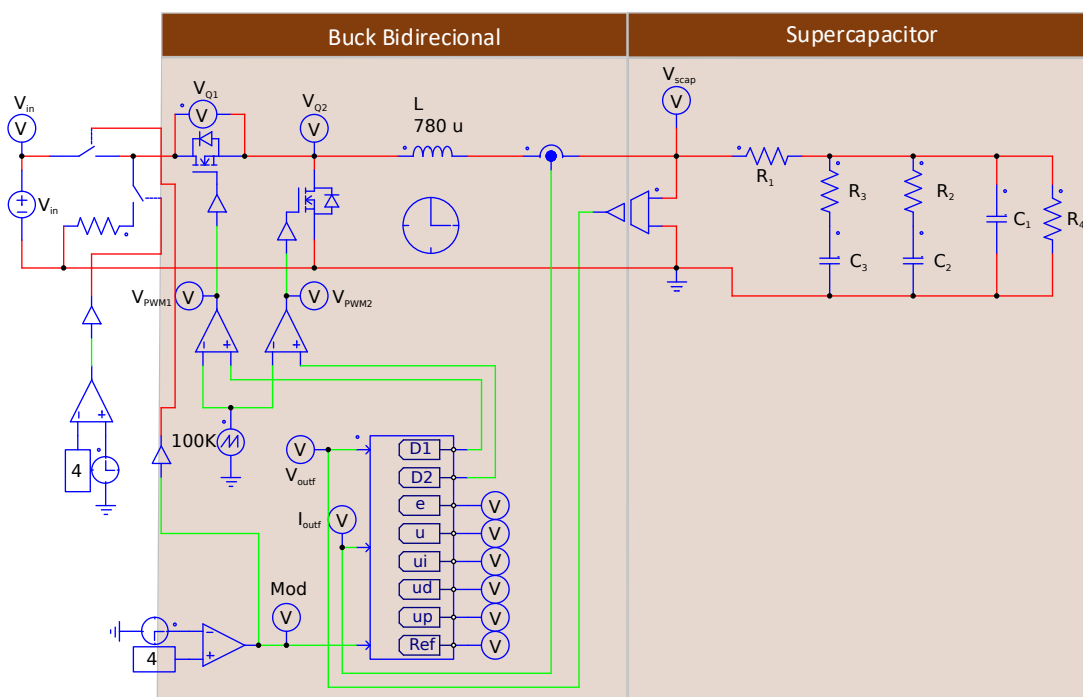
Para a simulação em malha fechada deste conversor, realizando a carga e descarga do supercapacitor, foi implementado no programa Psim o circuito da Figura 52. Onde são mostradas a entrada, como fonte de tensão em paralelo com um

**Tabela 19: Constantes para projeto do CCC2 em modo buck e boost, em tempo discreto.**

Constante	Unidade	Modo buck	Modo boost
		Valor	Valor
$K_P$	-	0,06	34,8
$K_I$	-	0,00000384	0,8933
$K_D$	-	234,361	347,675
$T$	$\mu S$	0,69444	0,69444

Fonte: autoria própria.

resistor para descarregar o supercapacitor após 4 segundos da simulação, o circuito do conversor Buck Bidirecional, e o circuito equivalente do supercapacitor ao final. O sistema de controle foi implementado em um bloco C do Psim.



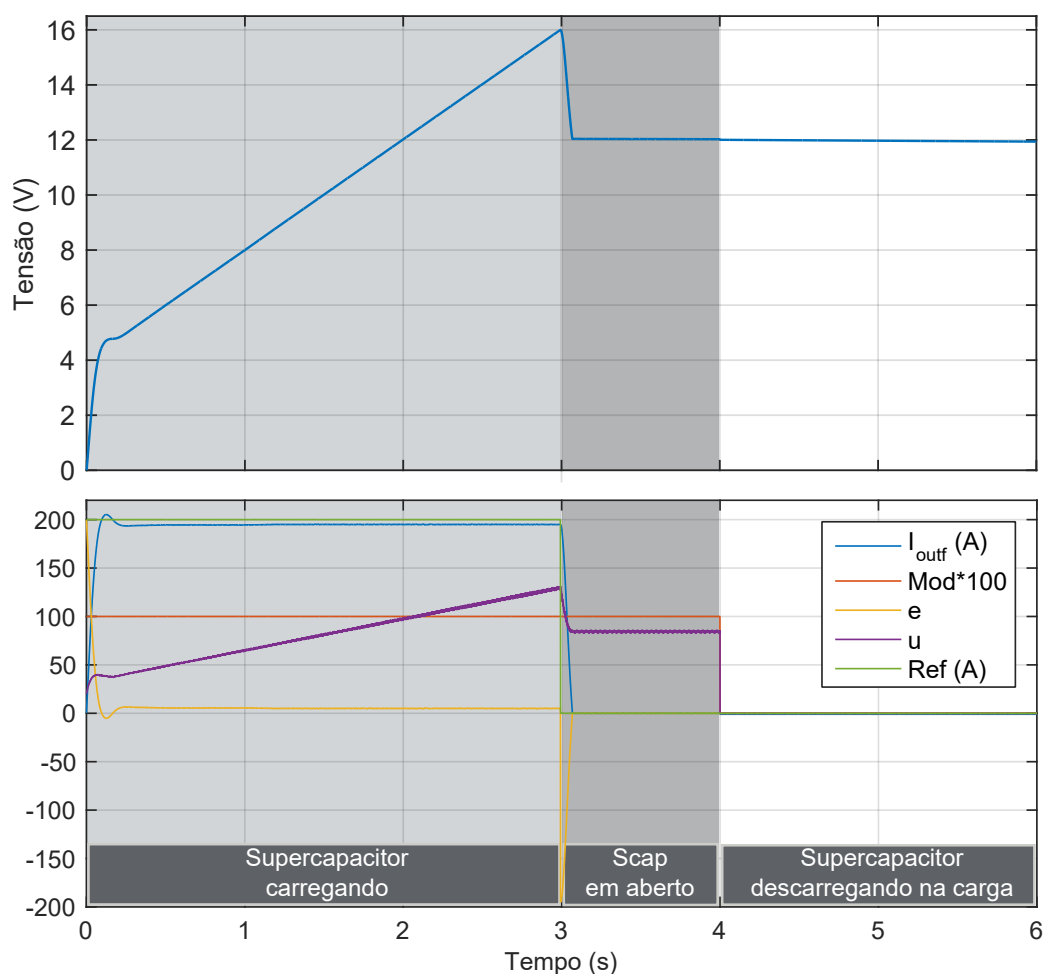
**Figura 52: CCC2 simulado em Psim em malha fechada.**

Fonte: Autoria própria.

Foi realizada a simulação para a carga do supercapacitor com uma corrente de 200 A. Após carregado, o supercapacitor foi descarregado em uma resistência de 12  $\Omega$ , em paralelo com a fonte de entrada na Figura 52, no tempo de 4 segundos de simulação.

Na Figura 53 são mostrados a corrente de saída para o supercapacitor, o modo de operação, que indica se é para carregar ou descarregar o supercapacitor, 0 para carga e 1 para descarga, além do sinal de erro, ação de controle e referência

do sistema de controle. Os valores dos componentes que constituem o modelo do supercapacitor foram extraídos da Tabela 3.



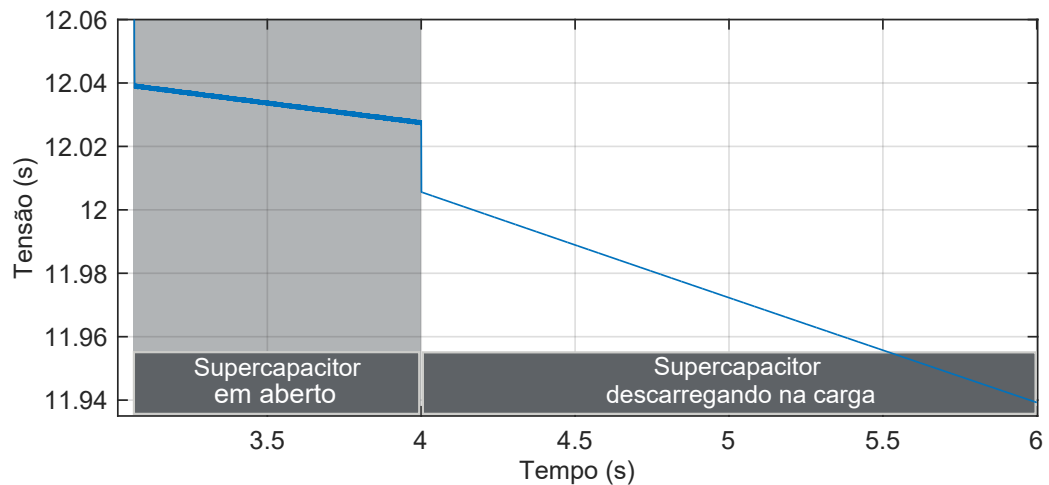
**Figura 53: Tensão no supercapacitor, corrente de saída do CCC2, sinal de modo, erro, ação de controle e referência na simulação do CCC2 em malha fechada.**  
**Fonte: Autoria própria.**

No primeiro gráfico de cima para baixo na Figura 53 é verificado o supercapacitor carregando de forma aproximadamente linear até o segundo 3 de simulação. Após isso, o supercapacitor tem seus terminais em aberto até o segundo 4, e após isso conectado no resistor em paralelo para descarregar. Com esta curva de tensão no supercapacitor é possível observar uma aproximação com a curva de carga e descarga de supercapacitores da Figura 19, verificando a aproximação entre o modelo teórico descrito na seção 2.3 e o implementado em Psim.

Na Figura 54 é mostrada uma ampliação da curva de descarga do supercapacitor, evidenciando a descarga natural dele, mesmo em aberto entre os segundos 3 e 4. Do segundo 4 em diante o supercapacitor está descarregando em uma resistência colocada em paralelo com a entrada do CCC2; com isso verificando o modo *boost* do conversor, invertendo o fluxo de potência que antes era da entrada do conversor para



saída, e agora é da saída para a entrada.



**Figura 54: Vista ampliada da tensão no supercapacitor quando este está descarregando.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram definidos a estrutura do sistema de conversão de energia, o painel fotovoltaico e o supercapacitor com base na bateria a ser carregada. A partir desta estrutura foram especificados e projetados conversores estáticos (CCC1, CCC2 e CCC3) que atendem aos requisitos estabelecidos. Os conversores CCC1, CCC2 e CCC3 foram então analisados através de simulações computacionais e foram projetados sistemas de controle para cada conversor com base na respectiva função a ser realizada. Através de análise por simulações, verificou-se que o conversor CCC1 foi capaz de realizar rastreamento do MPP do painel solar, enquanto o controle controlar de corrente do supercapacitor foi realizado pelo conversor CCC2 e o conversor CCC3 controlou o carregamento da bateria.

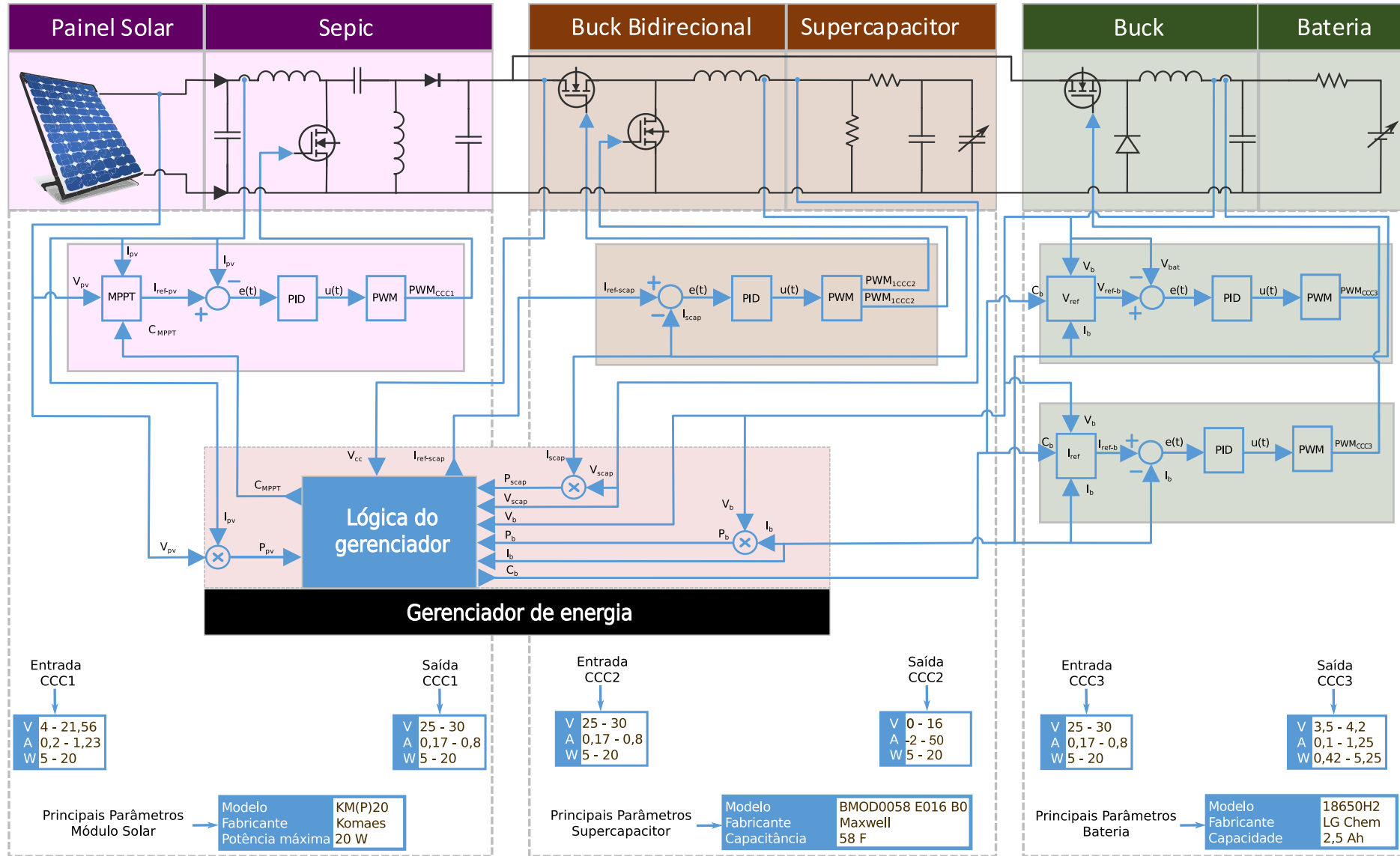


Figura 55: Diagrama geral do projeto proposto com detalhes.  
 Fonte: Autoria própria.

## 4 PROJETO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA ENERGIA

Após cada CCC ter sido implementado em simulação de forma isolada, é chegado o momento de uni-los em um sistema, formando o CSBS. Para isso é necessário o projeto do sistema de gerenciamento de energia, (GE), que irá coordenar os CCCs a fim de trabalharem para o objetivo geral de carregar a bateria.

### 4.1 ESPECIFICAÇÕES DAS ETAPAS E PROCESSOS

Para o projeto do sistema de gerenciamento de energia é importante, primeiramente, especificar as etapas e os processos que deverão ser atendidos. A Figura 56 ilustra os estados principais que constituirão este sistema.

A análise da Figura 56 inicia-se quando o CSBS é ligado, então é ligado o MPPT do painel fotovoltaico através do CCC1. Após o sistema se estabilizar é feita as primeiras comparações, ou também verificações, direcionando a energia do painel para carregar apenas a bateria, a bateria e o supercapacitor ou apenas o supercapacitor. Também foi considerado o carregamento apenas do supercapacitor quando não há energia suficiente do painel para carregar a bateria. Outra consideração foi a possibilidade de carregar a bateria apenas com o supercapacitor, se o painel solar não prover a potência necessária para tal.

Sempre que houver o carregamento da bateria será verificado sobretensão nela, tolerando-se 0,1 V a mais do que os 4,2 V durante a carga normal; isto para que o carregamento não seja interrompido enquanto a bateria se encontrar no segundo estágio, onde a tensão fica por volta de 4,2 V, com isso tem-se uma margem de segurança de 0,1 V. Caso a tensão na bateria ultrapasse esse valor máximo, é ativado o controle da tensão no CCC3 a fim de que a tensão volte no valor de 4,2 V.

Quando a corrente da bateria chegar ao valor de flutuação, 0,5 A, e tensão por volta de 4,2 V, é verificado se o supercapacitor está carregado; se sim, o sistema é desligado; se não, carrega-se apenas ele, a fim de deixá-lo carregado enquanto houver potência do painel. O estado E3, que é a carga apenas da bateria, é composto ainda de alguns estados internos mostrados na Figura 57, sendo estes, a verificação de sobretensões e o fim do carregamento da bateria e do supercapacitor.

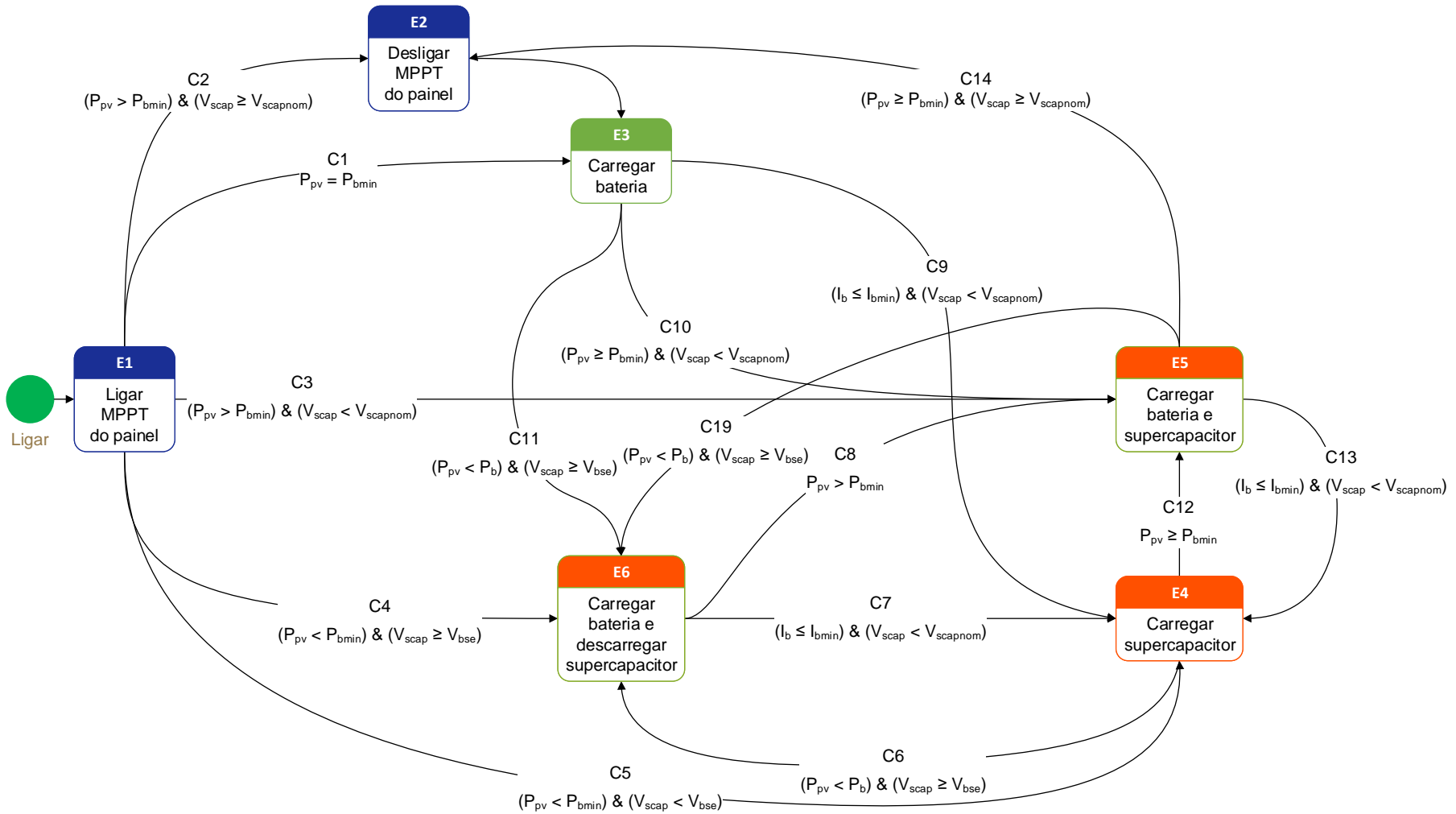
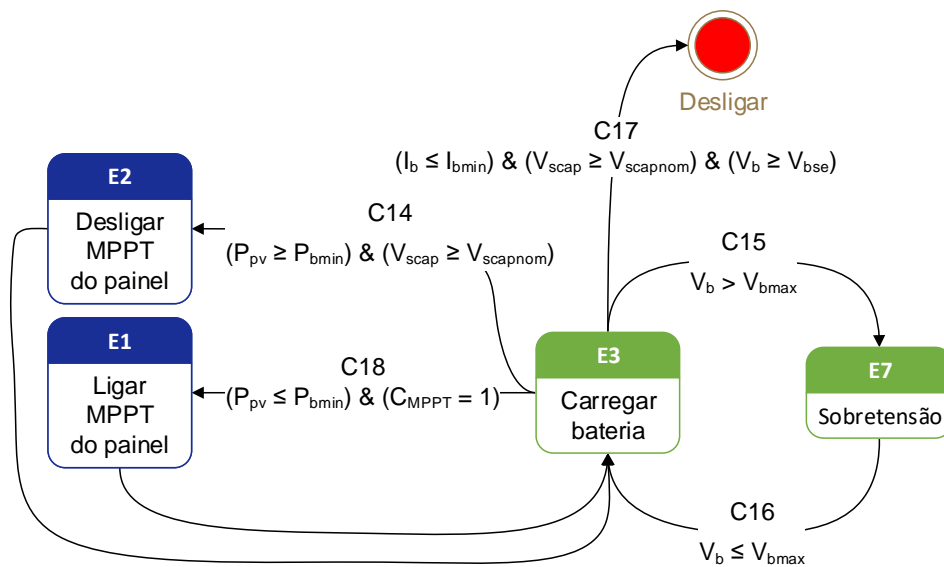
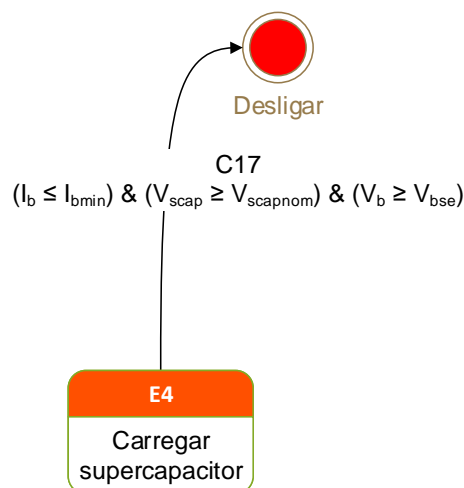


Figura 56: Máquina de estados do sistema de gerenciamento da energia.  
 Fonte: Autoria própria.



**Figura 57: Máquina de estados dos estados internos do E3.**  
**Fonte: Autoria própria.**

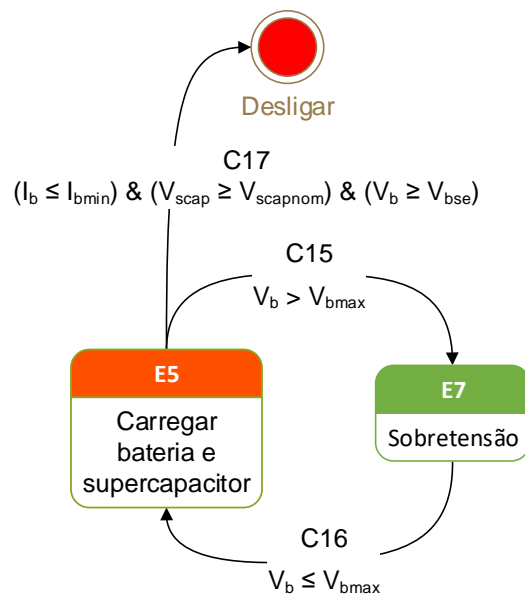
O estado E4 que é a carga apenas do supercapacitor é composto ainda de um estado interno, mostrado na Figura 58, a saber, o estado de desligamento do sistema.



**Figura 58: Máquina de estados dos estado interno do E4.**  
**Fonte: Autoria própria.**

O estado E5 que é a carga da bateria e do supercapacitor é composto ainda de alguns estados internos, mostrados na Figura 59, a saber, o estado de sobretensão e desligamento do sistema.

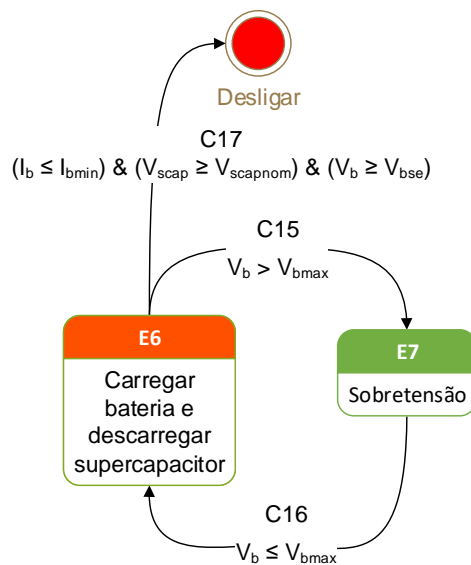
O estado E6 que é a carga da bateria e a descarga do supercapacitor é



**Figura 59: Máquina de estados dos estados internos do E5.**

Fonte: Autoria própria.

composto ainda de alguns estados internos, mostrados na Figura 60.



**Figura 60: Máquina de estados dos estados internos do E6.**

Fonte: Autoria própria.

As equações mostradas nas máquinas de estado das figuras acima tem as nomenclaturas das variáveis descritas abaixo:

- $P_{pv}$ : potência extraída no painel fotovoltaico,

- $P_b$ : potência requerida pela bateria,
- $P_{bmin}$ : potência mínima necessária para carregar a bateria na transição dos estágios de carregamento,
- $P_{scap}$ : potência de saída do supercapacitor,
- $V_{scap}$ : tensão nos terminais do supercapacitor,
- $V_{scapnom}$ : tensão nominal do supercapacitor,
- $V_{bse}$ : tensão da bateria durante segunda etapa de carregamento.
- $V_{bmax}$ : máxima tensão admitida pela bateria durante carregamento.
- $I_b$ : corrente drenada pela bateria,
- $I_{bmin}$ : corrente de flutuação da bateria, significa o fim do carregamento.

As equações condicionais elencadas nas máquinas de estado têm seus significados descritos abaixo:

- C1: ocorre quando a potência gerada pelo painel é suficiente apenas para carregar a bateria;
- C2: ocorre quando a potencia gerada pelo painel fotovoltaico é maior do que a requerido para a carga da bateria e o supercapacitor já está carregado, sendo necessário desligar o MPPT do painel;
- C3: potência do painel é maior do que a necessária para carregar a bateria e o supercapacitor ainda não está carregado;
- C4: potência do painel é menor do que a requerida para carregar a bateria, mas há potência suficiente no supercapacitor (já está um pouco carregado);
- C5: quando não está sendo gerada potência suficiente no painel e o supercapacitor não está carregado suficientemente para carregar a bateria;
- C6: potência do painel é menor do que a requerida para carregar a bateria, porém o supercapacitor já está um pouco carregado;
- C7: quando a corrente da bateria já alcançou a corrente de flutuação, mas o supercapacitor ainda não carregou;

- C8: potência do painel é maior do que a requerida para a carga da bateria;
- C9: quando a corrente da bateria já alcançou a corrente de flutuação, mas o supercapacitor ainda não carregou;
- C10: quando a potência do painel é maior do que a mínima para carregar a bateria, e o supercapacitor ainda não está carregado;
- C11: não há potência necessária para carregar a bateria pelo painel, mas sim no supercapacitor;
- C12: potência do painel é maior do que a requerida pela bateria, podendo então carregar também o supercapacitor;
- C13: quando a corrente da bateria já alcançou a corrente de flutuação, mas o supercapacitor ainda não carregou completamente;
- C14: quando há potência no painel para carregar a bateria e o supercapacitor já está carregado, sendo necessário desligar o MPPT do painel;
- C15: quando a tensão da bateria excede seus limites e então é acionado o modo de sobretensão da bateria;
- C16: quando a tensão da bateria volta ao seu valor normal, logo a bateria continua a ser carregada normalmente;
- C17: quando a corrente da bateria já alcançou a corrente de flutuação e o supercapacitor já foi carregado completamente, além da tensão na bateria estar no valor correto para o segundo estágio de carregamento;
- C18: quando a potência gerada pelo painel é menor do que a necessária para a carga da bateria e o MPPT do painel está desligado, então liga-se novamente o MPPT do painel,
- C19: quando a potência do painel é menor do que a drenada pela bateria, porém tem energia disponível no supercapacitor.

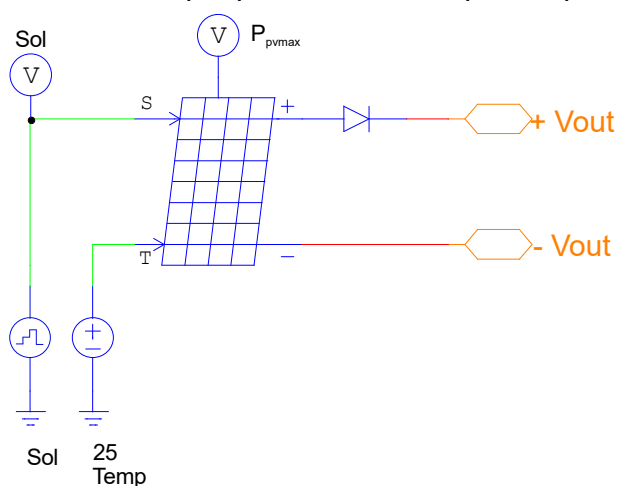
Com a lógica de funcionamento do gerenciador de energia definido é então realizada a implementação dele e de todo o CSBS em simulação no Psim, o que está descrito na seção seguinte.



## 4.2 IMPLEMENTAÇÃO EM SIMULAÇÃO

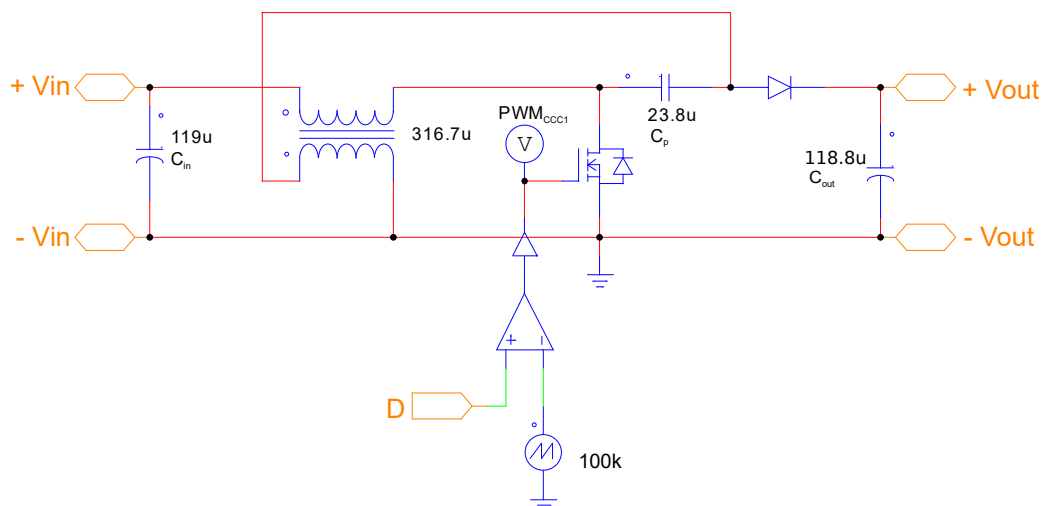
Para a implementação em simulação do gerenciador de energia no programa Psim, bem como todo o CSBS, foi montado o circuito mostrado na Figura 66, na qual foi juntado o painel fotovoltaico, CCC1, CCC2, supercapacitor, CCC3, bateria e o gerenciador de energia. Os conversores, o supercapacitor, além do painel fotovoltaico, foram montados em sub circuitos a fim de melhorar a organização da simulação.

O código implementado no Bloco C do gerenciador de energia está no apêndice B.4. O painel fotovoltaico está mostrado no sub circuito da Figura 61. Foi realizada a simulação para uma temperatura de 25°C no painel e irradiação solar em forma de um sinal com amplitudes variadas de 0 a 1000 W/m<sup>2</sup>, além disso, foi inserido um diodo para impedir correntes que poderiam voltar para o painel.



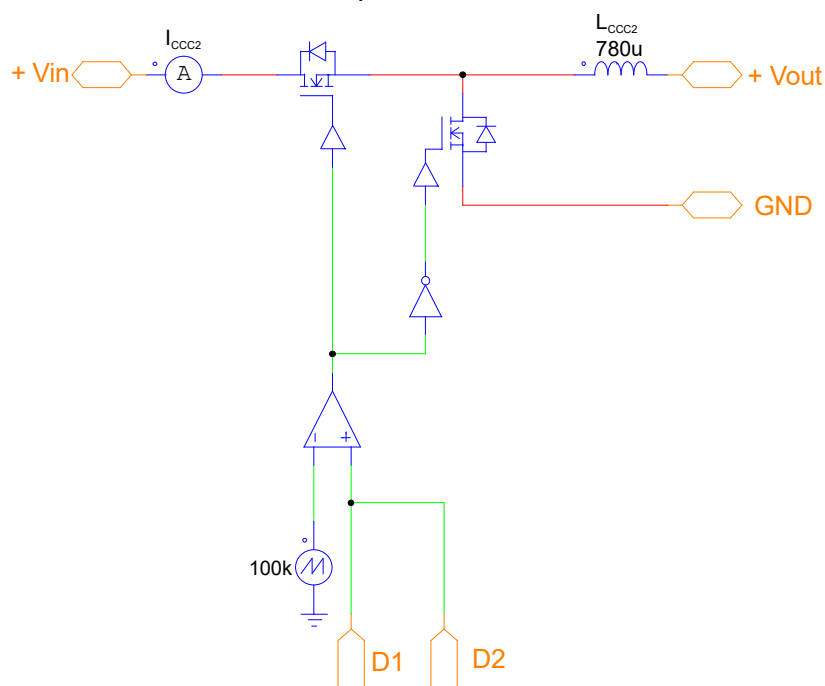
**Figura 61: Painel fotovoltaico no Psim.**  
**Fonte: Autoria própria.**

O CCC1, conversor Sepic, está mostrado no sub circuito da Figura 62, e o código implementado no Bloco C do CCC1 no apêndice B.1. Para que a corrente gerada como referência para o CCC1, através do algoritmo de MPPT, não variasse muito, foi utilizado incrementos pequenos de perturbação no algoritmo, na ordem de 0,0001 A. Quando o sinal de controle CMPPT é igual a 0, significa que o MPPT do painel está sendo realizado; caso o CMPPT seja igual a 1, indica que o MPPT do painel é para ser interrompido, com isso a tensão de referência do painel passa a ser a mesma daquela no momento em que o GE mandou parar o MPPT; caso a tensão do painel abaixe do valor determinado enquanto o MPPT está desligado, significa que a potência máxima extraível do painel está diminuindo, ou seja, a irradiação está diminuindo, como isso o MPPT do painel volta a atuar até que o valor da tensão do painel volte ao estabelecido anteriormente.



**Figura 62: CCC1 como sub circuito implementado em Psim.**  
**Fonte: Autoria própria.**

O CCC2, conversor *Buck* bidirecional, está mostrado no sub circuito da Figura 63, onde o sinal da razão cíclica D1 e D2 são complementares, haja vista o funcionamento deste conversor explanado na subseção 2.4.3.1, por isso a curto-circuitação destes sinais antes do comparador.

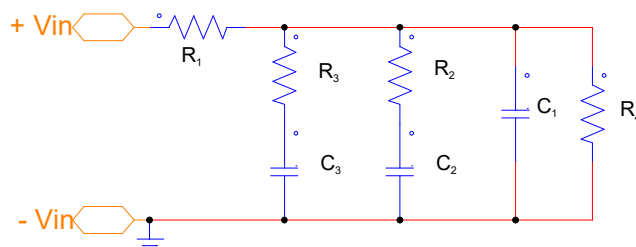


**Figura 63: CCC2 como sub circuito implementado em Psim.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Ainda neste conversor CCC2 é colocada uma porta inversora no *gate* de um deles, além de que no código do Bloco C do CCC2 as duas saídas, D1 e D2, terem valores iguais para um mesmo modo de operação do conversor. Quando o objetivo for operar como *Buck*, envia-se a razão cíclica para D1 e a mesma para D2, e quando o objetivo for operar como *Boost*, envia-se o complementar da razão cíclica para D2 e o

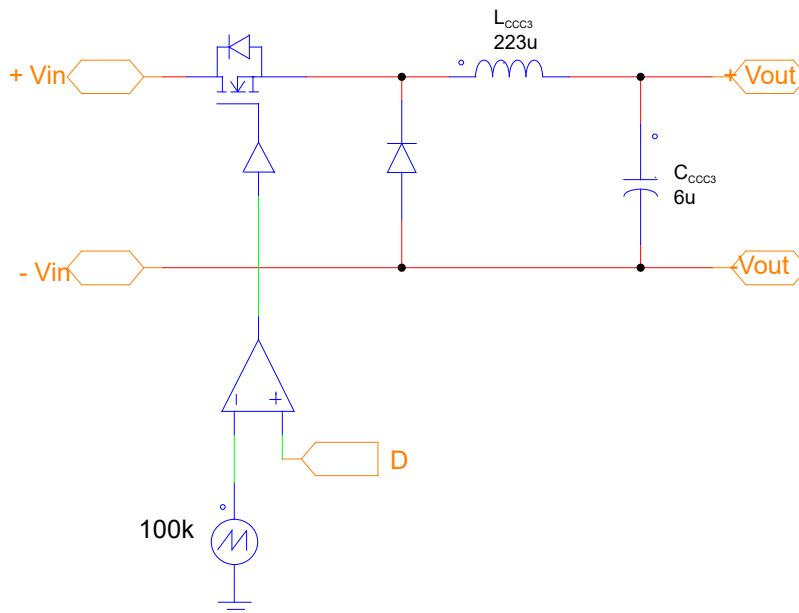
mesmo para D1.

O código implementado no Bloco C do CCC2 está no apêndice B.2. O supercapacitor está mostrado no sub circuito da Figura 64, os valores dos componentes utilizados na simulação são os descritos na Tabela 3.



**Figura 64: Supercapacitor como sub circuito implementado em Psim.**  
Fonte: Autoria própria.

O CCC3, conversor *Buck*, está mostrado no sub circuito da Figura 65 e o código implementado no Bloco C do CCC3 no apêndice B.3. Na saída do CCC3, indo para a bateria, foi inserido um Mosfet para impedir que a bateria descarregue durante operação do CSBS, além de desconectar a bateria quando for enviado o sinal  $C_b$  igual a 1, que significa o carregamento total da bateria, através de uma lógica booleana, para que  $C_b = 0$  ou 2 não desconecte a bateria.



**Figura 65: CCC3 como sub circuito implementado em Psim.**  
Fonte: Autoria própria.

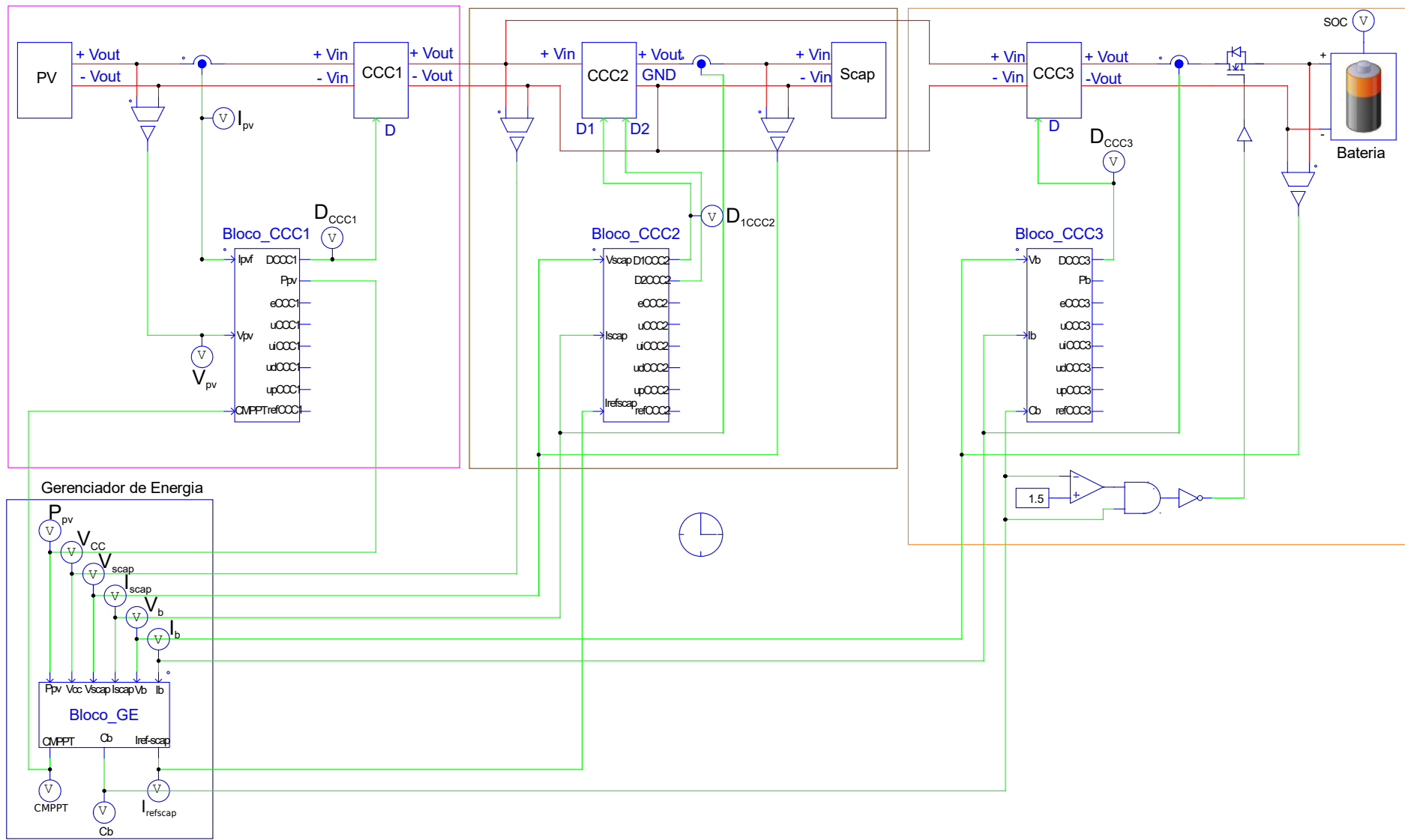
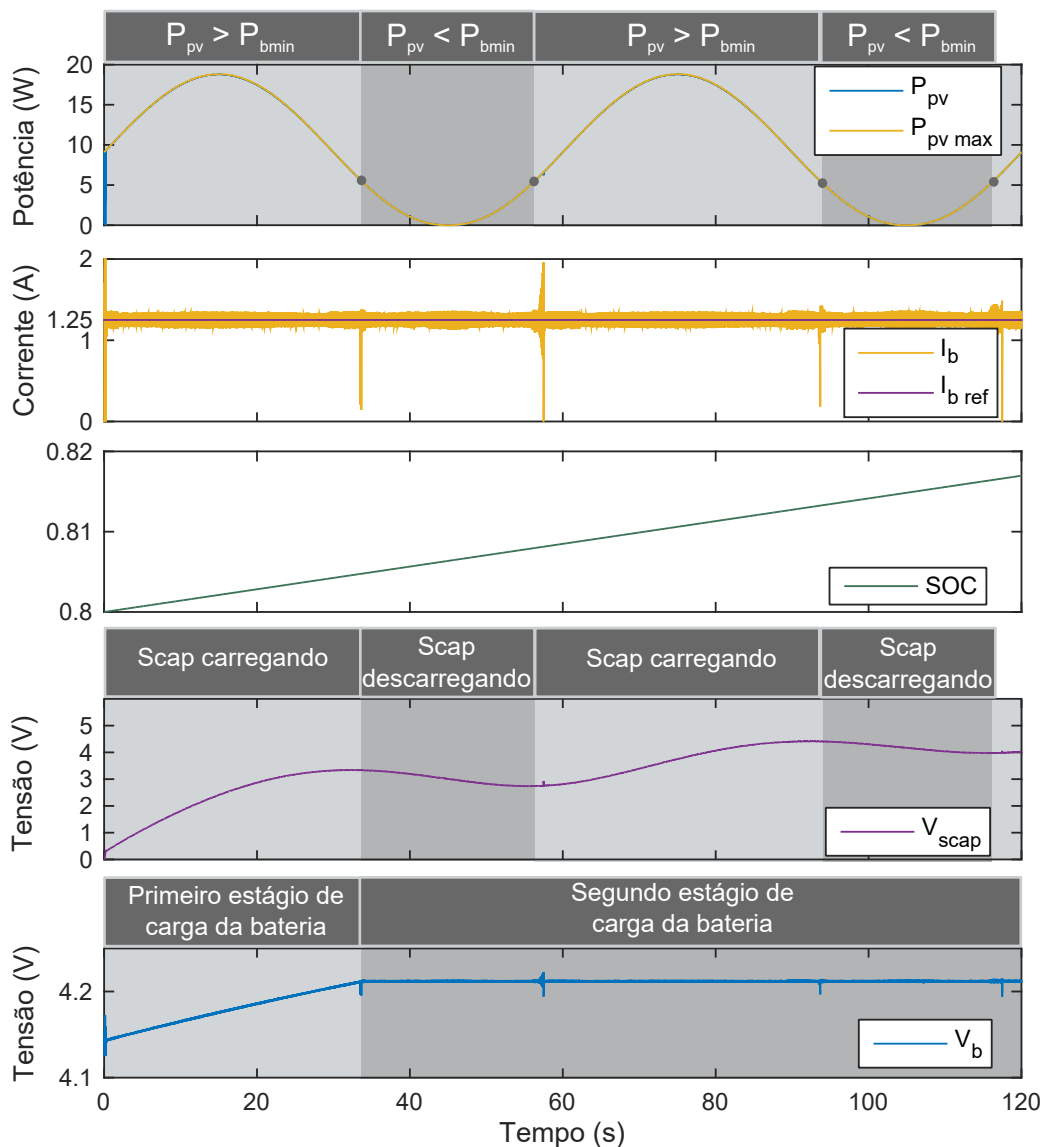


Figura 66: CSBS implementado em Psim.  
 Fonte: Autoria própria.

## 4.2.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

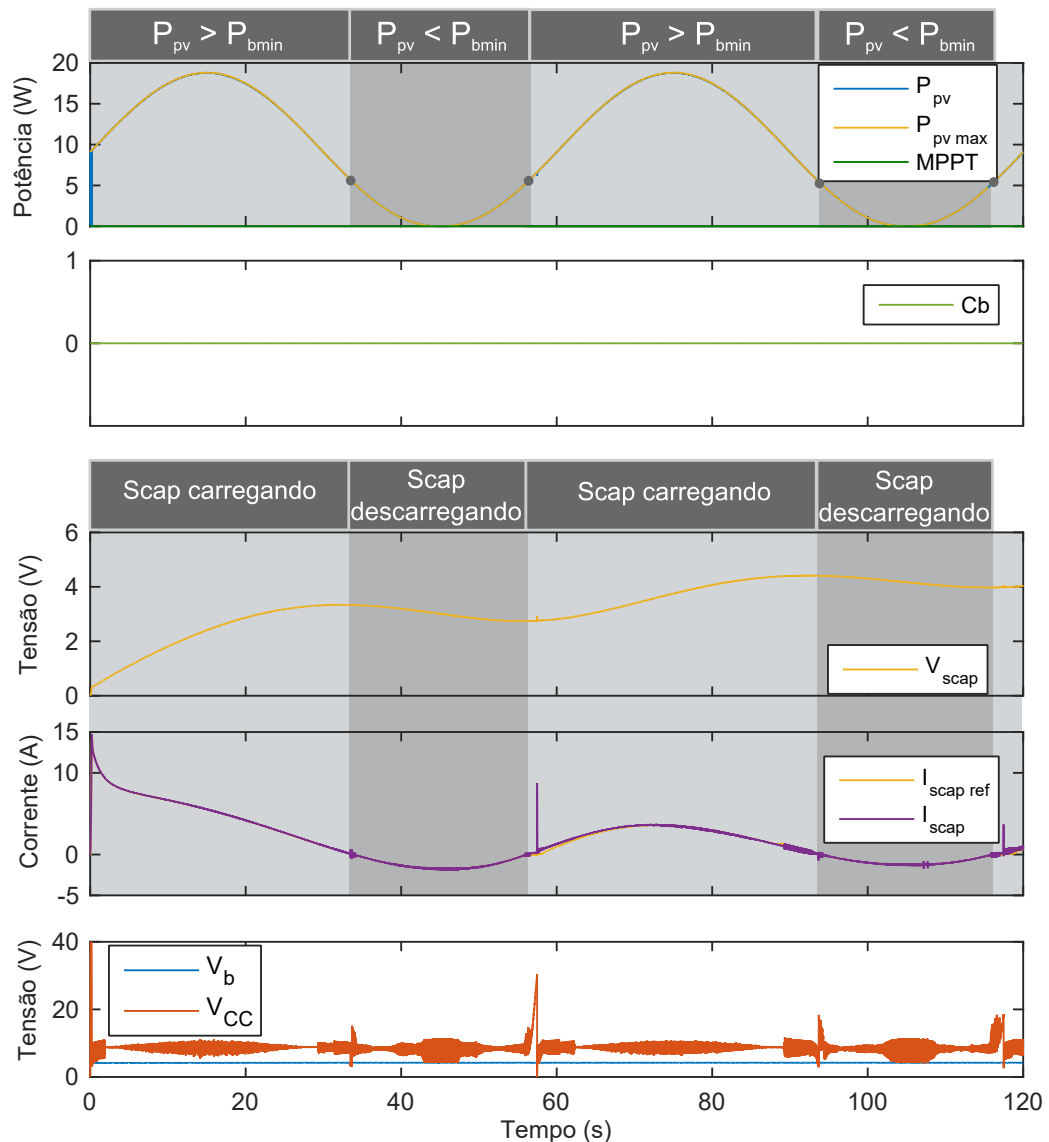
Foi realizada a simulação do CSBS, obtendo as leituras das variáveis importantes para o entendimento do bom funcionamento do sistema apresentado, são elas: estado de carga da bateria, SOC, corrente da bateria,  $I_b$ , tensão da bateria,  $V_b$ , tensão do supercapacitor,  $V_{scap}$ , tensão  $V_{CC}$  e potência gerada pelo painel fotovoltaico,  $P_{pv}$ , mostradas na Figura 67 para simulação de 0 a 120 segundos e os sinais de saída do GE, são eles: CMPPT,  $C_b$  e  $I_{refscap}$  na Figura 68, também para a simulação de 0 a 120 segundos.



**Figura 67:** Curvas das variáveis do CSBS para o tempo de 0 a 120 segundos.

**Fonte:** Autoria própria.

É perceptível que o algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico atingiu seu objetivo, juntamente com a programação implementada no bloco C do CCC1, o Bloco CCC1. Outro ponto importante é a regulação da



**Figura 68: Curvas das variáveis do CSBS com sinais de saída do GE para o tempo de 0 a 120 segundos.**

**Fonte: Autoria própria.**

corrente e tensão da bateria pelo CCC3, também alcançando seus objetivos dentro de uma margem de tolerância, mantendo sempre que possível o SOC da bateria em constante crescimento. Os transitórios na corrente  $I_b$  e  $I_{scap}$ , durante as transições entre o momento que o supercapacitor está carregando e quando está descarregando, são justificados pelo fato de o conversor CCC2 estar mudando de modo de operação nestas transições e a corrente no indutor do CCC2 não acompanhar de forma instantânea essa troca.

Um dos resultados mais importantes foi a transferência de energia do supercapacitor para a bateria quando não houve potência disponível pelo painel, mantendo a carga da bateria constante, mesmo com o supercapacitor tendo sido carregado com pouco mais de 3 V.

Na Figura 68 é verificado que o sistema operou no estado E5, carregando a bateria e supercapacitor, durante os períodos em que  $P_{pv} > P_{bmin}$ . Também operou no estado E6, carregando bateria e descarregando o supercapacitor, durante os períodos em que  $P_{pv} < P_{bmin}$ . Com isso o sistema foi alternando entre os estados E5 e E6 através das condições C19 e C8, mantendo a carga da bateria, ou seja,  $C_b$  permaneceu em zero.

Uma característica verificada é que a tensão  $V_{CC}$  não necessita estar entre 25 a 30 V como especificado durante o projeto dos conversores, mas apenas com valores acima da tensão da bateria,  $V_b$ . Obedecendo isto, o CSBS funciona como proposto. Para realizar esta regulação da tensão  $V_{CC}$ , utilizou-se a corrente que vai para o supercapacitor ou a fornecida por ele.

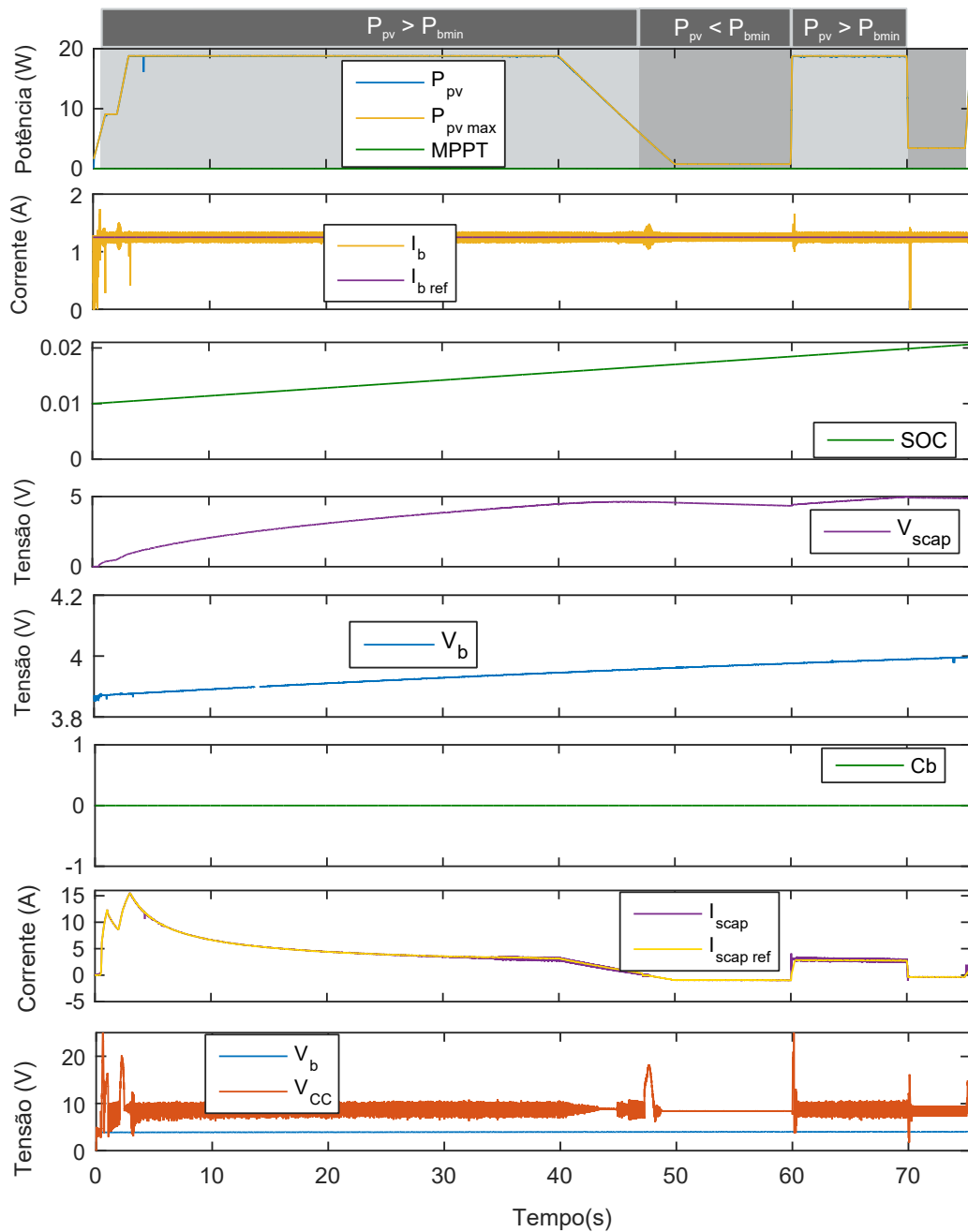
Foi realizada outra simulação para um padrão diferente de irradiação solar, simulando o sistema de 0 a 75,5 segundos, com variações mais bruscas da irradiação solar, com os resultados mostrados na Figura 69.

Sendo visível que, mesmo com variações bruscas de potência gerada pelo painel, em especial no segundo 60 de simulação, o SOC da bateria continuou a crescer e a tensão da bateria não caiu, demonstrando a resposta rápida do sistema.

Por fim, foi realizada outra simulação com variação mais lenta da irradiação solar, simulando o sistema de 0 a 300 segundos. Os resultados estão mostrados na Figura 70. Observou-se com esta última simulação, que para variações menos bruscas da irradiação solar, o CSBS funciona de forma melhor, ou seja, o carregamento da bateria é feito de maneira mais suave, sem variações bruscas na corrente de carga,  $I_b$ . Tendo em vista que a irradiação solar ao longo de um dia varia em taxas pequenas, logo o CSBS atende aos requisitos de carregamento da bateria de maneira satisfatória (BURGESS, 2009).

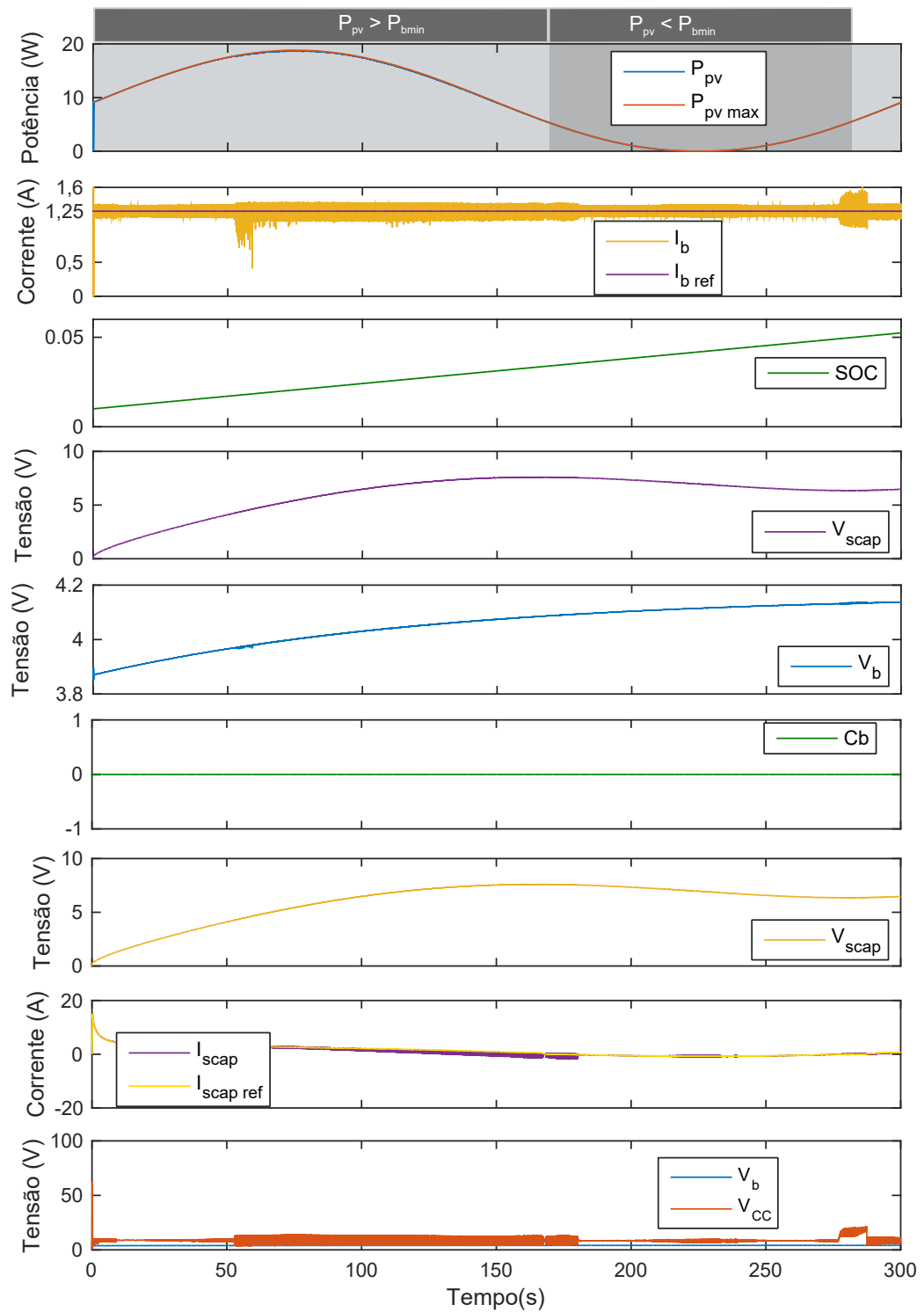
### 4.3 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi realizado o projeto do sistema de gerenciamento da energia, especificando os estados e condições que o sistema pode executar, com isto foi realizada a simulação do CSBS no programa Psim, versão 9.3, obtendo curvas que identificam alguns dos estados descritos na etapa de projeto do gerenciador de energia e que confirmaram o funcionamento do sistema dentro dos objetivos especificados, carregando a bateria, como objetivo central.



**Figura 69: Curvas das variáveis do CSBS para o tempo de 0 a 75,5 segundos.**  
**Fonte: Autoria própria.**





**Figura 70:** Curvas das variáveis do CSBS para o tempo de 0 a 300 segundos.  
**Fonte:** Autoria própria.

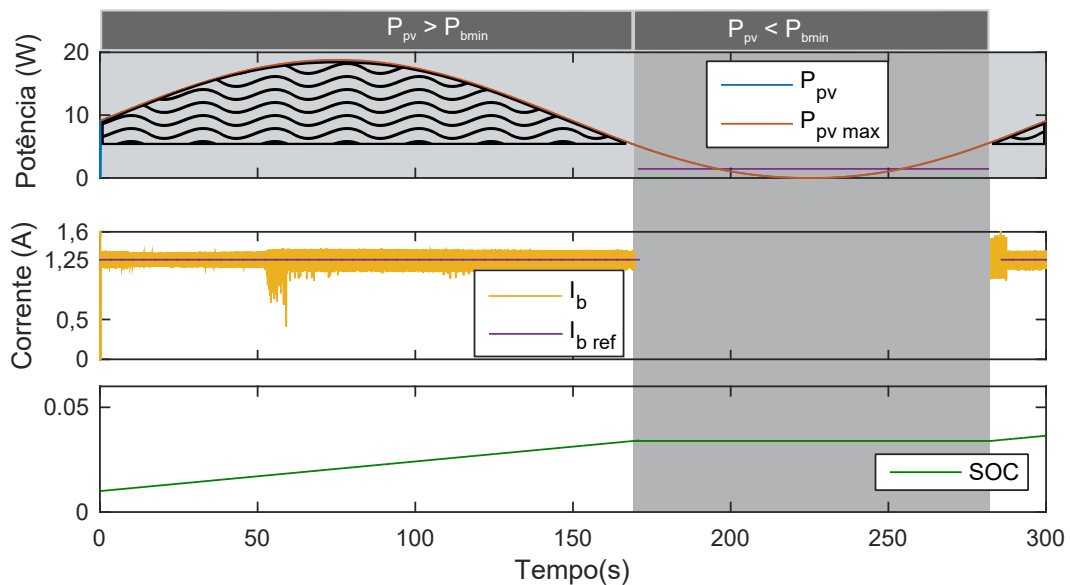
## 5 ANÁLISE E VERIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO

Com os resultados mostrados no capítulo anterior é realizada, neste presente capítulo, uma análise dos resultados a fim de obter uma conclusão plausível da viabilidade técnica de uso de supercapacitores em carregadores de baterias com painel fotovoltaico.

### 5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS ANTERIORES

Os resultados anteriores, mostrados nas Figuras 67, 68, 69 e 70 confirmam a viabilidade técnica de uso de supercapacitores em carregadores de bateria com painel fotovoltaico.

Para comparação entre a utilização ou não do supercapacitor foi, a partir dos resultados da simulação para 300 segundos mostrados na Figura 70, elaborada a Figura 71 onde é analisado, para o sistema sem o supercapacitor, os momentos nos quais a bateria não estaria sendo carregada. Com isso o tempo de carregamento aumenta, além de observada a energia desperdiçada, pois há excesso de geração.



**Figura 71: Curvas das variáveis do CSBS sem o supercapacitor para a simulação de 0 a 300 segundos.**

**Fonte: Autoria própria.**

Como evidenciado no primeiro gráfico de cima para baixo na Figura 71,

toda a diferença entre a potência gerada pelo painel solar e a drenada pela bateria, a área hachurada, seria desperdiçada, pois não haveria onde armazená-la sem o supercapacitor.

Outro ponto visto ainda neste gráfico, é que no período em que a potência gerada pelo painel é menor do que a mínima para a carga da bateria,  $P_{pv} < P_{bmim}$ , não haveria potência suficiente para carregar a bateria, logo a corrente  $I_b$  vai a zero, como evidenciado no segundo gráfico; além do SOC da bateria não evoluir durante este período, portanto a bateria demoraria mais para carregar. Sendo que para os mesmos 300 segundos, na simulação com supercapacitor, a bateria carregou até pouco mais de 5% de sua carga total; enquanto que na simulação sem o supercapacitor, a bateria carregou até próximo de 3,6%.

Dado que em 300 segundos, o sistema com supercapacitor carregou 5%. A partir disso, para terminar a primeira etapa de carregamento da bateria, onde a corrente é constante e vai até a bateria chegar nos 65%, demorará aproximadamente 65 minutos. Porém considerando o sistema sem o supercapacitor, nos mesmos 300 segundos, a bateria carregou cerca de 3,6%, logo para chegar nos 65%, ela levará cerca de 90 minutos. Ou seja, o sistema sem supercapacitor leva cerca de 38,46% mais tempo para carregar a bateria. Estas análises foram realizadas observando que, para este caso, a relação entre o tempo em que houve  $P_{pv} > P_{bmim}$ , tempo  $t_b$ , e o tempo total da simulação  $T_t$ , a relação  $T_b/T_t$ , foi de 0,623.

Outra análise possível é em relação à potência que está sendo desperdiçada, haja vista que a bateria consome próximo de 5 W. Considerando que, para este mesmo caso, a relação entre a energia desperdiçada  $E_d$  e a total gerada  $E_t$ , a relação  $E_d/E_t$ , é de 0,541. Ou seja, 54,1% da energia gerada pelo painel está sendo perdida, o que gera um rendimento do sistema sem o supercapacitor de, 45,9% apenas. Já com o supercapacitor, o rendimento é de 100%, haja vista que toda a energia gerada pelo painel pode ser utilizada para carregamento da bateria, dentro dos limites de armazenamento do supercapacitor.

A análise do tempo de carregamento do primeiro estágio de uma bateria realizada acima, e uma extensão para outros cenários com o CSBS e um carregador solar de bateria sem supercapacitor (CSBsS) estão resumidas na Tabela 20; onde as barras horizontais cinzas mais claras, após a linha verde vertical na quarta coluna da tabela, representam o tempo a mais para carregar a bateria no CSBsS.

Uma comparação do aproveitamento, considerando a energia gerada pelo painel e a consumida pela bateria para o primeiro estágio de carga da bateria, com

**Tabela 20: Tempo de carregamento do primeiro estágio de uma bateria, em minutos, no CSBS proposto e em um CSBsS.**











Relação $T_b/T_t$	CSBS	CSBsS	Tempo no CSBsS
1	65	65	
0,9	65	71	
0,8	65	78	
0,7	65	85	
0,623	65	90	
0,5	65	98	
0,4	65	104	
0,3	65	111	
0,2	65	118	

**Fonte: autoria própria.**

o CSBS e um CSBsS estão resumidos na Tabela 21. Onde as barras horizontais mais escuras representam o aproveitamento no CSBsS. Sendo visível que o sistema sem o supercapacitor terá aproveitamentos maiores quando a potência gerada pelo painel não ultrapassar em muito a requerida pela bateria. Essa possibilidade só seria viável tecnicamente se a irradiação ao longo de algumas horas fosse constante e o painel fosse especificado para uma potência muito próxima de 5 W, o que na prática não ocorre. Tal fato tornaria o sistema com baixa confiabilidade, haja vista que a potência especificada pelo fabricante é a máxima obtida no painel dado uma irradiação constante de 1000 W/m<sup>2</sup>.

O padrão de irradiação solar ao longo de um dia depende da localidade, inclinação da placa em relação aos raios diretos do sol, além das condições climáticas neste lugar. Com isso a irradiação ao longo do dia pode variar e ter valores abaixo de 200 W/m<sup>2</sup>, que foi observado como a mínima irradiação para gerar a potência mínima para carregar a bateria com o painel fotovoltaico escolhido. Com isso o CSBS têm sua importância elevada, dado que padrões ótimos de irradiação são possíveis apenas para dias bem ensolarados e céu limpo.

**Tabela 21: Aproveitamento em porcentagem com o CSBS e um CSBsS.**

Relação $E_d/E_t$	CSBS	CSBsS	Aproveitamento no CSBsS
0,9	100	10	
0,8	100	20	
0,7	100	30	
0,6	100	40	
0,541	100	45,9	
0,4	100	60	
0,3	100	70	
0,2	100	80	
0,1	100	90	
0	100	100	

**Fonte: autoria própria.**

Estas características da irradiação solar ao longo do dia estão ilustradas na Figura 72. Onde para um dia ensolarado a curva de irradiação pode atingir valores próximos de  $1000 \text{ W/m}^2$ ; para dias nublados dificilmente a irradiação chega a valores altos e ainda tem quedas acentuadas e inconstância; por fim, para dias chuvosos, a curva de irradiação é bem reduzida. Estas análises evidenciam a questão primordial das geração fotovoltaica, a variabilidade e necessidade de maneiras auxiliares de garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica, trazendo à tona a usabilidade de supercapacitores em sistemas fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014).

Com estes resultados, do sistema conjunto de supercapacitores com baterias convencionais, é possível estender as aplicações deste conjunto a outros meios; tais como em sistemas autônomos de energia renovável, além da geração fotovoltaica, mas também em geração eólica e até em geração a partir das ondas do mar (VOORDEN *et al.*, 2007; MURRAY *et al.*, 2009).

Outra aplicação para esses sistemas conjuntos de supercapacitores e baterias é em carros elétricos e híbridos, para aproveitamento de energia em frenagem, utilizando a capacidade de carregamento e descarregamento rápido dos supercapacitores (WEISSLER, 2013).

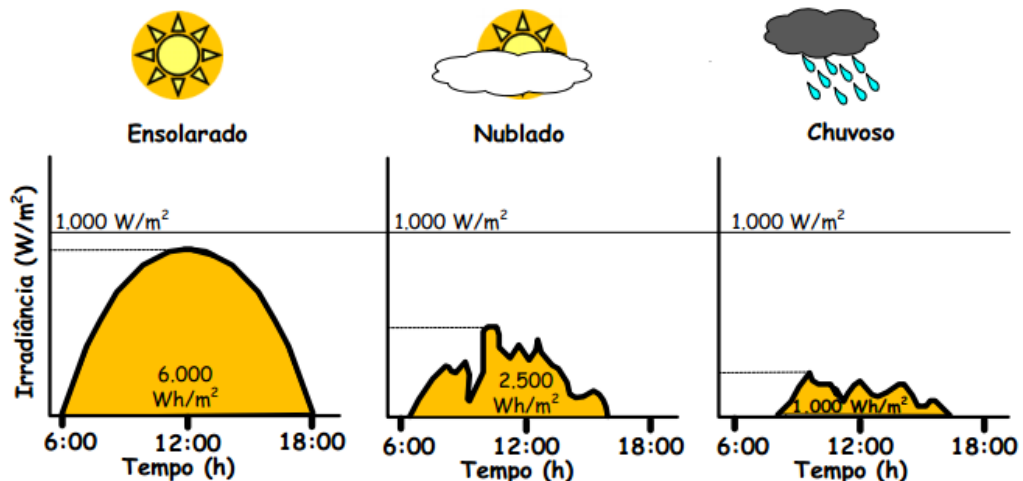


Figura 72: Curvas de irradiação solar diárias para diferentes padrões de dias.  
Fonte: (MACENA, 2015) com modificações.

Nestes carros elétricos e híbridos a energia cinética obtida pela frenagem, ou desaceleração, é convertida por um alternador, armazenada em um supercapacitor e então convertida por um conversor de corrente contínua para demais usos. Na Figura 73 é esquematizada esta aplicação, onde um veículo ao chegar próximo a um quebra-mola tem sua aceleração negativa, ou seja, está freando, gerando uma energia cinética negativa, após passar pelo quebra-mola ele começa a aceleração, gerando energia positiva.

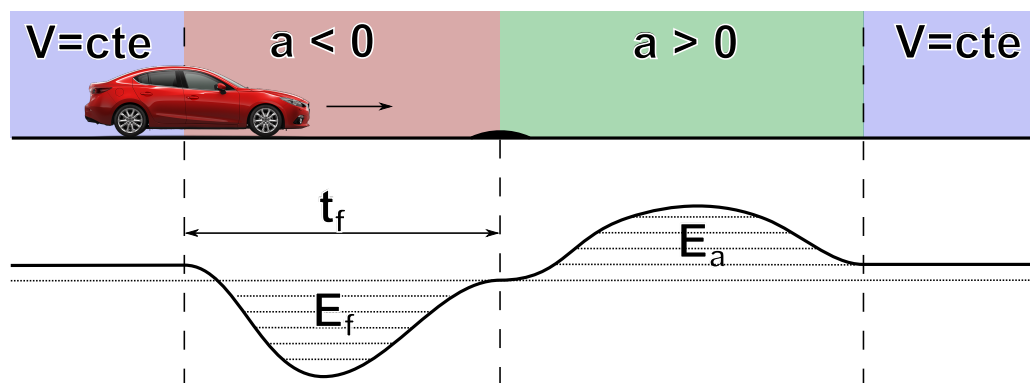


Figura 73: Esquema ilustrativo da energia em aceleração e desaceleração de veículos.

Fonte: (WEISSLER, 2013) com modificações.

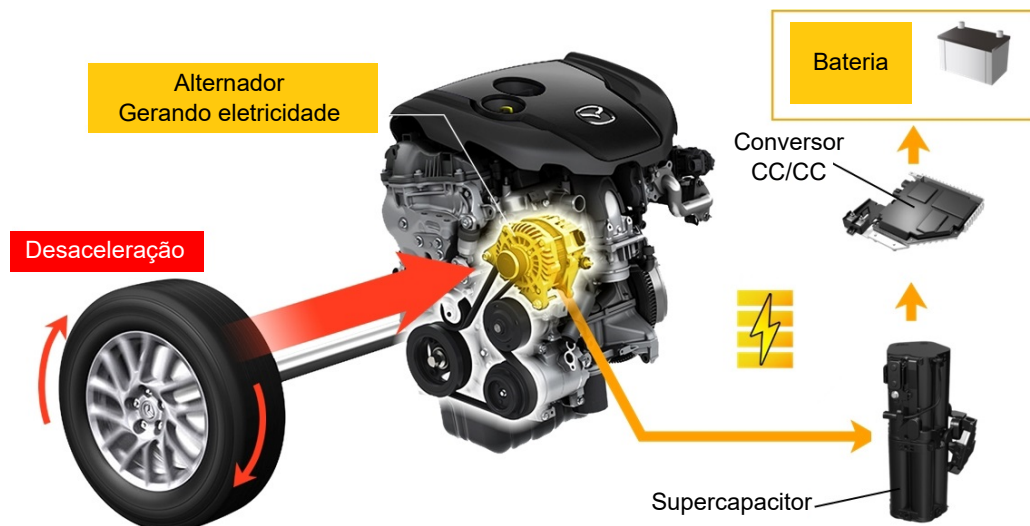
Considerando que o carro de 1000 kg da Figura 73 está a 120 Km/h e ao chegar no meio do quebra-mola sua velocidade seja de 20 Km/h, o tempo de frenagem  $t_f$  é de 5 segundos; logo, a energia cinética de frenagem  $E_f$  é de

$$E_f = \frac{1}{2}m(\Delta v)^2 = \frac{1}{2}1000\left(\frac{100}{3,6}\right)^2 = 385802,47J, \quad (50)$$

onde  $m$  é a massa do veículo e  $\Delta v$  é a variação da velocidade dele. Dividindo este valor de  $E_f$  por 5 segundos, obtêm-se a potência gerada neste percurso,  $P_f$ , que é de 77160 W. Com este valor de  $P_f$ , considerando que o rendimento do alternador seja de 80%, então a corrente que iria para uma bateria de 200 V a fim de carregá-la com essa energia cinética é de

$$I = \frac{P_f * \eta}{V} = \frac{77160 \cdot 0,8}{200} = 308A. \quad (51)$$

Tal corrente de 308 A para carregar baterias utilizadas em veículos, geralmente de Chumbo-Ácido é um valor muito alto, acima dos valores seguros para carga, por isso o supercapacitor se faz necessário, haja vista a necessidade de correntes altas em curtos períodos de tempo. Portanto a utilização de supercapacitores em sistemas que aproveitam a energia de desaceleração é outra aplicação que tem potencial de bons aproveitamentos. Na Figura 74 são mostradas as principais partes destes sistemas em um veículo já desenvolvido e comercializado (WEISSLER, 2013).



**Figura 74: Principais componentes do sistema de regeneração de frenagem em um Mazda6.**

Fonte: (WEISSLER, 2013) com modificações.

## 5.2 ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA PARA UM PROTÓTIPO

Para a implementação do CSBS em um protótipo, dado que é sim viável por conta dos resultados obtidos nas simulações, seriam necessários, inicialmente, os seguintes componentes mostrados na Tabela 22. Foi observado que um dos maiores impactos no custo final é o custo do supercapacitor. Entretanto este custo pode ser reduzido utilizando um supercapacitor com menor capacidade, haja vista pelo gráfico da Figura 70 que, com o supercapacitor carregado com apenas cerca de 7,5 V, o que

representa menos da metade de sua capacidade total, conseguiu-se manter a carga da bateria por cerca de 113 segundos, com queda de 1,4 V. Fazendo extrapolação desta capacidade de manter a carga da bateria pelo supercapacitor. Entretanto este mesmo supercapacitor poderá manter a bateria por até 2357 segundos, ou cerca de 40 minutos, consecutivos desde totalmente carregado até chegar próximo dos 4,2 V mínimos de carga da bateria.

**Tabela 22: Componentes necessários para um protótipo do CSBS**

Quantidade	Componente	Descrição	Valor
1	Supercapacitor	BMOD0058-E016-BO	USD \$ 122,25
1	Módulo solar	KM(P)20	USD \$ 43,43
1	Indutor acoplado	330 $\mu$ H, 2.1 A	USD \$ 1.85
1	Capacitor eletrolítico	120 $\mu$ F, 25 V	USD \$ 0,15
1	Capacitor eletrolítico	160 $\mu$ F, 100 V	USD \$ 1.84
1	Capacitor cerâmico	23 $\mu$ F, 500 V	USD \$ 3,87
4	Mosfet	30 V, 15,2 A	USD \$ 0,48
3	Diodo	50 V, 30 A	USD \$ 0,43
1	Indutor	780 $\mu$ H, 10 A	–
1	Indutor	223 $\mu$ H, 3 A	–
1	Capacitor	6 $\mu$ F, 300 V	USD \$ 2,88
1	Tiristor	2 A, 32 V	USD \$ 0,21
3	Sensor de corrente	30 A, 4V	USD \$ 7,36
1	Microcontrolador	Piccolo TMS320F28035	USD \$ 17
Total			USD \$ 218,77

Fonte: autoria própria.

### 5.3 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Ao longo deste capítulo foram analisados os resultados das simulações do CSBS, comparando o sistema com e sem o supercapacitor e verificado as vantagens do sistema com supercapacitor. Tais vantagens são: a redução do tempo de carregamento da bateria, haja vista as possíveis variações de irradiação solar; outra vantagem observada é o melhor aproveitamento da energia gerada a partir do painel fotovoltaico. Com estas vantagens foi possível observar outras aplicações para sistemas que utilizem a combinação de baterias com supercapacitores, aplicações em veículos elétricos e híbridos, e em outras gerações de energias renováveis. Foi elencado ao final do capítulo os principais componentes necessários para a criação de um protótipo e levantado os custos gerais para aquisição.



## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um sistema de carregamento solar de bateria com supercapacitor. Realizado o projeto, controle e implementação em simulação de cada um dos três conversores estáticos de energia constituintes deste sistema para transferência de energia entre o painel fotovoltaico, o supercapacitor e a bateria de Li-íon.

A partir da revisão de literatura acerca das células fotovoltaicas, baterias de Li-íon, supercapacitores e conversores estáticos de energia apresentada no capítulo 2 foram determinadas as bases para especificação, projeto e simulação destes componentes.

A definição da configuração dos conversores a serem utilizados, bem como as especificações dos componentes principais do CSBS foram elencadas no capítulo 3. Ainda neste capítulo foram realizados os projetos e implementações em simulação para cada um dos conversores (CCC1, CCC2 e CCC3). Os resultados das simulações neste capítulo mostraram que os objetivos de cada conversor foram alcançados de forma individual.

As etapas e processos do sistema de gerenciamento da energia foram definidos, explicados e implementados em simulação, juntamente com todo o CSBS no capítulo 4. Foi obtido resultados satisfatórios em relação ao funcionamento do CSBS, o qual alcançou o objetivo maior de carregar a bateria mesmo para períodos sem irradiação solar suficiente, utilizando para isso a energia armazenada no supercapacitor.

Os resultados obtidos nas simulações do CSBS foram analisados e comparados para um sistema sem supercapacitor no capítulo 5. Foi verificada algumas vantagens do CSBS, nomeadamente: aumento da eficiência e redução do tempo de carregamento da bateria. Ainda neste capítulo, foram exploradas as possíveis aplicações destes sistemas conjuntos de baterias e supercapacitores, além de uma análise da viabilidade técnica para um protótipo, com uma lista dos principais componentes necessários e uma estimativa de custos.

As simulações foram feitas no programa Psim a fim de verificar a viabilidade

técnica do uso de supercapacitores em carregadores de baterias com painel fotovoltaico. Através dos resultados das simulações, realizado para o controle de carga e descarga do supercapacitor, e para a extração da máxima potência do painel fotovoltaico foi verificado que o carregamento da bateria foi realizado de forma contínua, mesmo que a geração fotovoltaica, momentaneamente, não atendesse a carga.

Como sugestão para trabalhos futuros na mesma área de estudo abordada por este trabalho, pode-se citar: desenvolvimento de um protótipo do CSBS; desenvolvimento de sistemas de aproveitamento da energia cinética de veículos utilizando supercapacitores; análise de sistemas de geração eólica com supercapacitores; análise do uso de supercapacitores em geração a partir das ondas do mar; além de análise do uso de supercapacitores nas gerações de energia chamadas *energy harvesting*, que pode ser traduzido como "mineração de energia".

## REFERÊNCIAS

ARUMUGAM.R; KUTHALINGAM.C; .S, PATTUSELVAM; THIRUVENGADAM.M. **Design and Implementation of various MPPT Algorithms for Solar Charge Controller to improve the efficiency of Standalone Photovoltaic Systems using PSIM.** Tese (Doutorado) — Anna University, 2012.

ASSOCIATION, National Fire Protection. **NFPA 72: national fire alarm and signaling code.** EUA: The Association, 2009.

BALIGA, B Jayant. **Fundamentals of power semiconductor devices.** EUA: Springer Science & Business Media, 2010.

BAN, Shuai; ZHANG, Jiujun; ZHANG, Lei; TSAY, Ken; SONG, Datong; ZOU, Xinfu. Charging and discharging electrochemical supercapacitors in the presence of both parallel leakage process and electrochemical decomposition of solvent. **Electrochimica Acta**, Elsevier, v. 90, p. 542–549, 2013.

BETTEN, John. Benefits of a coupled-inductor sepic converter. **Power Management**, 2011.

BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e baterias: Funcionamento e impacto ambiental. **Química Nova na Escola**, Sociedade Brasileira de Química, n. 11, 2000.

BONKOUNGOU, Dominique; KOALAGA, Zacharie; NJOMO, Donatien. Modelling and simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in matlab. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 3, p. 493–502, 2013.

BURGESS, Paul. Variation in light intensity at different latitudes and seasons, effects of cloud cover, and the amounts of direct and diffused light. In: CONTINUOUS COVER FORESTRY GROUP. **Continuous Cover Forestry Group Scientific Meeting.** UK, 2009.

BURKE, Andrew. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. **Journal of power sources**, Elsevier, v. 91, n. 1, p. 37–50, 2000.

CARVALHO, André Luiz Costa de. **Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

CCSA. **What is CCS?** 2010. Disponível em: <<http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/>>.

CHEM, LG. Product specification - rechargeable lithium ion battery, model: 18650he2 2500mah. **Document No. BCY-PS-HE2-Rev0**, 2013.

CULTURA, A. B.; SALAMEH, Z. M. Modeling, evaluation and simulation of a supercapacitor module for energy storage application. **Cell Journal**, v. 1, n. 1, p. 1, 2015.

EINSTEIN, Albert. Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light. **American Journal of Physics**, v. 33, n. 5, p. 367, 1965.

ELETRONICA, STA. **Tipos de carregadores para diferentes tipos de baterias**. 2016. Disponível em: <<http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/carregadores-de-baterias>>.

FALIN, Jeff. Designing dc/dc converters based on sepic topology. **Analog Applications Journal**, Texas Instruments Incorporated, v. 1, n. 4Q 2008, p. 9, 2008.

GEEK. **New lithium-sulfur batteries could provide 4x capacity**. 2010. Disponível em: <<http://www.geek.com/chips/new-lithium-sulfur-batteries-could-provide-4x-capacity-1132162/>>.

GRBOVIĆ, Petar J. Energy storage technologies and devices. **Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems: Applications, Analysis and Design from Theory to Practice**, John Wiley e Sons, 2014.

GRUNDY, P. Shell energy scenarios to 2050. **Den Haag: Shell Compagny**, v. 265, 2008.

HALPER, Marin S.; ELLENBOGEN, James C. **Supercapacitors: A Brief Overview**. Virginia, EUA: MITRE Nanosystems Group, 2006.

HART, Daniel W. **Eletrônica de Potência: análise e projetos de circuitos**. Madrid, Espanha: McGraw Hill Brasil, 2016.

HOFFMANN, Winfried. Pv solar electricity industry: Market growth and perspective. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier, v. 90, n. 18, p. 3285–3311, 2006.

HOUSE, Kurt Zenz. The limits of energy storage technology. **Bulletin of the Atomic Scientists**, 2009.

HREN, Rebekah. A peek inside pv. **Home Power**, 2009.

IEA. Solar photovoltaic energy. **IEA Technology Roadmap**, 2014.

IGLESIAS, R.; LAGO, A.; NOGUEIRAS, A.; PEÑALVER, C. Martínez; MARCOS, J.; QUINTANS, C.; MOURE, MJ.; VALDÉS, MD. Modelado y simulación de una batería de ion-lítio comercial multicelda. **Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación**, 2012.

JOHANSSON, Patrik; ANDERSSON, Bjorn. Comparison of simulation programs for supercapacitor modelling. **Master of Science Thesis. Chalmers University of Technology, Sweden**, 2008.

KATZ, Cheryl. As novas tecnologias darão um empurrão decisivo na energia solar. **Yale e360**, 2014.

KOMAES. **Specification sheet: Solar Module - KM(P)20**. EUA, 10 2016.

- KUGELSTADT, Thomas. **Op Amps for Everyone - Chapter 16**. Dallas, Texas - USA: Texas Instruments, 2008.
- LEONARD, Kevin C. Ultracapacitors for off-grid solar energy applications. **SoIRayo LLC**, 2016.
- LINDEN, David; REDDDY, Thomas B. **Handbook of Batteries**. New York, USA: McGraw-Hill, 2002. 1454 p.
- MACENA, Walter. **Circuito Microinversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. 2015. TCC (Bacharel em Engenharia Elétrica), USF (Universidade São Francisco), Campinas, Brasil.
- MARTINS, Denizar Cruz; BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência: Conversores CC-CC básicos não isolados**. Florianópolis: UFSC, 2006.
- MAXWELL. Datasheet - 16 v small cell module. **Catálogo No. 1015371.6**, 2014.
- MERTENS, Konrad. **Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice**. Reino Unido: John Wiley & Sons, 2013.
- MURRAY, Dónal B; EGAN, MG; HAYES, JG; SULLIVAN, DL O. Applications of supercapacitor energy storage for a wave energy converter system. In: EUROPEAN OCEAN ENERGY ASSOCIATION. **EWTEC 2007-7th European Wave and Tidal Energy Conference**. Portugal, 2009.
- NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, 2004.
- NETZSCH. **Catodo de óxido de Lítio-Cobalto: Estabilidade Térmica**. 2015. Disponível em: <<http://www.netzsch-thermal-analysis.com/pt/materiais-aplicacoes/baterias/catodo-de-oxido-de-litio-cobalto-estabilidade-termica.html>>.
- NREL. **Best Research-Cell Efficiencies**. 2017. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>>.
- OGATA, Katsuhiko. **Discrete Time Control Systems**. New Jersey - USA: Prentice-Hall International, 1995.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2000. 828 p.
- ONGARO, Fabio; SAGGINI, Stefano; MATTAVELLI, Paolo. Li-ion battery-supercapacitor hybrid storage system for a long lifetime, photovoltaic-based wireless sensor network. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 27, n. 9, p. 3944–3952, 2012.
- PARK, Sangyoung; KOH, Bumkyu; WANG, Yanzhi; KIM, Jaemin; KIM, Younghyun; PEDRAM, Massoud; CHANG, Naehyuck. Maximum power transfer tracking in a solar usb charger for smartphones. In: IEEE. **Low Power Electronics and Design (ISLPED), 2013 IEEE International Symposium on**. EUA, 2013. p. 88–93.
- PETRY, Clóvis Antônio. Introdução aos conversores cc-cc. **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2001.

- PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb**, 2014.
- POMILIO, José Antenor. **Topologias Básicas de Conversores CC-CC não-isolados**. 2010.
- POWERSIM. **PSIM**. 2014. Disponível em: <<https://powersimtech.com/products/psim/>>. Version 9.3.
- POWERSIM. **TUTORIAL Ultracapacitor Model**. 2016. Disponível em: <<https://powersimtech.com/drive/uploads/2016/03/Tutorial-Ultracapacitor-Model-1.pdf>>.
- POWERSIM. **What is the Function of the Separator?** 2016. Disponível em: <[http://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_306\\_battery\\_separators](http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_306_battery_separators)>.
- PSIM. How to use lithium-ion battery model. **Powersim Tech**, 2016.
- RASHID, Muhammad H. **Power electronics: circuits, devices, and applications**. New York, USA: Pearson Education USA, 2004. 830 p.
- SAGE, Energy. **Mono vs. Poly solar panels explained**. 2016. Disponível em: <<https://www.energysage.com/solar/101/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>>.
- SANTOS, C.A. dos. **A descoberta do Efeito Fotoelétrico**. 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/einstein/efeitofotoeletricodecoberta.html>>.
- SCHNEUWLY, Adrian; GALLAY, Roland. Properties and applications of supercapacitors: From the state-of-the-art to future trends. **Rossens, Switzerland**, 2000.
- SCHONBERGER, J. Modeling a supercapacitor using plecs. **Plexim GmbH**, v. 4, 2010.
- SEGUEL, Julio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- SIMPSON, Chester. Lm2576, lm3420, lp2951, lp2952: Battery charging. **Texas Instruments: Literature Number: SNVA557**, 2011.
- SOCIETY, IEEE Power Engineering. **IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing, and Replacement of Valve-Regulated Lead- Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications**. EUA: IEEE, 2006.
- TAKENO, Kazuhiko; ICHIMURA, Masahiro; TAKANO, Kazuo; YAMAKI, Junichi. Influence of cycle capacity deterioration and storage capacity deterioration on li-ion batteries used in mobile phones. **Journal of power sources**, Elsevier, v. 142, n. 1, p. 298–305, 2005.
- TREMBLAY, Olivier; DESSAINT, Louis-A. Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. **World Electric Vehicle Journal**, v. 3, n. 1, p. 1–10, 2009.
- TUTORIALS, Alternative Energy. **Photovoltaic Solar Cells**. 2016. Disponível em: <<http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/photovoltaics.html>>.

VOORDEN, Arjan M van; ELIZONDO, Laura M Ramirez; PAAP, Gerard C; VERBOOMEN, Jody; SLUIS, Lou van der. The application of super capacitors to relieve battery-storage systems in autonomous renewable energy systems. In: IEEE. **Power Tech, 2007 IEEE Lausanne**. EUA, 2007. p. 479–484.

WALKER, Geoff. Evaluating mppt converter topologies using a matlab pv model. **Journal of Electrical & Electronics Engineering**, v. 21, n. 1, p. 49–56, 2001.

WEISLER, Paul. Mazda introduces supercapacitor-type regenerative braking. **Automotive Engineering Online**, 2013.

WOODFORD, Chris. How lithium ion batteries work. **Explain That Stuff**, 2014.

YANG, Yuan; MCDOWELL, Matthew T; JACKSON, Ariel; CHA, Judy J; HONG, Seung Sae; CUI, Yi. New nanostructured li<sub>2</sub>s/silicon rechargeable battery with high specific energy. **Nano letters**, ACS Publications, v. 10, n. 4, p. 1486–1491, 2010.

## APÊNDICE A - CÓDIGO DE EMULAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO

```

1 %% Simulador de painel fotovoltaico
2 % TCC – Victor Emanuel
3 % Versao 2
4 %
5
6 close all;
7 clc;
8 clear all;
9
10 disp('———— Inincio da execução ————');
11 %% Constantes
12 A = 1.360; % fator de "qualidade do diodo", = 2 para cristalinos, < 2 ...
    for amorfos
13 Eg = 1.12;
14 Ki = 0.065;
15 Kv = -80*10^-3;
16 Ns = 36; % numero de celulas conectadas em serie (diodos)
17 Vca = 21.56; % tensao de circuito aberto
18 Icc = 1.23; % corrente de curto circuito
19 Tn = 25 + 273; % temperatura nominal do PV
20 Gn = 1000; % ensolacao nominal do PV
21 q = 1.60e-19; % carga do eletron
22 k = 1.38e-23; % constante de Boltzman
23 n = 22; % numero de amostras;
24 Ta = 50;
25 Ga = 1000;
26 P = zeros(n);
27 I = zeros(n);
28 V = zeros(n);
29
30 %% Equacionamento
31 T = Ta + 273;
32 G = Ga;
33 Vt = (Ns*k*T)/q;
34 Ipv = (Icc + Ki*(T - Tn)*G/Gn);
35 Ion = (Icc+Ki*(T-Tn))/(exp((Vca+Kv*(T-Tn))/(A*Vt))-1);
36 Io = Ion*(Tn/T)^3*exp(q*Eg/(A*Ki)*(1/Tn-1/T));
37
38 for i = 1:n
39     V(i) = i;

```



```
40     I(i) = Ipv - Io*(exp(V(i)/(A*Vt))-1);
41
42     if I(i) < 0
43         I(i) = 0;
44     end
45
46     P(i) = I(i)*V(i);
47 end
48
49 plot(V,P)
50 disp('———— Fim da execução ————');
```

## APÊNDICE B - CÓDIGOS DOS BLOCOS C DA SIMULAÇÃO DO CSBS

### B.1 BLOCO CCC1

```

1  #include <Stdlib.h>
2  #include <String.h>
3  #include <math.h>
4
5  // ----- Declaracao de variaveis -----
6  float p = 0, p_ant = 0, ipv = 0, vpv = 0, vpv_ant = 0, iref = 0;
7  float e = 0, u = 0, up = 0, ui = 0, dp = 0, dv = 0, setvpv = 0;
8  float ud = 0, Duty = 0, uia = 0, erroant = 0;
9  float CMPPT = 0;
10 float Kp = 2.856, Ki = 0.0001841, Kd = 1511, isc = 1.23;
11 int cont = 0, sam = 0;
12
13
14 // EXECUCAO DURANTE A SIMULACAO
15 void SimulationStep(
16     double t, double delt, double *in, double *out,
17     int *pnError, char * szErrorMsg,
18     void ** reservedUserData, int reserved.ThreadIndex, void * ...
19     reserved.AppPtr)
19 {
20 // ----- Execucao -----
21
22 //----- Sample and Hold
23 if (sam == 14){
24
25     // ----- Leitura dos sensores
26     ipv = in[0];
27     vpv = in[1];
28     CMPPT = in[2];
29
30     // ----- Liga ou desliga MPPT
31     if (CMPPT == 0){
32
33         // ----- Calculo de dv
34         dv = vpv_ant - vpv;
35
36         // ----- Calculo da potencia
37         p = ipv*vpv;

```

```
38
39 // ----- Calculo de dp
40 dp = p_ant - p;
41
42 // ----- MPPT
43 if (dp/dv > 0){
44     iref = iref - 0.0001;
45 }
46
47 if (dp/dv < 0){
48     iref = iref + 0.0001;
49 }
50
51 // Saturacao da referencia
52 if (iref > isc){
53     iref = isc;
54 }
55
56 if (iref < 0){
57     iref = 0;
58 }
59
60 // ----- Fim do laco para Liga ou desliga MPPT
61 }else{
62     if (setvpv == 0){
63         setvpv = vpv;
64     }
65
66     if (vpv < setvpv){
67         // ----- Calculo de dv
68         dv = vpv_ant - vpv;
69
70         // ----- Calculo da potencia
71         p = ipv*vpv;
72
73         // ----- Calculo de dp
74         dp = p_ant - p;
75
76         // ----- MPPT
77         if (dp/dv > 0){
78             iref = iref - 0.001;
79         }
80
```

```
81         if (dp/dv < 0){
82             iref = iref + 0.01;
83         }
84
85         // Saturacao da referencia
86         if (iref > isc){
87             iref = isc;
88         }
89
90         if (iref < 0){
91             iref = 0;
92         }
93     }
94 }
95
96 // ----- Calculo da erro
97 e = iref - ipv;
98
99 // ----- Calculo da acao de controle
100 up = Kp*e;
101
102 ui = Ki*e + uia;
103
104 ud = Kd*(e - erroant);
105
106 // saturacoes
107
108 if (ui > isc){
109     ui = isc;
110 }
111
112 if (ui < -isc){
113     ui = -isc;
114 }
115
116 if (ud > isc){
117     ud = isc;
118 }
119
120 if (ud < -isc){
121     ud = -isc;
122 }
123
```

```
124     if (up > isc){
125         up = isc;
126     }
127
128     if (up < -isc){
129         up = -isc;
130     }
131
132     // acao de controle total
133     u = up + ui + ud;
134
135     if ( u > isc){
136         u = isc;
137     }
138
139     if(u < 0){
140         u = 0;
141     }
142
143     // ----- Calculo do PWM
144     Duty = u/isc;
145
146     if (Duty ≥ 1){
147         Duty = 0.99;
148     }
149
150     if (Duty ≤ 0){
151         Duty = 0.01;
152     }
153
154     // ----- atualiza o das variaveis
155     uia = ui;
156     erroant = e;
157     vpv_ant = vpv;
158     p_ant = p;
159
160     // ----- Fim do laco do sample and hold
161     sam = 0;
162 }else{
163     sam = sam + 1;
164 }
165
166 // ----- atualiza o das saidas
```

```
167 out[0] = Duty;
168 out[1] = p;
169 out[2] = e;
170 out[3] = u;
171 out[4] = ui;
172 out[5] = ud;
173 out[6] = up;
174 out[7] = iref;
175 }
176
177
178 // EXECUCAO APENAS NO COMECO DA SIMULACAO
179 void SimulationBegin(
180     const char *szId, int nInputCount, int nOutputCount,
181     int nParameterCount, const char ** pszParameters,
182     int *pnError, char * szErrorMsg,
183     void ** reservedUserData, int reserved.ThreadIndex, void * ...
184     reserved.AppPtr)
185 {
186 }
187
188 // EXECUCAO NO FINAL A SIMULACAO
189 void SimulationEnd(const char *szId, void ** reservedUserData, int ...
190     reserved.ThreadIndex, void * reserved.AppPtr)
191 {
192 }
```

## B.2 BLOCO CCC2

```
1 #include <Stdlib.h>
2 #include <String.h>
3 #include <math.h>
4
5 // ----- Declaracao de variaveis -----
6 float iout = 0, vout = 0, ref = 0, vsat = 16, isat = 10, var = 0, sat ...
7     = 0, p = 0, Irefscap = 0;
8 float e = 0, u = 0, up = 0, ui = 0, ud = 0, D1 = 0, D2 = 0, uia = 0, ...
9     erroant = 0;
10 int carg = 0, sam = 0;
11 float Kp_bu = 21, Ki_bu = 0.0000384, Kd_bu = 230.361;
12 float Kp_bo = 2.5, Ki_bo = 0.8933, Kd_bo = 3.675;
```

```
11 float Kp = 0, Ki = 0, Kd =0;
12
13 // EXECUCAO DURANTE A SIMULACAO
14 void SimulationStep(
15     double t, double delt, double *in, double *out,
16     int *pnError, char * szErrorMsg,
17     void ** reservedUserData, int reserved.ThreadIndex, void * ...
18     reserved.AppPtr)
19 {
20 // ----- Execucao -----
21 // Irefscap ≥ 0 he buck
22 // Irefscap ≤ 0 he boost
23 //----- sample and hold
24 if (sam == 14){
25
26     // ----- Leitura dos sensores
27     iout = in[1];
28     vout = in[0];
29     Irefscap = in[2];
30     p = vout*iout;
31
32     if ((Irefscap < 0.1) & (Irefscap ≥ 0)){
33         Irefscap = 0.1;
34     }
35
36     if((Irefscap > -0.1) & (Irefscap < 0)){
37         Irefscap = -0.1;
38     }
39
40     if (iout ≥ 0){
41         Kp = Kp_bu;
42         Ki = Ki_bu;
43         Kd = Kd_bu;
44     }else{
45         Kp = Kp_bo;
46         Ki = Ki_bo;
47         Kd = Kd_bo;
48     }
49
50     if (Irefscap ≥ 0){
51         ref = Irefscap;
52         var = iout;
```

```
53     }else{
54         ref = -Irefscap;
55         var = -iout;
56     }
57
58     sat = isat;
59
60     // ----- Calculo da erro
61     e = ref - var;
62
63     // ----- Calculo da acao de controle
64     up = Kp*e;
65
66     ui = Ki*e + uia;
67
68     ud = Kd*(e - erroant);
69
70     // saturacoes
71
72     if (ui > sat){
73         ui = sat;
74     }
75
76     if (ui < -sat){
77         ui = -sat;
78     }
79
80     if (ud > sat){
81         ud = sat;
82     }
83
84     if (ud < -sat){
85         ud = -sat;
86     }
87
88     if (up > sat){
89         up = sat;
90     }
91
92     if (up < -sat){
93         up = -sat;
94     }
95
```



```
96 // acao de controle total
97 u = up + ui + ud;
98
99 if ( u > sat){
100     u = sat;
101 }
102
103 if(u < 0){
104     u = 0;
105 }
106
107 // ----- Calculo do PWM1 e PWM2
108 if (Irefscap ≥ 0){
109     D1 = u/sat;
110     D2 = D1;
111 }
112
113
114 if (Irefscap < 0){
115     D2 = 1 - u/sat;
116     D1 = D2;
117 }
118
119 if (D1 ≥ 1){
120     D1 = 0.99;
121 }
122
123 if (D1 ≤ 0){
124     D1 = 0.01;
125 }
126
127 if (D2 ≥ 1){
128     D2 = 0.99;
129 }
130
131 if (D2 ≤ 0){
132     D2 = 0.01;
133 }
134
135 // ----- atualizacao das variaveis
136 uia = ui;
137 erroant = e;
138
```

```
139 // ----- Fim do laço do sample and hold
140 sam = 0;
141 }else{
142     sam = sam + 1;
143 }
144
145 // ----- atualiza o das saidas
146 out[0] = D1;
147 out[1] = D2;
148 out[2] = e;
149 out[3] = u;
150 out[4] = ui;
151 out[5] = ud;
152 out[6] = up;
153 out[7] = ref;
154 }
155
156 // EXECUCAO APENAS DO COMECO DA SIMULACAO
157 void SimulationBegin(
158     const char *szId, int nInputCount, int nOutputCount,
159     int nParameterCount, const char ** pszParameters,
160     int *pnError, char * szErrorMsg,
161     void ** reservedUserData, int reserved.ThreadIndex, void * ...
162     reserved.AppPtr)
163 {
164
165 // EXECUCAO APENAS NO FINAL DA SIMULACAO
166 void SimulationEnd(const char *szId, void ** reservedUserData, int ...
167     reserved.ThreadIndex, void * reserved.AppPtr)
168 }
```

### B.3 BLOCO CCC3

```
1 #include <Stdlib.h>
2 #include <String.h>
3 #include <math.h>
4
5 // ----- Declaracao de variaveis -----
```

```
6 float Ib = 0, Vb = 0, ref = 0, refvar= 1.25, vsat = 4.2, isat = ...
   1.25, icut = 0.5, var = 0, sat = 0, Pb = 0;
7 float e = 0, u =0, up = 0, ui = 0, ud = 0, Duty = 0, uia = 0, ...
   erroant = 0;
8 float Kp = 1.5, Ki = 1.75289, Kd = 0.81885;
9 int mod = 0, Cb = 0, cont = 0, sam = 0;
10
11 // EXECUCAO DURANTE A SIMULACAO
12 void SimulationStep(
13     double t, double delt, double *in, double *out,
14     int *pnError, char * szErrorMsg,
15     void ** reserved_UserData, int reserved_ThreadIndex, void * ...
        reserved_AppPtr)
16 {
17 // ----- Execucao -----
18 // mod = 0 esta na primeira etapa de carregamento
19 // mod = 1 esta na segunda etapa de carregamento
20 // Cb = 0: carga normal da bateria
21 // Cb = 1: não carrega bateria
22 // Cb = 2: controle da tensao da bateria (modo sobretensao)
23
24 //----- sample and hold
25 if (sam == 14){
26
27     // ----- Leitura dos sensores
28     Ib = in[1];
29     Vb = in[0];
30     Cb = in[2];
31
32     Pb = Vb*Ib;
33
34     switch (Cb){
35         case 0:
36             if (Vb ≥ vsat){
37                 mod = 1;
38             }
39
40             if (mod == 0){
41                 sat = isat;
42                 var = Ib;
43                 ref = isat;
44             }
45
```

```
46         if (mod == 1){
47             sat = vsat;
48             var = Vb;
49             ref = vsat;
50         }
51     break;
52
53     case 1:
54         var = Ib;
55         ref = 0;
56         sat = isat;
57     break;
58
59     case 2:
60         var = Vb;
61         sat = vsat;
62         ref = vsat;
63     break;
64 }
65 // ----- Calculo da erro
66 e = ref - var;
67
68 // ----- Calculo da acao de controle
69 up = Kp*e;
70
71 ui = Ki*e + uia;
72
73 ud = Kd*(e - erroant);
74
75 // saturacoes
76 if (ui > sat){
77     ui = sat;
78 }
79
80 if (ui < -sat){
81     ui = -sat;
82 }
83
84 if (ud > sat){
85     ud = sat;
86 }
87
88 if (ud < -sat){
```

```
89     ud = -sat;
90   }
91
92   if (up > sat){
93     up = sat;
94   }
95
96   if (up < -sat){
97     up = -sat;
98   }
99
100  // acao de controle total
101  u = up + ui + ud;
102
103  if ( u > sat){
104    u = sat;
105  }
106
107  if(u < 0){
108    u = 0;
109  }
110
111  // ----- Calculo do PWM
112  Duty = u/sat;
113
114  if (Duty ≥ 1){
115    Duty = 0.99;
116  }
117
118  if (Duty ≤ 0){
119    Duty = 0.01;
120  }
121
122  // ----- atualizacao das variaveis
123  uia = ui;
124  erroant = e;
125
126  // ----- Fim do laco do sample and hold
127  sam = 0;
128 }else{
129   sam = sam + 1;
130 }
131
```

```

132 // ----- atualizacao das saidas
133 out[0] = Duty;
134 out[1] = Pb;
135 out[2] = e;
136 out[3] = u;
137 out[4] = ui;
138 out[5] = ud;
139 out[6] = up;
140 out[7] = ref;
141 }
142
143 // EXECUCAO APENAS NO FINAL DA SIMULACAO
144 void SimulationBegin(
145     const char *szId, int nInputCount, int nOutputCount,
146     int nParameterCount, const char ** pszParameters,
147     int *pnError, char * szErrorMsg,
148     void ** reservedUserData, int reserved.ThreadIndex, void * ...
149     reserved.AppPtr)
149 {
150 }
151
152 // EXECUCAO APENAS NO FINAL DA SIMULACAO
153 void SimulationEnd(const char *szId, void ** reservedUserData, int ...
154     reserved.ThreadIndex, void * reserved.AppPtr)
154 {
155 }

```

## B.4 BLOCO GE

```

1 #include <Stdlib.h>
2 #include <String.h>
3 #include <math.h>
4
5 // ----- Declaracao de variaveis -----
6 float Ppv = 0, Pb = 0, Pbmin = 5.5, Pscap = 0;
7 float Ib = 0, Ibmin = 0.5, Irefscap = 0, Iscap_car = 10, Iscap = 0;
8 float Vb = 0, Vbmax = 4.2 + 0.1, Vbse = 4.2, Vscap = 0, Ppvant = 1, ...
9     Vscapnom = 16, Vcc = 0, Vbnom = 3.2;
9 int CMPPT = 0, Cb = 0, iniciar = 0, estado = 0, contbat = 0, sam = 0;
10
11 // EXECUCAO DURANTE A SIMULACAO

```

```
12 void SimulationStep(
13     double t, double delt, double *in, double *out,
14     int *pnError, char * szErrorMsg,
15     void ** reservedUserData, int reserved.ThreadIndex, void * ...
16     reserved.AppPtr)
17 {
18     // ----- Execucao -----
19     //----- sample and hold
20     if (sam == 14){
21         // ----- Leitura dos sensores
22         Ib = in[0];
23         Vb = in[1];
24         Iscap = in[2];
25         Vscap = in[3];
26         Vcc = in[4];
27         Ppv = in[5];
28
29         // ----- Calculo da potencia
30         Pb = Ib*Vb;
31         Pscap = Iscap*Vscap;
32
33         // ----- Primeiras comparacoes
34         if ((iniciar == 0) & (Ppvant == Ppv)){
35             if (Ppv = Pbmin){ // C1
36                 estado = 3; // apenas carrega bateria
37             }
38
39             if ((Ppv > Pbmin) & (Vscap ≥ Vscapnom)){ // C2
40                 CMPPT = 1; // desliga MPPT
41                 estado = 3; // apenas carrega bateria
42             }
43
44             if ((Ppv > Pbmin) & (Vscap < Vscapnom)){ // C3
45                 estado = 5; // carrega bateria e supercapacitor
46             }
47
48             if ((Ppv < Pbmin) & (Vscap ≥ 0.7*Vbse)){ // C4
49                 estado = 6; // carrega bateria e descarrega supercapacitor
50             }
51
52             if ((Ppv < Pbmin) & (Vscap < Vbse)){ // C5
53                 estado = 4; // apenas carrega supercapacitor
```

```
54     }
55
56     iniciar = 1;
57 }
58
59 // ----- Segundas comparacoes
60 // E7: sobretensao na bateria
61 switch (Cb){
62     case 0:
63         if (Vb > Vbmax){ // C15
64             Cb = 2; // ativa controle de tensao da bateria
65         }
66         break;
67
68     case 2:
69         if (Vb ≤ Vbmax){ // C16
70             Cb = 0; // volta ao controle de corrente da bateria
71         }
72         break;
73 }
74
75 // Desligar
76 if ((Ib ≤ Ibmin) & (Vscap ≥ Vscapnom) & (iniciar == 1) & (Vb ≥ ...
77     Vbse)){ // C17
78     Cb = 1; // nao carrega bateria
79     Irefscap = 0; // nao carrega nem descarrega scap
80     CMPPT = 1; // desliga MPPT
81 }
82 switch (estado){
83     case 3: // carrega apenas bateria
84         Cb = 0;
85         Irefscap = 0.1;
86
87         if ((Ppv ≤ Pbmin) & (CMPPT == 1)){ // C18
88             CMPPT = 0; // liga MPPT do painel
89         }
90
91         if ((Ppv > Pbmin) & (Vscap ≥ Vscapnom)){ // C14
92             CMPPT = 1; // desliga MPPT do painel
93         }
94
95         if ((Ib ≤ Ibmin) & (Vscap < Vscapnom) & (Vb ≥ Vbse)){ // C9
```



```
96         if (contbat == 3*1440009){
97             estado = 4; // carrega apenas o supercapacitor
98             contbat = 0;
99         }
100         contbat = contbat +1;
101     }
102
103     if ((Ppv ≥ Pbmin) & (Vscap < Vscapnom)){ //C10
104         estado = 5; // carrega bateria e supercapacitor
105     }
106
107     if ((Ppv < Pb) & (Vscap ≥ 0.7*Vbse)){ //C11
108         estado = 6; // carrega bateria e descarrega supercapacitor
109     }
110     break;
111
112     case 4: // carrega apenas scap
113         Cb = 1;
114
115         // geracao de Irescap
116         if (Irefscap < 0.001){
117             Irefscap = 0.001;
118         }
119         if (Vcc ≤ 20){
120             Irefscap = Irefscap;
121         }else{
122             Irefscap = Irefscap + 0.01;
123         }
124
125         if (Ppv < Pbmin){ // C6
126             estado = 6; // carrega bateria e descarrega supercapacitor
127         }
128
129         if (Ppv ≥ Pbmin){ // C12
130             estado = 5; //carrega bateria e supercapacitor
131         }
132     break;
133
134     case 5: // carregando a bateria e scap
135         Cb = 0;
136
137         // geracao de Irescap
138         if (Vcc > 2.1*Vbse){
```

```
139         Irefscap = Irefscap + 0.0001; // carrega supercapacitor
140         if (Vcc > 20){
141             Irefscap = Irefscap + 0.001; // carrega supercapacitor
142         }
143     }
144     if ((Vcc > Vbse) & (Vcc ≤ 2.1*Vbse)){
145         if (Irefscap ≤ 0){
146             Irefscap = 0.1;
147         }else{
148             Irefscap = Irefscap - 0.0001; // carrega ...
149                 supercapacitor
150         }
151     }
152     if (Vcc ≤ Vbse){
153         if (Irefscap ≤ 0){
154             Irefscap = 0.1;
155         }else{
156             Irefscap = Irefscap - 0.001; // carrega ...
157                 supercapacitor
158         }
159     }
160
161     if ((Ppv ≥ Pbmin) & (Vscap ≥ Vscapnom)){ // C14
162         CMPPT = 1; // desliga MPPT do painel
163         estado = 3; // apenas carrega bateria
164     }
165
166     if ((Ppv < Pbmin) & (Vscap ≥ 0.7*Vbse)){ // C19
167         estado = 6; //carrega bateria e descarrega supercapacitor
168     }
169
170     if ((Ib ≤ Ibmin) & (Vscap < Vscapnom) & (Vb ≥ Vbse)){ // C13
171         if (contbat == 3*1440009){
172             estado = 4; // carrega apenas o supercapacitor
173             contbat = 0;
174         }
175         contbat = contbat +1;
176     }
177 }
178 break;
179
180 case 6: // descarregando o scap e carregando a bateria
181     Cb = 0;
```

```
180     // geracao de Irefscap
181     if (Irefscap > 0){
182         Irefscap = -0.1;
183     }
184     if (Vcc > 2*Vbse){
185         Irefscap = Irefscap + 0.0001; //descarrega supercapacitor
186         if (Vcc > 20){
187             Irefscap = Irefscap + 0.001; // descarrega supercapacitor
188         }
189     }
190     if ((Vcc > Vbse) & (Vcc ≤ 2*Vbse)){
191         Irefscap = Irefscap - 0.0001;; // descarrega supercapacitor
192     }
193     if (Vcc ≤ Vbse){
194         Irefscap = Irefscap - 0.001; //descarrega supercapacitor
195     }
196
197     if ((Ib ≤ Ibmin) & (Vscap < Vscapnom) & (Vb ≥ Vbse)){ // C7
198         if (contbat == 3*1440009){
199             estado = 4; // carrega apenas o supercapacitor
200             contbat = 0;
201         }
202         contbat = contbat +1;
203     }
204
205     if (Ppv > 1.2*Pbmin){ // C8
206         estado = 5; // carrega supercapacitor e bateria
207         Irefscap = 0.01;
208     }
209     break;
210 }
211 }
212
213
214 // ----- Fim do laco do sample and hold
215     sam = 0;
216 }else{
217     sam = sam + 1;
218 }
219
220 // ----- atualizacao das saidas
221 Ppvant = Ppv;
222
```

```
223 out[0] = Irefscap;
224 out[1] = Cb;
225 out[2] = CMPPT;
226 }
227
228 // EXECUCAO APENAS NO COMECO DA SIMUALCAO
229 void SimulationBegin(
230     const char *szId, int nInputCount, int nOutputCount,
231     int nParameterCount, const char ** pszParameters,
232     int *pnError, char * szErrorMsg,
233     void ** reservedUserData, int reserved.ThreadIndex, void * ...
        reserved.AppPtr)
234 {
235 }
236
237 // EXECUCAO APENAS NO FIM DA SIMUALCAO
238 void SimulationEnd(const char *szId, void ** reservedUserData, int ...
        reserved.ThreadIndex, void * reserved.AppPtr)
239 {
240 }
```