



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/01.05.20.17-TDI

COMPARAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DAS TOPOLOGIAS PPT E DET NÃO REGULADAS POR MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SUBSISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PEQUENOS SATÉLITES

Elaine de Souza Ferreira de Paula

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, aprovada em 19 de janeiro de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/465KKTE>>

INPE
São José dos Campos
2022

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/01.05.20.17-TDI

**COMPARAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DAS TOPOLOGIAS
PPT E DET NÃO REGULADAS POR MODELAGEM,
SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SUBSISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA PARA PEQUENOS SATÉLITES**

Elaine de Souza Ferreira de Paula

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelo Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, aprovada em 19 de janeiro de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/465KKTE>>

INPE
São José dos Campos
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Paula, Elaine de Souza Ferreira de.

P281c Comparação das eficiências das topologias PPT e DET não reguladas por modelagem, simulação e análise de subsistemas de energia elétrica para pequenos satélites / Elaine de Souza Ferreira de Paula. – São José dos Campos : INPE, 2022.

xxxv + 200 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/01.05.20.17-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientador : Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza.

1. Subsistema de Energia Elétrica-EPS. 2. Eficiência. 3. Rastreador de Potência de Pico-PPT. 4. Transferência Direta de Energia-DET. 5. Painel Solar. I.Título.

CDU 629.78:621.311



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE ELAINE DE SOUZA FERREIRA DE PAULA
BANCA Nº 004/2022, REG 134546/2018

No dia 19 de janeiro de 2022, às 15h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Engenharia e Tecnologia Espaciais / Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Título Novo: “COMPARAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DAS TOPOLOGIAS PPT E DET NÃO REGULADAS POR MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SUBSISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA PARA PEQUENOS SATÉLITES”

Membros da Banca:

Dr. Walter Abrahão dos Santos - Presidente - INPE

Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza - Orientador - INPE

Dra. Ana Paula de Sá Santos Rabello – Membro Interno – INPE

Dr. Willer Gomes dos Santos - Membro Externo - ITA



Documento assinado eletronicamente por **Willer Gomes dos santos (E), Usuário Externo**, em 20/01/2022, às 16:47 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula de Sá Santos Rabello, Tecnologista**, em 21/01/2022, às 10:23 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **marcelo lopes de oliveira e souza (E), Usuário Externo**, em 21/01/2022, às 19:11 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Walter Abrahão dos Santos, Pesquisador(a) em Ciência e Tecnologia**, em 25/01/2022, às 11:18 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **9251369** e o código CRC **FAC9A102**.

“Por vezes, sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Teresa de Calcutá.

Dedico este trabalho a Deus, a Nossa Senhora, aos meus pais Luiz Carlos e Ivone, aos meus irmãos, a meu esposo Rodolfo e às minhas filhas Manuela e Melissa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, força, sabedoria para realizar esse trabalho, iluminando o caminho e me fortalecendo nos dias difíceis.

A meus pais, Luiz Carlos e Ivone, pela educação e apoio constante.

Ao meu esposo Rodolfo pelo companheirismo, incentivo e paciência.

Às minhas filhas, Manuela e Melissa, que deram um novo sentido à minha existência, inspirando sonhos e me incentivando a seguir em frente.

Aos meus irmãos Fábio, Fernando, Flávio e Heloisa e a todos da família pelas orações e palavras de ânimo.

Ao meu orientador professor Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza pelo amor em ensinar e compartilhar seus conhecimentos, pelo dom de extrair de nós o melhor, pela paciência, conhecimento, incentivo, comentários e sugestões na execução deste trabalho.

Ao ex-professor Dr. Renato Oliveira de Magalhães, que durante o período de 2018 a 2020, compartilhou, com paciência e sabedoria, seus conhecimentos sobre o tema deste trabalho.

Ao professor Dr. Walter Abrahão dos Santos, pelo incentivo para fazer o mestrado e por sugerir o estudo de caso deste trabalho.

Aos colegas da equipe do RaioSat.

À Divisão de Sistemas Espaciais do INPE por ceder o uso da licença do MathWorks® MATLAB.

Aos colegas da equipe da Divisão de Eletrônica Espacial e Computação (DIEEC) do INPE.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade oferecida, por meio do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação do INPE pelos ensinamentos e dedicação.

Aos membros da banca examinadora Dra. Ana Paula de Sá Santos Rabello, Dr. Walter Abrahão dos Santos e Dr. Willer Gomes dos Santos pelas valiosas contribuições.

Aos profissionais da Biblioteca do INPE, em especial a Simone Del Ducca e Clayton Martins Pereira, pela disponibilidade e auxílio a finalização e publicação deste trabalho.

Ao Dr. Eloy Martins de Oliveira Jr pelas dicas e indicação de referências/ tutoriais sobre o *Matlab/Simulink*.

A todos os colegas de pós-graduação do INPE, em especial Graziela Fernanda, Herbi Júnior, Teresa Raquel, Isomar Lima, Mateus Pereira, Cassiano Filho, Áureo Tikami e Bruno Junqueira, pelo companheirismo, pela troca de informações, conhecimento e dicas.

A TODAS as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta Dissertação, com profundo reconhecimento e gratidão:

O meu Muito Obrigada!

RESUMO

As principais tarefas do Subsistema de Energia Elétrica (*Electrical Power Subsystem-EPS*) de um satélite artificial são gerar, armazenar e fornecer a energia necessária às cargas úteis, regulando, controlando e distribuindo a energia gerada pelos painéis solares e armazenada pelas baterias. A escolha de uma topologia EPS eficiente e um controle de gerenciamento de energia eficaz são elementos cruciais para o sucesso da missão e uma longa vida útil dos satélites. No início de seu projeto, é importante verificar o cumprimento de alguns requisitos, principalmente de eficiência, por meio de Modelos e Simulações (M&S) dos painéis solares, baterias e conversores, e a análise de seus resultados. Assim, este trabalho, apresenta, o estudo comparativo, segundo um critério de eficiência, avaliando a eficiência geral do sistema, para duas classes de topologias: Transferência Direta de Energia (*Direct Energy Transfer-DET*) e Rastreador de Potência de Pico (*Peak Power Tracking-PPT*), em barramento não regulado, de Subsistemas de Energia Elétrica para satélites artificiais, comparando a energia dissipada em cada um deles ao longo do período orbital via modelagem, simulação e análise. Os resultados sugerem que: 1) a topologia PPT é mais eficiente que a topologia DET; 2) a M&S adotada e as análises realizadas os validam como ferramenta para avaliar o requisito de eficiência do EPS.

Palavras-chave: Subsistema de Energia Elétrica-EPS. Eficiência. Rastreador de Potência de Pico-PPT. Transferência Direta de Energia-DET. Painel Solar. Bateria.

COMPARISON OF EFFICIENCY OF UNREGULATED PPT AND DET TOPOLOGIES BY MODELING, SIMULATION AND ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SUBSYSTEMS FOR SMALL SATELLITES

ABSTRACT

The main tasks of the Electrical Power Subsystem (EPS) of an artificial satellite are to generate, store and supply the necessary energy to the payloads, by regulating, controlling and distributing the energy generated by the solar panels and stored by the batteries. Choosing an efficient EPS topology and an effective power management control are crucial elements for mission success and long satellite life. Early in their design, it is important to verify the compliance of some requirements, especially on efficiency, via Models and Simulations (M&S) of the solar panels, batteries and converters, and the analysis of their results. So, this work presents the comparative study, according to an efficiency criterion, evaluating the system overall efficiency, for two classes of topologies: Direct Energy Transfer (DET) and Peak Power Tracking (PPT), in unregulated bus, of Electrical Power Subsystems for artificial satellites, by comparing the energy dissipated for each of them along the orbital period via modeling, simulation and analysis. The results obtained so far suggest that: 1) PPT topology is more efficient than DET topology; 2) the adopted M&S and the analysis performed validate them as a tool to assess the EPS efficiency requirement.

Keywords: Electrical Power Subsystem - EPS. Efficiency. Peak Power Tracking - PPT. Direct Energy Transfer - DET. Solar Array. Battery.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 - Metodologia desta dissertação.....	4
Figura 2.1 - Algumas configurações do padrão <i>CubeSat</i>	7
Figura 2.2 - Satélite e seus subsistemas.....	8
Figura 2.3 - Diagrama em blocos de um EPS.	9
Figura 2.4 - Topologias segundo Wertz e Larson (1999).	11
Figura 2.5 - Topologias segundo Ley, Wittmann e Hallmann (2009).....	12
Figura 2.6 - Topologias segundo Shekoofa e Karbasian (2013).	14
Figura 2.7 - Topologias segundo Magalhães (2020).	15
Figura 2.8 - Topologias PPT e DET versus técnica de regulação.	17
Figura 2.9 - Topologia Híbrida com controle de condutância.	21
Figura 2.10 - Primeira geração das topologias de barramento não regulado...	29
Figura 2.11 - Segunda geração das topologias de barramento não regulado com <i>Buck-Boost Regulator</i> (B^2R).	31
Figura 2.12 - Circuitos de controle para B^2R	31
Figura 2.13 - Primeira geração das topologias de barramento regulado com BCR e BDR.	32
Figura 2.14 - Segunda geração das topologias de barramento regulado com conversor bidirecional e S^4R	33
Figura 2.15 - Terceira geração das topologias de barramento regulado com conversor <i>Buck Buck-Boost Regulator</i> (B^3R).	35
Figura 2.16 - Diferenças entre célula, módulo e painel solar.	36
Figura 2.17 - Curva característica de um painel solar.	38
Figura 2.18 - Densidade de energia por tipo de bateria.	40
Figura 2.19 - Fenômeno de <i>lock-up</i>	41
Figura 2.20 - Avalanche térmica em bateria.....	42
Figura 2.21 - Unidade de condicionamento de energia.....	43
Figura 2.22 - Uso de conversores DC/DC dentro da PCU.	44
Figura 2.23 - Diagrama de um canal do Shunt.....	45
Figura 2.24 - Topologia S^3R	46

Figura 2.25 - Topologia S ⁴ R.....	46
Figura 2.26 - Sequential Shunt Unit – SSU.....	47
Figura 2.27 - Arquitetura de distribuição descentralizada.	49
Figura 2.28 - Arquitetura de distribuição centralizada.	49
Figura 4.1 - Detalhamento do modelo elétrico do PPT em malha fechada.	54
Figura 4.2 - Detalhamento do modelo elétrico do DET em malha fechada.	56
Figura 4.3 - Modelo elétrico de célula solar com resistência em paralelo.	57
Figura 4.4 - Modelo elétrico do painel solar.	58
Figura 4.5 - Modelo matemático do painel solar no <i>Simulink</i>	59
Figura 4.6 - Verificação do modelo (I-V) do painel solar no <i>Simulink</i>	59
Figura 4.7 - Modelo <i>Simulink</i> do painel solar na topologia PPT.	60
Figura 4.8 - Modelo <i>Simulink</i> do painel solar na topologia DET.....	60
Figura 4.9 - Modelo elétrico do bloco PPT– Conversor <i>Boost</i>	61
Figura 4.10 - Comportamento do conversor <i>Boost</i> no modo de condução contínua.....	62
Figura 4.11 - Implementação do bloco PPT no <i>Simulink</i>	63
Figura 4.12 - Verificação do modelo do conversor <i>Boost</i> no <i>Simulink</i>	63
Figura 4.13 - Modelo elétrico do bloco S ³ R.....	64
Figura 4.14 - Comportamento do S ³ R.	65
Figura 4.15 - Implementação do bloco S ³ R no <i>Simulink</i>	66
Figura 4.16 - Verificação do modelo do S ³ R no <i>Simulink</i>	66
Figura 4.17 - Modelo por circuito elétrico RC da Bateria.....	67
Figura 4.18 - Implementação do modelo da bateria no <i>Simulink</i>	68
Figura 4.19 - Verificação do modelo da bateria no <i>Simulink</i>	68
Figura 4.20 - Modelo elétrico da carga.....	69
Figura 4.21 - Implementação do modelo da carga no <i>Simulink</i>	69
Figura 4.22 - Verificação do modelo da carga no <i>Simulink</i>	69
Figura 4.23 - Modelo elétrico do controle - MEA.	70
Figura 4.24 - Implementação do modelo elétrico do controle no <i>Simulink</i>	70
Figura 4.25 - Verificação do modelo elétrico do controle – MEA no <i>Simulink</i> . .	71
Figura 5.1 - Elementos da missão espacial RaioSat.	72
Figura 5.2 - Processo para o <i>design</i> do painel solar.	74

Figura 5.3 - Perfil de consumo.	77
Figura 5.4 - Processo para o <i>design</i> da bateria.....	82
Figura 6.1 - Modelo do sistema PPT em <i>Simulink</i>	87
Figura 6.2 - Modelo do sistema DET em <i>Simulink</i>	88
Figura 6.3 - Comportamento do modelo PPT ($V_{bus} = 8,4 \text{ V}$) no <i>Simulink</i>	92
Figura 6.4 - Comportamento do modelo DET ($V_{bus} = 8,4 \text{ V}$) no <i>Simulink</i>	94
Figura 6.5 - Comportamento do modelo PPT ($V_{bus} = 12,6 \text{ V}$) no <i>Simulink</i>	96
Figura 6.6 - Comportamento do modelo DET ($V_{bus} = 12,6 \text{ V}$) no <i>Simulink</i>	98
Figura 6.7 - 1ª Métrica: Energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 8,4 V.	102
Figura 6.8 - 1ª Métrica: Energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 12,6 V.	105
Figura 6.9 - 1ª Métrica: Comparação da energia dissipada pelas topologias PPT e DET.	107
Figura 6.10 - 2ª Métrica: Energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 8,4 V.	111
Figura 6.11 - 2ª Métrica: Energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 12,6 V.	114
Figura 6.12 - 2ª Métrica: Comparação da energia dissipada pelas topologias PPT e DET.	116
Figura 6.13 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 8,4 V.	119
Figura 6.14 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pelo PPT e DET – Barramento de 12,6 V.	122
Figura 6.15 - 3ª Métrica: Comparação da média da energia dissipada pelas topologias PPT e DET.	124
Figura A.1 - Bloco painel solar PPT.	136
Figura A.2 - Bloco painel solar DET.	136
Figura A.3 - Bloco conversor <i>Boost</i>	136
Figura A.4 - Bloco S ³ R.	137
Figura A.5 - Bloco Bateria	137
Figura A.6 - Bloco Carga.	137

Figura A.7 - Bloco controle PPT e DET.....	138
Figura A.8 - Bloco Energia Dissipada (1ª métrica).	138
Figura A.9 - Bloco Energia Dissipada (2ª métrica).	138
Figura A.10 - Bloco Energia Dissipada (3ª métrica).	139
Figura B.1 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.	141
Figura B.2 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.	142
Figura B.3 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.	143
Figura B.4 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.	144
Figura B.5 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.	145
Figura B.6 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.	146
Figura B.7 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.	147
Figura B.8 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.	148
Figura B.9 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.	149
Figura B.10 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.	150
Figura B.11 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.	151
Figura B.12 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.	152
Figura B.13 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.	153
Figura B.14 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.	154

Figura B.15 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S ³ R com queda de diodo de 1,5 V.	155
Figura B.16 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S ³ R com queda de diodo de 0,75 V.	156
Figura B.17 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S ³ R com queda de diodo de 1,5 V.	157
Figura B.18 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S ³ R com queda de diodo de 0,75 V.	158
Figura B.19 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.	160
Figura B.20 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.	161
Figura B.21 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.	162
Figura B.22 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.	163
Figura B.23 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.	164
Figura B.24 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.	165
Figura B.25 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.	166
Figura B.26 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.	167
Figura B.27 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.	168
Figura B.28 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.	169
Figura B.29 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.	170
Figura B.30 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.	171

Figura B.31 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.	172
Figura B.32 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.	173
Figura B.33 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S ³ R com queda de diodo de 1,5 V.	174
Figura B.34 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S ³ R com queda de diodo de 0,75 V.	175
Figura B.35 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S ³ R com queda de diodo de 1,5 V.	176
Figura B.36 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S ³ R com queda de diodo de 0,75 V.	177
Figura B.37 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.	179
Figura B.38 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.	180
Figura B.39 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.	181
Figura B.40 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.	182
Figura B.41 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.	183
Figura B.42 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.	184
Figura B.43 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.	185
Figura B.44 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.	186
Figura B.45 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.	187
Figura B.46 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.	188

Figura B.47 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC <i>Boost</i> de 97,48% de eficiência.	189
Figura B.48 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC <i>Boost</i> de 98% de eficiência.	190
Figura B.49 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC <i>Boost</i> de 99,20% de eficiência.	191
Figura B.50 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC <i>Boost</i> de 99,33% de eficiência.	192
Figura B.51 - 3ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S ³ R <i>com queda de diodo de 1,5 V</i>	193
Figura B.52 - 3ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S ³ R <i>com queda de diodo de 0,75 V</i>	194
Figura B.53 - 3ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S ³ R <i>com queda de diodo de 1,5 V</i>	195
Figura B.54 - 3ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S ³ R <i>com queda de diodo de 0,75 V</i>	196
Figura C.1 - Configuração do solucionador.	197
Figura C.2 - Configuração dos parâmetros do solucionador.	197
Figura C.3 - Elemento chaveador do <i>Sunlight</i> e <i>eclipse</i>	198
Figura C.4 - Bloco <i>Unit Delay</i>	198
Figura C.5 - Realimentação da corrente do painel solar.	199
Figura C.6 - Bloco <i>Initial Condition</i>	199
Figura C.7 - Bloco <i>Saturation</i>	200

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Classificação dos satélites artificiais, segundo Pessotta (2018). ...	6
Tabela 2.2 - Topologias segundo Freire (2009).	13
Tabela 2.3 - Vantagens e desvantagens das topologias DET e PPT.....	22
Tabela 2.4 - Vantagens e desvantagens dos métodos de regulação de barramento.	23
Tabela 2.5 - Topologias de EPS - satélites de grande e médio porte.	25
Tabela 2.6 - Topologias de EPS - satélites de pequeno porte.	27
Tabela 5.1 - Requisitos globais da missão RaioSat.	73
Tabela 5.2 - Estimativa de <i>budget</i> de potência para o RaioSat.	75
Tabela 5.3 - Informações sobre o período e a inclinação orbital.	76
Tabela 5.4 - Características da célula solar XTJ Prime30.....	76
Tabela 5.5 - Consumo por modo de operação.	77
Tabela 5.6 - Eficiência teórica do PPT e DET.	79
Tabela 5.7 - Resultados dos dimensionamentos dos painéis solares para o PPT e DET.	82
Tabela 5.8 - Especificação da célula da bateria SLP 554374H.....	83
Tabela 5.9 - Dados da bateria.	84
Tabela 6.1 - Parâmetros para as simulações.	90
Tabela 6.2 - Levantamento das eficiências para o conversor <i>Boost</i>	99
Tabela 6.3 - Cálculo das eficiências para o S ³ R.	99
Tabela 6.4 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT com V_{bus} de 8,4 V.....	100
Tabela 6.5 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET com V_{bus} de 8,4 V.....	101
Tabela 6.6 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT com V_{bus} de 12,6 V.....	103
Tabela 6.7 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET com V_{bus} de 12,6 V.....	104
Tabela 6.8 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT com V_{bus} de 8,4 V.....	109
Tabela 6.9 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET com V_{bus} de 8,4 V.....	110
Tabela 6.10 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT com V_{bus} de 12,6 V.....	112
Tabela 6.11 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET com V_{bus} de 12,6 V.....	113

Tabela 6.12 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pela topologia PPT com V_{bus} de 8,4 V.....	117
Tabela 6.13 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pela topologia DET com V_{bus} de 8,4 V.....	118
Tabela 6.14 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pela topologia PPT com V_{bus} de 12,6 V.....	120
Tabela 6.15 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pela topologia DET com V_{bus} de 12,6 V.....	121

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AOCS	<i>Attitude and Orbit Control System</i>
AsGa	Arseneto de Gálio
BCD	<i>Battery Charge and Discharge</i>
BCDR	<i>Battery Charge and Discharge Regulator</i>
BC	<i>Battery Charge</i>
BCR	<i>Battery Charge Regulator</i>
BDR	<i>Battery Discharge Regulator</i>
BH	<i>Hybrid Bus</i>
BOL	<i>Begin-of-Life</i>
B ² R	<i>Buck-Boost Regulator</i>
B ³ R	<i>Buck Buck-Boost Regulator</i>
BQ	<i>Quasi-regulated Bus</i>
BR	<i>Fully Regulated Bus</i>
BS	<i>Semi-regulated Bus</i>
BSR	<i>Sunlight Regulated Bus</i>
BU	<i>Unregulated Bus</i>
CA	Corrente Alternada
CBERS	<i>China Brazil Earth Resources Satellite</i>
CC	Corrente Contínua
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSE	Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais
DET	<i>Direct Energy Transfer</i>
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
EOC	<i>End-Of-Charge</i>
EOL	<i>End-Of-Life</i>
EPS	<i>Electrical Power System</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
ETE	Engenharia e Tecnologia Espaciais
FCL	<i>Fold-back Current Limiters</i>
Fr	Fator de Recarga

GEO	<i>Geostationary Earth Orbit</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTO	<i>Geostationary Transfer Orbit</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
I-V	Corrente – Tensão
LC ³	<i>Linear Charge Current Control</i>
LCL	<i>Latching Current Limiters</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
Li-Fe	<i>Lithium Ferrite</i>
Li-Ion	<i>Lithium Ion</i>
LiPo	<i>Lithium Polymer</i>
M&S	Modelagem e Simulação
MEA	<i>Main Error Amplifier</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPP	Ponto de Máxima Potência
MPPT	<i>Maximum Peak Power Tracking</i>
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NiCd	Níquel-Cádmio
NiH ₂	Níquel-Hidrogênio
NiMH	Níquel-Metal-Hidreto
OBC	<i>On-Board Computer</i>
PCDU	<i>Power Control and Distribution Unit</i>
PCU	<i>Power Control Unit</i>
PDU	<i>Power Distribution Unit</i>
PMAD	<i>Power Management and Distribution</i>
POL	<i>Point-of-Load</i>
PPT	<i>Peak Power Tracking</i>
P-V	Potência –Tensão
PWM	<i>Pulse Width Modulation - PWM</i>
SA	<i>Solar Array</i>
SAG	<i>Solar Array Generator</i>
SR	<i>Shunt Regulator</i>
S ³ R	<i>Sequential Switching Shunt Regulator</i>
S ⁴ R	<i>Sequential Switching Shunt Series Regulator</i>

SID	Serviço de Informação e Documentação
SPG	Serviço de Pós-Graduação
SSPC	<i>Solid-State Power Controllers</i>
STK	<i>Systems Tool Kit</i>
TBC	<i>To Be Confirmed</i>
TDI	Teses e Dissertações Internas
TCS	<i>Thermal Control Subsystem</i>
TT&C	<i>Telemetry Tracking and Control</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére, unidade de medida de corrente
Ah	Ampére-hora
A_{sa}	Área do painel solar, cm^2
C_{Bat}	Capacitância da bateria, F
cm	<i>Centímetros</i>
d	<i>Duty cycle</i>
D	Diodo
E_{Bat}	Capacidade de armazenamento da bateria, Wh
E_D	Energia dissipada, J
E_e	Energia consumida em eclipse, Wh
E_{g0}	Energia de <i>band gap</i> do semiconductor, J
E_{sa}	Energia do painel solar, Wh
F	Farad
G	Irradiação solar
I	Corrente de saída, A
I_{bat}	Corrente da bateria, A
I_{BOOST}	Corrente na saída do conversor <i>Boost</i> , A
I_{BUS}	Corrente do barramento, A
I_D	Corrente de diodo, A
I_L	Corrente do indutor, A
I_s	Corrente de saturação do diodo, A
I_{sc}	Corrente de curto-circuito, A
I_{rs}	Corrente de saturação reversa, A
I_{sh}	Corrente de <i>shunt</i> , A
I_{mcell}	Corrente da célula solar, mA
I_{mp}	Corrente de máxima potência, A
I_{ph}	Fotocorrente, A
I_{SAG}	Corrente do painel solar, A
I_{S3R}	Corrente na saída do S ³ R, A
J	Índice de desempenho da topologia

k	Potência de entrada, W
K	Constante de Boltzmann's, $1.380658e-23$ J/K
kg	Quilogramas
K_i	Corrente de curto-circuito da célula a 25°C e 1000 W/m ²
L	Indutor
L_d	Degradação por tempo de vida
A	Fator de idealidade do diodo, (adimensional)
η_S	Eficiência do sistema de energia
η_{PPT}	Eficiência do conversor
M_{Bat}	Massa da bateria, g
M_{sa}	Massa do painel solar, g
MHz	Mega Hertz
mW	Mili Watts
nm	Nanômetro
N_P	Números total de células em série, (adimensional)
N_S	Números total de células em paralelo, (adimensional)
P_d	Potência durante eclipse, W
P_e	Potência durante <i>Sunlight</i> , W
P_{EOL}	Potência areal de saída no fim de vida, W/m ²
P_i	Potência de entrada do conversor, W
P_{in}	Potência de entrada, W
P_{Lmax}	Potência de carga, W
$P_{MÁX}$	Potência de máxima, W
P_{mcell}	Potência de máxima potência da célula solar, W
P_{MIN}	Potência de mínima, W
P_{mp}	Potência de máxima potência, W
P_{out}	Potência de saída, W
P_{BOL}	Potência areal de saída no começo da vida, W/m ²
q	Carga do elétron, $1.60217733e-19$ C
R_i	Resistência interna, Ω
R_s	Resistência em série, Ω
R_P	Resistência em paralelo <i>Shunt</i> , Ω
T	Temperatura, $^{\circ}\text{K}$
T	Tempo, s

T_d	Tempo em <i>Sunlight</i> , minutos
T_e	Tempo em eclipse, minutos
T_n	Temperatura nominal, °K
T_{off}	Tempo de chave desligada
V	Volt, unidade de medida de tensão
V_{bat}	Tensão da bateria, V
V_{bus}	Tensão de barramento, V
V_{cell}	Tensão da célula, V
V_C	Tensão no capacitor, V
V_D	Tensão do diodo, V
V_{EOC}	Tensão de fim de carga da bateria, V
V_{mp}	Tensão de máxima potência, V
V_{oc}	Tensão de circuito aberto, V
V_{ref}	Tensão de referência, V
V_{Ri}	Tensão na resistência interna, V
V_{sa}	Tensão do painel solar, V
V_T	Tensão térmica do diodo, V
X_d	Eficiência em <i>Sunlight</i>
X_e	Eficiência em eclipse
W	Watts, unidade de medida de potência

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Generalidade e utilidade	3
1.4 Metodologia	3
1.5 Organização deste documento	4
2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Classificação dos satélites artificiais	6
2.1.1 O Padrão <i>CubeSat</i>	6
2.2 Satélites e seus subsistemas.....	7
2.3 Subsistema de energia elétrica.....	9
2.4 Topologias de subsistema de energia elétrica	10
2.4.1 Vantagens e desvantagens entre DET e PPT.....	21
2.4.2 Topologias utilizadas em voo	24
2.4.3 Estado da arte.....	29
2.4.3.1 Evolução das topologias de barramento não regulado	29
2.4.3.2 Evolução das topologias de barramento regulado	32
2.5 Equipamentos do EPS.....	36
2.5.1 Painel solar	36
2.5.2 Baterias	39
2.5.2.1 Fenômeno de “ <i>lock-up</i> ”.....	40
2.5.2.2 Avalanche térmica em baterias.....	42
2.5.3 Unidade de Condicionamento de Energia (PCU).....	42
2.5.3.1 Conversores DC/DC	43
2.5.3.2 Regulador <i>Shunt</i>	44
2.5.3.3 Regulador de Carga da Bateria (BCR)	48
2.5.3.4 Regulador de Descarga da Bateria (BDR)	48
2.5.4 Unidade de Distribuição de Potência (PDU)	48
2.5.4.1 <i>Point-Of-Load (POL)</i>	50

2.5.4.2	Medidas para proteção do barramento	50
3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS PARA SUA SOLUÇÃO	51
3.1	Formulação do problema	51
3.2	Abordagens para sua solução	51
3.2.1	Modelagem	51
3.2.2	Simulação	51
3.2.3	Análise e comparação	52
3.2.3.1	Definição do critério e métricas para verificação da eficiência	52
4	MODELAGEM DAS TOPOLOGIAS DET E PPT	53
4.1	Detalhamento do modelo elétrico do PPT em malha fechada	53
4.2	Detalhamento do modelo elétrico do DET em malha fechada	55
4.3	Modelo de painel solar	57
4.4	Modelo do bloco PPT	60
4.5	Modelo do bloco S ³ R	63
4.6	Modelo de bateria	66
4.7	Modelo da carga	68
4.8	Modelo do controle	70
5	ESTUDO DE CASO	72
5.1	Missão RaioSat	72
5.1.1	Requisitos globais da missão RaioSat	73
5.1.2	Dimensionamento do painel solar	73
5.1.3	Dimensionamento da bateria	82
6	SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	85
6.1	Apresentação dos modelos em <i>Simulink</i>	85
6.2	Parâmetros para as simulações	89
6.3	Resultados das simulações em barramento 8,4 V	90
6.3.1	Topologia PPT	90
6.3.2	Topologia DET	93
6.4	Resultados das simulações em barramento 12,6 V	95
6.4.1	Topologia PPT	95
6.4.2	Topologia DET	97

6.5 Análises	99
6.5.1 Primeira métrica	100
6.5.2 Segunda métrica	109
6.5.3 Terceira métrica	117
7 CONCLUSÃO.....	126
7.1 Conclusões e contribuições	126
7.2 Dificuldades encontradas.....	127
7.3 Trabalhos futuros.....	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS MODELOS EM <i>SIMULINK</i>.....	136
APÊNDICE B – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	140
B.1 - Resultados para a primeira métrica	140
B.1.1 - PPT em barramento 8,4 V	141
B.1.2 - PPT em barramento 12,6 V	148
B.1.3 - DET em barramento 8,4 V	155
B.1.4 - DET em barramento 12,6 V	157
B.2 - Resultados para a segunda métrica	159
B.2.1 - PPT em barramento 8,4 V	160
B.2.2 - PPT em barramento 12,6 V	167
B.2.3 - DET em barramento 8,4 V	174
B.2.4 - DET em barramento 12,6 V	176
B.3 - Resultados para a terceira métrica	178
B.3.1 - PPT em barramento 8,4 V	179
B.3.2 - PPT em barramento 12,6 V	186
B.3.3 - DET em barramento 8,4 V	193
B.3.4 - DET em barramento 12,6 V	195
APÊNDICE C – <i>SOLVER</i> E PROBLEMAS DE SIMULAÇÃO	197

1 INTRODUÇÃO

Este documento apresenta a Dissertação da autora para sua titulação como Mestre no Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE), Área de Concentração em Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais (CSE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

1.1 Contexto e motivação

O Subsistema de Energia Elétrica (do Inglês *Electrical Power Subsystem* – EPS) é um subsistema vital para qualquer satélite. As principais tarefas do EPS de um satélite artificial são gerar, armazenar e fornecer a energia necessária às cargas úteis, regulando, controlando e distribuindo a energia gerada pelos painéis solares e armazenada pelas baterias. A topologia do EPS define as partes existentes e como elas estão conectadas.

A escolha de uma topologia EPS eficiente e um controle de gerenciamento de energia eficaz são elementos cruciais para o sucesso da missão e uma longa vida útil dos satélites. A topologia do EPS especifica a geometria do painel solar (do Inglês *Solar Arrays* - SA); a quantidade de barramentos de tensão principal (primários), o número e valores de tensão para os barramentos de distribuição de tensão (secundários). A topologia pode impactar significativamente na eficiência, tamanho, massa, confiabilidade e custo do EPS.

No início do projeto, é importante verificar o cumprimento de alguns requisitos, principalmente de eficiência, por meio de Modelos e Simulações (M&S) dos painéis solares, baterias e conversores, e a análise de seus resultados.

Neste contexto, é importante selecionar uma topologia adequada de acordo com os requisitos de sistema.

Assim, as motivações deste trabalho são: a) analisar, estudar e simular as topologias de subsistema de energia elétrica utilizados em satélites artificiais; b) disponibilizar informações que possam ser utilizadas pelo INPE, tornando a tomada de decisão de projeto mais assertivas.

1.2 Objetivo

O objetivo principal e geral desta dissertação é realizar uma comparação das eficiências das topologias *Peak Power Tracking* (PPT) e *Direct Energy Transfer* (DET) não reguladas por modelagem, simulação e análise de subsistemas de energia elétrica para pequenos satélites. Tendo em vista a busca constante por sistemas mais eficientes, este trabalho avalia a eficiência geral do sistema para duas principais classes de processamento e transferência de energia de matriz solar, as topologias: PPT e DET, de subsistemas de energia elétrica para satélites artificiais, comparando a energia dissipada em cada um deles ao longo do período orbital. Assim, por meio de modelagens, simulações (M&S) e análises, pretende-se mostrar o impacto da eficiência na seleção da topologia do subsistema de energia. Para se atingir tal objetivo, realizam-se os seguintes passos:

- a) **Estudo e categorização das topologias de EPS:** verifica-se na literatura quais topologias para EPS existem atualmente, e quais são as mais utilizadas em missões de satélites de grande, médio e pequeno porte;
- b) **Modelos das topologias PPT e DET:** o sistema a ser modelado possui várias partes distintas, a saber: painel solar, baterias, conversores e carga, porém acopladas por meio de um barramento. Isso implicou desenvolver modelos que contemplassem essas partes e que permitissem adaptação para diferentes topologias de EPS;
- c) **Dimensionamentos teóricos do painel solar e da bateria:** Dimensionam-se teoricamente os tamanhos de painel solar e bateria para as topologias PPT e DET, de acordo com os requisitos de sistema e parâmetros orbitais, a fim de identificar qual topologia de barramento de potência não regulado exige o menor painel solar;
- d) **Simulação dos modelos:** uma vez desenvolvidos os modelos PPT e DET, estimam-se seus parâmetros para uma missão específica, a saber, o RAIOSAT; e, utilizando o software *Matlab/Simulink*, realizam-se simulações dos modelos completos, comparando os resultados obtidos com os modelos utilizados; e

- e) **Critério de eficiência:** uma vez simulados os modelos, confrontam-se teoria e simulação para investigar os fatores que afetam a eficiência energética do sistema. Observa-se o efeito da variação de parâmetros das partes desse sistema juntamente com o funcionamento do satélite ao longo do período orbital e modos de operação.

1.3 Generalidade e utilidade

A **generalidade** deste trabalho consiste em facilitar e auxiliar no processo de seleção e tomadas de decisão de topologias para o subsistema de energia elétrica para pequenos satélites artificiais.

A **utilidade** deste trabalho é mostrar a comparação das eficiências das topologias PPT e DET não reguladas por modelagem, simulação e análise de subsistemas de energia elétrica para pequenos satélites para auxiliar no processo de seleção e desenvolvimento de um subsistema de energia. Desta maneira este trabalho poderá colaborar com as atividades do Grupo de Suprimento de Energia da Divisão de Engenharia do INPE, além de colaborar com grupos de estudos de missões.

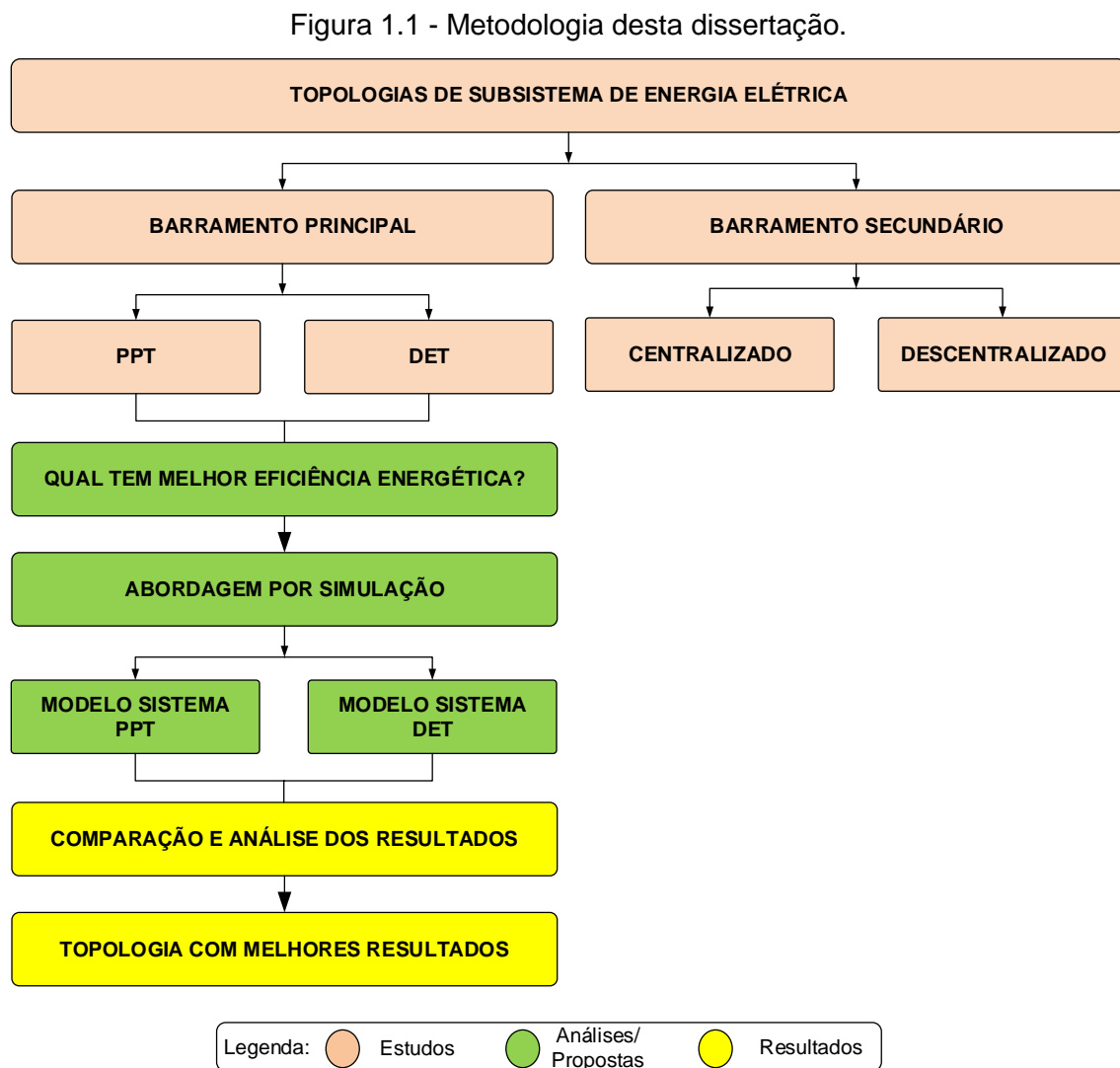
1.4 Metodologia

A pesquisa limita-se ao estudo da eficiência de topologias para subsistema de energia elétrica quanto à sua classe e método de regulação de barramento, com foco em topologias PPT e DET de barramento não regulado.

O desenvolvimento deste trabalho compreende: (i) estudo sobre subsistema de energia elétrica para satélites artificiais; (ii) o estudo e categorização das principais topologias para geração e distribuição da energia; (iii) o estudo de eficiências de painel solar, conversores e processo de carga e descarga da bateria; (iv) formulação do problema e abordagens para sua solução; (v) modelagem sistêmica e matemática de eficiência para as topologias PPT e DET com barramento não regulado; (vi) a definição e simulação de alguns cenários para verificar a melhor topologia para o barramento principal; (vii) comparação e

análise dos resultados obtidos e finalmente; (viii) proposta da topologia que melhor atende ao critério de eficiência.

A Figura 1.1 sintetiza a metodologia utilizada para a realização desta dissertação.



Fonte: Produção da autora.

1.5 Organização deste documento

Este documento é composto por 7 capítulos organizados da seguinte forma:

- a) O Capítulo 2: apresenta a fundamentação teórica e trabalhos relacionados mostrando de forma sucinta, os conceitos básicos sobre o subsistema de energia elétrica, as topologias de barramentos principal e secundário comumente utilizados em satélites artificiais, e o estado da arte sobre a evolução e compactação de partes do subsistema de energia;
- b) O Capítulo 3: discursa sobre a formulação do problema e abordagens para sua solução, definindo o critério e as métricas para verificação da eficiência;
- c) O Capítulo 4: discursa sobre quais pontos os modelos deverão complementar. Apresenta a modelagem sistêmica, painel solar, bateria, conversor e carga para a definição do critério de eficiência que permite a análise e comparação das topologias PPT e DET em barramento não regulado;
- d) O Capítulo 5: apresenta o dimensionamento de cargas, painel solar e bateria para o estudo de caso, cujos parâmetros serviram de entrada para as simulações das topologias PPT e DET, que permitirão a verificação dos modelos;
- e) O Capítulo 6: apresenta as simulações e as análises dos resultados obtidos através da variação dos parâmetros que afetam a eficiência do sistema; e
- f) O Capítulo 7: apresenta as conclusões e contribuições obtidas, dificuldades encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta alguns conceitos básicos e uma breve revisão da literatura, trazendo à memória os estudos mais relevantes realizados sobre topologias de sistemas de energia elétrica, utilizadas em satélites artificiais, e que contribuem para a construção do estado da arte, destinadas a introduzir um conhecimento mais abrangente sobre a temática relacionada a este trabalho.

2.1 Classificação dos satélites artificiais

Os satélites artificiais podem ser classificados por função, órbita, custo, dimensões, massa e complexidade (PESSOTTA, 2018; SANTOS, 2019). A Tabela 2.1, apresenta a classificação dos satélites com relação a sua massa segundo Pessotta (2018), considerada neste trabalho.

Tabela 2.1 - Classificação dos satélites artificiais, segundo Pessotta (2018).

CLASSIFICAÇÃO	MASSA (kg)
Satélites grandes	>1000
Satélites médios	500 a 1000
Satélites pequenos / Minisatélites	100 a 500
Microsatélites	10 a 100
Nanosatélites	1 a 10
Picosatélites	0,1 a 1
Femtosatélites	< 0,1

Fonte: Adaptado de Pessotta (2018).

2.1.1 O Padrão *CubeSat*

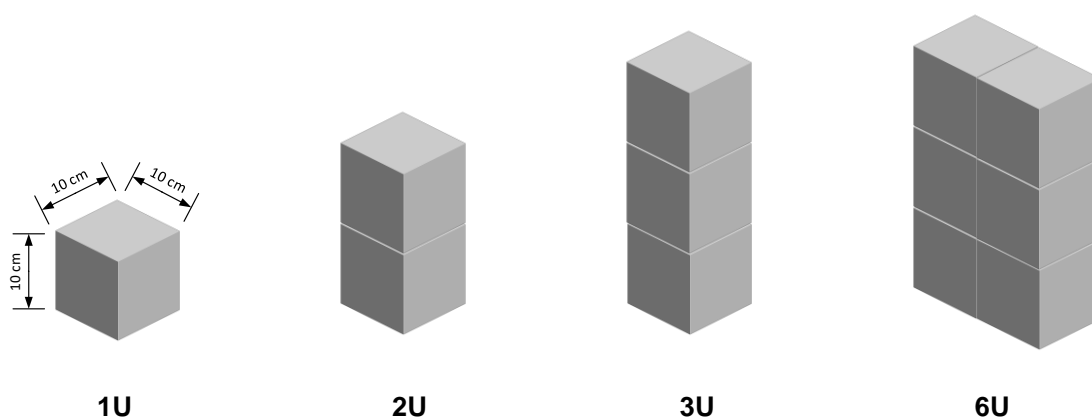
O padrão *CubeSat* foi criado, por Jordi Puig-Suari, da *California Polytechnic State University*, e Bob Twiggs, da *Stanford University*, em 1999, como um padrão mais simples, com o intuito de proporcionar aos alunos a oportunidade de participar de um programa espacial completo (TWIGGS, 2008).

O termo *CubeSat* é composto pela palavra, em inglês, *cube*, que significa cubo, mais as três primeiras letras da palavra satélite (Sat) e é utilizado para categorizar os satélites de pequeno porte, nanosatélites, em forma de cubo.

O padrão *CubeSat*, é descrito por uma especificação de domínio público, cujas dimensões são: 10 cm de comprimento x 10 cm de largura x 10 cm de altura, em formato de cubo, para uma estrutura denominada 1 U (CAL POLY, 2014).

Os satélites do padrão *CubeSat* são escaláveis, podendo ter versões que vão de 0,5 U a 27 Us, conforme ilustrado na Figura 2.1. Cada U pesa, normalmente, menos que 1,33 kg.

Figura 2.1 - Algumas configurações do padrão *CubeSat*.



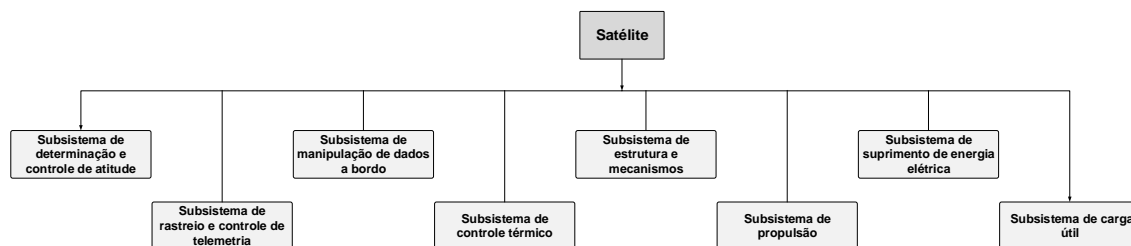
Fonte: Adaptado de CGEE (2018).

2.2 Satélites e seus subsistemas

A plataforma dos satélites artificiais é dividida em subsistemas. Esta divisão é feita para sistematizar o trabalho de engenharia requerido no projeto, montagem, integração e testes, dividindo-o de acordo com as áreas de competência.

A Figura 2.2 ilustra os subsistemas usualmente encontrados em satélites artificiais.

Figura 2.2 - Satélite e seus subsistemas.



Fonte: Adaptado de Wertz e Larson (1999).

O Subsistema de Determinação e Controle de Atitude (*Attitude Determination and Control Subsystem – ADCS*) tem o objetivo controlar o apontamento do satélite no espaço.

O Subsistema de Rastreo e Controle de Telemetria (*Telemetry, Tracking and Command – TT&C*) tem o objetivo de enviar e receber os dados e comandos que permitem o acompanhamento do funcionamento do satélite.

O Subsistema de Manipulação de Dados a Bordo (*Command and Data Handling – C&DH*) tem o objetivo de processar as informações recebidas ou a serem enviadas para a Terra e as informações internas ao satélite.

O Subsistema de Controle Térmico (*Thermal Control Subsystem – TCS*) tem o objetivo de manter os equipamentos dentro de suas faixas nominais de temperatura.

O Subsistema de Estrutura e Mecanismos (*Structures and Mechanisms Subsystem*) tem o objetivo de fornecer o suporte mecânico e de movimento para as partes do satélite como proteção contra as vibrações de lançamento e radiação em órbita.

O Subsistema de Propulsão tem o objetivo de fornecer o empuxo necessário para o controle da atitude e da órbita.

O Subsistema de Suprimento de Energia (*Electrical Power Subsystem – EPS*) elétrica tem o objetivo de fornecer a energia necessária aos diversos subsistemas.

O Subsistema de Carga Útil tem como objetivo coletar os dados sobre a missão.

A próxima seção detalha o Subsistema de Energia Elétrica, abordado neste trabalho.

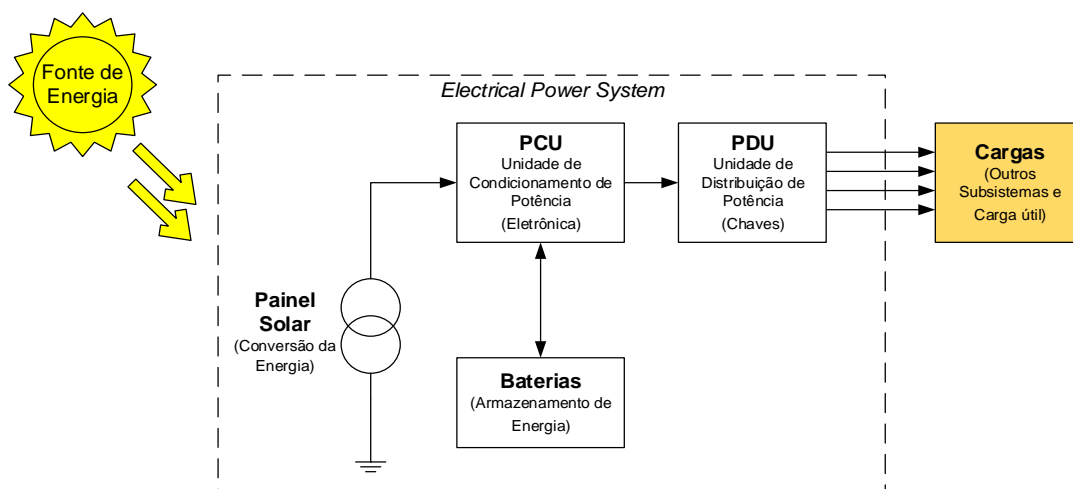
2.3 Subsistema de energia elétrica

O subsistema de energia elétrica tem como funções: gerar, armazenar, condicionar, controlar e distribuir a energia, dentro de uma faixa de tensão especificada, para todos os equipamentos ligados ao barramento e para a carga útil, além de proteger o sistema de um curto-circuito ou consumo excessivo de um ou mais equipamentos (PATEL, 2005).

No espaço, a fonte externa de energia mais utilizada em órbitas terrestres é a solar. Os satélites artificiais que orbitam a Terra tem que fazer uso da energia solar ou levar consigo sua própria fonte de energia, como baterias, células de combustível, combustível nuclear ou químico (PATEL, 2005).

Um sistema de energia básico é composto por: fonte de energia primária (Sol), conversor de energia (painel solar), fonte de armazenamento de energia recarregável (bateria), unidades de controle e regulação de energia e unidades de distribuição de energia (PCU e PDU) (WERTZ; LARSON, 1999). A Figura 2.3 ilustra os componentes típicos de um sistema de energia.

Figura 2.3 - Diagrama em blocos de um EPS.



Fonte: Adaptada de Patel (2005) e Burt (2011).

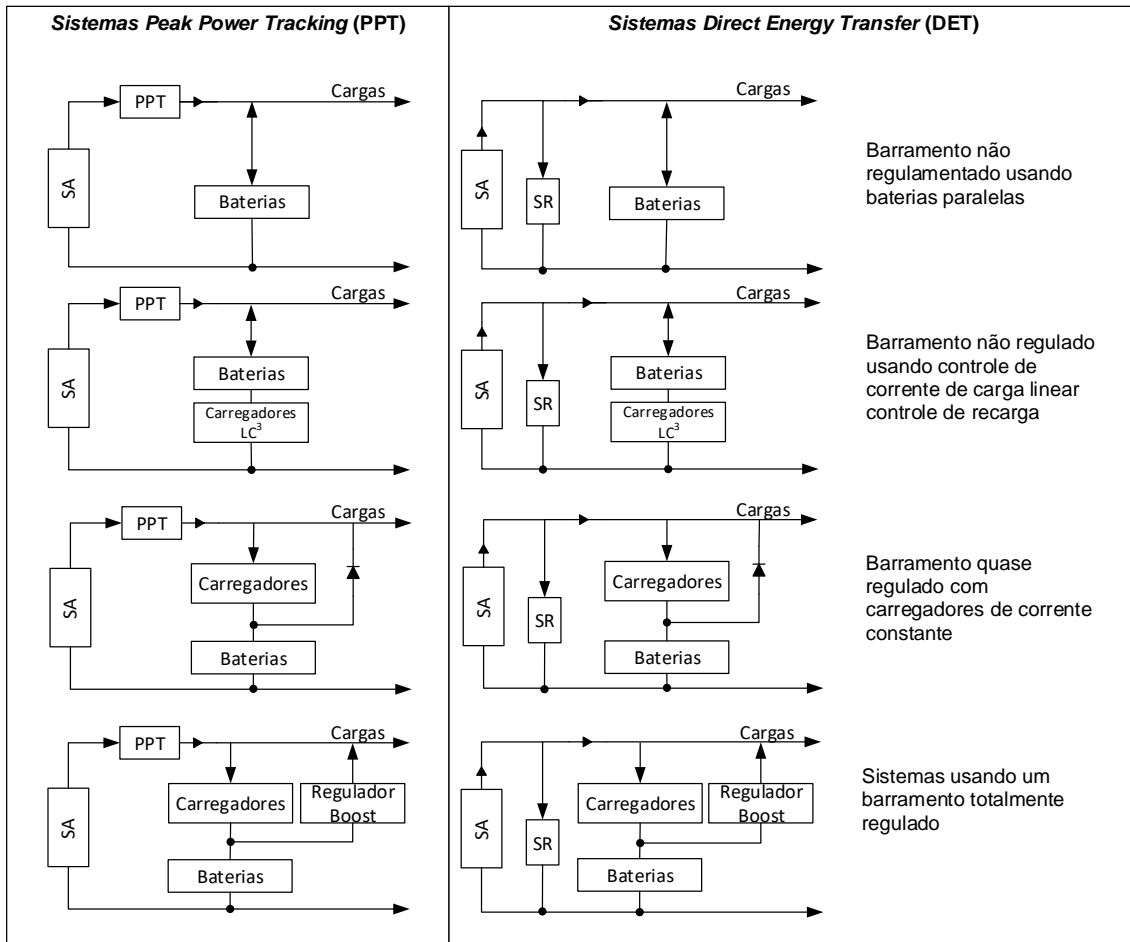
2.4 Topologias de subsistema de energia elétrica

São diversas as topologias e suas classificações utilizadas em EPS de satélites desde básicas até as mais complexas, p.ex:

Sullivan (1989) cita e detalha quatro topologias básicas: *unregulated power buses*, *regulated power buses*, *sunlight-regulated power buses* e *hybrid power bus*. O autor deixa claro que a escolha da topologia tem grandes impactos na massa do sistema e mostra como escolher um sistema de energia ideal, para missões específicas, em órbitas LEO (*Low Earth Orbit*) e GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*), por meio de análise dos resultados de um modelo de massa e eficiência, em que conclui que a topologia de Barramento Híbrido é mais indicada para missões LEO e a topologia de Barramento Totalmente Regulado é mais indicada para órbitas GEO e todas as outras aplicações.

Wertz e Larson (1999) apresentam oito topologias para EPS (Figura 2.4), categorizadas de acordo com o método de transferência e regulação de energia, assim como fazem Ley, Wittmann e Hallmann (2009), porém estes categorizando seis topologias (Figura 2.5). Em ambos há a discussão de vários tipos de topologias básicas para EPS, porém consideram categorias diferentes para as topologias. O método de classificação de topologias de Wertz e Larson (1999) para as topologias EPS básicas é o mais conhecido.

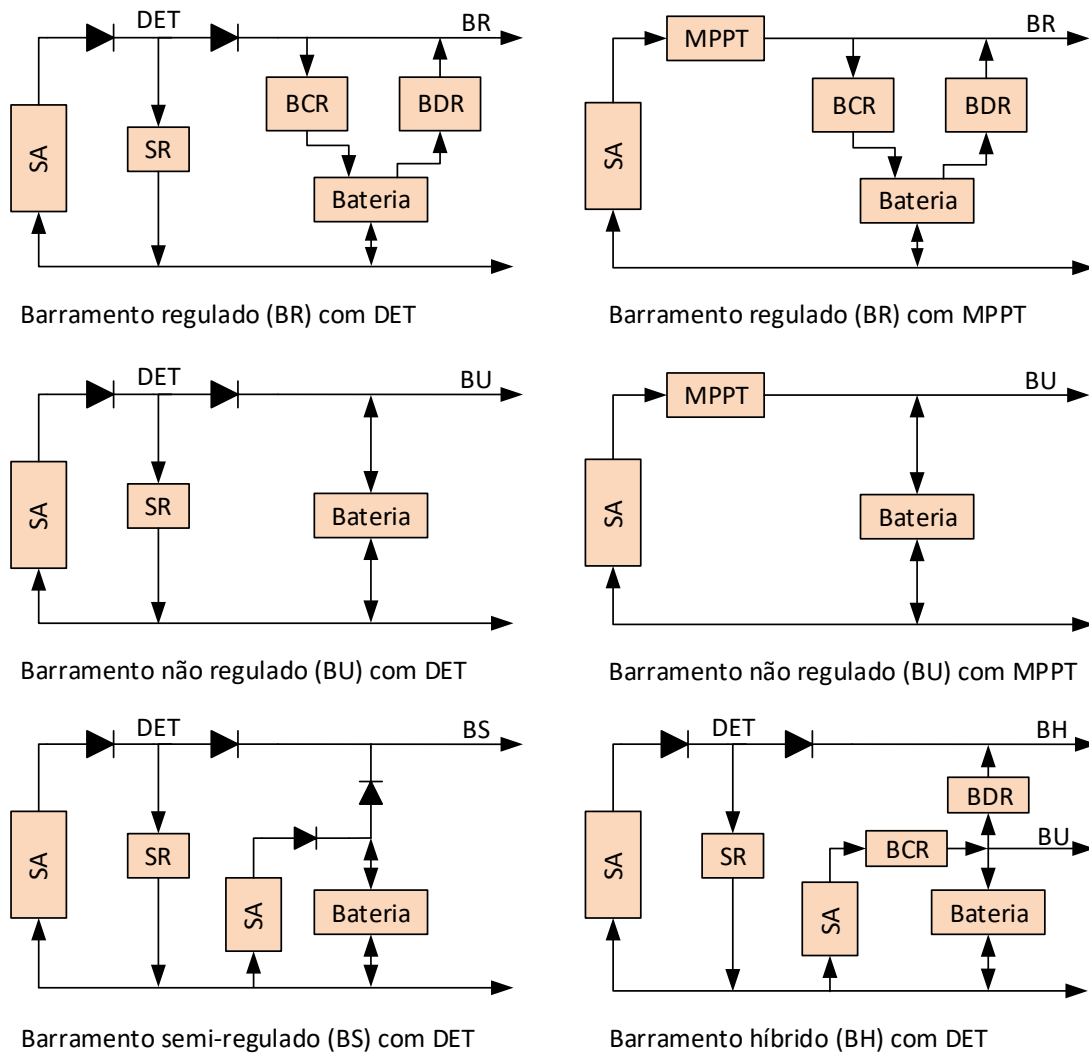
Figura 2.4 - Topologias segundo Wertz e Larson (1999).



Legenda: (SA) Solar Array; (SR) Shunt Regulator; e (LC³) Linear Charge Current Control.

Fonte: Wertz e Larson (1999).

Figura 2.5 - Topologias segundo Ley, Wittmann e Hallmann (2009).



Legenda: (SA) Solar Array; (SR) Shunt Regulator; (MPPT) Maximum Peak Power Tracking; (BU) Unregulated Bus; (BR) Fully Regulated Bus; (BS) Semi-regulated Bus; (BH) Hybrid Bus; (BCR) Battery Charge Regulator; e (BDR) Battery Discharge Regulator.

Fonte: Ley, Wittmann e Hallmann (2009).

Freire (2009) realiza um vasto estudo sobre topologias para sistemas de energia elétrica. Apresenta cinco topologias divididas em dois grupos: topologias de barramento não regulado e topologias de barramento regulado, conforme a Tabela 2.2. Detalha o projeto da topologia híbrida em barramento regulado, com controle de condutância (utilizada nos sistemas de energia dos satélites CBERS), considerando os aspectos de minimização de massa, no impacto no

projeto do painel solar representado pelo efeito do “*lock-up*”, e a eficiência elétrica do sistema.

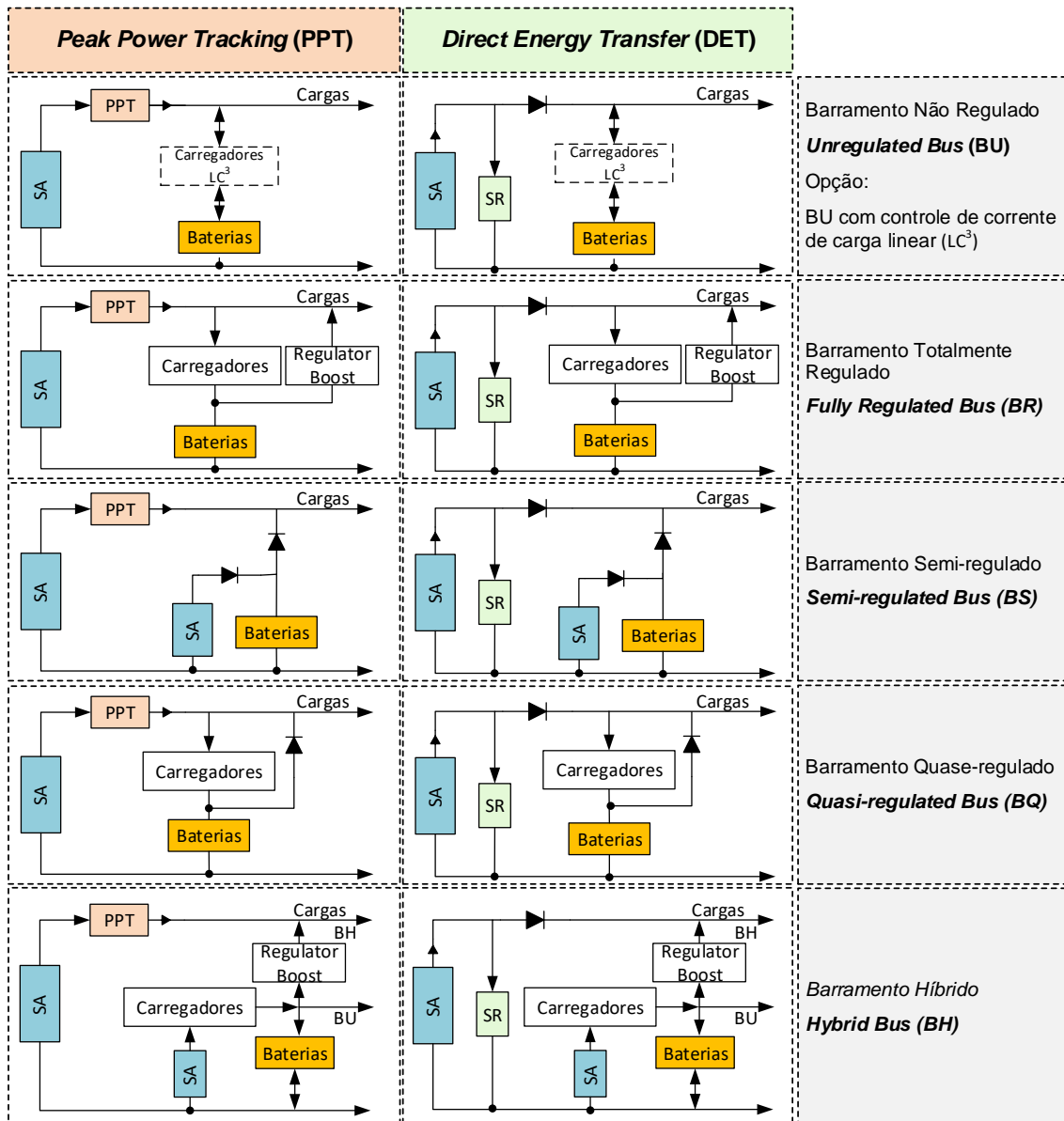
Tabela 2.2 - Topologias segundo Freire (2009).

Grupo das topologias com barramento não regulado	Grupo das topologias com barramento regulado
Seguidor de Potência Máxima (<i>The Maximum Peak Power Tracking – MPPT</i>)	Barramento de Potência Regulado (<i>The Regulated Power Bus Voltage</i>)
Barramento de Potência com Tensão Não Regulada (<i>The Unregulated Power Bus Voltage</i>)	Barramento de Potência Híbrido (<i>The Hybrid Regulated Power Bus Voltage</i>)
Barramento de Potência Regulado durante o período Solar (<i>SunlightRegulated Power Bus</i>)	

Fonte: Adaptado de Freire (2009).

Shekoofa e Karbasian (2013) categoriza as topologias segundo dois critérios: primeiro pelo método de transferência de energia e o segundo pelo método de regulação da tensão do barramento, cita ainda dois métodos de transferência de energia: PPT e DET, além de cinco métodos de regulação da tensão de barramento: *Unregulated Bus (BU)*, *Fully Regulated Bus (BR)*, *Semi-regulated Bus (BS)*, *Quasi-regulated Bus (BQ)* e *Hybrid Bus (BH)*. A combinação dos métodos de transferência de energia e os métodos de regulação da tensão de barramento, resulta em dez diagramas de topologias, os quais são apresentados na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Topologias segundo Shekoofa e Karbasian (2013).

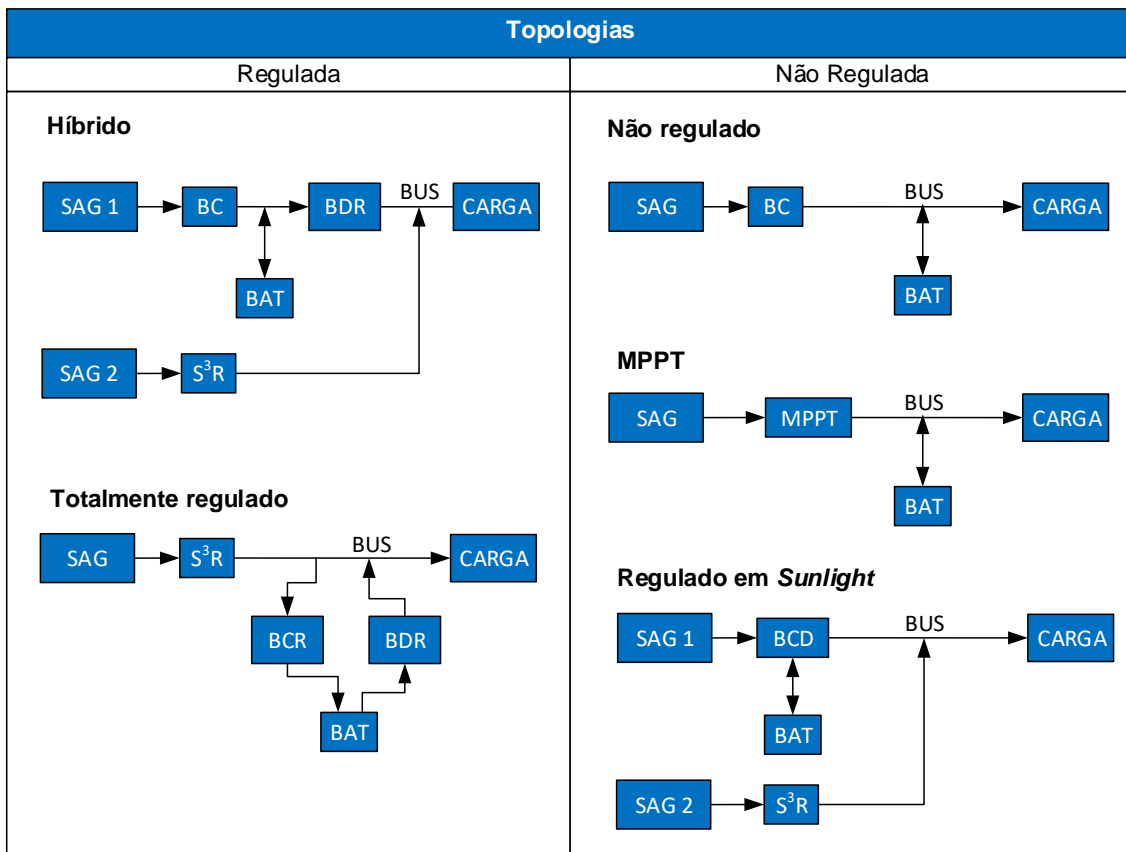


Legenda: (SA) Solar Array; (SR) Shunt Regulator; e (LC³) Linear Charge Current Control.

Fonte: Shekoofa e Karbasian (2013).

Magalhães (2020) apresenta dois grupos de topologias: 1) reguladas e 2) não reguladas. No grupo das topologias reguladas estão as topologias *Hybrid* e *Fully Regulated*, enquanto no grupo das topologias não reguladas estão as topologias *Unregulated* (sem e com MPPT) e *Sunlight Regulated*, totalizando quatro topologias conforme a Figura 2.7.

Figura 2.7 - Topologias segundo Magalhães (2020).



Legenda: (SAG) Solar Array Generator; (BC) Battery Charge; (BDR) Battery Discharge Regulator; (BAT) Battery; (S³R) Sequential Switching Shunt Regulator; (BCR) Battery Charge Regulator; (MPPT) Maximum Peak Power Tracking; e (BCD) Battery Charge and Discharge.

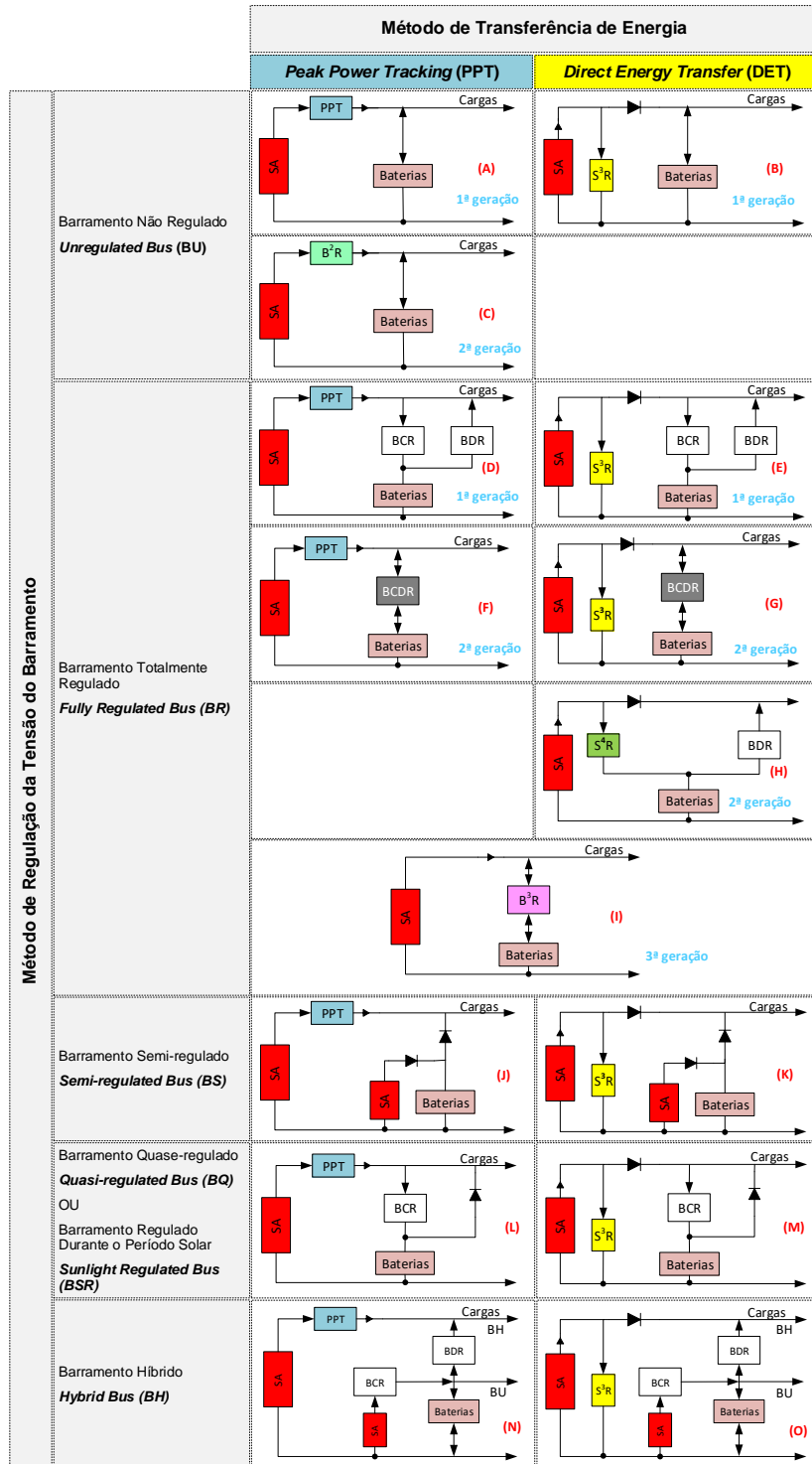
Fonte: Magalhães (2020).

Observa-se uma grande confusão quanto às nomenclaturas e classificações das topologias. Alguns autores classificam quanto ao método de regulação de barramento (FREIRE, 2009; MAGALHAES, 2020), outros quanto ao método de transferência de energia (WERTZ; LARSON, 1999), ao passo que outros apenas citam as topologias sem classificá-las propriamente (SULLIVAN, 1989), apenas um autor classifica conforme os dois métodos (SHEKOFA; KARBASIAN, 2013). Este último é o que melhor categoriza as topologias, porém, mistura o controle de barramento com controle de corrente de carga, incluindo, em algumas topologias, o controle de carga da bateria (LC³ - Linear Charge Current Control) em outras não; outro ponto, o autor não incluiu a topologia *Fully Regulated* com conversores bidirecionais (BCDR - Battery Charge and Discharge Regulator),

com conversores B³R, com S⁴R e considera *Sunlight Regulated Bus* como topologia quase regulada. Há ainda, autores que consideram S³R e S⁴R como topologia de barramento (SULLIVAN, 1977; CAPEL e PEROL, 2001), porém, S³R e S⁴R são termos utilizados para caracterizar métodos de regulação e controle do regulador *Shunt* em topologias DET. Com intuito de padronizar e classificar as topologias, este trabalho, adota as topologias apresentadas na Figura 2.8. A colaboração deste trabalho, nesta categorização, foi a inclusão da topologia *Unregulated* com conversores B²R *bem como* a inclusão da topologia *Fully Regulated* com conversores bidirecionais (BCDR), com conversores B³R e com o uso do S⁴R. Este trabalho adota também o termo “topologia” para designar a forma de geração, condicionamento e armazenamento da energia; e o termo “arquitetura” é utilizado em nível sistêmico para designar a forma de distribuição da energia às cargas.

É importante ressaltar que cada sistema de energia deve ser configurado de forma personalizada para cada missão, de forma a considerar a massa dos componentes, a órbita, o período orbital, os requisitos de potência dos subsistemas e de carga útil.

Figura 2.8 - Topologias PPT e DET versus técnica de regulação.



Legenda: (SAG) Solar Array Generator; (S³R) Sequential Switching Shunt Regulator; (S⁴R) Sequential Switching Shunt Series Regulator; (BDR) Battery Discharge Regulator; (BCR) Battery Charge Regulator; (BCDR) Battery Charge and Discharge Regulator; (B²R) Buck Boost Regulator e (B³R) Buck Buck Boost Regulator.

Fonte: Adaptado de Sullivan (1977; 1989); Wertz e Larson (1999); Capel e Perol (2001); Ley, Wittmann e Hallmann (2009), Freire (2009); Shekoofa e Karbasian (2013); Magalhães (2020).

A fonte de geração de energia determina o método de regulação da tensão, seja por meio de transferência direta de energia ou por rastreador de potência de pico.

Embora os componentes e tamanhos de equipamentos sejam diferentes para cada missão, os sistemas de energia seguem algumas das topologias básicas, que atualmente são divididas em duas grandes classes de topologias: 1ª Classe: a abordagem por Transferência Direta de Energia (DET) e a 2ª Classe: abordagem por Rastreamento de Pico de Potência (PPT).

Na topologia DET, a energia gerada pelo painel solar é fornecida às cargas de forma direta, e o excesso de energia é dissipado nos reguladores. Um sistema DET costuma utilizar um regulador *Shunt* para manter o nível desejado da tensão do barramento (FREEMAN, 1992; WERTZ; LARSON, 1999).

Em topologias PPT ou MPPT a energia gerada pelo painel solar é fornecida às cargas por meio de conversores DC/DC, que são reguladores controlados por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM), que, por sua vez, são controlados para buscar o ponto de máxima potência gerada pelo painel solar (SHEKOOFA; KARBASIAN, 2013). Um PPT é um subsistema não dissipativo, porque extrai a potência exata que uma espaçonave requer até o pico de potência da matriz (FREEMAN, 1992; WERTZ; LARSON, 1999).

Para ambas as topologias DET e PPT, a regulação do barramento principal pode ser feita por:

- Barramento Não Regulado;
- Barramento Totalmente Regulado;
- Barramento Semi-regulado;
- Barramento Quase-regulado ou Regulado Durante o Período Solar; e
- Barramento Híbrido.

A. Barramento Não Regulado

Nessa topologia, a energia é fornecida de forma direta do barramento principal para as cargas, sem a necessidade de um regulador para carga e descarga da bateria (BCR/BDR). Um regulador S³R (*Shunt*) ou módulo PPT pode ser utilizado entre o painel solar e a bateria, e o *Shunt* é usado para a dissipação da energia excessiva gerada pelo painel solar quando as cargas já estão alimentadas e a bateria está totalmente carregada. A tensão da bateria, que é igual à das cargas, controla a tensão do barramento principal (SULLIVAN, 1989).

B. Barramento Totalmente Regulado

Na topologia de Barramento Totalmente Regulado, são controladas três partes do barramento principal: painel solar (S³R ou PPT), *Battery Charge Regulator* (BCR) e *Battery Discharge Regulator* (BDR). Este método de controle é conhecido como controle dos três domínios de operação. O painel solar e a bateria estão isolados eletricamente, um do outro, por meio de: regulador *Shunt*, que controla a energia do painel solar; regulador BCR, que controla a corrente de carga da bateria e regulador BDR, que tem a função de retirar a energia da bateria e fornecê-la ao barramento regulado durante os períodos de eclipse, além de suprir a energia faltante às cargas durante os picos de consumo em períodos iluminados. O Barramento Totalmente Regulado é indicado para satélites de alta potência e alta tensão (SULLIVAN, 1989; FREIRE, 2009).

C. Barramento Semi-regulado

O Barramento Semi-regulado trabalha com dois barramentos (não regulado e regulado) e com painéis solares independentes que ajudam para aumentar o nível de energia solar e confiabilidade do subsistema. Um painel para o barramento principal e o outro dedicado para recarregar a bateria utilizando diodos para carga e descarga da mesma (SHEKOOFA; KARBASIAN, 2013).

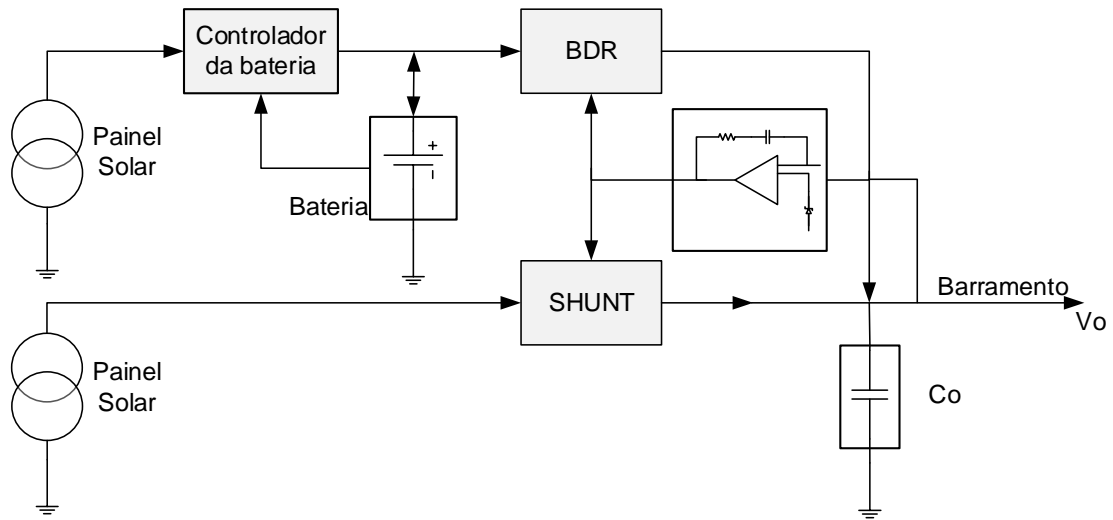
D. Barramento Quase-regulado ou Regulado Durante o Período Solar

Este barramento é um meio-termo entre o Barramento Regulado e o Barramento Não Regulado. Fornece um Barramento Regulado durante os períodos iluminados do satélite através do *Shunt*, que controla a tensão do barramento. Durante o período de eclipse, o barramento é não regulado uma vez que a tensão acompanha a descarga da bateria via o diodo, não via BDR, delegando a regulação do barramento para as cargas (SULLIVAN, 1989; FREIRE, 2009).

E. Barramento Híbrido

O Barramento Híbrido é composto pelos barramentos não regulado e regulado. É uma topologia mais complexa, por usar os módulos BCR e BDR, para conectar o painel solar e a bateria ao barramento principal, ao invés de diodos. Nesta topologia, uma parte do painel solar é utilizada para o barramento regulado, com módulo de BDR e outra parte do painel solar é utilizada no barramento não regulado, com um módulo de BCR. O barramento regulado é utilizado para alimentar as cargas normais, ao passo que o barramento não regulado alimenta as cargas de corrente (FREIRE, 2009). Na topologia Híbrida, com controle de condutância em dois domínios, são controladas a condutâncias do *Shunt* e do BDR. O painel solar é dividido em duas sessões, na qual uma parte é responsável por carregar as baterias e a outra é conectada diretamente ao *Shunt*, fornecendo a potência necessária para os períodos em *Sunlight* (FREIRE, 2009). Durante os períodos de eclipse, o BDR alimenta os subsistemas e cargas úteis extraíndo a potência da bateria, conforme a Figura 2.9.

Figura 2.9 - Topologia Híbrida com controle de condutância.



Fonte: Adaptado de Freire (2009).

2.4.1 Vantagens e desvantagens entre DET e PPT

As topologias DET e PPT são amplamente utilizadas em sistemas de energia elétrica de satélites artificiais, sendo cada uma adequada para determinadas missões e aplicações, assim como os métodos de regulação do barramento. As vantagens e desvantagens de cada uma foram coletadas de diferentes referências (EAKMAN, 1994; WERTZ; LARSON, 1999; PATEL, 2005; LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009; MOURRA, 2010; SHEKOOFA; KARBASIAN, 2013) e são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Vantagens e desvantagens das topologias DET e PPT.

	DET	PPT
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> • Menor quantidade de componentes • Componentes simples • Maior eficiência total no EOL • Menor ruído, menor complexidade • Maior confiabilidade • Simplicidade • Boa densidade de potência • Boa eficiência (diodos, cablagem) 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor área do painel solar • Mais disponibilidade de energia em diferentes projeções do Sol • Maior eficiência na alimentação das cargas (no BOL) • Previne o efeito de <i>lock-up</i> da Bateria • Reutilização (sem modificação)
DESVANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> • Tensão de painel solar igual à tensão de barramento ($V_{sa} = V_{bus}$) • Não é bom quando as características da matriz solar variam amplamente (temperatura, idade, radiação, ângulo solar, intensidade do Sol) • <i>Lock-up</i> da bateria • Adaptação específica de reutilização de acordo com o painel solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência (Quanto maior for a diferença entre V_{sa} e V_{bus} menor será a eficiência) • Uso de reguladores de chaveamento (PWM), são ruidosos e requerem uso de filtros. • Alto nível de complexidade do projeto, bem como o peso e o custo do EPS.
APLICAÇÕES	<ul style="list-style-type: none"> • Missões GEO e GTO • Grandes satélites LEO • Satélites em miniatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Missões LEO com ampla gama de variação na projeção do Sol sobre as matrizes solares • Pequenos satélites com $200 < P_{Lmax} < 1000$ Watts • Satélites em miniatura com razão "$P_{Lmax}/massa$" superior a 2 • Missões interplanetárias

Fonte: Adaptado de Eakman (1994); Wertz e Larson (1999); Patel (2005); Ley, Wittmann e Hallmann (2009); Mourra (2010); Shekoofa e Karbasian (2013).

A Tabela 2.4 resume as vantagens e desvantagens dos métodos de regulação de barramento.

Tabela 2.4 - Vantagens e desvantagens dos métodos de regulação de barramento.

	Barramento Não Regulado (BU)	Barramento Regulado (BR)	Barramento Semi-regulado (BS) e Quase-regulado (BQ) ou Regulado em <i>Sunlight</i> (BSR)	Barramento Híbrido (BH)
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da área necessária de painéis solares • Redução de massa e custo • Aumento da eficiência na ausência de BCRs e BDRs • Aumento da confiabilidade devido à eletrônica mais simples • Alimenta as cargas de pulso de alta potência 	<ul style="list-style-type: none"> • Adequado para sistemas com várias baterias • Adequado para regulação de cargas individuais • Adequado para aplicações com pequena gama de variações na produção de painéis solares • Uso de reguladores simples e eficientes • <i>Design</i> térmico simplificado • Boas características EMC 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiência • Maior confiabilidade do que BU • Menor massa e custo comparado ao BR • Menor complexidade e componentes elétricos/eletrônicos • Sem <i>lock-up</i> • Adequado para sistemas com várias baterias • Adequado para baixas variações de potência das cargas • Adequado para baixas variações na fase iluminada pelo Sol 	<ul style="list-style-type: none"> • Ter as vantagens de BU e BR • Fornecimento de cargas instantâneas de alta potência • Mais disponibilidade de energia
DESVANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da eficiência no caso de uso de conversores DC / DC individuais para cada carga • Bloqueio ocorrendo • Não é adequado para sistemas com várias baterias 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência geral • Necessidade de mais área de painel solar devido às perdas de BCRs e BDRs • Necessidade de três blocos de controle eficientes para controlar a produção de energia • Problema com a alimentação das cargas de pulso de alta potência • Vários blocos de regulação 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência dos conversores DC / DC quando o barramento opera em modo não regulado • Nível de EMI mais alto do que BU com PPT • Necessidade de áreas maiores de painéis solares 	<ul style="list-style-type: none"> • Mais complexidade por causa do uso de três tipos diferentes de controladores / reguladores
APLICAÇÕES	<ul style="list-style-type: none"> • Missões LEO com perfis de alta potência de pico • Espaçonaves alimentadas por CA 	<ul style="list-style-type: none"> • Principalmente missões GEO • Grandes satélites de comunicação 	<ul style="list-style-type: none"> • Missão GEO com potência relativamente baixa em eclipse 	<ul style="list-style-type: none"> • Pequenos satélites compactos com relação "P_{Lmax} / massa" > 2,5

Fonte: Adaptado de Ley, Wittmann e Hallmann (2009) e Shekoofa e Karbasian (2013).

2.4.2 Topologias utilizadas em voo

Este tópico apresenta a relação das topologias utilizadas em voo de alguns satélites de grande, médio e pequeno porte, baseada em artigos publicados em congressos e disponíveis nas principais bases de dados.

A fim de comparar a aplicação dessas topologias com base em seus tipos de missão, foram investigados os EPS de 29 satélites de grande e médio porte e de 38 satélites de pequeno porte (nanosatélites). As informações coletadas encontram-se nas Tabela 2.5 e Tabela 2.6.

Entre os satélites de grande e médio porte, observa-se que 16 utilizam DET e 12 utilizam PPT. Quanto ao método de regulação de barramento em ordem decrescente tem-se 8 com Barramento Regulado, 7 com Barramento Não Regulado, 6 com Barramento Semi-regulado e 3 com Barramento Híbrido.

Entre os satélites de pequeno porte, a maioria utilizou topologia PPT, arquitetura de distribuição centralizada, 3 barramentos com tensões de 3,3 e 5 Volts e tensão de bateria de 4,2 Volts, 8,4 Volts e 12,6 Volts.

Tabela 2.5 - Topologias de EPS - satélites de grande e médio porte.

Missão/Satélite	Orbita	Eficiência	Complexidade	Confiabilidade	Potência [W]	Topologia	Método de Regulação
OUFTI-1	LEO	Média	Baixa	Alta	4.7	DET	BU
Φrsted	LEO	Média	Baixa	Alta	40	DET	BU
CHAMP	LEO	Média	Baixa	Alta	140	DET	BU
CryoSat	LEO	Média	Baixa	Alta	810	DET	BU
STRV-1 a/b	GTO	Média	Alta	Baixa	32	DET	BR
Meteosat	GEO	Média	Alta	Baixa	2000	DET	BR
GPS IIR	MEO	Média	Alta	Baixa	1050	DET	BR
SOHO	<i>INTERPLANETARY</i>	Média	Alta	Baixa	1500	DET	BR
SMART-1	<i>INTERPLANETARY</i>	Média	Alta	Baixa	1975	DET	BR
AdeSat	LEO	Alta	Baixa	Média	2.5	DET	BS
XTE	LEO	Alta	Baixa	Média	800	DET	BS
Ocean Sat	LEO	Alta	Baixa	Média	1700	DET	BS
Eurostar	GEO	Alta	Baixa	Média	3000	DET	BS
Alcatel	GEO	Alta	Baixa	Média	3000	DET	BS
CBERS-1	LEO	Média	Alta	Alta	1100	DET	BH
GMP	GEO	Média	Alta	Alta	2500	DET	BH
ENVISAT	LEO	Média	Alta	Alta	6750	DET	BH
OPTOS	LEO	Média	Média	Média	7.2	PPT	BU
Danish SAT	LEO	Média	Média	Média	10	PPT	BU
Radarsat-2	LEO	Média	Média	Média	2400	PPT	BU
Aalborg	LEO	Baixa	Alta	Baixa	10	PPT	BR
RosettaMarsExpress	<i>INTERPLANETARY</i>	Baixa	Alta	Baixa	1500	PPT	BR
Bepi-Colombo			Alta		14000	PPT	BS
Globalstar	LEO					PPT	

(continua)

Tabela 2.5 – Conclusão.

Missão/Satélite	Orbita	Eficiência	Complexidade	Confiabilidade	Potência [W]	Topologia	Método de Regulação
Venus Express						PPT	
Goce						PPT	
Swarm						PPT	
Lisa Pathfinder						PPT	BR
GAIA					1910	PPT	

Legenda: (BU) *Unregulated Bus*; (BR) *Fully Regulated Bus*; (BS) *Semi-regulated Bus*; e (BH) *Hybrid Bus*.

Fonte: Adaptado de Mourra (2010); Shekoofa e Karbasian (2013); Mourra (2012); Magalhães (2020).

Tabela 2.6 - Topologias de EPS - satélites de pequeno porte.

Missão/Satélite	Órbita	Tamanho	Potência [W]	Topologia	Método de Regulação	Tensão de Barramento Principal	Arquitetura Dist./Centr.	Números de Barramentos	Tensões Barramento secundário [V]	Tipo de Bateria	Tensão Bateria [V]
CUTE-I	LEO	1U	1.5	DET			Centralizada	3	5, 3.7bat, 3.3	Li-Ion	3.7
XI-IV		1U		DET			Centralizada	3	5		
XI-V		1U		DET			Centralizada	4	5, 3.8bat		3.8
AAUSAT 1		1U		MPPT	BU	6-8V	Centralizada	1	5	Li-Po	
QuakeSat		3U		DET			Centralizada	2	5, -5		
CUTE-1.7+APD I		2U		PPT			Centralizada	4	3.3,5, 6, 3.8Bat	Li-Ion	3.8
MEROPE		1U		PPT			Centralizada	5	5, -5, 6, 8, 5, 5		8
CP3		1U		PPT			Distribuída	6	3,3,3,3,3, 3.7bat		3.7
CP4		1U		PPT			Distribuída	7	3,3,3,3,3, 3.7bat		3.7
Delfi-C3		3U		DET			Distribuída	1	12		12
CompassOne		1U		PPT			Centralizada	3	3.3,5,5	Li-Po	
Hermes		1U		DET	BR BCDR		Distribuída	4	7.4, 7.4, 5, 3.3	Li-Ion	7.4
KySat		1U		PPT			Centralizada	3	12bat,5, 3.3	Li-Ion	12
AtmoCube		1U		DET			Centralizada	6	3.3, 5, 6, -6,- 100, 3.3		
e-st@r		1U		PPT			Centralizada	3	7.4bat, 5, 3.3		7.4
Goliat		1U		DET			Centralizada	>1	7.4bat, others		7.4
OuFTI-1		1U		DET			Centralizada	3	7.2bat, 3.3, 5		7.2
DICE 1		1.5U		PPT			Centralizada	3	7.2bat, 3.3, 5		7.2
Colony 1		3U		PPT			Centralizada	3	7.2bat, 3.3, 5		7.2
DTUSat-1		1U		MPPT	BR BCR / BDR		Distribuída	1	3.6	Li-Ion	
CUTE-1.7+APD II		3U		PPT			Centralizada	4	3.3, 5, 6, 7	Li-Ion	7.4
KySat II		1U		MPPT			Centralizada	4	2 - 3.3, 2 - 5	Li-Ion	3.7

(continua)

Tabela 2.6 – Conclusão.

Missão/Satélite	Órbita	Tamanho	Potência [W]	Topologia	Método de Regulação	Tensão de Barramento Principal	Arquitetura Dist./Centr.	Números de Barramentos	Tensões Barramento secundário [V]	Tipo de Bateria	Tensão Bateria [V]
AESP-14	LEO	1U		DET	BU	0 - 10.7V 6 - 8.2V	Centralizada	2	3.3, 5	Li-Ion	5
Aalto-1		3U		MPPT	BR BCR		Centralizada	3	3.3, 5, 12	Li-Po	12
Aalto-2		2U		MPPT	BR BCR		Centralizada	2	3.3, 5	Li-Ion	5
ISRASAT 1		1U		MPPT			Centralizada	3	3.3, 5, 8.4bat	Li-Ion	8.4
LEONIDAS		1.5U		PPT			Centralizada	4	3.3, 5, 5.4, 6.5	Li-Ion	
INSPIRESat-1		6U		MPPT			Centralizada	3	3.3, 5, 12	Li-Po	12
SRMSat-2		50kg ~ Cuboid		MPPT	BU	28V	Centralizada	5	3.3,5,5,12,12,28	Li-Ion	12
ESMO (European Student Moon Orbiter)		150kg - Cuboid		MPPT	BU		Centralizada	3	$I > 2 A$ $2A \geq I \geq 1 A$ $I < 1 A$	Li-Ion	
ESTCube-1		1U		MPPT			Centralizada	3	3.3,5 12	Li-Ion	12
CubeSTAR		2U		MPPT	BU		Distribuída	1	3	Li-Ion	
NANOSATC-BR1	LEO	1U									
NANOSATC-BR2	LEO	2U									
FloripaSat-1	LEO	1U		MPPT						Li-Ion	
ITASAT-1	LEO	6U	6 - 7	DET				3	3.3, 5, 12	Li-Ion	12
SERPENS	LEO	3U									5
SPORT		6U									12

Fonte: Adaptado de Burt (2011) e Kulu (2019).

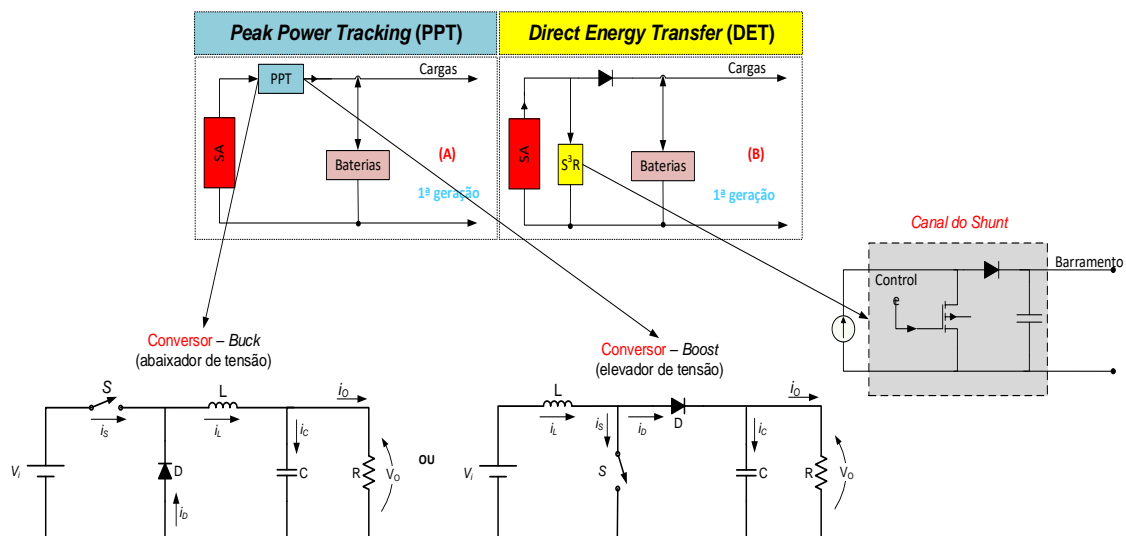
2.4.3 Estado da arte

Esta seção descreve a evolução das topologias, onde a compactação, agrupamento de componentes e modularização de topologias para EPS compõem o estado da arte.

2.4.3.1 Evolução das topologias de barramento não regulado

A **primeira geração** das topologias de barramento não regulado (Figura 2.10) faz uso de conversores *Buck* ou *Boost* para controlar a potência fornecida pelo painel solar com PPT e S^3R (Canal do *Shunt*) tornando o reuso limitado.

Figura 2.10 - Primeira geração das topologias de barramento não regulado.



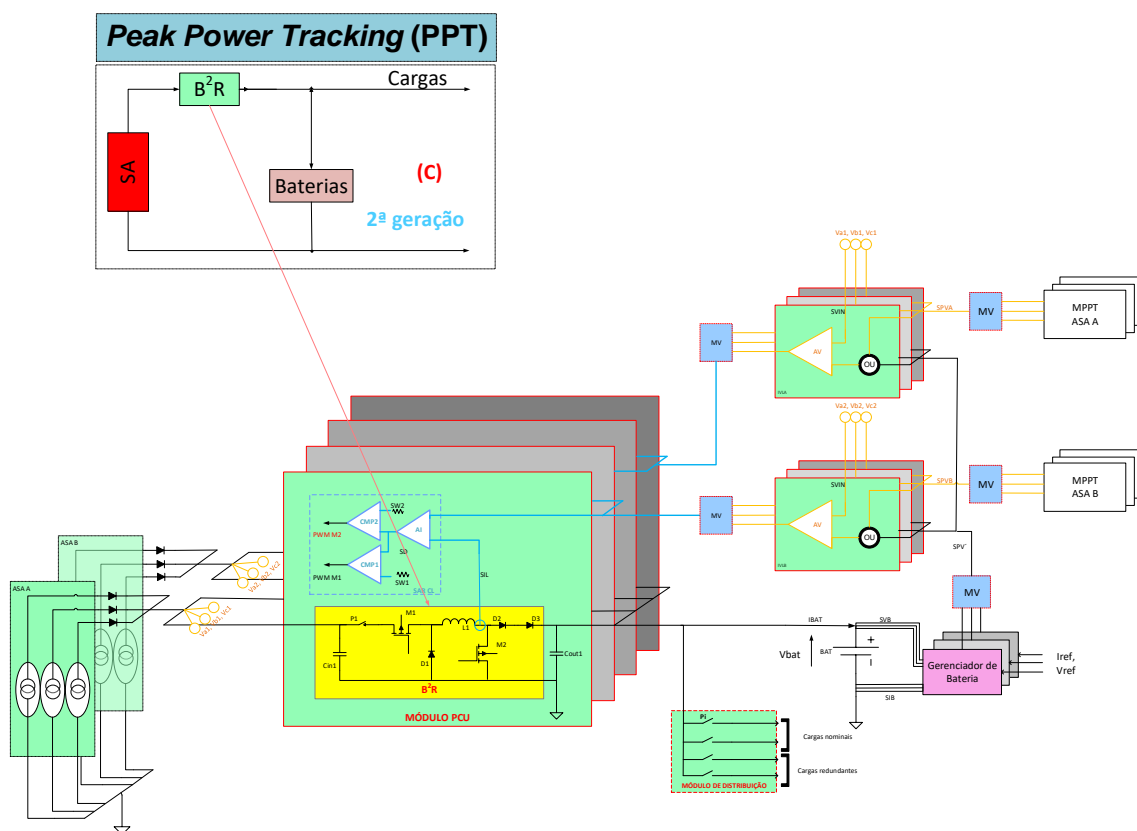
Fonte: Adaptado de Rashid (1999) e Freire (2009).

A **segunda geração** das topologias de barramento não regulado faz uso do conversor DC-DC *Buck-Boost Regulator* (B^2R). O conversor B^2R , apresentado por Mourra (2010), considera um barramento de potência não regulado com ou sem MPPT, conforme ilustrado na Figura 2.11. Na imagem, a bateria e o painel solar estão acoplados ao barramento principal e estão conectados individualmente ao módulo B^2R . No centro, há vários módulos B^2R , cada qual com seu painel solar e bateria, conectados ao barramento em configuração de

redundância a quente, sem ponto de falha simples. A falha ou perda de um módulo B²R implica a perda do painel solar e da bateria a ele conectado, e precisa ser considerado no orçamento de energia. Esta configuração de topologias B²R é simples, e pode ser adaptada para barramentos não regulados ou totalmente regulados por meio de circuitos de controle específicos, conforme apresentado na Figura 2.12. Esta configuração permite a inclusão de mais módulos conforme os requisitos de potência da missão.

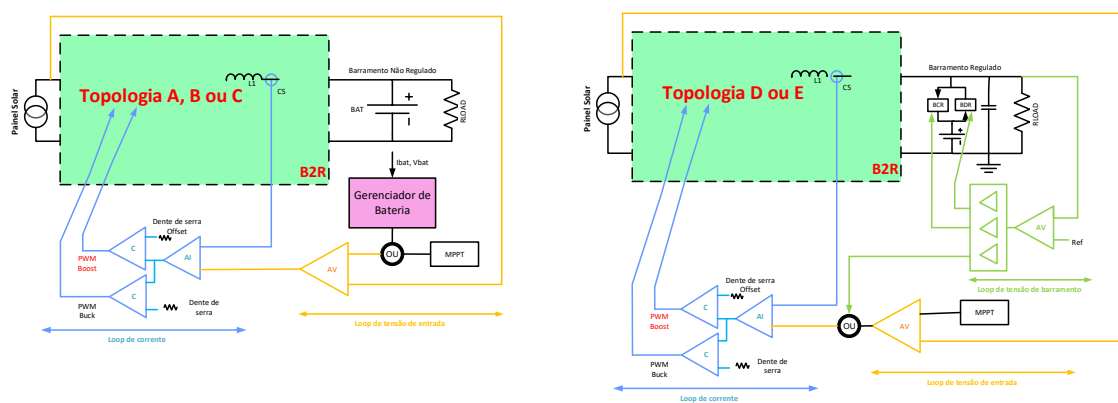
O uso de conversores B²R flexibiliza o reuso do projeto em outras missões, uma vez que pode ser utilizado em missões cuja tensão de painel solar seja maior que tensão de barramento (utilizando as ligações do conversor *Buck*) ou quanto a tensão de painel solar é menor que a tensão de barramento (utilizando as ligações do conversor *Boost*), sem a necessidade de adaptações.

Figura 2.11 - Segunda geração das topologias de barramento não regulado com *Buck-Boost Regulator* (B²R).



Fonte: Mourra (2010).

Figura 2.12 - Circuitos de controle para B²R.

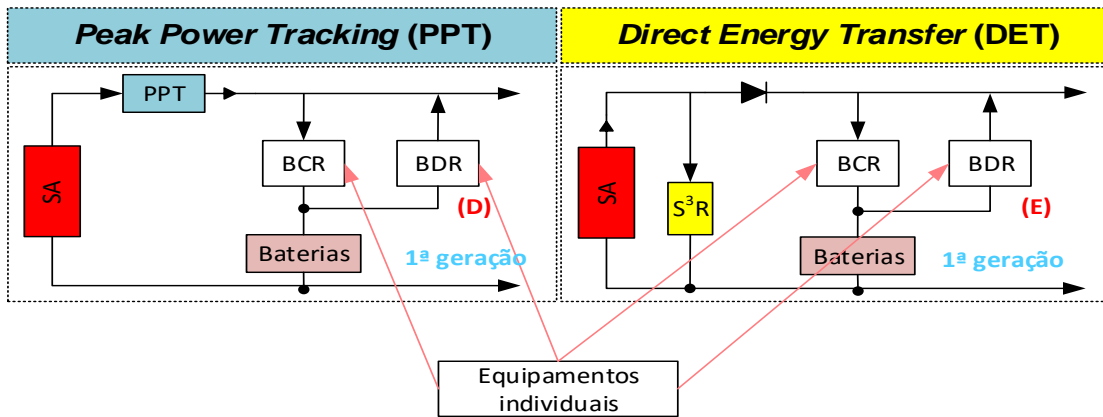


Fonte: Mourra (2010).

2.4.3.2 Evolução das topologias de barramento regulado

A **primeira geração** das topologias de barramento regulado faz uso de equipamentos individuais para o controle da carga (BCR) e descarga (BDR) da bateria, conforme a Figura 2.13.

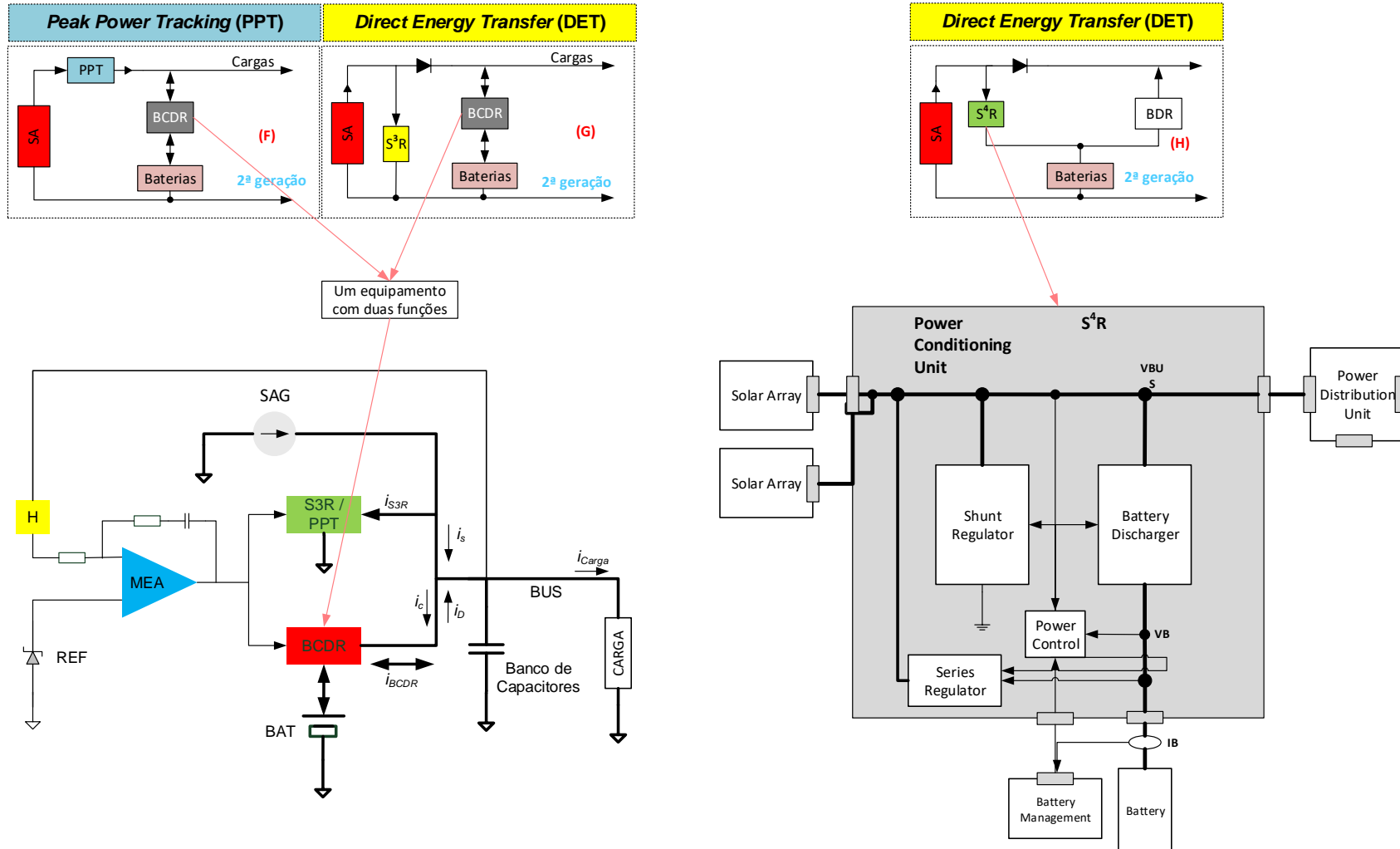
Figura 2.13 - Primeira geração das topologias de barramento regulado com BCR e BDR.



Fonte: Freire (2009).

A **segunda geração** das topologias de barramento regulado faz uso de conversores bidirecionais para controle da carga e descarga da bateria e S⁴R - *Sequential Switching Shunt Series Regulator* para controle de painel solar e carga da bateria, conforme a Figura 2.14. Magalhães (2020) mapeia as topologias de barramento de potência para satélite em órbita LEO e faz um comparativo entre as topologias de Barramento Totalmente Regulado controlado por três domínios e o Barramento Híbrido ou controlado por dois domínios, usando como critérios comparativos a redução de massa e a melhoria da eficiência. Ele apresenta o projeto do sistema de controle para carga e descarga da bateria, considerando o regulador de carga da bateria (BCR) e o regulador de descarga da bateria (BDR) como um módulo unificado, denominado BCDR (*Battery Charge and Discharge Regulator*), também conhecido como conversor bidirecional. Por fim, ele compara os resultados com as outras duas topologias estudadas, mostrando que a topologia bidirecional totalmente regulada, pode ser utilizada para missões de órbita baixa (LEO).

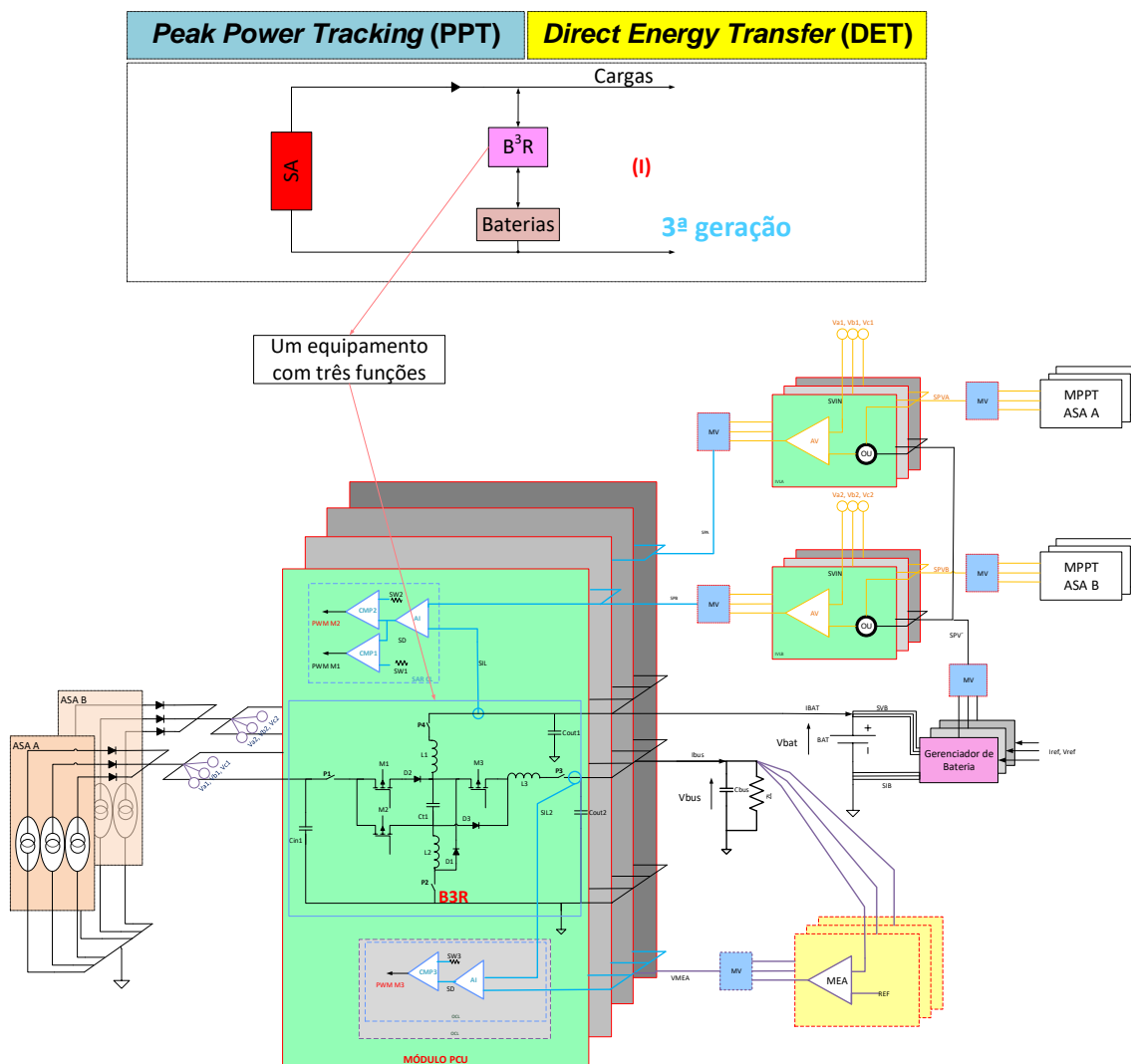
Figura 2.14 - Segunda geração das topologias de barramento regulado com conversor bidirecional e S⁴R.



Fonte: Sullivan (1977); Capel e Perol (2001); Magalhães (2020).

A **terceira geração** das topologias de barramento regulado faz uso do conversor DC-DC *Buck Buck-Boost Regulator* (**B³R**). O **B³R** é um conversor capaz, de em um único equipamento, controlar o painel solar (potência), a bateria (carga) e as cargas (descarga da bateria). O conversor DC-DC do tipo *Buck Buck-Boost Regulator* (**B³R**), apresentado por Mourra (2012), pode ser utilizado em um barramento de potência totalmente regulado com ou sem MPPT, conforme apresentado na Figura 2.15. Na imagem, a bateria, diferentemente do **B²R**, está desacoplada do barramento principal do painel solar e ambos estão conectados individualmente ao módulo **B³R**. No centro, há vários módulos **B³R**, cada qual com seu painel solar e bateria, conectados ao barramento em configuração de redundância a quente e controlados por um amplificador de erro. Esta configuração de topologias **B³R**, é simples e flexível, uma vez que permite a inclusão de novos módulos, conforme a demanda de potência do satélite. O **B³R**; é o que há de mais atual em topologias reguladas.

Figura 2.15 - Terceira geração das topologias de barramento regulado com conversor *Buck Buck-Boost Regulator* (B^3R).



Fonte: Mourra (2012).

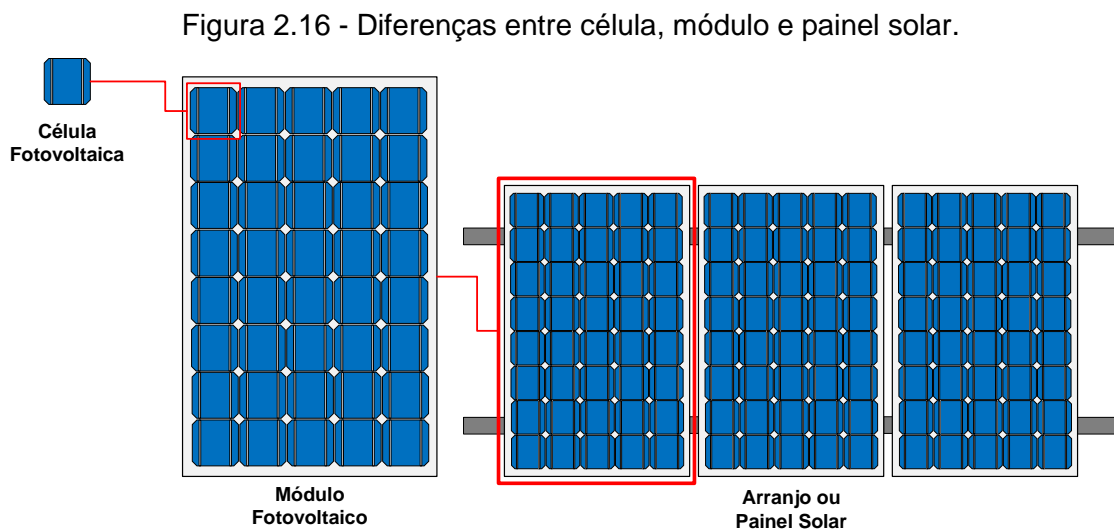
Este trabalho abordará as topologias DET e PPT ambas com barramento não regulado (Figura 2.8 A e B), destinadas a aplicações em pequenos satélites de baixa órbita, em que há limitações de massa e de custos.

2.5 Equipamentos do EPS

Esta seção descreve os equipamentos utilizados em subsistema de energia elétrica, detalhados a seguir.

2.5.1 Painel solar

Painéis Solares (*Solar Arrays – SAs*) são arranjos de células solares, conectadas eletricamente em circuitos (série-paralelo), e montadas numa matriz solar, a fim de se obter a tensão e a corrente de barramento necessárias para manter o satélite operacional durante toda a sua missão (RAUSCHENBACH, 1980; PATEL, 2005). Figura 2.16 ilustra as diferenças entre célula, módulo e painel solar.



Fonte: Adaptado de Moraes (2021).

O princípio de funcionamento das células solares fotovoltaicas é o efeito fotovoltaico, que consiste em converter a luz solar em energia elétrica.

O painel solar é o equipamento que possui a maior área em um satélite. Eles são formados por um substrato (matriz solar) sobre o qual são alocadas as células solares (FREIRE, 2009). A construção da matriz solar pode ser implementada de diferentes formas, conforme mencionado a seguir (PATEL, 2005):

- Painéis solares rígidos: neste método, as células solares são montadas ao substrato rígido de alumínio, semelhante ao favo de mel;
- Painéis solares flexíveis: são aqueles que admitem outra configuração, para lançamento, enrolado ou dobrado;
- Painéis solares fixados à própria estrutura do satélite (estáticos): as células solares são montadas diretamente no próprio corpo do satélite sem usar um substrato;
- Painéis solares tipo asa (*deployment*), com 3 ou mais asas: deixa livre a superfície do corpo do satélite, orientáveis com eixo único ou com mecanismos de vários ângulos de liberdade;
- Painel solar *origami*: há estudos de painéis em formato de *origami* (*origami array*), que consiste de uma matriz solar implantável de alto desempenho e alta potência de saída (JEON; FOOTDALE, 2018).

Os tipos de células solares, comumente utilizadas em painéis solares de satélites artificiais são:

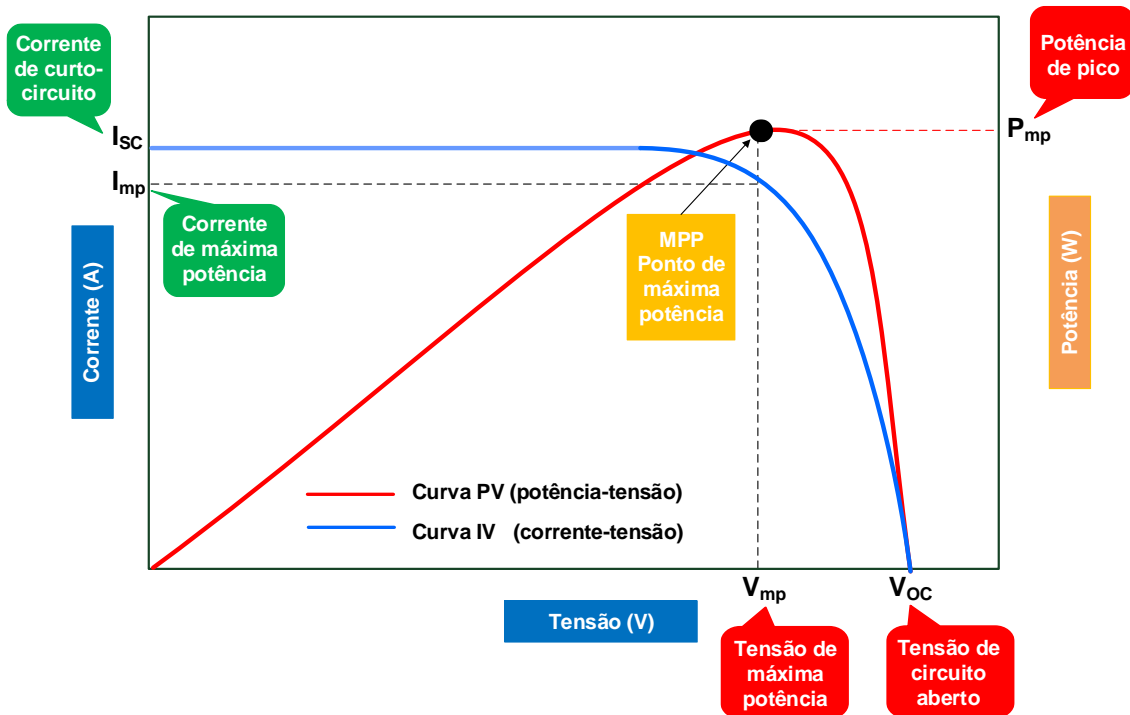
- a) Células solares de Silício monocristalino;
- b) Células solares de Arseneto de Gálio (AsGa);
- c) Células solares de tripla junção; e
- d) Células solares multijunção.

As curvas características de um painel solar relacionam a corrente e a tensão de saída (I-V) e a potência com a tensão de saída (P-V), conforme ilustrado na Figura 2.17, em outras palavras, medem a capacidade de geração do painel ao fornecer energia às cargas.

Nas curvas, é possível observar os parâmetros que o painel solar pode fornecer, tais como: corrente de curto-circuito (I_{sc}), corrente de máxima potência (I_{mp}),

tensão de circuito aberto (V_{oc}), tensão de máxima potência (V_{mp}), potência de máxima potência (P_{mp}) e o ponto de máxima potência (MPP).

Figura 2.17 - Curva característica de um painel solar.



Fonte: Adaptado de Canal Solar (2020).

O ponto em que o painel solar transfere a potência máxima é representado na figura como o ponto de coordenadas (I_{mp}) e (V_{mp}). Este é ponto de funcionamento ótimo logo, é desejável que o sistema se mantenham nesta região de operação. Para isso é comumente utilizados algoritmos rastreadores do ponto de potência máxima, como feito por Magalhães (2006).

As curvas do painel solar sofrem influências de fatores ambientais como temperatura e incidência de radiação. A temperatura altera os níveis de tensão do painel, deslocando a curva I-V para esquerda (eixo x) já a radiação altera o nível de corrente deslocando a curva IV para baixo (eixo y). Estes fatores ambientais causam, ao longo do tempo de vida do satélite, a degradação dos painéis solares. Baruel (2012) fez o estudo da variação da corrente fotogerada

nos painéis solares dos satélites do INPE, mostrando a degradação dos painéis solares ao longo do tempo de vida.

2.5.2 Baterias

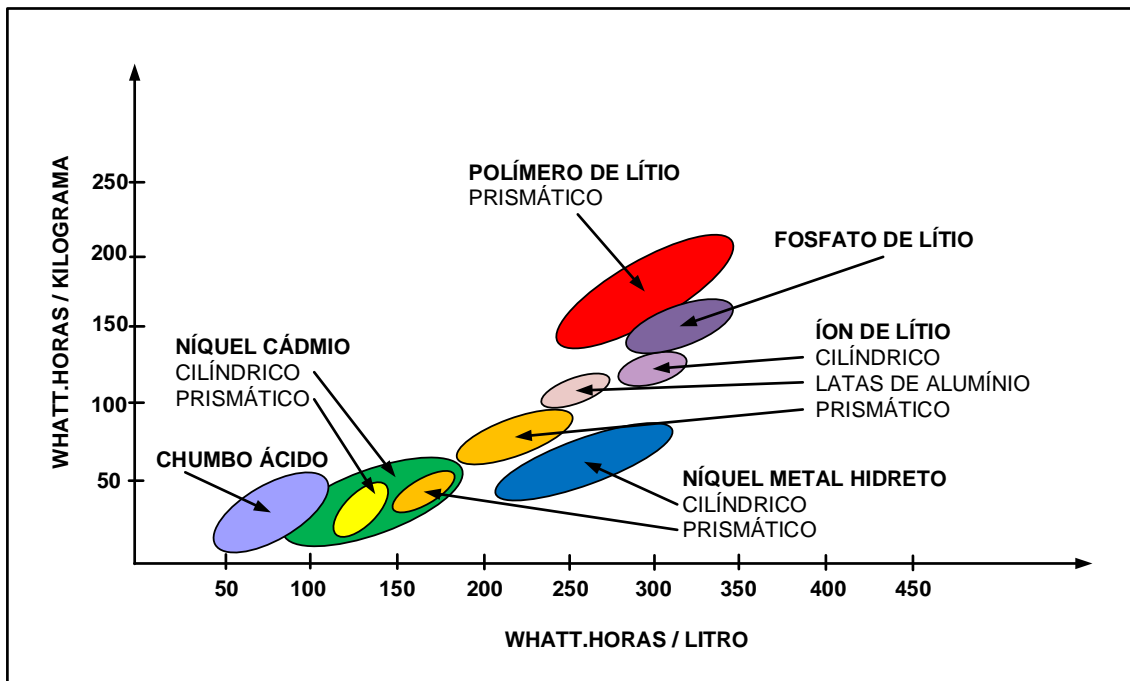
As baterias consistem em uma fonte auxiliar de energia, responsáveis por armazenar e fornecer energia às cargas, durante o período de *eclipse* ou pico de consumo. As baterias são divididas em primárias e secundárias e classificadas de acordo com sua eletroquímica (NASA, 2018). As baterias primárias convertem energia química em energia elétrica, mas não podem reverter essa conversão, de modo que não podem ser recarregadas. Já as baterias secundárias podem converter energia química em energia elétrica durante a descarga, e energia elétrica em energia química durante a carga, e são recarregáveis (WERTZ; LARSON, 1999). A recarga das baterias é feita com a energia excedente gerada pelo painel solar.

As principais baterias secundárias utilizadas em satélites são: Níquel-Cádmio (NiCd), Níquel-Hidrogênio (NiH₂), Níquel-Metal-Hidreto (NiMH), Lítio-Ion (Li-Ion) e Polímero de Lítio (LiPo) (NASA, 2018, PATEL, 2005; WERTZ; LARSON, 1999). A aplicação de cada tipo depende de parâmetros de desempenho, densidade de energia, vida útil e confiabilidade (NASA, 2018).

A definição do tipo de bateria a ser utilizada deve considerar as seguintes características: volume, massa, posição de operação, ambiente de operação, temperatura de operação, densidade de energia, tensão, capacidade (em Ampére.hora), ciclo de trabalho, limite de descarga (*Depth Of Discharge – DOD*) e tempo para recarga, tempo de missão, custo e confiabilidade da bateria.

A Figura 2.18 mostra a comparação das diferentes tecnologias de baterias em termos de densidade de energia volumétrica (Whatt.horas/litro) e gravimétrica (Whatt.horas/kg). Densidade de energia é a capacidade de energia que uma bateria pode armazenar. Na figura é possível ver que a bateria de Íon de Lítio é capaz armazenar cerca de 120 Wh/kg ou 300 Wh/l, isso significa esta bateria é capaz de armazenar uma grande quantidade de energia em na menor massa e no menor volume.

Figura 2.18 - Densidade de energia por tipo de bateria.



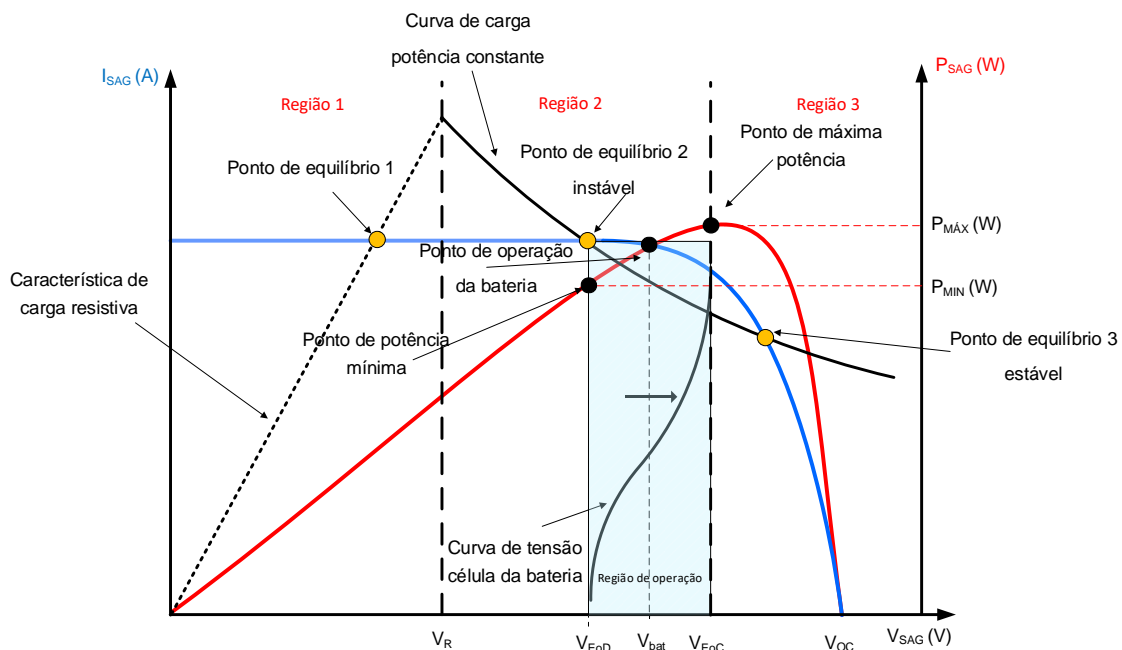
Fonte: Adaptado de NASA (2018).

2.5.2.1 Fenômeno de “*lock-up*”

Este fenômeno é intrínseco à topologia DET de barramento de potência não regulado, presente também na topologia de barramento híbrida, e está associado à ligação elétrica direta entre o painel solar, a bateria e aos conversores DCDC. O *lock-up* ou **travamento** é uma condição em que a bateria continua a fornecer energia para a carga durante os períodos de *Sunlight* (ou seja, quando a bateria deveria estar carregando até o fim de carga - *End-of-Charge* - EoC). Essa condição normalmente pode ocorrer quando uma carga (alta) excede a potência máxima do painel solar ou no momento em que o satélite está saindo do eclipse para o *Sunlight*, momento no qual a bateria se encontra em seu estado de tensão mínima também conhecido como ponto de fim de descarga (*End of Discharge* - EoD). Com a tensão do barramento travada com a tensão da bateria, a bateria continua a descarregar, fazendo com que a tensão do barramento caia na condição de subtensão. Normalmente, para evitar uma condição de subtensão do barramento, deve-se ter uma redução de carga no EPS. Essa redução efetivamente desliga as cargas até que a potência da carga

fique abaixo da potência disponível do painel solar, para se recuperar de uma condição de *lock-up*. Se não puder se recuperar, e se o painel solar não estiver sobredimensionado, o EPS irá operar com um balanço de energia negativo, e continuará descarregando a bateria, o que pode levar à perda da missão (SULLIVAN, 1989; CHO, 1990; FREIRE, 2009). Cho e Lee (1990) descrevem a questão da estabilidade do sistema, onde explica, não explicitamente, a causa do *lock-up*. Descrevem os pontos de equilíbrio do sistema e as regiões de trabalho, indicando a região de operação e os pontos de equilíbrio estável e instável do sistema. A Figura 2.19 ilustra este fenômeno, região de operação e os pontos de equilíbrio.

Figura 2.19 - Fenômeno de *lock-up*.



Fonte: Adaptado de Sullivan (1989); Cho (1990) e Freire (2009).

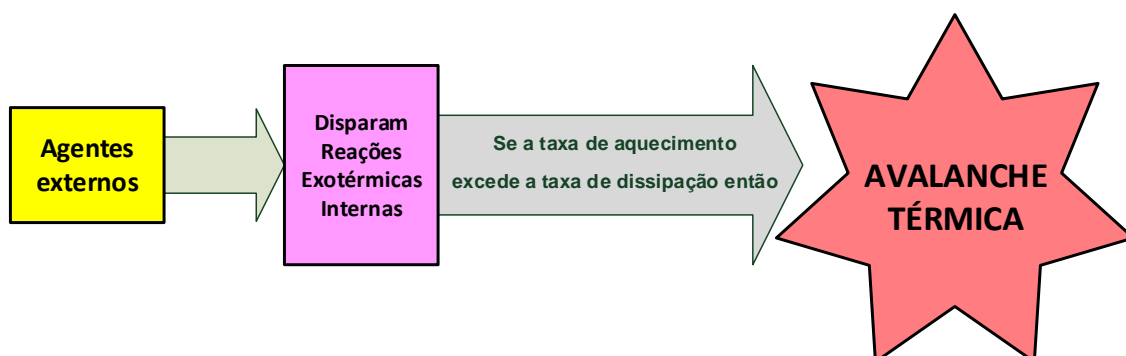
Para se evitar este problema é necessário superdimensionar o painel solar, de tal modo que a corrente fornecida pelo painel solar seja muito maior que a razão da potência de barramento (P_{bus}) pela tensão da bateria (V_{bat}), conforme a Equação 2.1, algo em torno de 18%-34%, o que acarreta um aumento de massa (SULLIVAN, 1989; FREIRE, 2009).

$$I_{SAG} \gg \frac{P_{bus}}{V_{bat}} \quad (2.1)$$

2.5.2.2 Avalanche térmica em baterias

Este fenômeno ocorre com o uso de carregadores de tensão constante em baterias Ni-Cd. Neste fenômeno, as células de baterias de *Nickel Cadmium* possuem um coeficiente negativo de variação de tensão com a temperatura; desse modo, quando a bateria se aproxima do seu final de carga e começa a esquentar, a tensão interna da célula diminui, o que faz aumentar a corrente de carga. Este fato, por sua vez, aumenta o calor interno na bateria e assim um círculo vicioso se inicia, podendo gerar uma falha catastrófica ou explosão da bateria, conforme ilustrado na Figura 2.20 (MAGALHÃES, 2012).

Figura 2.20 - Avalanche térmica em bateria.



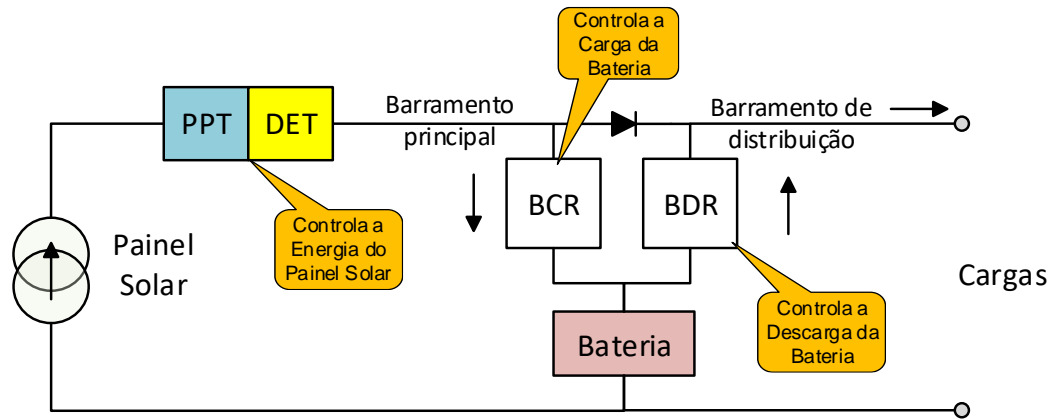
Fonte: Adaptado de Magalhães (2012).

2.5.3 Unidade de Condicionamento de Energia (PCU)

A unidade de condicionamento de energia (Figura 2.21) tem a função de controlar a energia que é gerada pelo painel solar, para evitar a sobrecarga e o aquecimento da bateria (WERTZ; LARSON, 1999).

Geralmente a PCU é composta pelos seguintes equipamentos: Conversores DC/DC, *Shunt*, BCR e BDR, os quais são descritos a seguir.

Figura 2.21 - Unidade de condicionamento de energia.



Fonte: Produção da autora.

2.5.3.1 Conversores DC/DC

Os conversores de corrente contínua DC/DC, (unidirecional/bidirecional) são circuitos eletrônicos que convertem a tensão ou corrente do barramento principal para diferentes níveis de tensão ou corrente com saída regulada (HART, 2012). São compostos por componentes semicondutores de potência (resistor, capacitor, indutor, MOSFET, etc.). As funções de um conversor são: converter uma tensão contínua em uma outra tensão de saída contínua com maior eficiência; regular a tensão de saída contra variações de carga; reduzir a ondulação da tensão de saída abaixo dos níveis requeridos; promover isolamento entre a entrada e a carga; proteger a fonte de entrada de interferências eletromagnéticas; e proteger contra falhas (RASHID,1999; FREIRE, 2009; MOREIRA, 2020).

Existem várias topologias para conversores DC/DC, os mais comuns, utilizados em EPS de satélites são os conversores: *Buck*, *Boost*, *Buck-Boost* e *Push-Pull*.

O conversor *Buck*, é um conversor abaixador, que produz uma tensão de saída menor que a tensão de entrada.

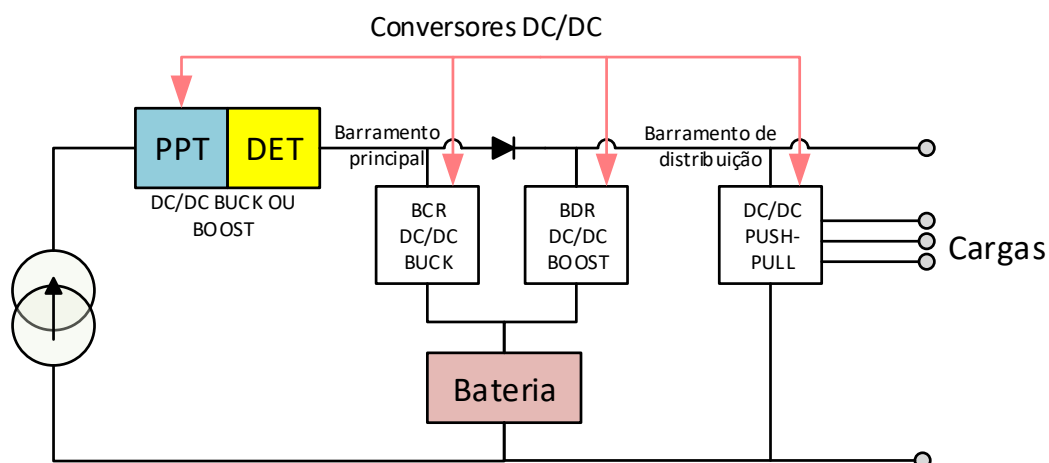
O conversor *Boost*, é um conversor elevador, produz uma tensão de saída maior que a tensão de entrada.

O conversor *Buck-Boost*, é formado a partir da combinação dos conversores *Buck* e *Boost*, com a inversão da polaridade da tensão de saída em relação à tensão de entrada, porém com níveis de tensão maior ou menor, de acordo com o ciclo de trabalho da chave.

O conversor *Push-Pull*, é elevador de tensão com entrada em corrente, utilizando um transformador para alterar o nível de tensão.

Em satélites os conversores DC/DC são utilizados para controlar a tensão de painel solar, para isolar a bateria do barramento e para gerar outras tensões para o barramento de distribuição (ALMEIDA, 2020). A Figura 2.22 ilustra o uso dos conversores DC/DC nos equipamentos da unidade de condicionamento de energia.

Figura 2.22 - Uso de conversores DC/DC dentro da PCU.



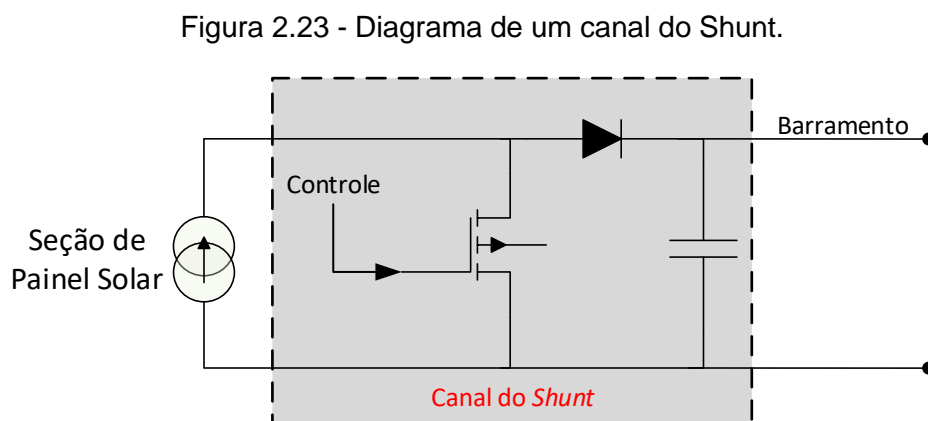
Fonte: Adaptado de Almeida (2020).

2.5.3.2 Regulador *Shunt*

O regulador *Shunt* é o componente principal da topologia DET. Sua função é regular e controlar a potência gerada pelo painel solar, disponibilizada no barramento principal, ao mesmo tempo em que alimenta os subsistemas, as cargas e carrega a bateria. O Regulador *Shunt* (SR - *Shunt Regulator*) permite a dissipação do excesso de energia, ao espaço, em forma de calor, com uma

dissipação de potência elétrica baixa no interior do satélite (FREIRE, 2009). Existem várias topologias de regulador *Shunt* para regular a tensão de barramento tais como: Regulador *Shunt* Linear, Regulador *Shunt* Linear Sequencial, Regulador *Shunt* Chaveado, Regulador *Shunt* Parcial, Regulador *Shunt* Chaveado Sequencial (S^3R - *Sequential Switching Shunt Regulator*), e o mais atual, o Regulador Série e *Shunt* Chaveado Sequencial (S^4R - *Sequential Switching Shunt Series Regulator*) (SULLIVAN, 1970; DONATO, 2007; GIANNIOTO, 2017).

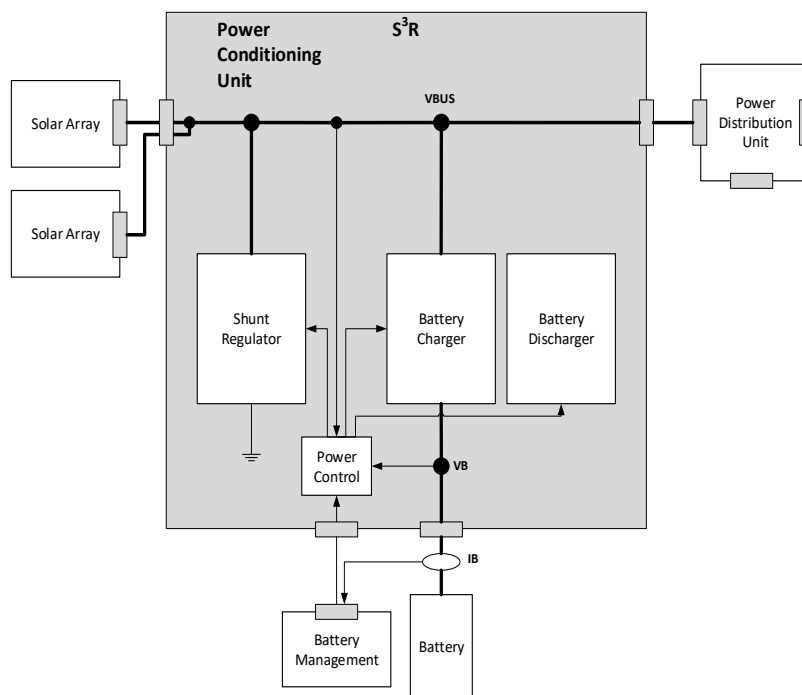
O *Shunt* pode ser dividido em canais, e cada canal é responsável por controlar uma parte do painel solar. A Figura 2.23 apresenta o diagrama de um canal do *Shunt*.



Fonte: Adaptado de Freire (2009).

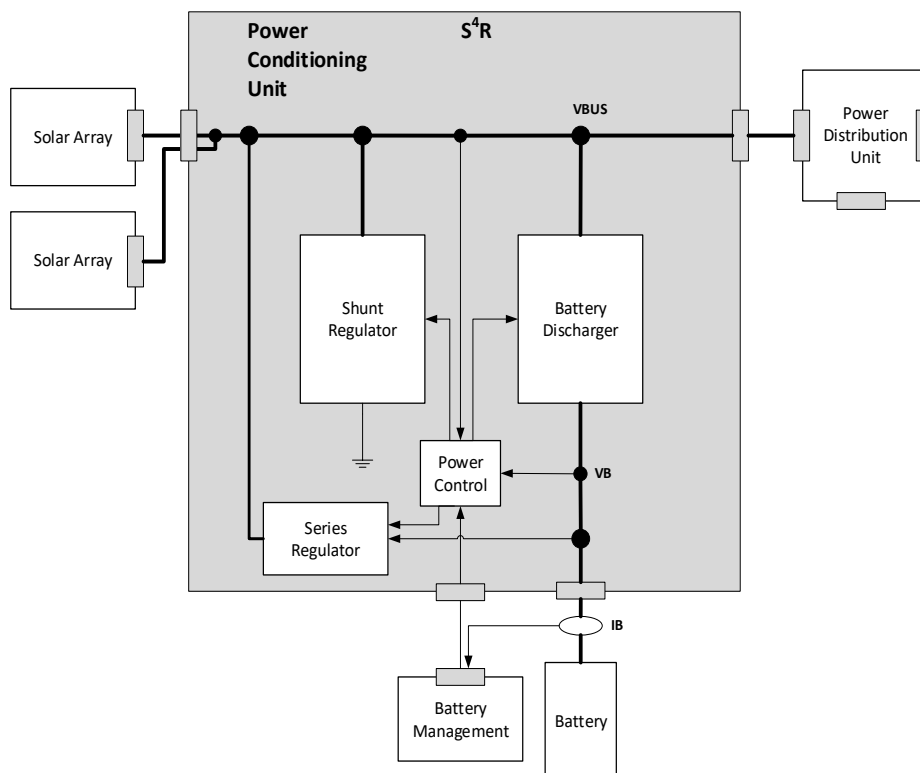
A topologia S^3R - *Sequential Switching Shunt Regulator*, apresentada na Figura 2.24 (SULLIVAN, 1977) foi introduzida pela Agência Espacial Europeia (ESA) na década de 70 com o objetivo de definir um padrão de topologia de barramento regulado para satélites de telecomunicações, evoluindo nos anos 90 para a topologia S^4R - *Sequential Switching Shunt Series Regulator* (Figura 2.25).

Figura 2.24 - Topologia S³R.



Fonte: Adaptado de Sullivan (1977) e Capel e Perol (2001).

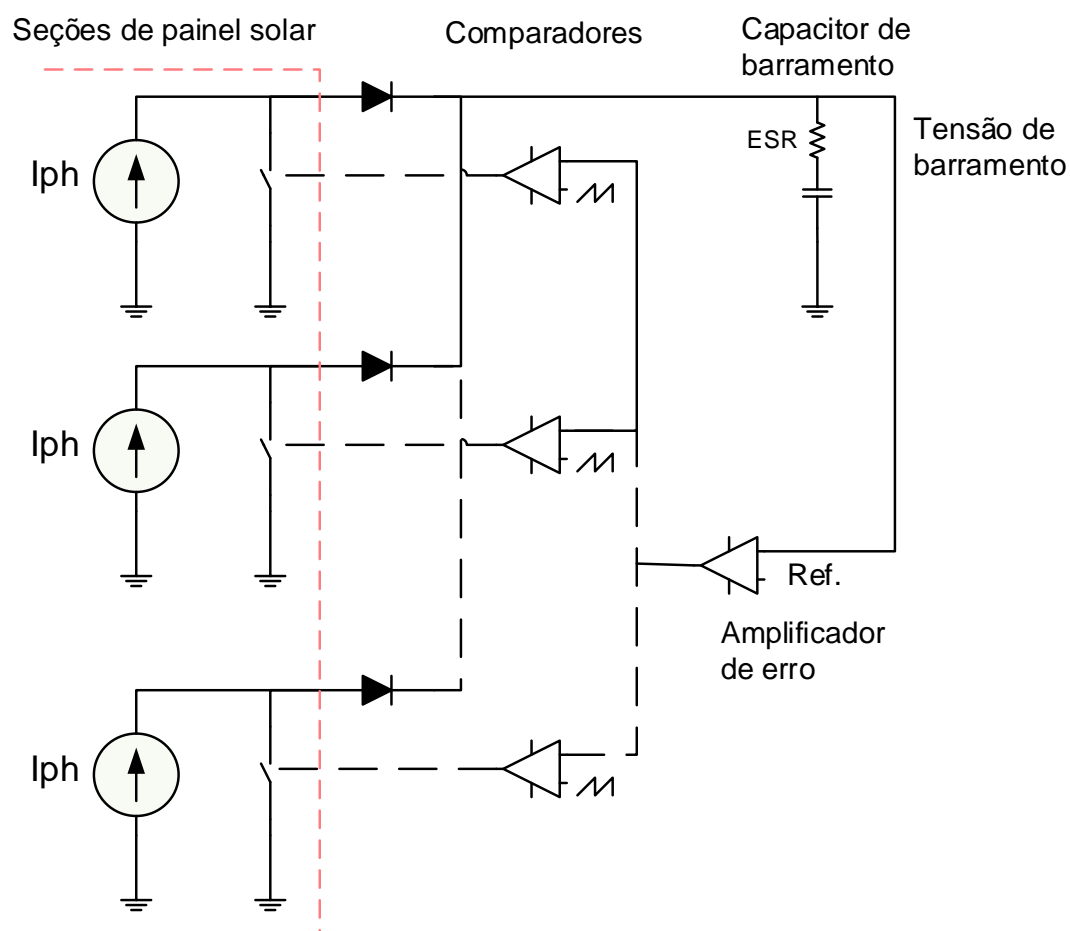
Figura 2.25 - Topologia S⁴R.



Fonte: Adaptado de Sullivan (1977) e Capel e Perol (2001).

Patil (1990) apresenta uma análise de controle para o S³R chamada *Sequential Shunt Unit* (SSU) (Figura 2.26), proposta para a Estação Espacial Internacional-ISS e a Plataforma Espacial.

Figura 2.26 - Sequential Shunt Unit – SSU.



Fonte: Adaptado de Patil (1990).

Capel e Perol (2001) apresentam uma avaliação comparativa de desempenho entre as duas topologias (S³R e S⁴R), na qual a topologia S³R é aplicada a missões em órbita geoestacionárias e a S⁴R para missões em órbitas baixas.

2.5.3.3 Regulador de Carga da Bateria (BCR)

O BCR (*Battery Charge Regulator*) é responsável por fornecer uma fonte de corrente constante para o carregamento da bateria, durante os períodos de *Sunlight*.

2.5.3.4 Regulador de Descarga da Bateria (BDR)

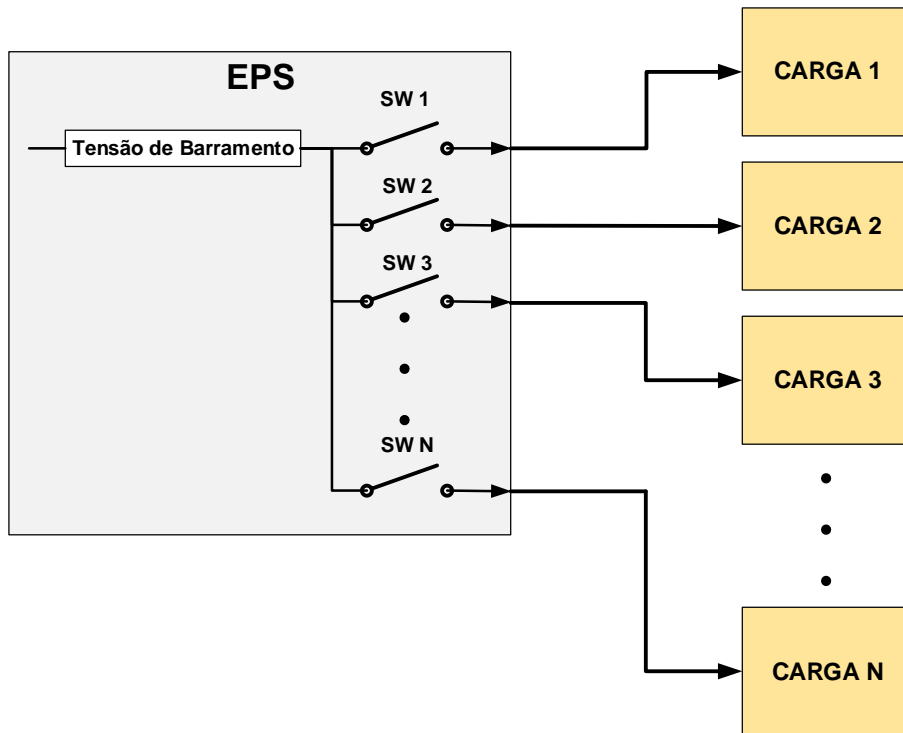
O BDR (*Battery Discharge Regulator*) é responsável pelo controle de descarga da bateria durante os períodos de eclipse e picos de consumo das cargas.

2.5.4 Unidade de Distribuição de Potência (PDU)

A Unidade de Distribuição de Potência tem a função de garantir que todas as cargas, sejam alimentadas. É composta por cabos, barramento de energia, interruptores e fusíveis para proteger as cargas contra falhas e decodificadores de comando para ligar ou desligar relés de cargas específicas (PATEL, 2005; WERTZ; LARSON, 1999).

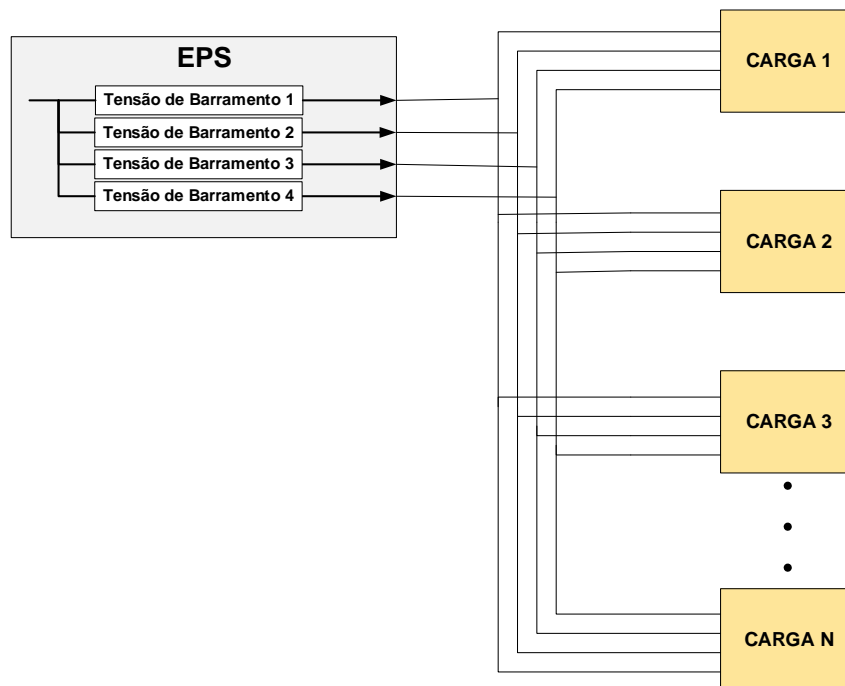
Como subsistemas e cargas úteis trabalham com tensões diferenciadas, o nível de tensão de entrada pode ser maior, menor ou inverso da tensão do barramento principal. Neste caso de níveis de tensão secundários diferentes, será necessário o uso de conversores DC-DC no barramento de distribuição, para elevar ou diminuir o nível da tensão. Este condicionamento pode ser feito por dois métodos: centralizados ou descentralizados, dependendo da localização dos conversores. Nos sistemas de distribuição descentralizada (Figura 2.27) os conversores estão alocados em cada carga separadamente, ao passo que a abordagem de distribuição centralizada (Figura 2.28) regula a energia para todas as cargas do satélite dentro do barramento principal. A distribuição descentralizada requer um barramento não regulado porque os conversores distribuídos regulam a potência. Uma vantagem do sistema centralizado é não ter a necessidade de projetar o EPS para diferentes aplicações (WERTZ; LARSON, 1999).

Figura 2.27 - Arquitetura de distribuição descentralizada.



Fonte: Adaptado de Burt (2011).

Figura 2.28 - Arquitetura de distribuição centralizada.



Fonte: Adaptado de Burt (2011).

2.5.4.1 Point-Of-Load (POL)

O Ponto de Regulação de Carga (*Point-Of-Load Regulation*), é um requisito, em *CubeSats*, com arquitetura EPS descentralizada. O POL consiste de um regulador de tensão, utilizado em cargas que necessitem de baixa tensão e alta corrente, mantendo um nível de tensão e corrente constante. O POL fica localizado próximo à carga e tem a função de fornecer uma tensão diferente da distribuída pelo EPS, elevando ou diminuindo a tensão de barramento. Conversores POL podem ser com indutor ou sem indutor, os chamados *Charge Pump* (bomba de carga). O conversor com indutor é o mais comum e o *Charge Pump* é indicado para aplicações de baixa potência. Há várias topologias para o POL sendo as principais: *Buck*, *Buck-Boost*, *Boost* e Inversor. (BROWN, 2002).

2.5.4.2 Medidas para proteção do barramento

O barramento principal assim como as cargas, deve ser protegido contra sobrecargas ou curtos-circuitos causados pelas cargas. Para isso, as linhas de distribuição podem ser protegidas por elementos passivos, como um fusível; ou por um dispositivo ativo, como um limitador de corrente eletrônico. Os dispositivos ativos são conhecidos como LCLs (*Latching Current Limiters*), FCLs (*Fold-back Current Limiters*) e SSPCs (*Solid-State Power Controllers*). (LEY; WITTMANN; HALLMANN, 2009; DIAS, 2019).

Diante do que foi pesquisado e revisado, identificou-se que as topologias DET e PPT em barramento não regulado, são as mais utilizadas em pequenos satélites. Como o estudo de caso deste trabalho é um pequeno satélite do tipo *CubeSat*, este trabalho irá modelar e simular estas topologias e compará-las quanto à eficiência. A modelagem das partes e a modelagem sistêmica de cada topologia é descrita no Capítulo 4.

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS PARA SUA SOLUÇÃO

Neste capítulo, pretende-se identificar como comparar e analisar a eficiência das topologias DET e PPT ambas com barramento não regulado para subsistemas de energia elétrica de satélites artificiais. Para isso, o problema será abordado por meio de modelagem, simulação, análise e comparação dos EPSs para o *CubeSat* RaioSat.

3.1 Formulação do problema

Neste trabalho as seguintes hipóteses serão adotadas para verificação das topologias conforme o critério e as 3 métricas definidas nas seções seguintes.

- a) Hipótese 1: A tensão de barramento influencia a eficiência do sistema.
- b) Hipótese 2: As eficiências do conversor e do S³R influenciam a eficiência do sistema.

3.2 Abordagens para sua solução

O problema será abordado por meio de modelagem, simulação, análise e comparação da eficiência dos EPSs para o *CubeSat* RaioSat.

3.2.1 Modelagem

Primeiramente será necessário desenvolver modelos computacionais para as topologias PPT e DET ambas com barramento não regulado, que representem o comportamento de um sistema EPS e que permita análises elétricas das topologias.

Os modelos deverão ser adaptáveis para outras missões.

3.2.2 Simulação

A simulação dos modelos das topologias PPT e DET ambas com barramento não regulado deverá ser realizada com o software *Matlab/Simulink*,

considerando sua interface gráfica e biblioteca de blocos funcionais que facilitam a implementação dos mesmos.

3.2.3 Análise e comparação

Para se realizar a análise e comparação da eficiência das topologias fez-se uso da Primeira Lei da Termodinâmica, balanço de energia, com a qual serão definidos o critério e as 3 métricas para verificação da eficiência do sistema, conforme a seguir.

3.2.3.1 Definição do critério e métricas para verificação da eficiência

As topologias serão comparadas e analisadas, segundo o critério da eficiência do sistema, que consiste em calcular a integral da potência dissipada ($P_1 - P_2$) que é igual à energia dissipada (ED) ao longo do tempo em órbita, conforme a Equação 3.1, em que P_1 é a potência disponível na saída do painel solar e P_2 é a potência entregue às cargas.

$$E_D = \int (P_1 - P_2) dt \quad (3.1)$$

A energia dissipada será medida e comparada conforme as seguintes métricas:

Primeira métrica (curto prazo): comparar a energia dissipada acumulada durante o *Sunlight*;

Segunda métrica (médio prazo): comparar a energia dissipada acumulada durante todo o ciclo (*Sunlight e eclipse*); e

Terceira métrica (longo prazo): comparar a média da energia dissipada acumulada durante 10 ciclos de *Sunlight e eclipse*.

4 MODELAGEM DAS TOPOLOGIAS DET E PPT

Este capítulo detalha os modelos elétricos das topologias DET e PPT ambas com barramento não regulado e apresenta os modelos elétricos e matemáticos utilizados para o painel solar, bloco PPT, bloco S³R, bateria e carga.

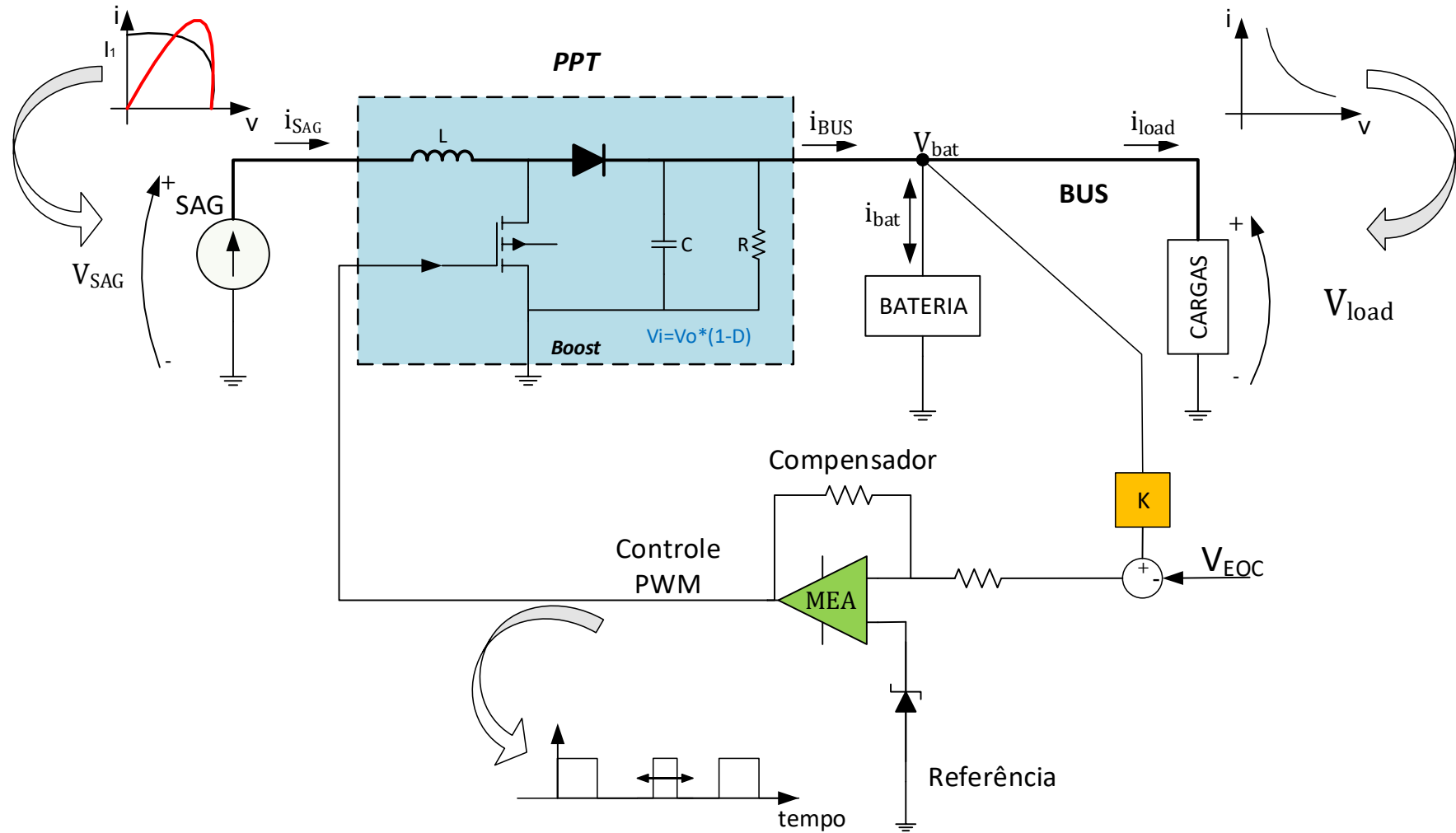
A modelagem é o ato de fazer uma descrição de um sistema, processo ou fenômeno em um meio, com uma linguagem baseada nas leis da natureza e em medidas dos seus parâmetros. Modelo é a descrição feita pela modelagem que pode ser física, matemática, lógica ou computacional (SOUZA; TRIVELATO, 2003).

4.1 Detalhamento do modelo elétrico do PPT em malha fechada

Tomando como referência a topologia genérica da Figura 2.8(A), vamos descrever as características internas de alguns equipamentos ali apresentados. O detalhamento é apresentado na Figura 4.1, em que se tem que o bloco PPT, composto por um conversor *Boost*, é responsável por controlar a corrente do barramento principal, direcionando a máxima energia disponível, para alimentar as cargas úteis e recarga da bateria. Para isso, a tensão da bateria é realimentada e comparada com a tensão de fim de carga (V_{EOC}). Ao sinal resultante desta comparação é aplicado um ganho (K) que passa por um controlador (*Main Error Amplifier* - MEA), que atua, por meio de Modulação por Largura de Pulso - PWM (*Pulse Width Modulation*), sobre uma chave (MOSFET), de tal modo que ela liga e desliga o painel solar da bateria, controlando a quantidade de corrente disponível no barramento principal e para carga da mesma.

O método de carga da bateria começa com o modo de operação inicial em que a corrente é, indiretamente, constante, devido à natureza do sistema; e, por este motivo, ela não é realimentada, via *feedback*, até que atinja a tensão de fim de carga.

Figura 4.1 - Detalhamento do modelo elétrico do PPT em malha fechada.

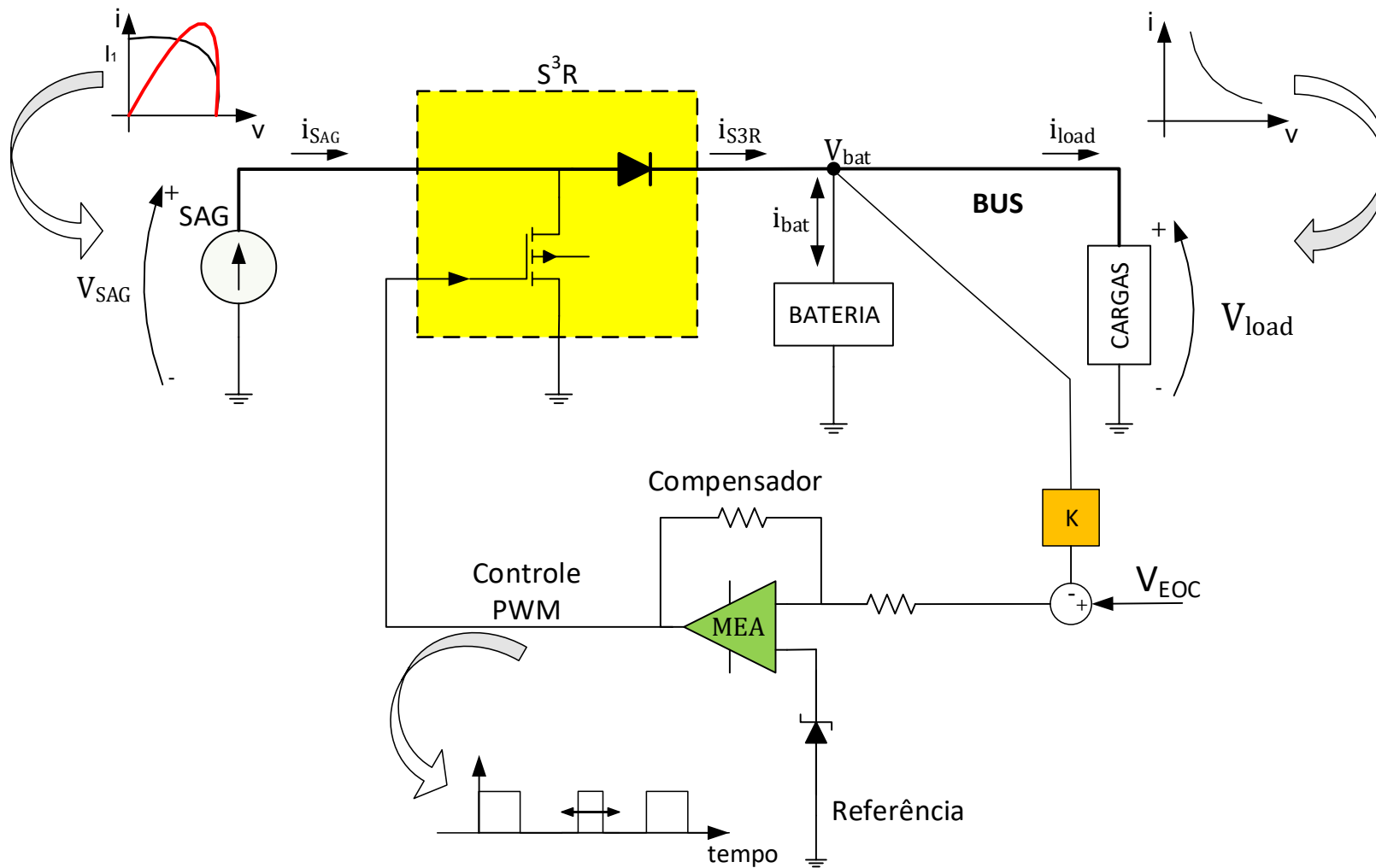


Fonte: Produção da autora.

4.2 Detalhamento do modelo elétrico do DET em malha fechada

Tomando como referência a topologia genérica da Figura 2.8(B), assim como no item anterior, vamos descrever as características internas de alguns equipamentos ali apresentados. O detalhamento é apresentado na Figura 4.2, em que o bloco S³R é responsável por controlar, durante o período de *Sunlight*, a energia do painel solar para alimentar as cargas úteis e recarga da bateria. Para isso, a tensão da bateria é realimentada e comparada com a tensão de fim de carga (V_{EOC}). Ao sinal resultante desta comparação é aplicado um ganho (K) que passa por um controlador MEA, que atua, por meio de um PWM, sobre uma chave (MOSFET), de tal modo que ela liga e desliga o painel solar ao barramento, controlando a quantidade de corrente disponível no barramento principal e para carga da bateria. Assim como no PPT, a corrente da bateria não é realimentada, pois indiretamente, é constante devido à natureza do sistema.

Figura 4.2 - Detalhamento do modelo elétrico do DET em malha fechada.



Fonte: Produção da autora.

Os detalhes da modelagem de cada bloco/equipamentos são descritos a seguir.

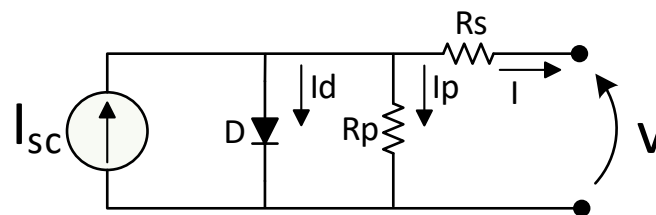
4.3 Modelo de painel solar

Os painéis solares são arranjos de células solares, conectadas eletricamente em circuitos (série-paralelo), e montadas a uma matriz solar, a fim de se obter a tensão e a corrente de barramento necessárias para manter o satélite operacional durante toda sua missão (RAUSCHENBACH, 1980; PATEL, 2005).

Os modelos para dimensionamento do painel solar descrevem a característica elétrica de células, módulos ou matriz.

Um circuito elétrico equivalente típico para uma célula solar é mostrado na Figura 4.3. A célula atua como uma fonte de corrente desviada por um diodo ideal; o resistor em série (R_s) representa a resistência interna ao fluxo de corrente, devida à resistividade do material. O resistor *Shunt* (R_p) determina a corrente de fuga através da junção. Na prática, as células fotovoltaicas são agrupadas em unidades maiores chamados módulos fotovoltaicos; e esses módulos são conectados em uma combinação série-paralela de modo que a tensão e a corrente necessárias sejam obtidas, formando assim o painel ou matriz solar.

Figura 4.3 - Modelo elétrico de célula solar com resistência em paralelo.



Fonte: Adaptado de Tsai e Siang (2008).

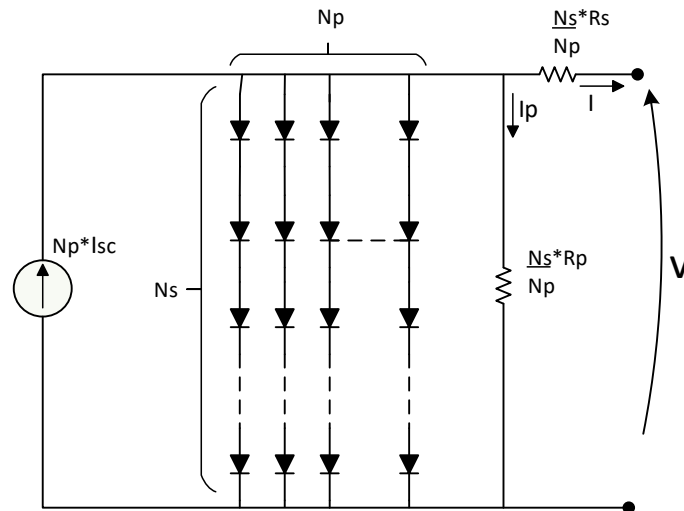
A corrente de saída para célula solar é calculada pela Equação 4.1.

$$I = I_{sc} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{A \cdot V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (4.1)$$

onde: I_{sc} é a corrente de curto-circuito, I_s é a corrente de saturação reversa do diodo de difusão, V é a tensão de saída do painel solar, N_s é o número de células em série, A é o fator de idealidade do diodo sendo $A \in [1,2]$, V_T é a tensão térmica, R_s é a resistência em série e R_p é a resistência em paralelo.

O circuito equivalente para o painel solar é mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Modelo elétrico do painel solar.



Fonte: Adaptado de Tsai e Siang (2008).

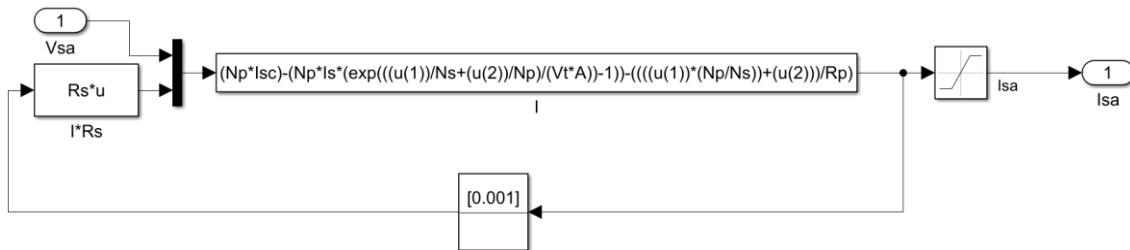
Para o painel solar, a corrente de saída é calculada pela Equação 4.2.

$$I = N_p \cdot I_{sc} - N_p \cdot I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V}{N_s} + \frac{I \cdot R_s}{N_p}\right) - 1 \right] - \frac{V \cdot N_p + I \cdot R_s}{R_p} \quad (4.2)$$

onde, N_p Número de módulos em paralelo.

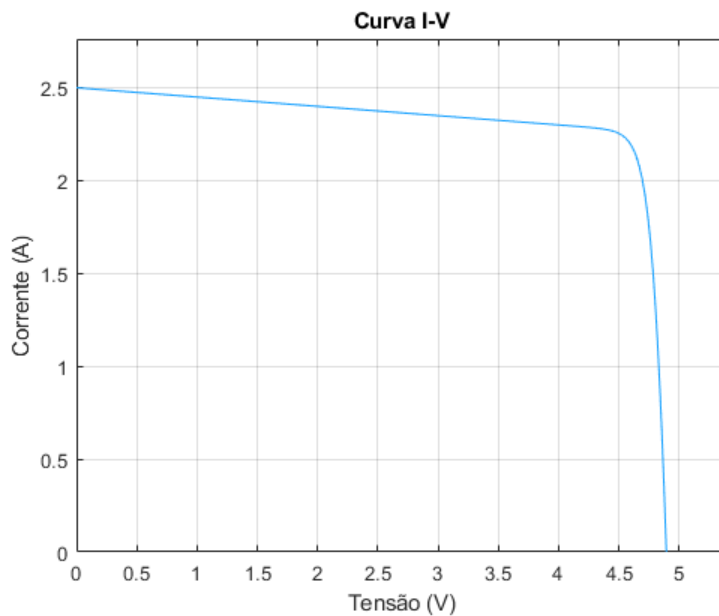
É possível obter a curva característica do painel solar (I-V), conforme visto na Seção 2, Figura 2.17, com o bloco de função no *Simulink*. Neste bloco é possível implementar o modelo matemático do painel solar (Equação 4.2), conforme apresentado na Figura 4.5 e verificá-lo na Figura 4.6.

Figura 4.5 - Modelo matemático do painel solar no *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

Figura 4.6 - Verificação do modelo (I-V) do painel solar no *Simulink*.

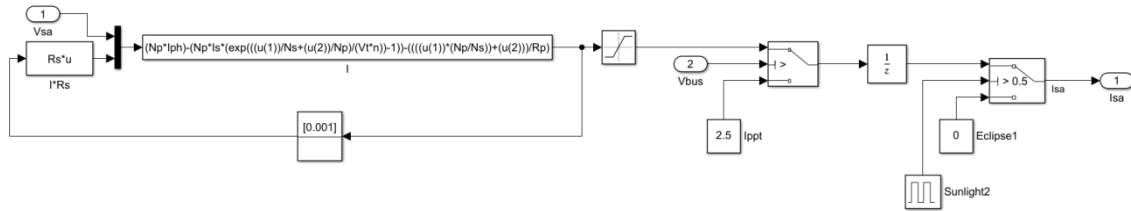


Fonte: Produção da autora.

Ao subsistema do painel solar foi adicionada uma chave simulando o *Sunlight* e o eclipse, e no painel solar da topologia PPT também foi incluído um bloco de função comutadora para que, enquanto a tensão do barramento não atinja a tensão de fim de carga da bateria, o mesmo envie a corrente do ponto de máxima potência. Portanto, a implementação do subsistema painel solar para a topologia

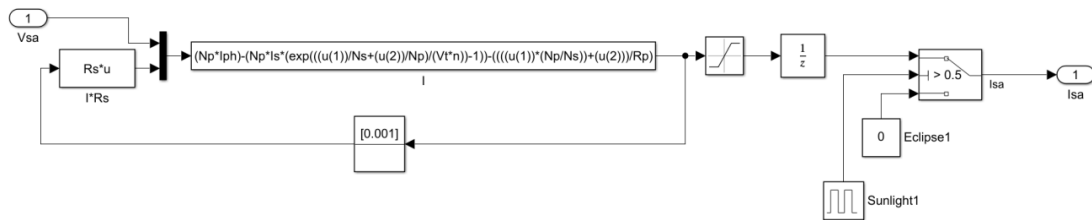
PPT é diferente dela na topologia DET. As Figuras Figura 4.7 e Figura 4.8 ilustram esta diferença.

Figura 4.7 - Modelo *Simulink* do painel solar na topologia PPT.



Fonte: Produção da autora.

Figura 4.8 - Modelo *Simulink* do painel solar na topologia DET.

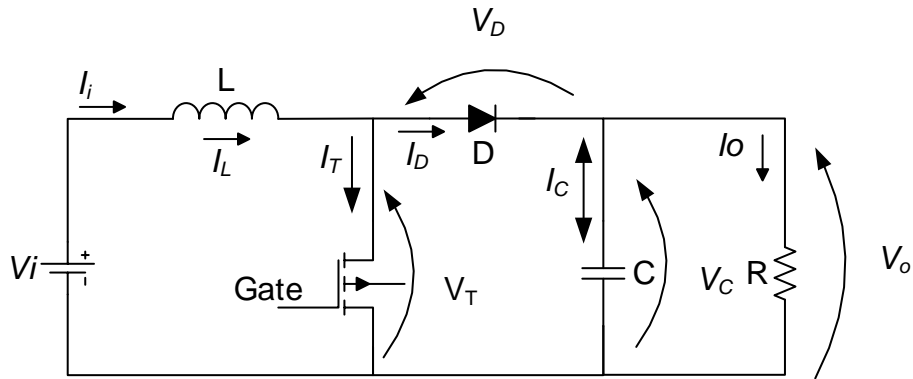


Fonte: Produção da autora.

4.4 Modelo do bloco PPT

A tensão do painel solar pode variar devido a fatores ambientais (temperatura e incidência de radiação), ao passo que a tensão do barramento principal é controlada para ser mantida constante em todas as condições de carga. Para isso, um conversor *Boost* foi utilizado, no bloco PPT. O conversor *Boost* é uma fonte chaveada cuja função, em geral, é elevar de tensão de entrada, com eficiência. O circuito elétrico do conversor *Boost* encontra-se na Figura 4.9. O conversor produz uma tensão de saída controlada por meio de técnicas de controle de modulação por largura de pulso (PWM) para controlar a relação de tensão CC média entre sua entrada e saída. Variando o *duty cycle* do conversor, consegue-se operar o painel solar próximo ao ponto de máxima potência (MPPT) (MOLINA, 2014; PRADHAN, 2018). Este conversor pode funcionar em modo contínuo (corrente no indutor positiva) ou descontínuo (corrente no indutor nula ou negativa). Este trabalho considera o modo de condução contínua.

Figura 4.9 - Modelo elétrico do bloco PPT– Conversor *Boost*.



Fonte: Adaptado de Prandhan e Panda (2018).

No modo de condução contínua, a corrente (I_L) sobre o indutor (L), quando o diodo (D) não está conduzindo (aberto), é calculada pela Equação 4.3.

$$I_L = \frac{(V_i - V_T) \cdot d \cdot T}{L} \quad (4.3)$$

Onde: V_i é a tensão de entrada e V_t é a tensão sobre o MOSFET, e T é o período. Quando o diodo é curto-circuitado, a corrente sobre o indutor é calculada pela Equação 4.4.

$$I_L = \frac{(V_o + V_D - V_i) \cdot (1 - d) \cdot T}{L} \quad (4.4)$$

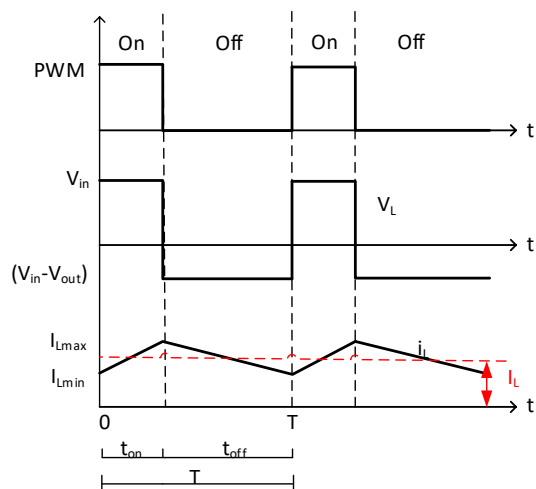
O ciclo de trabalho (d) do conversor *Boost* é calculado igualando as Equações 4.3 e 4.4 resultando na Equação 4.5.

$$V_D = V_T = 0 \quad \Rightarrow \quad d = \frac{V_o - V_i}{V_o} \quad \therefore \quad V_i = V_o \cdot (1 - d) \quad (4.5)$$

Onde: V_d é a tensão de diodo e V_o é a tensão de saída.

A Figura 4.10 mostra o comportamento do conversor *Boost*, na qual se pode ver a corrente no indutor, quando carregada (chave fechada) e descarregada (chave aberta).

Figura 4.10 - Comportamento do conversor *Boost* no modo de condução contínua.



Fonte: Adaptado de Prandhan e Panda (2018).

A eficiência do conversor (η_{PPT}) é a razão entre a potência de saída (P_{out}) e a potência de entrada (P_{in}), conforme a Equação 4.6.

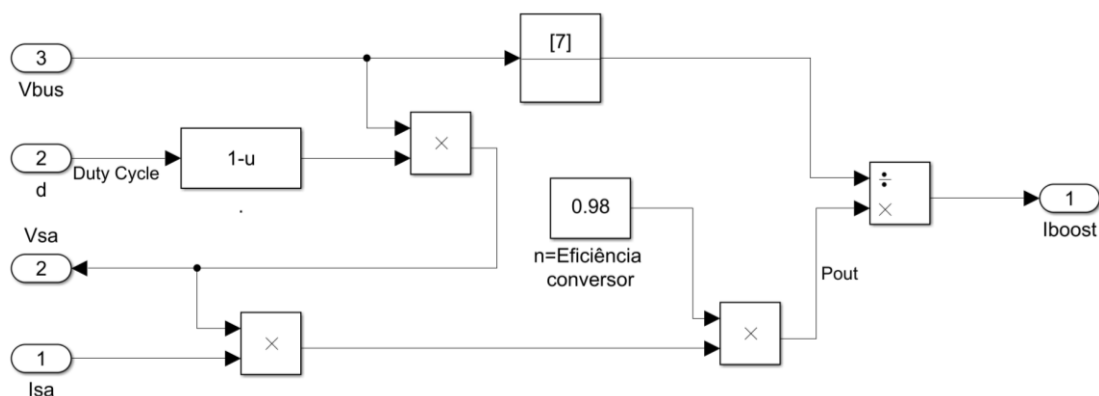
$$\eta_{PPT} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.6)$$

A corrente de saída (I_o) é calculado pela Equação 4.7.

$$I_{out} = \frac{\eta_{PPT} \cdot P_{in}}{V_{out}} \quad (4.7)$$

No Simulink, o bloco PPT foi implementado conforme a Figura 4.11, utilizando a função de transferência do conversor *Boost*.

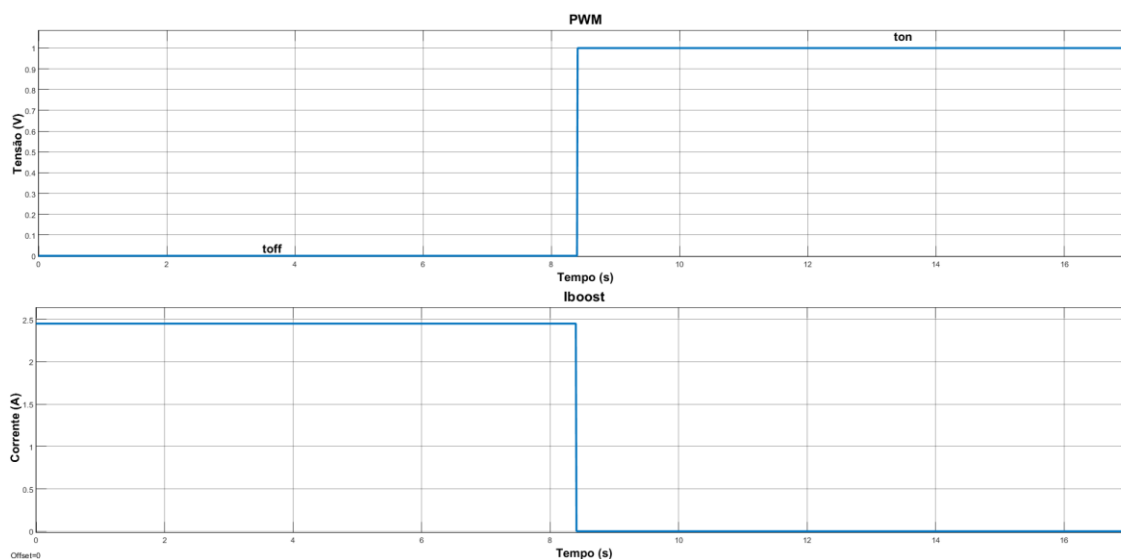
Figura 4.11 - Implementação do bloco PPT no *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 4.12 apresenta a verificação do modelo do conversor *Boost* no *Simulink*.

Figura 4.12 - Verificação do modelo do conversor *Boost* no *Simulink*.



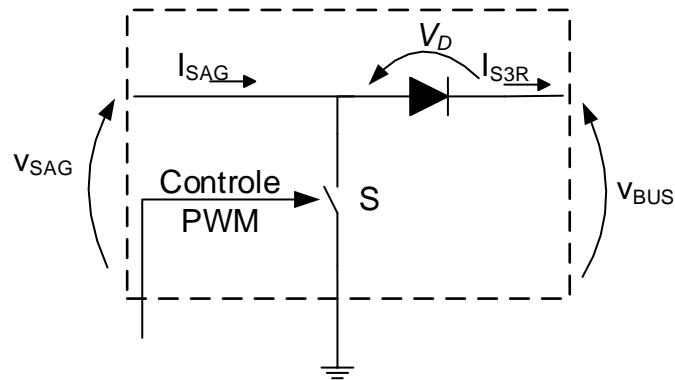
Fonte: Produção da autora.

4.5 Modelo do bloco S³R

O bloco S³R consiste de um regulador *Shunt* (Figura 4.13), que controla a energia disponibilizada pelo painel solar, dissipando o excesso ao espaço. O S³R utiliza o método de regulação baseado em modulação por largura de pulso, no qual o *duty cycle* atua no controle do chaveamento do painel solar de tal forma

que a sua corrente média seja o complemento necessário ao barramento principal (FREIRE, 2009).

Figura 4.13 - Modelo elétrico do bloco S³R.



Fonte: Adaptado de Freire (2009).

O controle por PWM consiste em comparar a tensão de controle com uma onda dente de serra de amplitude e frequência fixas. O resultado desta comparação é uma forma de onda pulsada com largura variável e com frequência fixa. Esta forma de onda é aplicada ao elemento de chaveamento. A porcentagem do seu período (T) com a chave ligada é chamada de **ciclo de trabalho** (*duty cycle* d), em que o *duty cycle* (d) é igual ao tempo ligado (T_{on}) dividido pelo período (T) conforme a Equação 4.8.

$$d = \frac{T_{on}}{T} \quad (4.8)$$

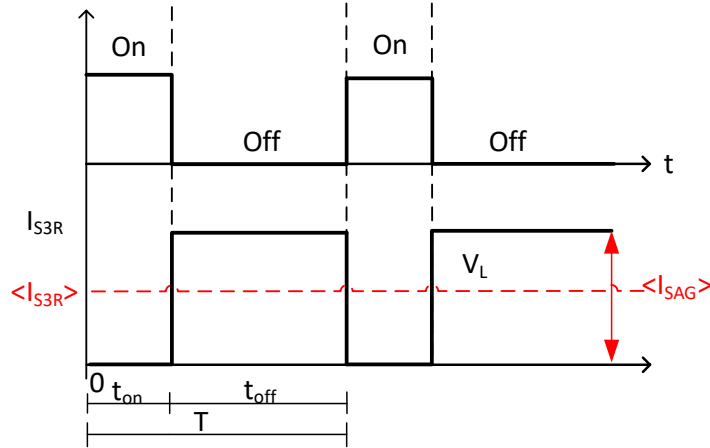
Desta forma, a porcentagem do seu período com a chave desligada (T_{off}) será dada pela Equação 4.9.

$$T_{off} = 1 - d \quad (4.9)$$

Quando a chave está fechada (*On*), ocorre o curto no painel solar (tensão do painel solar é zero), a corrente de curto do painel solar fica circulando entre a chave e o painel. Como não há fornecimento da corrente do painel solar para o barramento, a corrente I_{S3R} é nula. Quando a chave está aberta (*Off*), o painel

solar é conectado diretamente ao barramento, via diodo, fornecendo corrente ao mesmo. A Figura 4.14, ilustra este comportamento, na qual a corrente I_{S3R} é a componente chaveada e a corrente média $\langle I_{S3R} \rangle$ é a componente DC.

Figura 4.14 - Comportamento do S³R.



Fonte: Produção da autora.

A corrente média $\langle I_{S3R} \rangle$, é calculada conforme Equação 4.10.

$$\langle I_{S3R} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I_{S3R} dt \quad (4.10)$$

A corrente média é uma variação causada pelo *duty cycle* na corrente do painel solar; portanto, a corrente média é igual a corrente do painel solar vezes o *duty cycle* (Equação 4.11).

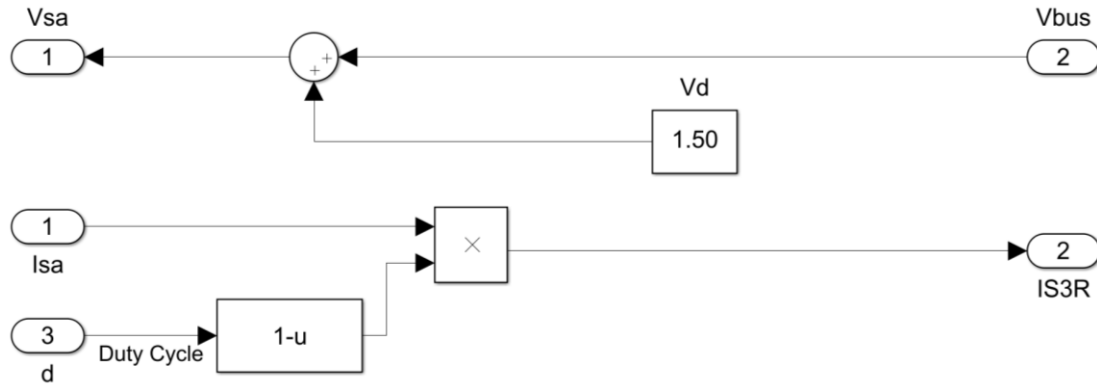
$$\langle I_{S3R} \rangle = (1 - d) \cdot I_{SAG} \quad (4.11)$$

A eficiência do S³R é a razão entre a potência de saída e a potência de entrada, sendo: a potência de entrada, a potência fornecida pelo painel solar (SAG - *Solar Array Generator*); e a potência de saída, a corrente de painel vezes a tensão do painel menos a tensão de *droop* do diodo, conforme a Equação 4.12.

$$\eta_{S3R} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{S3R} \cdot V_{bus}}{I_{SAG} \cdot V_{SAG}} = \frac{I_{SAG} \cdot V_{bus}}{I_{SAG} \cdot (V_{bus} + V_D)} = \frac{V_{bus}}{V_{bus} + V_D} \quad (4.12)$$

No *Simulink*, o bloco S³R, foi implementado conforme a Figura 4.15.

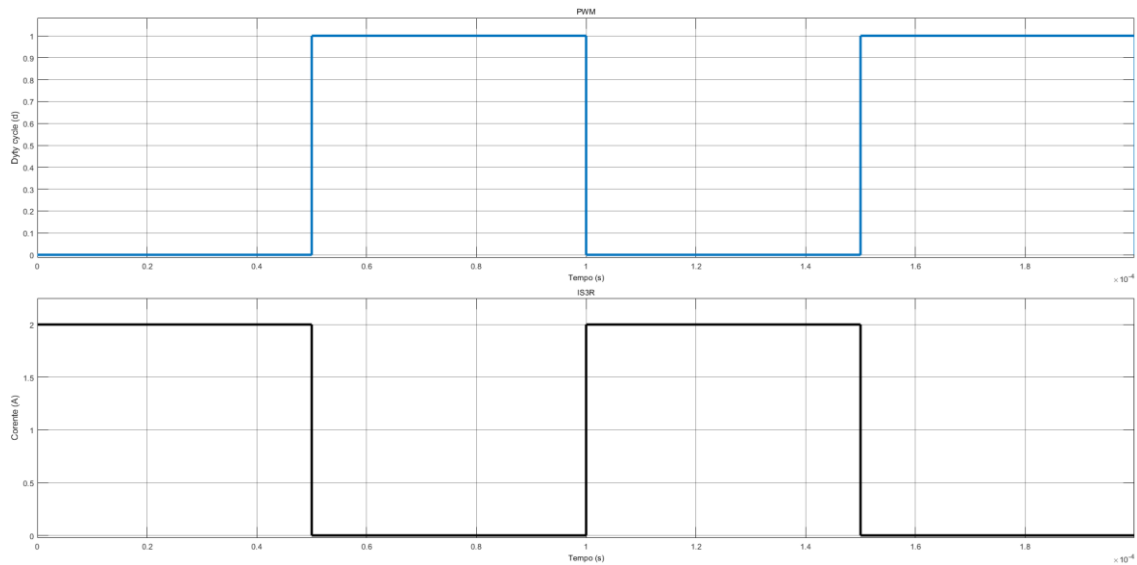
Figura 4.15 - Implementação do bloco S³R no *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 4.16 apresenta a verificação do modelo do S³R no *Simulink*.

Figura 4.16 - Verificação do modelo do S³R no *Simulink*.



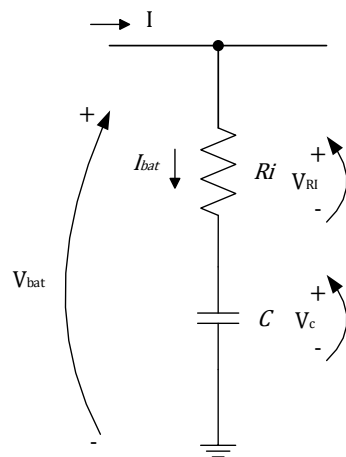
Fonte: Produção da autora.

4.6 Modelo de bateria

Na literatura, basicamente três tipos de modelos de bateria são relatados: experimental (HU X. e LI S., 2012), eletroquímico (HARTLEY et al., 2005; DAIGLE, 2016) e baseado em circuito elétrico (TREMBLAY, 2009; DUBARRY,

2009). Os modelos elétricos são comuns e úteis para representar o desempenho elétrico da bateria. O mais comum e utilizado neste trabalho, consiste de um circuito elétrico RC (resistor em série com capacitor), tal como representado na Figura 4.17, em que o resistor simula a resistência interna e o capacitor simula a força eletromotriz da bateria (MAGALHÃES, 2012).

Figura 4.17 - Modelo por circuito elétrico RC da Bateria.



Fonte: Produção da autora.

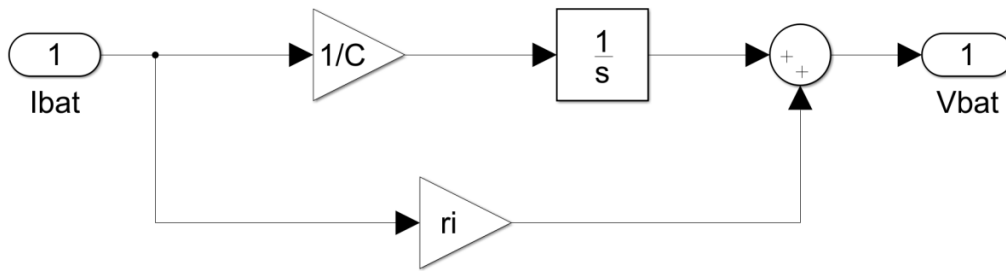
Aplicando-se a 1ª. Lei de *Kirchhoff* ao circuito equivalente do modelo elétrico da bateria apresentado na Figura 4.17, obtém-se a Equação 4.13:

$$V_{bat} = V_c + V_{Ri} = V_c + R_i \cdot I_{bat} \quad (4.13)$$

onde: V_{bat} é a tensão na bateria (V), V_c é a tensão no capacitor (V), V_{Ri} é a tensão na resistência interna (V) e R_i é a resistência interna (Ω).

O modelo da bateria, visto na Figura 4.18, é a representação da Equação 4.13, no *Simulink*.

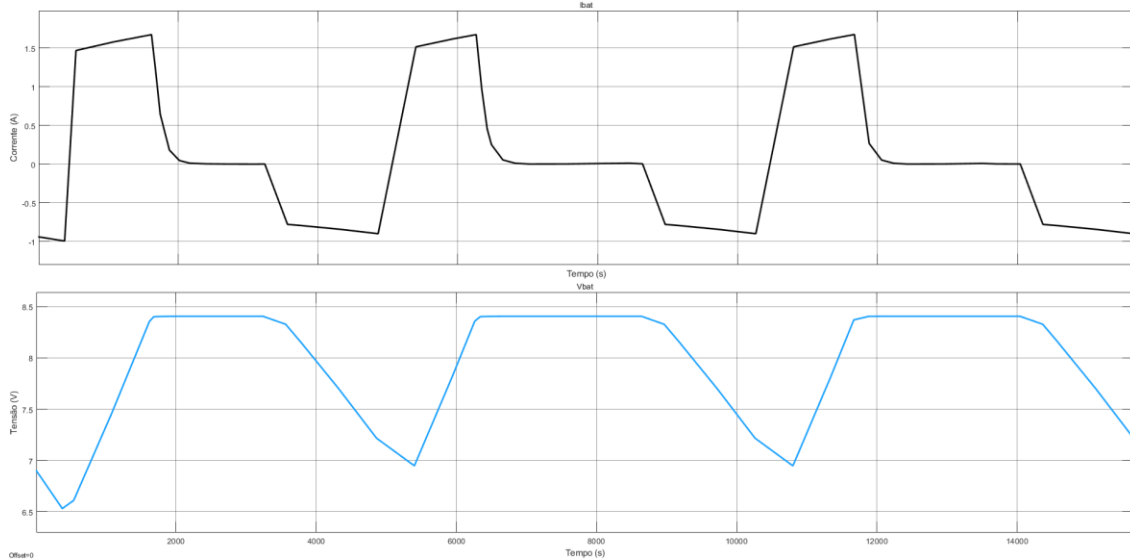
Figura 4.18 - Implementação do modelo da bateria no *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 4.19 mostra os gráficos do comportamento da bateria do *Simulink*.

Figura 4.19 - Verificação do modelo da bateria no *Simulink*.

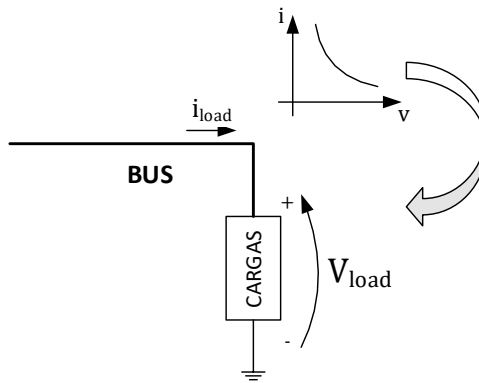


Fonte: Produção da autora.

4.7 Modelo da carga

O painel solar vê características de carga de potência constante Cho (1990), por este motivo, a carga é modelada com um conversor DCDC que é dispositivo de potência constante (Figura 4.20), por ter corrente e tensão de saída constante (regulada). A curva característica I-V do comportamento da carga é uma hipérbole, em que a tensão multiplicada pela corrente é igual à potência de entrada do conversor que, por sua vez, é igual a uma constante, como mostra a Equação 4.14.

Figura 4.20 - Modelo elétrico da carga.



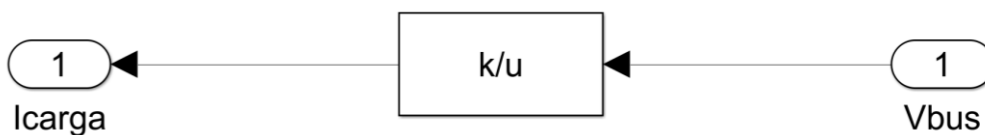
Fonte: Produção da autora.

$$v \cdot i = P_i = k \quad (4.14)$$

Onde, k é a potência de entrada do conversor.

A carga é implementada por um bloco de função, conforme a Figura 4.21.

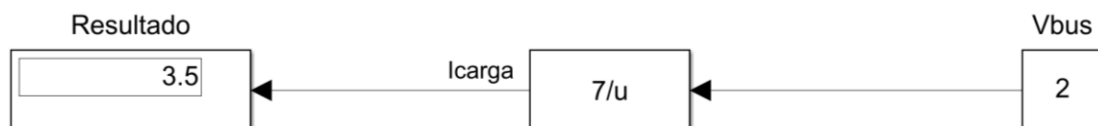
Figura 4.21 - Implementação do modelo da carga no *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

A verificação do modelo da carga considerou uma carga ($k = 7 \text{ w}$) e tensão de entrada ($V_{bus} = 2 \text{ V}$), o resultado é a metade do valor conforme ilustrado na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Verificação do modelo da carga no *Simulink*.

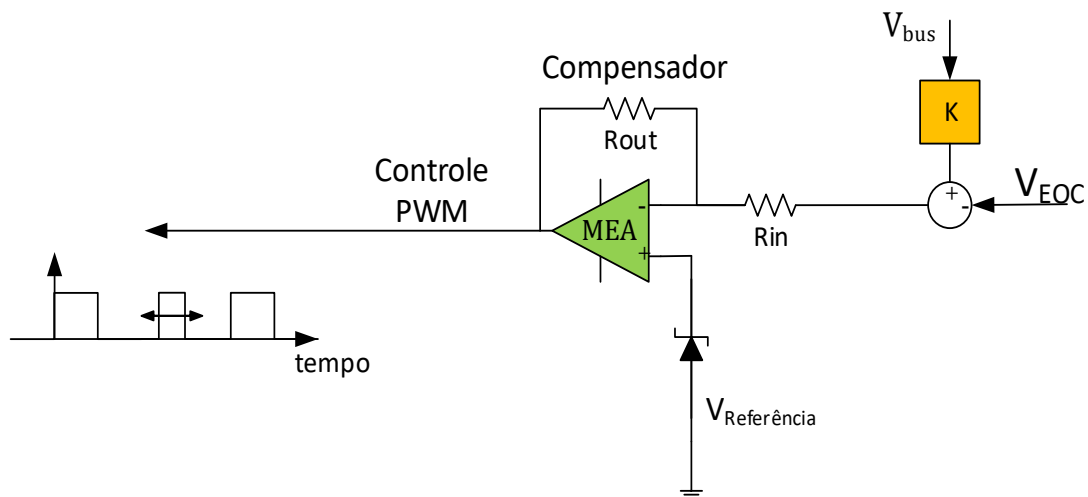


Fonte: Produção da autora.

4.8 Modelo do controle

A Técnica de controle do barramento consiste de uma realimentação de tensão com um amplificador de erro principal (*Main Error Amplifier* - MEA) e um diodo Zener ilustrado na Figura 4.23. Este amplificador amostra a tensão do barramento (V_{bus}), via um ganho K , e a compara com uma tensão de referência ($V_{Referência}$), neste caso a tensão de fim de carga da bateria (V_{EOC}). Este erro de tensão gerado pelo amplificador define o ciclo de trabalho (*duty cycle*) das chaves do S³R e do conversor *Boost*.

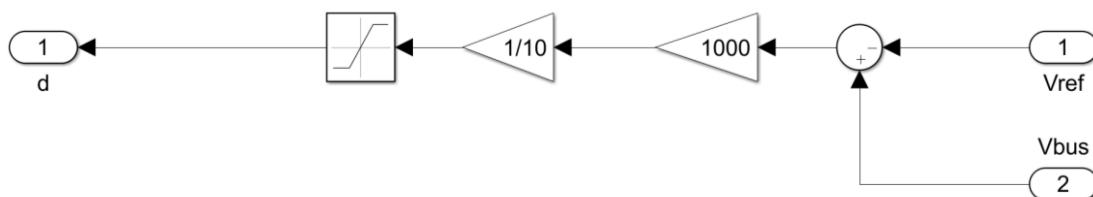
Figura 4.23 - Modelo elétrico do controle - MEA.



Fonte: Adaptado de Freire (2009).

No *Simulink* o modelo elétrico do controle foi implementado conforme visto na Figura 4.24.

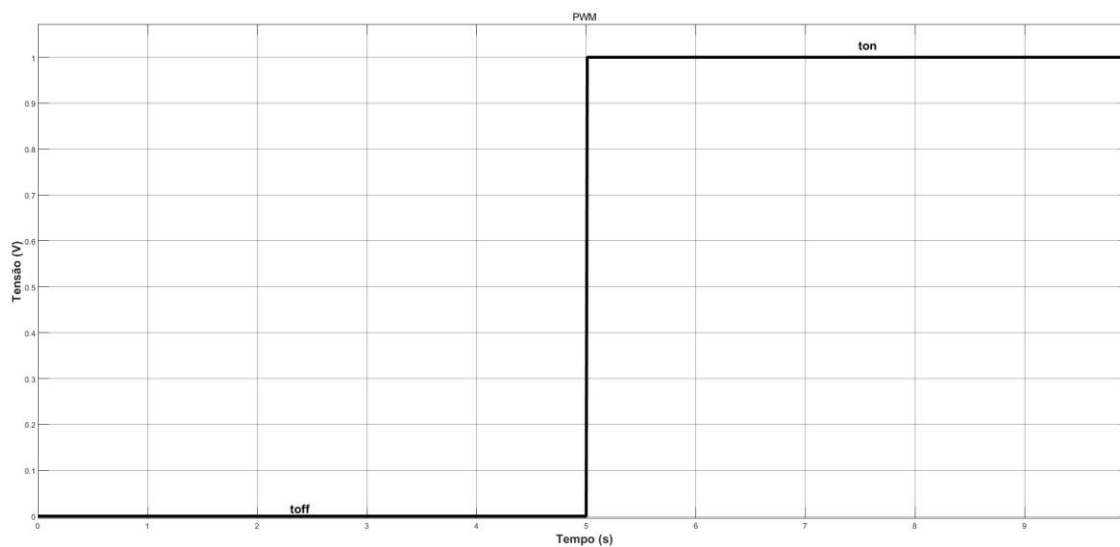
Figura 4.24 - Implementação do modelo elétrico do controle no *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

A verificação do modelo do controle no *Simulink* foi simulado com V_{bus} variando de 0 a 10 V e $V_{Referência}$ igual a 5 V. O resultado é visto na Figura 4.25.

Figura 4.25 - Verificação do modelo elétrico do controle – MEA no *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

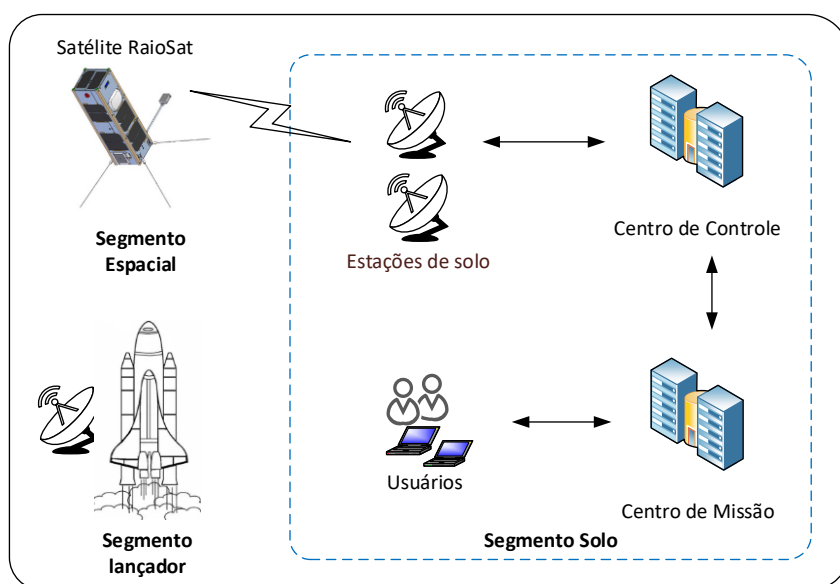
5 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta o estudo de caso, um *CubeSat* 3U para detecção de relâmpagos, o RaioSat, com seus requisitos globais e específicos ao EPS. A partir dos requisitos foram feitos os dimensionamentos teóricos, preliminares do painel solar e bateria para cada topologia. Os dados obtidos aqui são *inputs* para as simulações dos modelos em ambiente *Matlab/Simulink*, descritos no Capítulo 4. Este caso foi escolhido para contribuir com os estudos em andamento na Divisão de Pequenos Satélites do INPE.

5.1 Missão RaioSat

A missão RaioSat pretende, pela primeira vez, a integração de um sensor em um *CubeSat* para detecção de relâmpagos, com o desenvolvimento de tecnologia nacional para detecção de relâmpagos do espaço (JULIO FILHO et al. 2020). Os dados coletados irão complementar os dados existentes da Rede Brasileira de Detecção de Solo (BrasilDAT). A Figura 5.1 apresenta uma visão geral dos elementos da missão espacial, incluindo o segmento espacial, segmento terrestre e segmento lançador.

Figura 5.1 - Elementos da missão espacial RaioSat.



Fonte: Adaptado de Julio Filho et al. (2020).

5.1.1 Requisitos globais da missão RaioSat

Os requisitos globais da missão RaioSat, como dimensões, massa, consumo de energia, protocolos de comunicação, dados de bordo, determinação de atitude e sistema de controle, precisão de apontamento, órbita e tempo de vida da missão, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Requisitos globais da missão RaioSat.

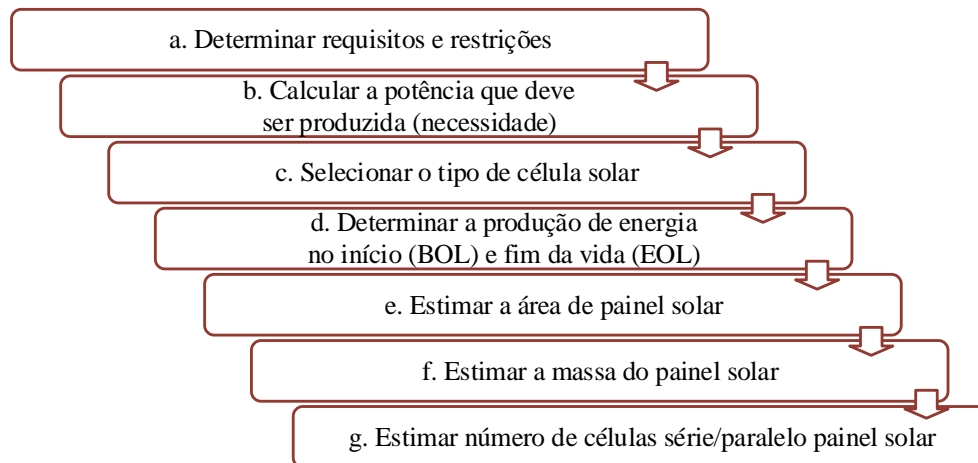
Item	Requisito
Dimensões Externas	CubeSat 3 U (10 x 10 x 30 cm)
Massa total máxima	3 kg
Total de potência de consumo	6.5 W (TBC)
Range de frequência (<i>uplink/downlink</i>)	430 – 440 MHz
Modulação	ASF ou FSK ou GFSK
Intervalo da taxa de dados	1200 – 9600 bps
Protocolo de camada de enlace de dados	AX.25
Armazenamento total de dados <i>onboard</i>	4 Giga (TBC) com redundância
Controle de Atitude	3 eixos
Precisão de apontamento	1 a 5° (TBC)
Campo de visão da câmera no nível da nuvem	10 km
Resolução espacial	80 m/px
Resolução temporal	500 fps
Órbita planejada	LEO
Altitude de órbita	650 Km
Inclinação da órbita	70°
Vida da missão	Em torno de 6 meses (outubro - março), temporada de chuva
Comprimento de onda desejado	777,4 nm
Sensibilidade da câmera	400 - 750 nm transmissão

Fonte: Adaptado de Julio Filho et al. (2020).

5.1.2 Dimensionamento do painel solar

Com base nas informações do item acima, fez-se um dimensionamento preliminar do painel solar para as topologias PPT e DET. O processo de dimensionamento do painel solar seguiu o esquema apresentado na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Processo para o *design* do painel solar.



Fonte: Adaptado de Wertz e Larson (1999).

Para configurar e dimensionar um painel solar, é preciso entender os tipos e características das células, problemas de *design* da matriz solar, cálculos de dimensionamento, configurações, regulação e ambientes de radiação e térmicos. Os principais problemas de projeto para painéis solares incluem configuração da espaçonave, nível de potência exigido (pico e média), temperaturas de operação, sombreamento, ambiente de radiação, iluminação ou orientação, vida útil da missão, área de painel, massa e custo (WERTZ; LARSON, 1999).

Seguindo o processo da Figura 5.2 temos:

a) Requisitos de potência

Os requisitos de alto nível adotados para o subsistema de energia elétrica do RaioSat são (JULIO FILHO et al., 2020):

- Fornecer uma fonte contínua de energia para as cargas durante a vida útil da missão;
- Controlar e distribuir a energia;
- Garantir o cumprimento das necessidades de consumo de energia, incluindo operações comuns e consumo de pico;

- Converter a energia em CA e regular de energia em CC (se necessário);
e
- Fornecer a telemetria e o status do sistema para determinar o desempenho.

O balanço de potência varia de acordo com a missão. As demandas de energia de fim de vida (EOL) devem ser reduzidas para compensar a degradação do painel solar (WERTZ; LARSON, 1999).

b) Power budget

A partir dos dados fornecidos pelos desenvolvedores e fabricantes dos módulos, pôde-se construir a Tabela 5.2, que apresenta uma estimativa de *Budget* de Potência para o RaioSat de acordo com os modos de operação.

Tabela 5.2 - Estimativa de *budget* de potência para o RaioSat.

Subsistema	Equipamento	Modos de Operação do RaioSat		
		<i>Standby</i> *	Nominal Não Imageando	Nominal Imageando
		Potência (mW)	Potência (mW)	Potência (mW)
EPS	Painel Solar	0	0	0
	PCDU	125	125	125
	Baterias	0	0	0
OBC	CPU	250	250	250
TT&C	Antena UHF	100	1000	1000
AOCS	Magnetotorque	1300	1300	1300
	Rodas de Reação	2700	2700	2700
PAYLOAD	Câmera NanoCam C1U	0	0	330
	Sensor PhotoBit PB	0	500	500
	MV13			
	GPS piNAV-L1	0	120	120
	Receptor VHF	0	100	100
Subtotal (mW)		4475	6095	6425
Total			6425 mW	

* Em modo *standby*, considera-se a potência igual a zero para os equipamentos desligados.

Fonte: Julio Filho et. al. (2020) e Paula (2019).

É possível observar na Tabela 5.2 que a necessidade de potência está em torno de 6,5 W no modo nominal com imagem.

Para o projeto preliminar do painel solar e bateria, do subsistema de energia elétrica, utilizaram-se os dados obtidos por meio de uma simulação com o *software* STK (*Systems Tool Kit*), que nos dá um período orbital de aproximadamente 94 minutos, *Sunlight* de 67 minutos e eclipse de 27 minutos. A Tabela 5.3 resume estas informações.

Tabela 5.3 - Informações sobre o período e a inclinação orbital.

ITEM	Requisito
Período orbital	94 minutos
Tempo de <i>Sunlight</i> (T_d)	67 minutos
Tempo de eclipse (T_e)	27 minutos
Mínimo ângulo de incidência solar (θ)	50°

Fonte: Adaptado de Paula (2019).

c) Seleção do tipo de célula solar

Foram analisadas três modelos de células solares: XTJ Prime (Spectrolab), CJ28 e CJ30 (CESI). A escolhida para o painel solar foi a XTJ Prime da Spectrolab, por apresentar maior eficiência, no caso 30,7%, dimensões de 3,97 x 6,91 cm, área de 26 cm² e baixa degradação (0,5%). A Tabela 5.4, apresenta as características da célula XTJ Prime.

Tabela 5.4 - Características da célula solar XTJ Prime30.

Parâmetro	Valor BOL
$Efficiency_{mp}$	30,7%
V_{oc} (V)	2,720
J_{sc} (mA/cm ²)	18,0
V_{mp} (V)	2,406
J_{mp} (mA/cm ²)	17,5

Fonte: Adaptado de *Datasheet* XTJ Prime da Spectrolab (2018).

d) Capacidade de potência produzida pelo painel solar

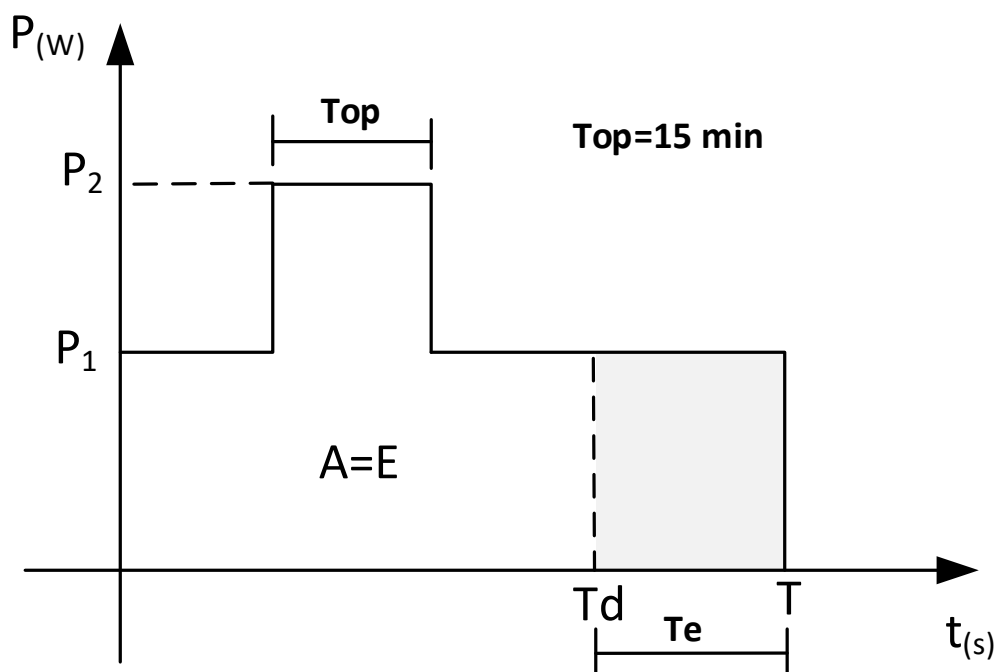
Para o cálculo da capacidade de potência que deverá ser produzida pelo painel solar, se faz necessário saber o perfil de operação e perfil de consumo do satélite. Para o estudo de caso em questão, construiu-se, a partir da Tabela 5.2, o consumo por modo de operação, apresentado na Tabela 5.5 que, por sua vez, nos dá o perfil de consumo apresentado na Figura 5.3.

Tabela 5.5 - Consumo por modo de operação.

Subsistema	Modos de Operação			
	Standby		Nominal Imageando	
	Potência (W)	Tempo (min)	Potência (W)	Tempo (min)
EPS	0,125	94	0,125	94
OBC	0,250	94	0,250	94
TT&C	0,100	79	1,000	15
AOCS	4,000	94	4,000	94
PAYLOAD	0,000	79	1,050	15
Subtotal (W)	4,48	P1	6,43	P2

Fonte: Paula (2019).

Figura 5.3 - Perfil de consumo.



Fonte: Paula (2019).

No gráfico da Figura 5.3, a área em branco é toda energia necessária durante o *Sunlight* e a área em cinza é toda energia necessária durante o eclipse. A soma delas nos dá toda energia necessária durante o período orbital.

A potência a ser gerada pelo painel solar (P_{sa}) é calculada a partir dos dados de potência necessária durante o *Sunlight* (P_d) e eclipse (P_e) e pelos tempos de *Sunlight* (T_d) e eclipse (T_e). A potência do painel solar é obtida pela Equação 5.1.

$$P_{sa} = \frac{\left(\frac{P_e T_e}{X_e} + \frac{P_d T_d}{X_d}\right)}{T_d} \quad (5.1)$$

A Equação 5.1, é um balanço de potência, onde: a potência do painel solar (P_{sa} em W) do 1º. membro, multiplicada pelo tempo de *Sunlight* (T_d em h), é igual à energia produzida pelo painel solar ($P_{sa} \cdot T_d$ em Wh). Ela é igual à energia total necessária durante o eclipse ($P_e \cdot T_e$), considerando sua eficiência X_e , somada à energia necessária durante o *Sunlight* ($P_d \cdot T_d$), considerando sua eficiência X_d . Então, a energia total produzida pelo painel solar ($P_{sa} \cdot T_d$) é o somatório das energias demandadas pela carga, refletidas no painel solar via X_e e X_d .

Para a topologia PPT, a potência do painel solar é constante, uma vez que busca e opera no ponto de máxima potência. Para, a topologia DET, na prática, a potência do painel, não é constante, varia com a carga e descarga da bateria, o que gera, no transitório do eclipse para o *Sunlight*, o problema do *lock-up* da bateria (FREIRE, 2009). Capel e Sullivan (1985) dizem que, para se evitar o travamento de energia (*lock-up*), o painel solar precisa ser superdimensionado, sugerindo 25% a mais de potência de painel solar; Sullivan (1989) diz que o painel solar deve ter cerca, de 18% de sobredimensionamento; e Freire (2009), sugere um sobredimensionamento de 34% para o painel solar. A penalidade do sobredimensionamento é um aumento de massa e que resulta em aumento de custo. Este trabalho, adota o sobredimensionamento de Freire (2009), de 34%, para a topologia DET.

Calculou-se a capacidade de potência produzida pelo painel solar para cada topologia, assumindo os valores teóricos de eficiência do sistema para PPT e

DET durante *Sunlight* e eclipse, conforme a Tabela 5.6. Estas eficiências consideram as perdas existentes entre o painel solar e as cargas (DET – S³R e PPT – conversor *Boost*).

Tabela 5.6 - Eficiência teórica do PPT e DET.

EFICIÊNCIA	PPT	DET
<i>Sunlight</i> (X_d)	0,80	0,85
Eclipse (X_e)	0,60	0,65

Fonte: Adaptado de Wertz e Larson (1999).

Potência de saída por unidade de área do painel solar

A potência de saída (P_O) é calculada pela multiplicação da eficiência da célula solar pela constante solar. Para a célula solar XTJ Prime, com eficiência (η_{cel}) de 30,7% a potência de saída, para uma constante solar (G) de 1367 W/m², é calculada pela Equação 5.2.

$$P_O = \eta_{cel} \cdot G \quad (5.2)$$

Determinação da potência necessária para BOL e EOL

A potência de saída necessária para o começo de vida (P_{BOL}) é calculada pela Equação 5.3.

$$P_{BOL} = P_O \cdot I_d \cdot \cos\theta \quad (5.3)$$

Onde: I_d é a degradação inerente e θ é o erro de apontamento do painel solar com relação à incidência de raio solar. No projeto apresentado, $\theta = 50^\circ$ no pior caso.

A degradação por tempo de vida (L_d) é calculada pela Equação 5.4.

$$L_d = \left(1 - \frac{\text{degradação}}{\text{ano}}\right)^{\text{vida do satélite}} \quad (5.4)$$

A potência de saída para o fim de vida (P_{EOL}) é dada pela Equação 5.5.

$$P_{EOL} = P_{BOL} \cdot L_d \quad (5.5)$$

e) Estimativa da área de painel solar

O cálculo da área total de painel solar (A_{sa}) é a razão entre a potência do painel solar (P_{sa}) e a potência real de saída no fim de vida (P_{EOL}). Desta forma, a área total é calculada pela Equação 5.6.

$$A_{sa} = \frac{P_{sa}}{P_{EOL}} \quad (5.6)$$

f) Estimativa da massa do painel solar

Considerando uma performance específica de 25 W/kg, a massa estimada para o painel solar (M_{sa}) será obtida pela Equação 5.7 (WERTZ; LARSON, 1999).

$$M_{sa} = (0,04) \cdot P_{sa} \quad (5.7)$$

g) Número de células em série e paralelo do painel solar

Esta etapa consiste em determinar o número de células em série (*strings*) e quantos *strings* em paralelo, serão necessários para compor o painel solar. Os dados da célula solar XTJ Prime como: a potência da célula solar ($P_{cell} = 1,088$ W), corrente da célula $I_{cell} = 17,4$ mA/cm² (0,5A para 26cm²) e a tensão da célula ($V_{cell} = 2,406$ V), são utilizados neste projeto. Utilizando a potência do painel solar P_{sa} , o número de células solares (N) necessárias é calculado pela Equação 5.8.

$$N = \frac{P_{sa}}{P_{cell}} \quad (5.8)$$

O número de células em série (N_s) e células em paralelo (N_p) dependerá da topologia adotada e são calculadas pelas Equações 5.9 e 5.10.

$$N_s = \frac{V_{sa}}{V_{Cell}} \quad (5.9)$$

$$N_p = \frac{P_{sa}}{V_{sa} \cdot I_{Cell}} \quad (5.10)$$

Na topologia PPT, a tensão do painel solar depende do tipo de conversor utilizado no rastreador de potência. Neste trabalho, será considerado um conversor do tipo *Boost*, pois como o painel opera sempre na região do ponto de máxima, a tensão do painel solar pode ser menor que a tensão do barramento. Portanto, a tensão do painel solar é menor do que a tensão da bateria, cujo “range” pode variar de 6 V a 8,4 V (no barramento 8,4 V) e de 10 V a 12,6 V (no barramento de 12,6 V). Sendo a tensão da célula solar, disponível, de 2,406V, o número de células em série deve ser menor do que 3 para ambos os barramentos. Considerando a geometria do satélite, para se escolheu-se $N_s=2$ ($V_{bus} = 8,4$ V e $V_{bus} = 12,6$ V). Logo, a tensão do painel é 4,8 V para os dois valores de tensão de barramento.

Na topologia DET, a tensão do painel solar é a tensão da bateria somada à queda do diodo do canal *Shunt* (V_d). A primeira hipótese considera que a bateria é composta de duas células em série, na qual temos uma tensão máxima de bateria igual a 8,4 V, correspondente à sua tensão de final de carga. Neste caso, o painel solar deve ter uma tensão de, pelo menos, 9,6 V. Uma segunda hipótese considera que a bateria é composta de três células em série, na qual a tensão máxima de bateria é igual a 12,6 V, correspondente à sua tensão de final de carga. Neste caso, o painel solar deve ter uma tensão de, pelo menos, 14,4 V. Os resultados dos cálculos para cada topologia estão na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Resultados dos dimensionamentos dos painéis solares para o PPT e DET.

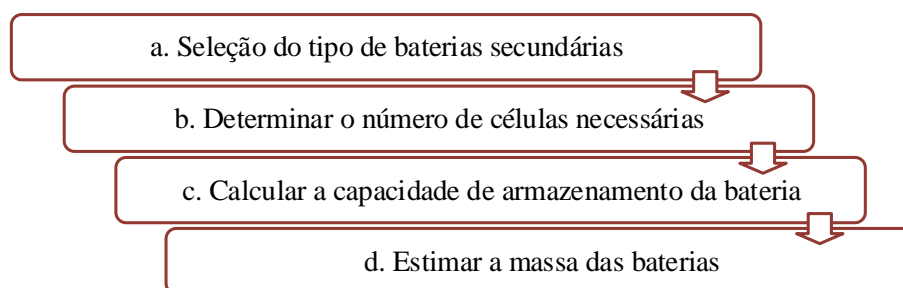
Parâmetro	Barramento de 8,4 V		Barramento de 12,6 V	
	PPT	DET	PPT	DET
Potência do Painel Solar (P_{sa})	10 W	13 W	10 W	13 W
Potência de saída (P_o)	419,7 W/m ²	419,7 W/m ²	419,7 W/m ²	419,7 W/m ²
Potência para o começo de vida (P_{BOL})	311,8 W/m ²	311,8 W/m ²	311,8 W/m ²	311,8 W/m ²
Potência para o fim de vida (P_{EOL})	307,5 W/m ²	307,5 W/m ²	307,5 W/m ²	307,5 W/m ²
Área de Painel Solar (A_{sa})	338,2 cm ²	426,0 cm ²	338,2 cm ²	426,0 cm ²
Massa de Painel Solar (M_{sa})	416 g	524 g	416 g	524 g
Tensão de Painel Solar (V_{sa})	4,8 V	9,6 V	4,8 V	14,4 V
Corrente de Painel Solar (I_{sa})	2,5 A	1,5 A	2,5 A	1 A
Número de células solares (N)	10	12	10	12
Número de células em série (N_s)	2	4	2	6
Número de <i>strings</i> em paralelo (N_p)	5	3	5	2

Fonte: Adaptado de Paula (2019).

5.1.3 Dimensionamento da bateria

Para o processo de dimensionamento da bateria é apresentado na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Processo para o *design* da bateria.



Fonte: Adaptado de Wertz e Larson (1999).

No item anterior sobre o dimensionamento do painel solar em função da topologia utilizada, foi considerada uma bateria cuja tensão corresponde à tensão de duas células em série para o barramento de 8,4 V e tensão de três células em série para o barramento de 12,6 V. Resta, portanto, calcular a capacidade de armazenamento e estimar a sua massa.

Para este trabalho foram analisadas baterias de Lítio-Íon (Li-Ion) e Lítio-Polímero (Li-Pol), as mais utilizadas em *CubeSats* (KNAP et al., 2020). Foi escolhida uma

bateria de Polímero de Lítio (SLPB 554374H da Kokam), para armazenar a energia necessária durante eclipse, cujas especificações estão listadas na Tabela 5.8. Esta bateria foi escolhida, pois nas baterias de polímero de Lítio a densidade de energia é cerca de 2 - 3 vezes maior que o Ni-Cd e Ni-MH (ROCHA, 2010; KNAP et al, 2020).

Tabela 5.8 - Especificação da célula da bateria SLP 554374H.

Capacidade típica (0,5 C; 4,2 – 2,7 V @ 25 °C)		1,25 Ah
Tensão nominal		3,7 V
Condição de carga	Corrente máxima	2,5 A
	Tensão	4,2 V ± 0,03 V
Condição de descarga	Corrente contínua	18,75 A
	Corrente de pico	37,50 A
	Tensão de corte	2,7 V
Ciclo de vida		> 500 Ciclos
Temperatura de operação	Carga	0 – 40 °C
	Descarga	-20 – 60 °C
Dimensão	Espessura (mm)	5,4 ± 0,2
	Largura (mm)	42,5 ± 0,5
	Comprimento (mm)	73,5 ± 0,5
Peso (g)		32,0 ± 1,0

Fonte: Adaptado de *Datasheet* SLPB 554374H da Kokam (2004).

A energia consumida pelo *CubeSat* durante um período de eclipse é calculada pela multiplicação da potência de consumo durante o eclipse e o tempo de eclipse, conforme a Equação 5.11.

$$E_e = P_e \cdot T_e \quad (5.11)$$

Considerando uma profundidade de descarga de bateria (*Depth Of Discharge – DOD*) de 30%, e uma eficiência de transmissão entre a bateria e a carga de 0,9 ($n_{bat} = 0,9$), a capacidade de armazenamento da bateria é calculada pela Equação 5.12.

$$E_{Bat} = \frac{E_e}{DOD \cdot n_{bat}} \quad (5.12)$$

A capacidade da bateria em Ampère - hora é obtida pela Equação 5.13.

$$C_{Bat} = \frac{E_{Bat}}{V_{Batmed}} \quad (5.13)$$

Para atender a essa capacidade da bateria, para a topologia com barramento de 8,4 V, a configuração a ser adotada é do tipo 2s2p, ou seja, a bateria é composta de 2 *strings* paralelos de 2 células em série, cada, totalizando 2,5 Ah. Para topologia com barramento de 12,6 V, a configuração a ser adotada é do tipo 3s3p, ou seja, a bateria é composta de 3 *strings* paralelos de 3 células em série, cada, totalizando 3,75 Ah.

A estimativa de massa das baterias, considerando apenas as células, cuja densidade de energia específica (E_d) é igual a 100 Wh/Kg, é calculada pela Equação 5.14 (ORABY et al., 2014).

$$M_{Bat} = \frac{E_{Bat}}{E_d} = 75 \text{ g} \quad (5.14)$$

A Tabela 5.9, apresenta os resultados dos cálculos acima.

Tabela 5.9 - Dados da bateria.

Parâmetro	Barramento de 8,4 V	Barramento de 12,6 V
	Valor	Valor
Energia consumida em eclipse (E_e)	2,0 Wh	2,0 Wh
Capacidade de armazenamento de bateria (E_{bat})	7,5 Wh	7,5 Wh
DoD	30%	30%
Eficiência de transmissão entre bateria e carga (η)	0,9	0,9
Capacidade da bateria (C_{bat})	1,0 Ah	0,7 Ah
Massa da bateria (M_{bat})	75 g	75 g
Configuração	2s2p	3s3p

Fonte: Adaptado de Paula (2019).

6 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo apresenta as simulações dos modelos das topologias PPT e DET em barramento não regulado e a análise dos resultados obtidos.

A simulação é o ato de fazer uma descrição da evolução de um sistema, processo, fenômeno, ser ou entidade em um meio, com uma linguagem e com um objetivo específico. O simulador é o agente que faz a simulação (SOUZA; TRIVELATO, 2003). Neste trabalho a simulação será realizada pelo simulador *MatLab/Simulink*.

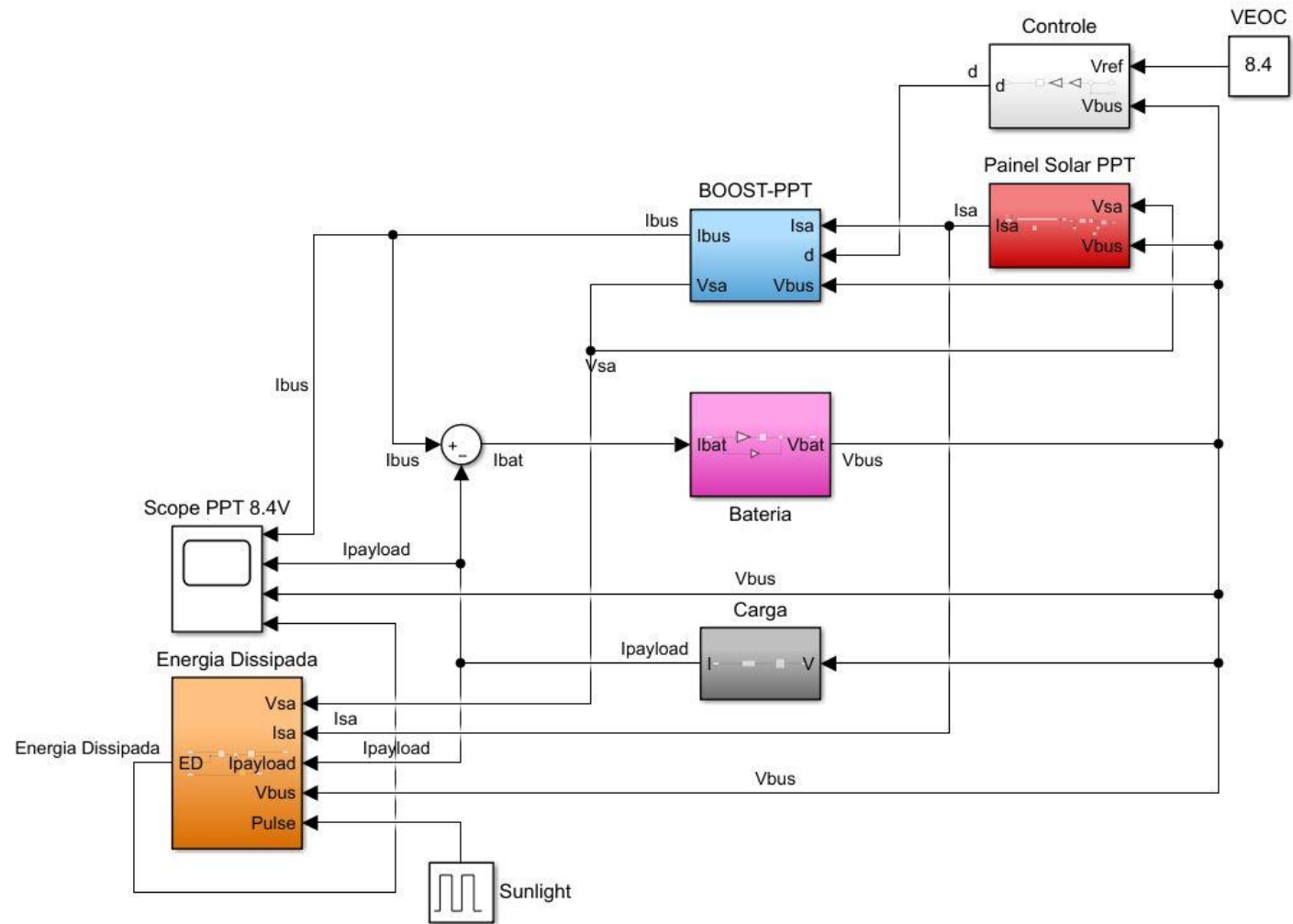
O *software* utilizado para as simulações foi o *MathWorks® MATLAB* da Divisão de Sistemas Espaciais do INPE, que permite a construção das partes dos modelos PPT e DET, discutido nos Capítulos 4 e 5, por possuir interface gráfica. O solucionador utilizado nas simulações dos sistemas foi o Solver ODE45 (*Ordinary Differential Equations*), com passo fixo, cujas configurações e informações estão no Apêndice C.

6.1 Apresentação dos modelos em *Simulink*

As Figura 6.1 e Figura 6.2 ilustram os modelos em *Simulink*, para as topologias PPT e DET, com barramento não regulado em malha fechada, desenvolvidos para a realização deste trabalho. Em **vermelho**, tem-se o bloco **Painel Solar**, com a equação característica deste, responsável por alimentar o sistema com a corrente de painel solar, durante os períodos iluminados. Em **azul** (modelo PPT), tem-se o bloco **PPT**, composto pelo conversor *Boost*, responsável por levantar a tensão do painel solar, conforme o *duty cycle*, e fornecer a corrente para o barramento. Em **amarelo** (modelo DET), tem-se o bloco **S³R**, com o regulador *Shunt* com chaveamento PWM, gerado pelo bloco Controle. Em **branco**, tem-se o bloco **Controle**, com o amplificador de erro, para verificar a tensão de fim de carga da bateria, e gerar o *duty cycle*. Em **rosa**, tem-se o bloco **Bateria** com o integrador do capacitor e a resistência interna. Em **cinza**, tem-se o bloco **Carga**, que consiste em um dispositivo de potência constante. Em **laranja**, tem-se o bloco **Energia Dissipada**, com o cálculo da integral da potência dissipada,

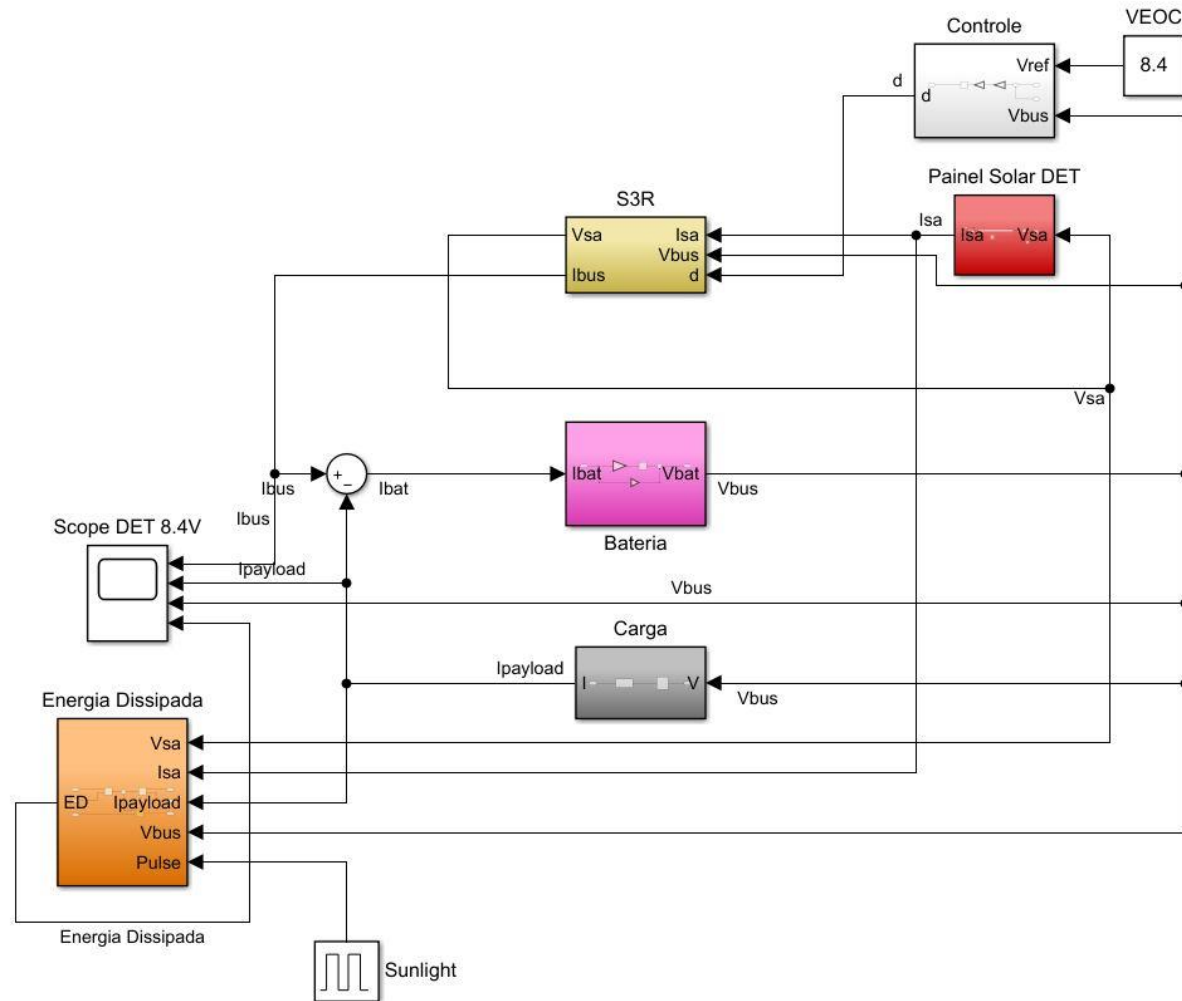
métrica escolhida para verificação do requisito de eficiência. Os detalhamentos internos dos blocos podem ser vistos no Apêndice A.

Figura 6.1 - Modelo do sistema PPT em *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

Figura 6.2 - Modelo do sistema DET em *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

Antes de iniciar uma simulação, é necessário configurar os parâmetros globais e específicos que definem as condições do sistema, sendo os mesmos:

- a) **Parâmetros orbitais:** tempo de uma órbita, tempo de eclipse e tempo de *Sunlight*, configurados por meio de blocos (*Pulse/Constant*); e tempo de simulação em segundos;
- b) **Parâmetros do painel solar:** números de células solares em série/paralelo (N_s/N_p), corrente de saturação (I_s), corrente de saturação reversa (I_{sr}), corrente fotogerada pela célula (I_{ph}), resistência em série (R_s), resistência em paralelo (R_p), fator de idealidade do diodo (A) e tensão térmica (V_t), configurados diretamente no bloco **Painel Solar**, por meio da função Inicializar, localizada na guia *Callbacks*, nas Propriedades do bloco **Painel Solar**;
- c) **Parâmetros da bateria:** resistência interna (R_i) e capacitância (C), configurados diretamente no bloco **Bateria**, por meio da função Inicializar localizada na guia *Callbacks*, nas Propriedades do bloco **Bateria**;
- d) **Parâmetros de carga:** potência máxima de consumo (k), configurada internamente no bloco **Carga**; e
- e) **Outros parâmetros:** eficiência do conversor *Boost*, tensão de queda do diodo (V_d), corrente de máxima potência (I_{ppt}), tensão de fim de carga de bateria (V_{eoc}), condições iniciais utilizadas pelo sistema (IC), ganhos do amplificador de erro, que devem ser configurados internamente em cada bloco.

Os valores utilizados são apresentados no item a seguir.

6.2 Parâmetros para as simulações

Cada topologia foi configurada inicialmente, conforme descrito anteriormente e os valores de parâmetros, de painel solar, conversor, bateria e carga utilizados para simulação dos modelos no *Matlab/Simulink*, estão na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Parâmetros para as simulações.

Parâmetro	Barramento de 8,4 V		Barramento de 12,6 V	
	PPT	DET	PPT	DET
Número de células em série (N_s)	2	4	2	6
Número de <i>strings</i> em paralelo (N_p)	5	3	5	2
Corrente Fotogerada (I_{ph})	0,5 A	0,5 A	0,5 A	0,5 A
Corrente de Saturação (I_s)	$2,45 \times 10^{-7}$ A	$2,45 \times 10^{-7}$ A	$2,45 \times 10^{-7}$ A	$2,45 \times 10^{-7}$ A
Corrente de Saturação Reversa (I_{sr})	-1 mA	-1 mA	-1 mA	-1 mA
Corrente de PPT (I_{ppt})	2,5 A	-	2,5 A	-
Resistência série (R_s)	0.05 Ω	0.05 Ω	0.05 Ω	0.05 Ω
Resistência série (R_p)	50 Ω	500 Ω	50 Ω	500 Ω
Fator de idealidade do Diodo (A)	1,5	1,5	1,5	1,5
Tensão térmica (V_t)	25 mV	25 mV	25 mV	25 mV
Tensão fim de carga da Bateria (V_{EOC})	8,4 V	8,4 V	12,6 V	12,6 V
Capacitância Bateria (C)	986 F	986 F	438 F	438 F
Resistência interna bateria (R_i)	100 m Ω	100 m Ω	100 m Ω	100 m Ω
Potência entrada conversor carga (k)	6,5 W	6,5 W	6,5 W	6,5 W

Fonte: Produção da autora.

Para se verificar o funcionamento dos modelos, fez-se as simulações dos mesmos, durante oito órbitas (45120 segundos), para 1^o métrica definida na seção 3.2.3.1, em barramento de tensão 8,4 V e 12,6 V, e os resultados estão descritos a seguir.

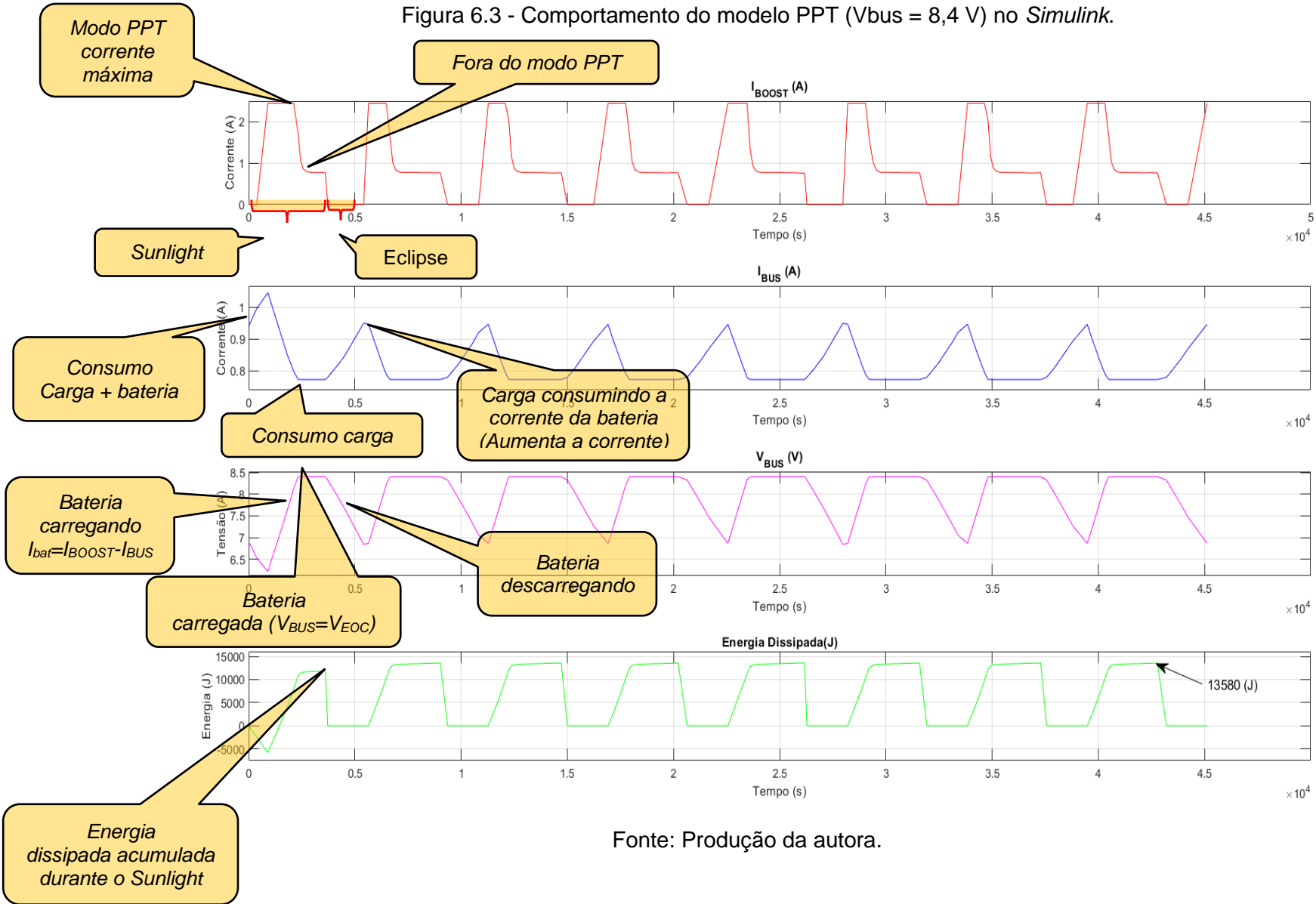
6.3 Resultados das simulações em barramento 8,4 V

6.3.1 Topologia PPT

Durante o tempo de *Sunlight*, o painel solar operar no modo PPT e fornece a corrente máxima que corresponde ao ponto de máxima potência (2,5 A – 10 W). Esta corrente alimenta o conversor *Boost*, que durante ciclo de trabalho igual a zero, fornece a corrente ao barramento (I_{BOOST}). Esta corrente, por sua vez, alimenta a carga de 6,5 W, cuja demanda de corrente (I_{BUS}) é de $\approx 0,77$ A, ao mesmo tempo que começa a carregar a bateria (V_{BUS}) até que ela atinja a sua tensão de final de carga de 8,4 V. Ao atingir e a tensão de fim de carga da bateria o painel solar sai do modo PPT e passa a operar em modo nominal. Quando o satélite entra na região de eclipse, o painel solar não gerar energia, ou seja, a corrente de painel solar é zero ($I_{BOOST} = 0$). Em eclipse a energia é fornecida pela bateria, o nível de corrente da carga (I_{BUS}) aumenta ($\approx 0,95$ A) à medida que a

tensão da bateria diminui. Na Figura 6.3 é possível verificar este comportamento. A energia dissipada no sistema ao longo do *Sunlight* pode então ser facilmente computada por meio do *software*. O resultado deste cálculo é mostrado no último gráfico da Figura 6.3. Nesta figura, o valor da energia dissipada corresponde ao pico da curva, ao final do tempo de *Sunlight*.

Figura 6.3 - Comportamento do modelo PPT ($V_{bus} = 8,4 \text{ V}$) no *Simulink*.



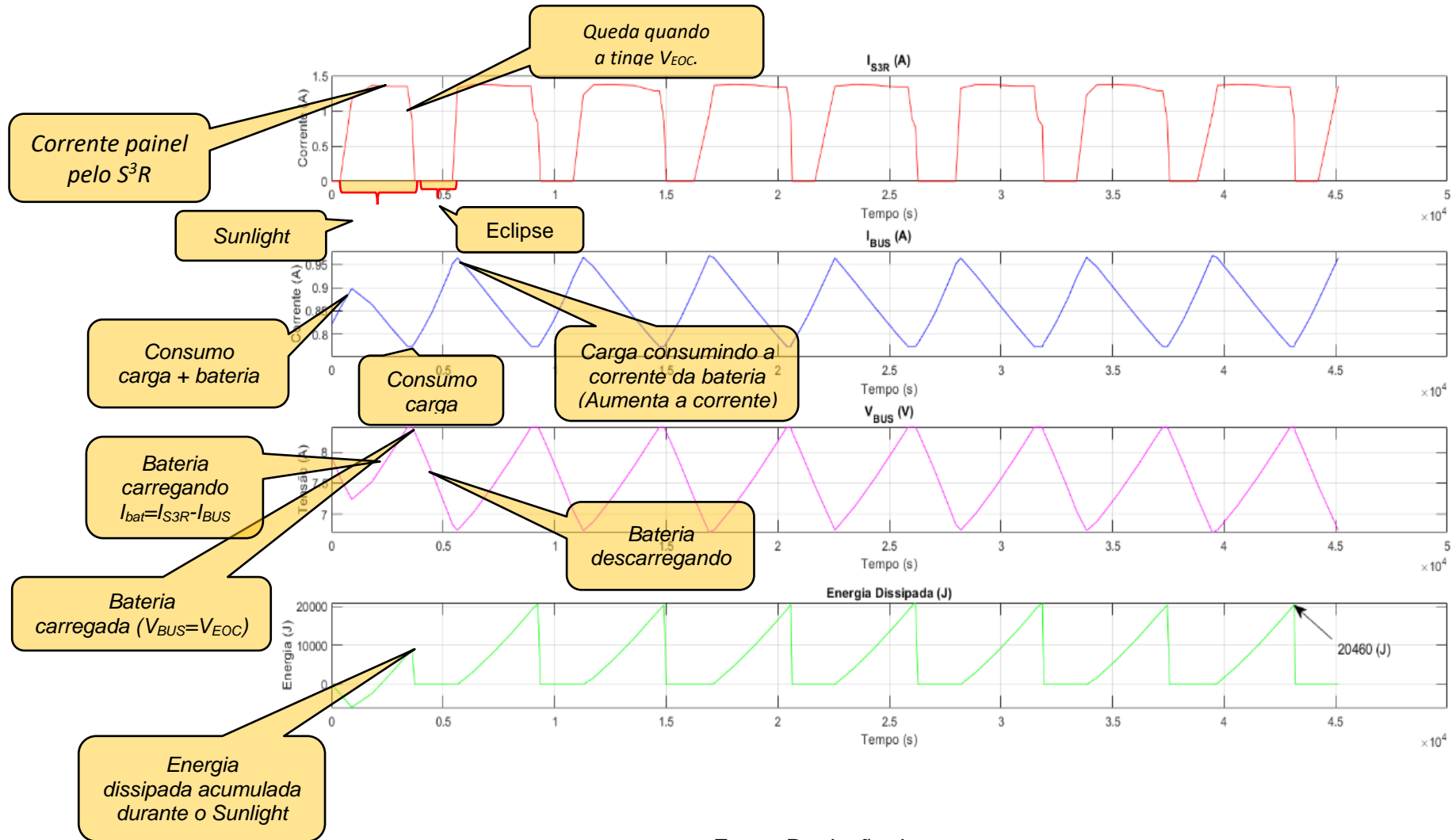
Fonte: Produção da autora.

6.3.2 Topologia DET

Durante o período de *Sunlight*, a corrente do painel solar alimenta o S³R, aqui simulado com 1,5 V de queda de tensão no diodo (valor referente a dois diodos em série), fornece a corrente ao barramento (I_{S3R}). O ciclo de trabalho (*duty cycle*) libera mais ou menos corrente ao barramento, conforme a demanda. A corrente de barramento, por sua vez, alimenta a carga de 6,5 W, cuja demanda de corrente (I_{BUS}) é de $\approx 0,77$ A, ao mesmo tempo que começa a carregar a bateria (V_{BUS}) até que ela atinja a sua tensão de final de carga de 8,4 V. Na topologia DET o tempo de carga da bateria é maior, pois não operar no ponto de máxima potência como na topologia PPT. Quando o satélite entra na região de eclipse, o painel solar não gerar energia, ou seja, a corrente de painel solar é zero ($I_{S3R} = 0$). Em eclipse a energia é fornecida pela bateria, o nível de corrente da carga (I_{BUS}) aumenta ($\approx 0,95$ A) à medida que a tensão da bateria diminui. Na Figura 6.4 é possível verificar este comportamento. Assim como no dito anteriormente, a energia dissipada no sistema ao longo do *Sunlight* pode então ser facilmente computada por meio do *software*. O resultado deste cálculo é mostrado no último gráfico da Figura 6.4.

Os resultados para outras eficiências de conversor *Boost* e S³R, em barramento 8,4 V, estão no Apêndice B.

Figura 6.4 - Comportamento do modelo DET ($V_{bus} = 8,4 \text{ V}$) no *Simulink*.



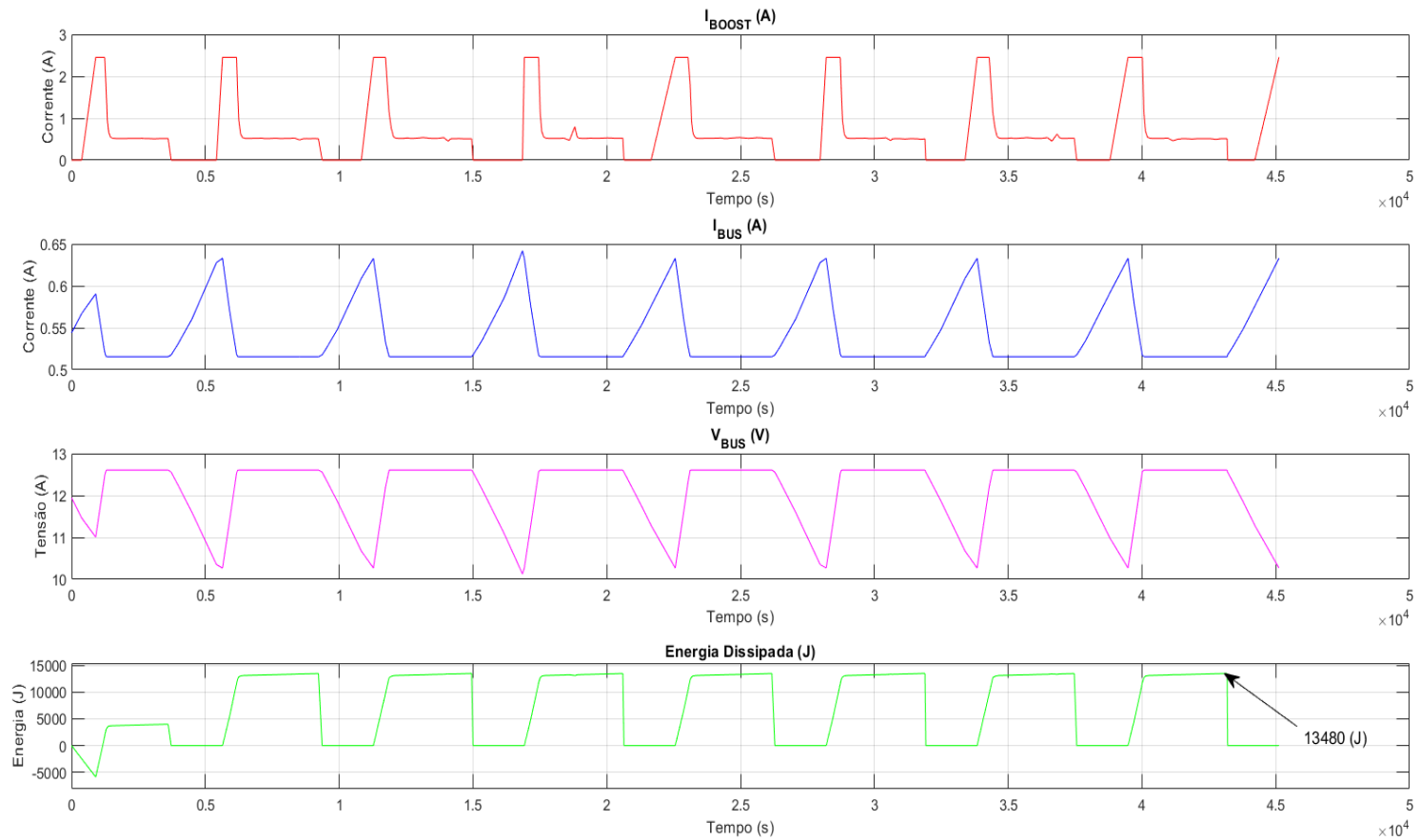
Fonte: Produção da autora.

6.4 Resultados das simulações em barramento 12,6 V

6.4.1 Topologia PPT

Durante o tempo de *Sunlight*, o painel solar opera no modo PPT e fornece a corrente máxima que corresponde ao ponto de máxima potência (2,5 A – 10 W). Esta corrente alimenta o conversor *Boost*, que durante ciclo de trabalho igual a zero, fornece a corrente ao barramento (I_{BOOST}). Esta corrente, por sua vez, alimenta a carga de 6,5 W, cuja demanda de corrente (I_{BUS}) é de $\approx 0,51$ A, ao mesmo tempo que começa a carregar a bateria (V_{BUS}) até que ela atinja a sua tensão de final de carga de 8,4 V. Ao atingir e a tensão de fim de carga da bateria o painel solar sai do modo PPT e passa a operar em modo nominal. Quando o satélite entra na região de eclipse, o painel solar não gera energia, ou seja, a corrente de painel solar é zero ($I_{BOOST} = 0$). Em eclipse a energia é fornecida pela bateria, o nível de corrente da carga (I_{BUS}) aumenta ($\approx 0,63$ A) à medida que a tensão da bateria diminui ($V_{BUS} = 10,5$ V). Na Figura 6.5 é possível verificar este comportamento. A energia dissipada no sistema ao longo do *Sunlight* pode então ser facilmente computada por meio do *software*. O resultado deste cálculo é mostrado no último gráfico da Figura 6.5. Nesta figura, o valor da energia dissipada corresponde ao pico da curva, ao final do tempo de *Sunlight*.

Figura 6.5 - Comportamento do modelo PPT ($V_{bus} = 12,6 \text{ V}$) no *Simulink*.



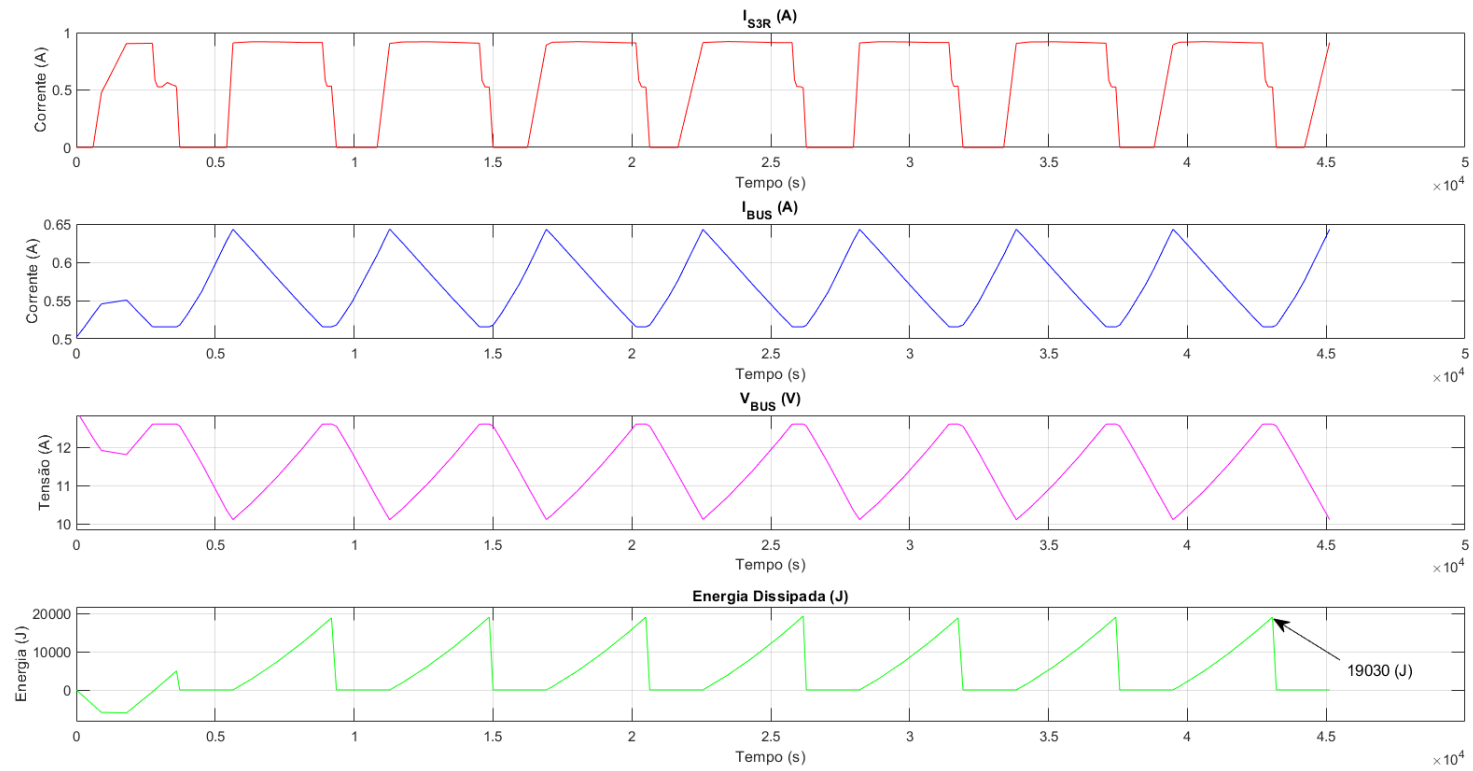
Fonte: Produção da autora.

6.4.2 Topologia DET

Durante o período de *Sunlight*, a corrente do painel solar alimenta o S³R, aqui simulado com 1,5 V de queda de tensão no diodo (valor referente a dois diodos em série), fornece a corrente ao barramento (I_{S3R}). O ciclo de trabalho (*duty cycle*) libera mais ou menos corrente ao barramento, conforme a demanda. A corrente de barramento, por sua vez, alimenta a carga de 6,5 W, cuja demanda de corrente (I_{BUS}) é de $\approx 0,52$ A, ao mesmo tempo que começa a carregar a bateria (V_{BUS}) até que ela atinja a sua tensão de final de carga de 8,4 V. Na topologia DET o tempo de carga da bateria é maior, pois não operar no ponto de máxima potência como na topologia PPT. Quando o satélite entra na região de eclipse, o painel solar não gerar energia, ou seja, a corrente de painel solar é zero ($I_{S3R} = 0$). Em eclipse a energia é fornecida pela bateria, o nível de corrente da carga (I_{BUS}) aumenta ($\approx 0,63$ A) à medida que a tensão da bateria diminui. Na Figura 6.6 é possível verificar este comportamento. Assim como no dito anteriormente, a energia dissipada no sistema ao longo do *Sunlight* pode então ser facilmente computada por meio do *software*. O resultado deste cálculo é mostrado no último gráfico da Figura 6.6.

Os resultados para outras eficiências de conversor *Boost* e S³R, em barramento 12,6 V, estão no Apêndice B.

Figura 6.6 - Comportamento do modelo DET ($V_{bus} = 12,6 \text{ V}$) no *Simulink*.



Fonte: Produção da autora.

6.5 Análises

Para comparar as topologias, não basta apenas simular e calcular a energia dissipada e ver qual é melhor, é necessário também, verificar o efeito/influência de outros parâmetros nesta eficiência. Para isso a energia dissipada foi analisada, para cada métrica, considerando os seguintes casos:

Caso 1: Influência das eficiências dos blocos PPT (conversor *Boost*) e DET (S³R) para tensão de barramento 8,4 V; e

Caso 2: Influência das eficiências dos blocos PPT (conversor *Boost*) e DET (S³R) para tensão de barramento 12,6 V.

A análise consiste em verificar a energia dissipada pelas topologias PPT e DET, para duas tensões de barramento, quando ocorre a variação da eficiência do conversor *Boost* e do S³R. Para isso foi realizado um levantamento bibliográfico de eficiências para o conversor *Boost* apresentado na Tabela 6.2. As eficiências do S³R foram calculadas conforme a Equação 4.12, com base na tensão de barramento e tensão de queda do diodo os valores de eficiências calculadas estão na Tabela 6.3.

Tabela 6.2 - Levantamento das eficiências para o conversor *Boost*.

Autor	Valor de Eficiência
Carvalho (2018)	91,80%
Tiburski et al. (2018)	97,22%
Silva (2015)	98,00%
Beltrame (2014)	97,48%
Ribes-Mallada (2011)	93,50%
Biela (2010)	99,33%
Kolar (2009)	99,20%

Fonte: Produção da autora.

Tabela 6.3 - Cálculo das eficiências para o S³R.

Tensão de queda do diodo [V]	Eficiência do S ³ R [%] para $V_{bus} = 8,4 V$	Eficiência do S ³ R [%] para $V_{bus} = 12,6 V$
1,50	84,85	89,36
0,75	91,80	94,38

Fonte: Produção da autora.

6.5.1 Primeira métrica

Esta seção apresenta os resultados da primeira métrica (comparar a energia dissipada acumulada durante o *Sunlight*) para os casos 1 e 2.

Caso 1 – Influência das eficiências dos blocos PPT e DET para tensão de barramento de 8,4 V

Neste caso, os sistemas foram simulados com a tensão de barramento de 8,4 V, a fim de identificar qual dissipa menos energia.

Para a topologia PPT, os valores de eficiência para o conversor *Boost* foram variados de forma crescente, adotando-se os valores da Tabela 6.2. Mediu-se a energia dissipada e os resultados foram registrados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT com V_{bus} de 8,4 V.

Eficiência do conversor <i>Boost</i> [%]	Energia dissipada no PPT [kJ]
91,80	15,92
93,50	15,32
97,22	13,90
97,48	13,80
98,00	13,58
99,20	13,15
99,33	13,12

Fonte: Produção da autora.

Para a topologia DET, os valores de eficiência do S³R foram baseados na Tabela 6.3 e simulados no modelo através da tensão de queda do diodo. Os resultados da energia dissipada para cada uma destas eficiências se encontram na Tabela 6.5. A partir das Tabelas 6.4 e 6.5, pode-se construir o gráfico da Figura 6.7.

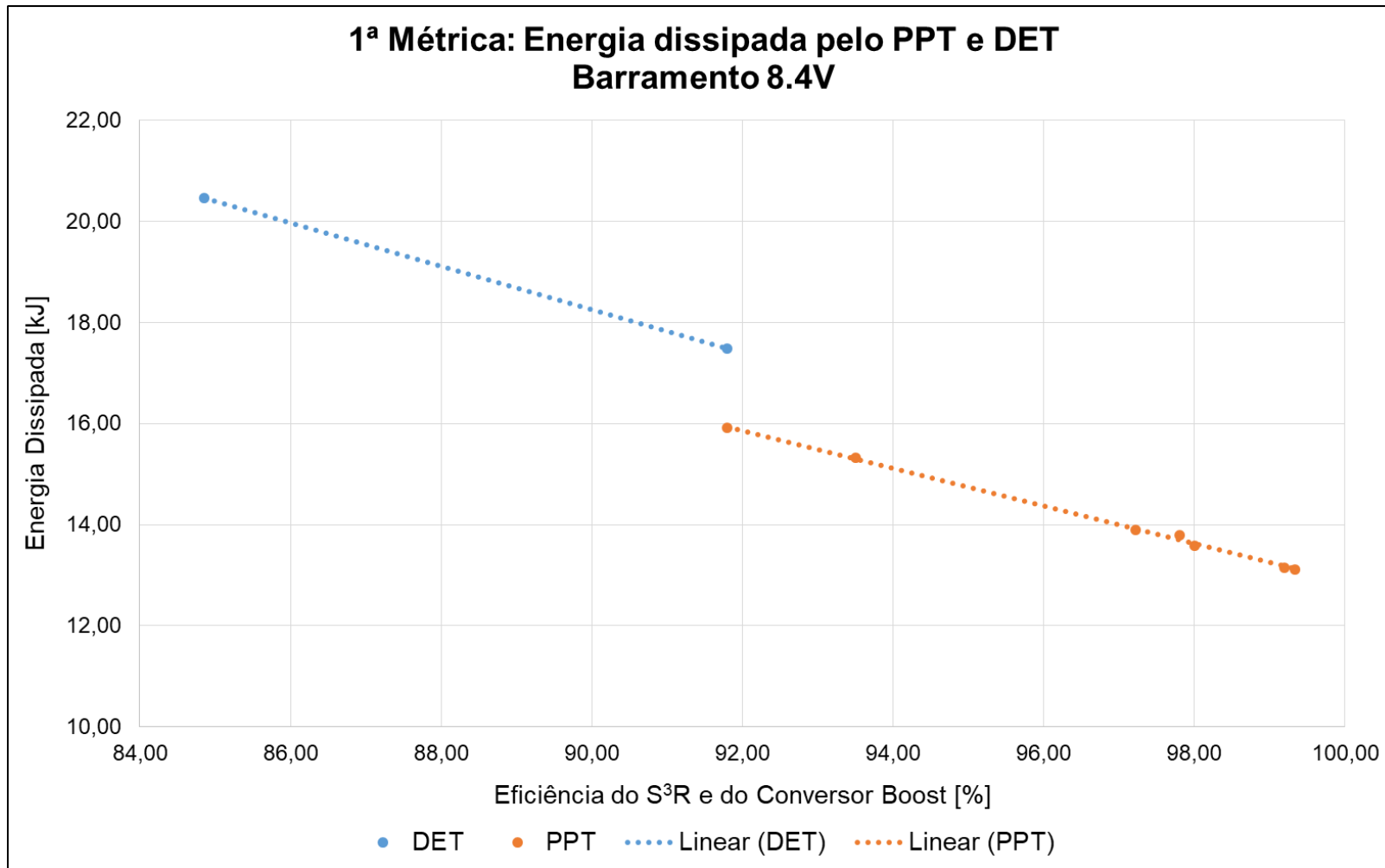
Tabela 6.5 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET com V_{bus} de 8,4 V.

Eficiência do S³R [%]	Tensão de queda do diodo [V]	Energia dissipada no DET [kJ]
84,85	1,50	20,46
91,80	0,75	17,49

Fonte: Produção da autora.

Todos os valores de energia dissipada utilizados foram retirados dos gráficos, resultados das simulações. Todos os gráficos se encontram no Apêndice B.1.

Figura 6.7 - 1ª Métrica: Energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 8,4 V.



Fonte: Produção da autora.

Pelo gráfico é possível verificar que, conforme a eficiência do conversor *Boost* aumenta, a energia dissipada para a topologia PPT diminui; isto também ocorre para a topologia DET: quando a eficiência do S³R aumenta, a energia dissipada diminui. Analisando verticalmente, observa-se que, para uma eficiência de 91,80% para o S³R e para o conversor *Boost*, a topologia DET dissipa 17,49 kJ de energia e a topologia PPT dissipa 15,92 kJ de energia; ou seja, a topologia DET dissipa 1,57 kJ a mais que a topologia PPT. Para outros valores de eficiência de S³R e *Boost*, a topologia PPT dissipa menos energia que a topologia DET.

No gráfico vemos dois pontos para o DET, estes pontos correspondem aos valores de energia dissipada pelo DET quando a eficiência do S³R é alterada. Estas eficiências variam conforme valores de queda de tensão do diodo, que neste caso considera um ou dois diodos (1 diodo = 0,75 V e dois diodos = 1,50 V).

Caso 2 – Influência das eficiências dos blocos PPT e DET para tensão de barramento de 12,6 V

Neste caso, os sistemas foram simulados com a tensão de barramento de 12,6 V, a fim de identificar qual dissipa menos energia.

Para a topologia PPT, os valores de eficiência, para o conversor *Boost* foram variados de forma crescente, adotando-se os valores da Tabela 6.2. Mediu-se a energia dissipada e os resultados foram registrados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT com V_{bus} de 12,6 V.

Eficiência do conversor <i>Boost</i> [%]	Energia dissipada no PPT [kJ]
91,80	15,99
93,50	15,24
97,22	13,78
97,48	13,68
98,00	13,48
99,20	13,02
99,33	12,98

Fonte: Produção da autora.

Para a topologia DET, os valores de eficiência do S³R foram baseados na Tabela 6.3, e simulados no modelo através da tensão de queda do diodo. Os resultados da energia dissipada para cada uma destas eficiências se encontram na Tabela 6.7. Assim como no caso 1, a partir das Tabelas 6.6 e 6.7 pode-se construir o gráfico da Figura 6.8, considerando a energia dissipada pela topologia PPT com valores variados de eficiências para o conversor *Boost* e para o S³R.

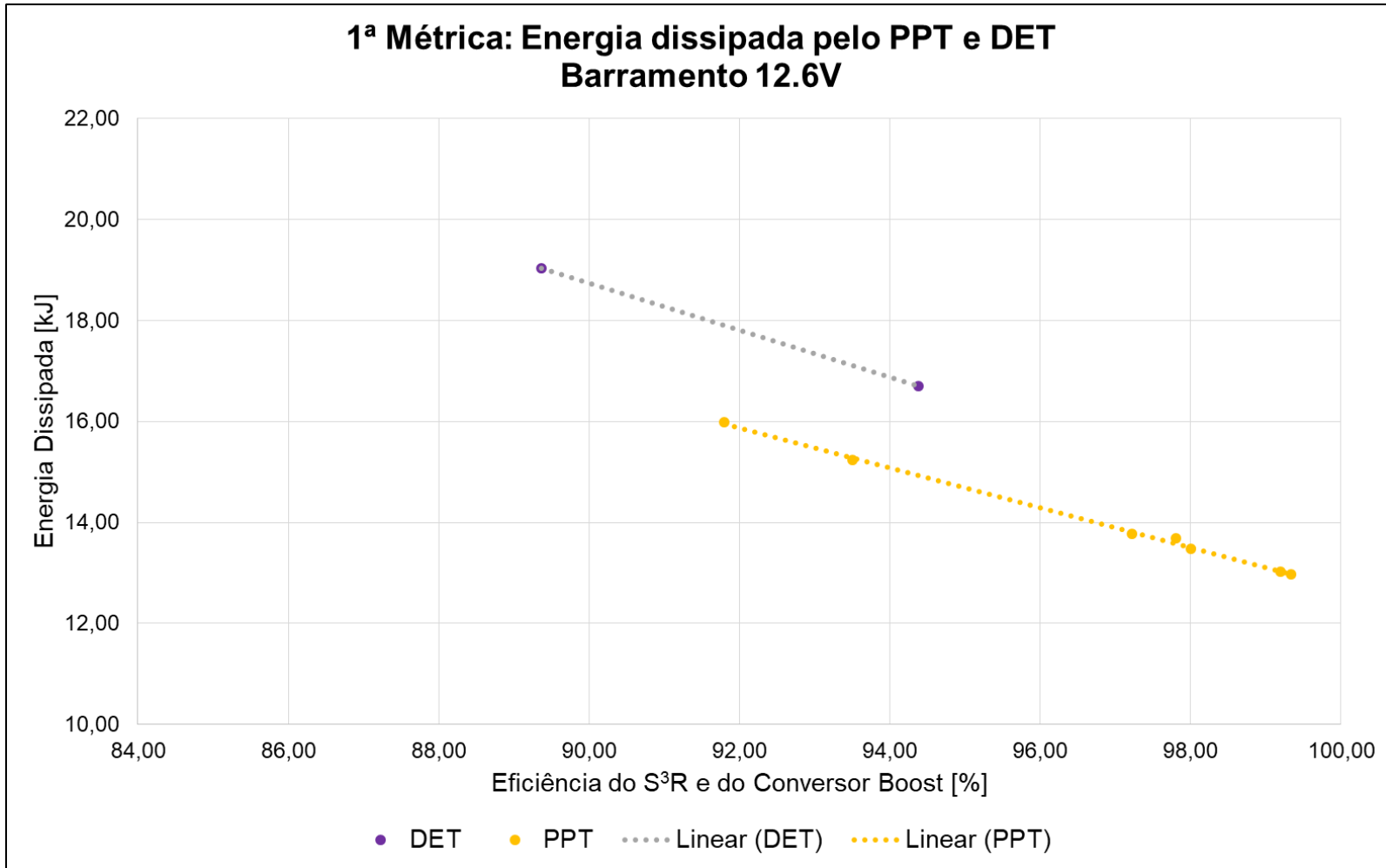
Tabela 6.7 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET com V_{bus} de 12,6 V.

Eficiência do S³R [%]	Tensão de queda do diodo [V]	Energia dissipada no DET [kJ]
89,36	1,50	19,03
94,38	0,75	16,69

Fonte: Produção da autora.

Todos os valores de energia dissipada utilizados foram retirados dos gráficos, resultados das simulações. Todos os gráficos se encontram no Apêndice B.1.

Figura 6.8 - 1ª Métrica: Energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 12,6 V.

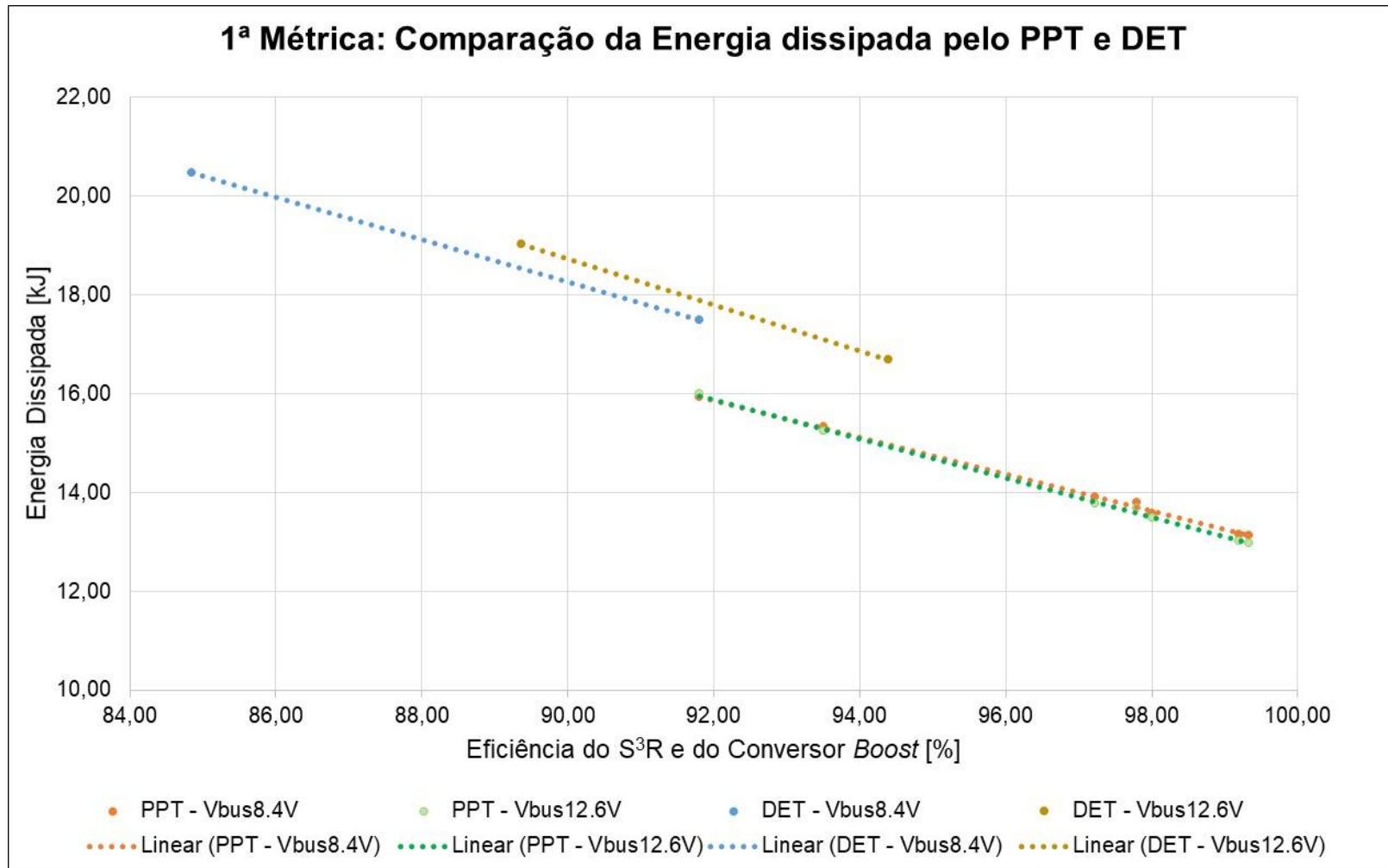


Fonte: Produção da autora.

Pelo gráfico é possível verificar que, assim como no caso 1, a energia dissipada pelas topologias PPT e DET diminuí à medida que as eficiências do conversor *Boost* e do S³R aumentam. Analisando verticalmente, observa-se que para uma eficiência de 94% para o S³R e para o conversor *Boost*, a topologia DET dissipa ≈17,5 kJ de energia e a topologia PPT dissipa ≈15 kJ de energia, mantendo para o DET uma diferença de energia dissipada de 2,5 kJ a mais que o PPT. Para outros valores de eficiência de S³R e *Boost*, a topologia PPT, mesmos em barramento maiores, dissipa menos energia que a topologia DET.

A Figura 6.9 faz a comparação da energia dissipada pelas topologias PPT e DET em ambos os barramentos.

Figura 6.9 - 1ª Métrica: Comparação da energia dissipada pelas topologias PPT e DET.



Fonte: Produção da autora.

Observa-se, pelo gráfico que a energia dissipada pelas topologias PPT e DET, em barramento 12,6 V, é menor que a energia dissipada em barramento 8,4 V, com pequena variação. A pequena variação de energia dissipada para a topologia PPT com barramento 8,4 V e 12,6 V, se dá em razão do sistema, que por meio de reguladores, está sempre buscando o ponto de máxima potência, ou seja, não há grande variação na energia fornecida pelo painel solar, o que torna o sistema menos dissipativo, uma vez que extrai a potência exata requerida pelo sistema.

A energia dissipada pela topologia DET é maior que a energia dissipada pela topologia PPT, para ambos os barramentos. De acordo com a literatura, isto faz sentido, uma vez que o sistema DET deve ter um painel solar maior (maior número de células, maior potência) que o da topologia PPT, para se evitar o efeito do *lock-up* da bateria, penalidade por não trabalhar no ponto de máxima potência.

6.5.2 Segunda métrica

Esta seção apresenta os resultados da segunda métrica (comparar a energia dissipada acumulada durante todo o ciclo *Sunlight/eclipse*) para os casos 1 e 2.

Caso 1 – Influência das eficiências dos blocos PPT e DET para tensão de barramento de 8,4 V

Neste caso, os sistemas foram simulados com a tensão de barramento de 8,4 V, a fim de identificar qual dissipa menos energia.

Para a topologia PPT, os valores de eficiência para o conversor *Boost* foram variados de forma crescente, adotando-se os valores da Tabela 6.2. Mediu-se a energia dissipada e os resultados foram registrados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT com V_{bus} de 8,4 V.

Eficiência do conversor <i>Boost</i> [%]	Energia dissipada no PPT [kJ]
91,80	4,857
93,50	4,133
97,22	2,627
97,48	2,528
98,00	2,328
99,20	1,87
99,33	1,827

Fonte: Produção da autora.

Para a topologia DET, os valores de eficiência do S^3R foram baseados na Tabela 6.3 e simulados no modelo através da tensão de queda do diodo. Os resultados da energia dissipada para cada uma destas eficiências se encontram na Tabela 6.9. A partir das Tabelas 6.8 e 6.9, pode-se construir o gráfico da Figura 6.10.

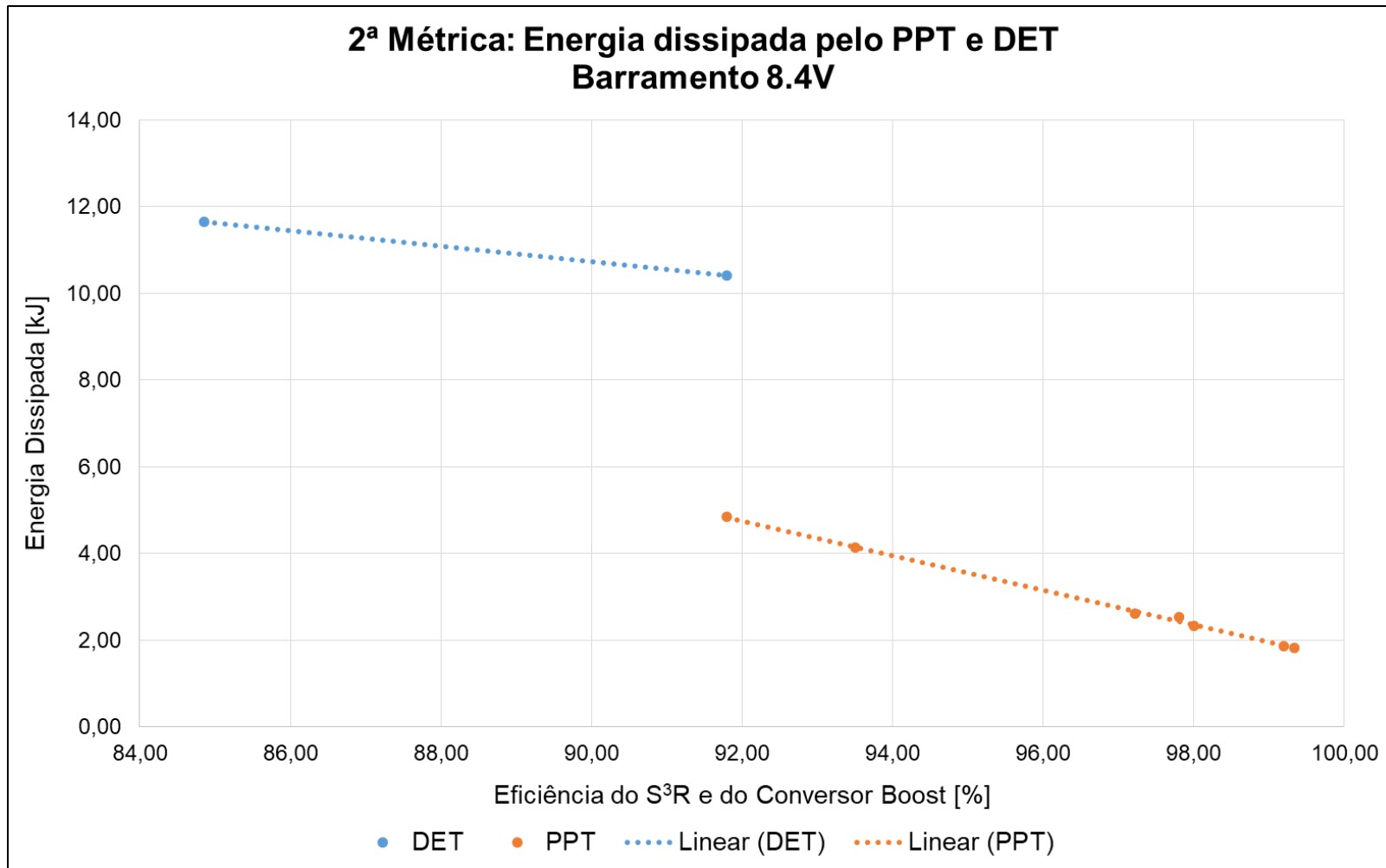
Tabela 6.9 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET com V_{bus} de 8,4 V.

Eficiência do S³R [%]	Tensão de queda do diodo [V]	Energia dissipada no DET [kJ]
84,85	1,50	11,66
91,80	0,75	10,41

Fonte: Produção da autora.

Todos os valores de energia dissipada utilizados foram retirados dos gráficos, resultados das simulações. Todos os gráficos se encontram no Apêndice B.2.

Figura 6.10 - 2ª Métrica: Energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 8,4 V.



Fonte: Produção da autora.

Pelo gráfico é possível verificar que, conforme as eficiências do conversor *Boost* e do S³R aumentam, as energias dissipadas para as topologias PPT e DET diminuem. Analisando verticalmente, observa-se que, para uma eficiência de 91,80% para o S³R e para o conversor *Boost*, a topologia DET dissipa 10,41 kJ de energia e a topologia PPT dissipa 4,857 kJ de energia, ou seja, a topologia DET dissipa 5,55 kJ a mais que a topologia PPT. Para outros valores de eficiência de S³R e *Boost*, a topologia PPT dissipa menos energia que a topologia DET.

Caso 2 – Influência das eficiências dos blocos PPT e DET para tensão de barramento de 12,6 V

Neste caso, os sistemas foram simulados com a tensão de barramento de 12,6 V, a fim de identificar qual dissipa menos energia.

Para a topologia PPT, os valores de eficiência, para o conversor *Boost* foram variados de forma crescente, adotando-se os valores da Tabela 6.2. Mediu-se a energia dissipada e os resultados foram registrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT com V_{bus} de 12,6 V.

Eficiência do conversor <i>Boost</i> [%]	Energia dissipada no PPT [kJ]
91,80	3,835
93,50	3,117
97,22	1,61
97,48	1,511
98,00	1,321
99,20	0,854
99,33	0,8157

Fonte: Produção da autora.

Para a topologia DET, os valores de eficiência do S³R foram baseados na Tabela 6.3, e simulados no modelo através da tensão de queda do diodo. Os resultados da energia dissipada para cada uma destas eficiências se encontram na Tabela 6.11. Assim como no caso 1, a partir das Tabelas 6.10 e 6.11 pode-se construir

o gráfico da Figura 6.11, considerando a energia dissipada pela topologia PPT com valores variados de eficiências para o conversor *Boost* e para o S³R.

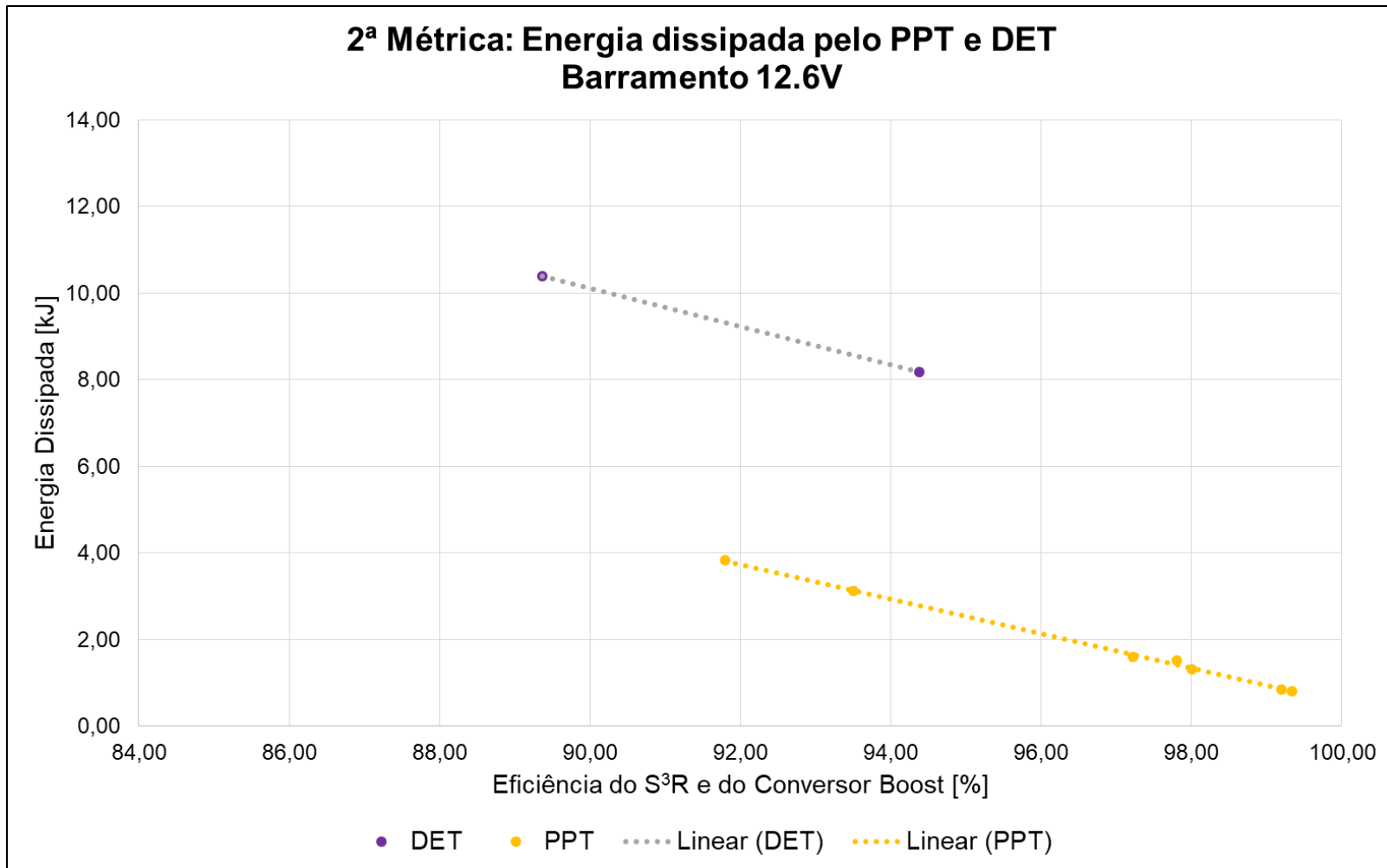
Tabela 6.11 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET com V_{bus} de 12,6 V.

Eficiência do S³R [%]	Tensão de queda do diodo [V]	Energia dissipada no DET [kJ]
89,36	1,50	10,39
94,38	0,75	8,18

Fonte: Produção da autora.

Todos os valores de energia dissipada utilizados foram retirados dos gráficos, resultados das simulações. Todos os gráficos se encontram no Apêndice B.2.

Figura 6.11 - 2ª Métrica: Energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 12,6 V.

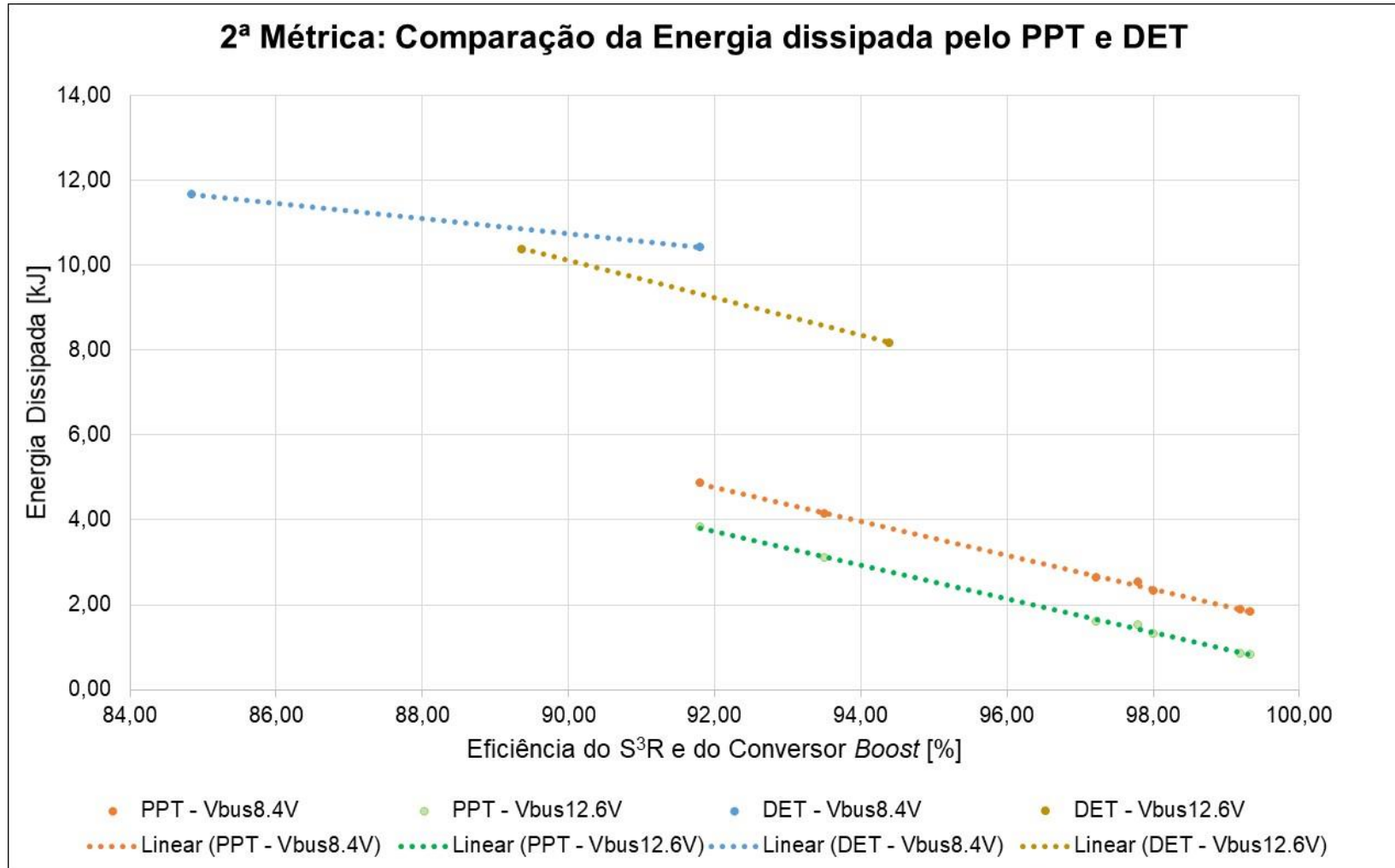


Fonte: Produção da autora.

Pelo gráfico é possível verificar que, assim como no caso 1, as energias dissipadas pelas topologias PPT e DET diminuem à medida que as eficiências do conversor *Boost* e do S³R aumentam. Analisando verticalmente, observa-se que para uma eficiência de 92% para o S³R e para o conversor *Boost*, a topologia DET dissipa ≈9 kJ de energia e a topologia PPT dissipa ≈4 kJ de energia, mantendo para o DET uma diferença de energia dissipada de 5 kJ a mais que o PPT. Para outros valores de eficiência de S³R e *Boost*, a topologia PPT, mesmos em barramento maiores, dissipa menos energia que a topologia DET.

A Figura 6.12 faz a comparação da energia dissipada pelas topologias PPT e DET em ambos os barramentos.

Figura 6.12 - 2ª Métrica: Comparação da energia dissipada pelas topologias PPT e DET.



Fonte: Produção da autora.

Observa-se, pelo gráfico que a energia dissipada pelas topologias PPT e DET, em barramento 12,6 V, é menor que a energia dissipada em barramento 8,4 V. E que a energia dissipada pela topologia PPT é menor que a energia dissipada pela topologia DET.

6.5.3 Terceira métrica

Esta seção apresenta os resultados da terceira métrica (comparar a média da energia dissipada acumulada durante 10 ciclos de *Sunlight e eclipse*) para os casos 1 e 2.

Caso 1 – Influência das eficiências dos blocos PPT e DET para tensão de barramento de 8,4 V

Neste caso, os sistemas foram simulados com a tensão de barramento de 8,4 V, a fim de identificar qual dissipa menos energia.

Para a topologia PPT, os valores de eficiência para o conversor *Boost* foram variados de forma crescente, adotando-se os valores da Tabela 6.2. Mediu-se a energia dissipada ao final de 10 ciclos, calculou-se a média da energia dissipada e os resultados foram registrados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pela topologia PPT com V_{bus} de 8,4 V.

Eficiência do conversor <i>Boost</i> [%]	Média da energia dissipada no PPT [kJ]
91,80	3,953
93,50	3,439
97,22	2,016
97,48	1,916
98,00	1,72
99,20	1,266
99,33	1,218

Fonte: Produção da autora.

Para a topologia DET, os valores de eficiência do S³R foram baseados na Tabela 6.3 e simulados no modelo através da tensão de queda do diodo. Os resultados da média da energia dissipada para cada uma destas eficiências se encontram na Tabela 6.13. A partir das Tabelas 6.12 e 6.13, pode-se construir o gráfico da Figura 6.13.

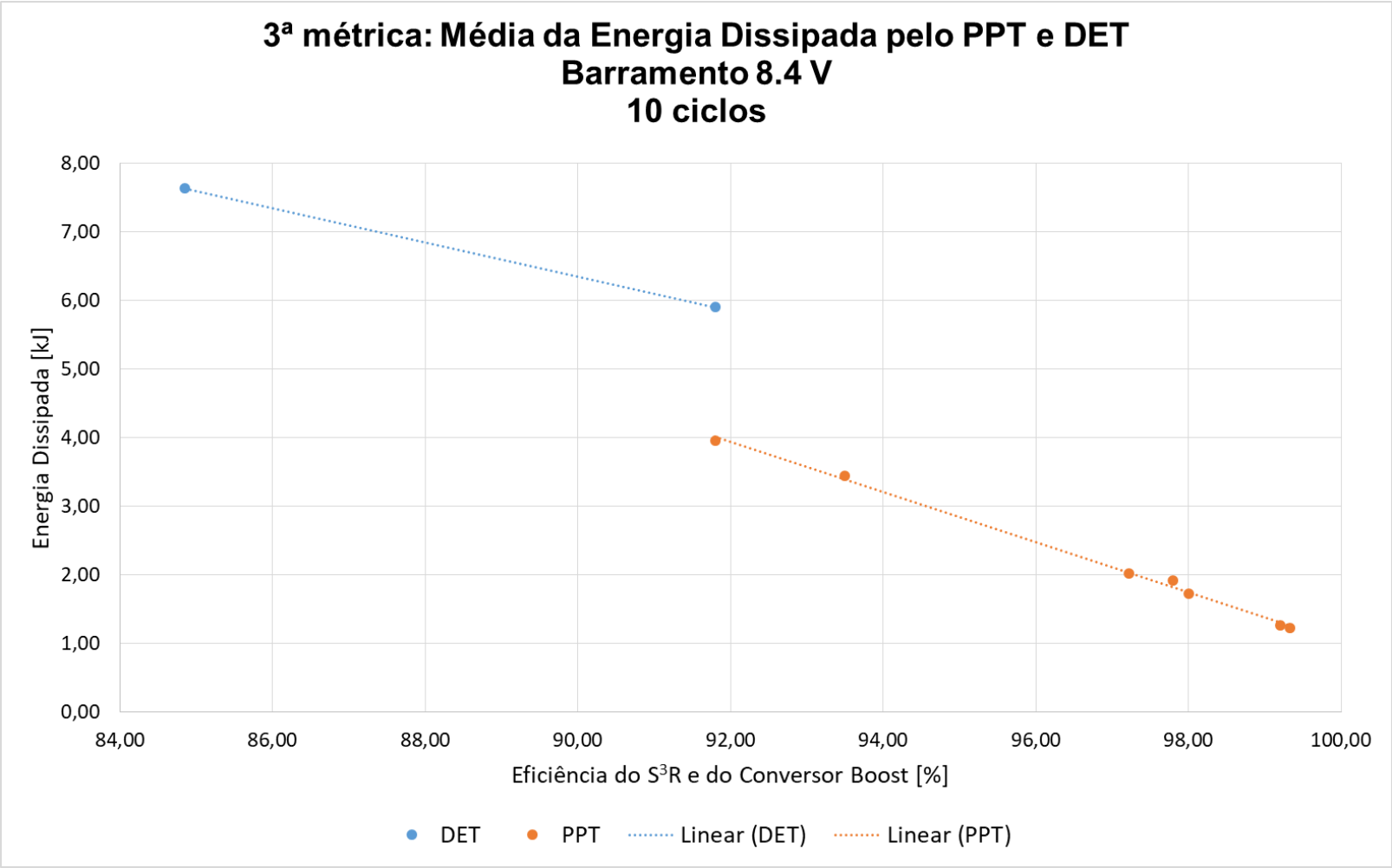
Tabela 6.13 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pela topologia DET com V_{bus} de 8,4 V.

Eficiência do S³R [%]	Tensão de queda do diodo [V]	Média da energia dissipada no DET [kJ]
84,85	1,50	7,63
91,80	0,75	5,90

Fonte: Produção da autora.

Todos os valores de energia dissipada utilizados foram retirados dos gráficos, resultados das simulações. Todos os gráficos se encontram no Apêndice B.3.

Figura 6.13 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pelas topologias PPT e DET – Barramento de 8,4 V.



Fonte: Produção da autora.

Pelo gráfico é possível verificar que, conforme a eficiência do conversor *Boost* aumenta, a média da energia dissipada para a topologia PPT diminui; isto também ocorre para a topologia DET: quando a eficiência do S³R aumenta, a média da energia dissipada diminui. Analisando verticalmente, observa-se que, para uma eficiência de 91,80% para o S³R e para o conversor *Boost*, a topologia DET tem 5,90 kJ de média de energia dissipada enquanto a topologia PPT tem 3,953 kJ de média de energia dissipada, ou seja, a média da energia dissipada pela topologia DET é 1,95 kJ a mais que a topologia PPT. Para outros valores de eficiência de S³R e *Boost*, a topologia PPT a média da energia dissipada é menor que na topologia DET.

Caso 2 – Influência das eficiências dos blocos PPT e DET para tensão de barramento de 12,6 V

Neste caso, os sistemas foram simulados com a tensão de barramento de 12,6 V, a fim de identificar qual dissipa menos energia.

Para a topologia PPT, os valores de eficiência, para o conversor *Boost* foram variados de forma crescente, adotando-se os valores da Tabela 6.2. Mediu-se a energia dissipada ao final de 10 ciclos, calculou-se a média da energia dissipada e os resultados foram registrados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pela topologia PPT com V_{bus} de 12,6 V.

Eficiência do conversor <i>Boost</i> [%]	Média da energia dissipada no PPT [kJ]
91,80	3,27
93,50	2,56
97,22	1,10
97,48	1,00
98,00	0,81
99,20	0,37
99,33	0,32

Fonte: Produção da autora.

Para a topologia DET, os valores de eficiência do S³R foram baseados na Tabela 6.3, e simulados no modelo através da tensão de queda do diodo. Os resultados da média da energia dissipada para cada uma destas eficiências se encontram na Tabela 6.15. Assim como no caso 1, a partir das Tabelas 6.14 e 6.15 pode-se construir o gráfico da Figura 6.14, considerando a média da energia dissipada pela topologia PPT com valores variados de eficiências para o conversor *Boost* e para o S³R.

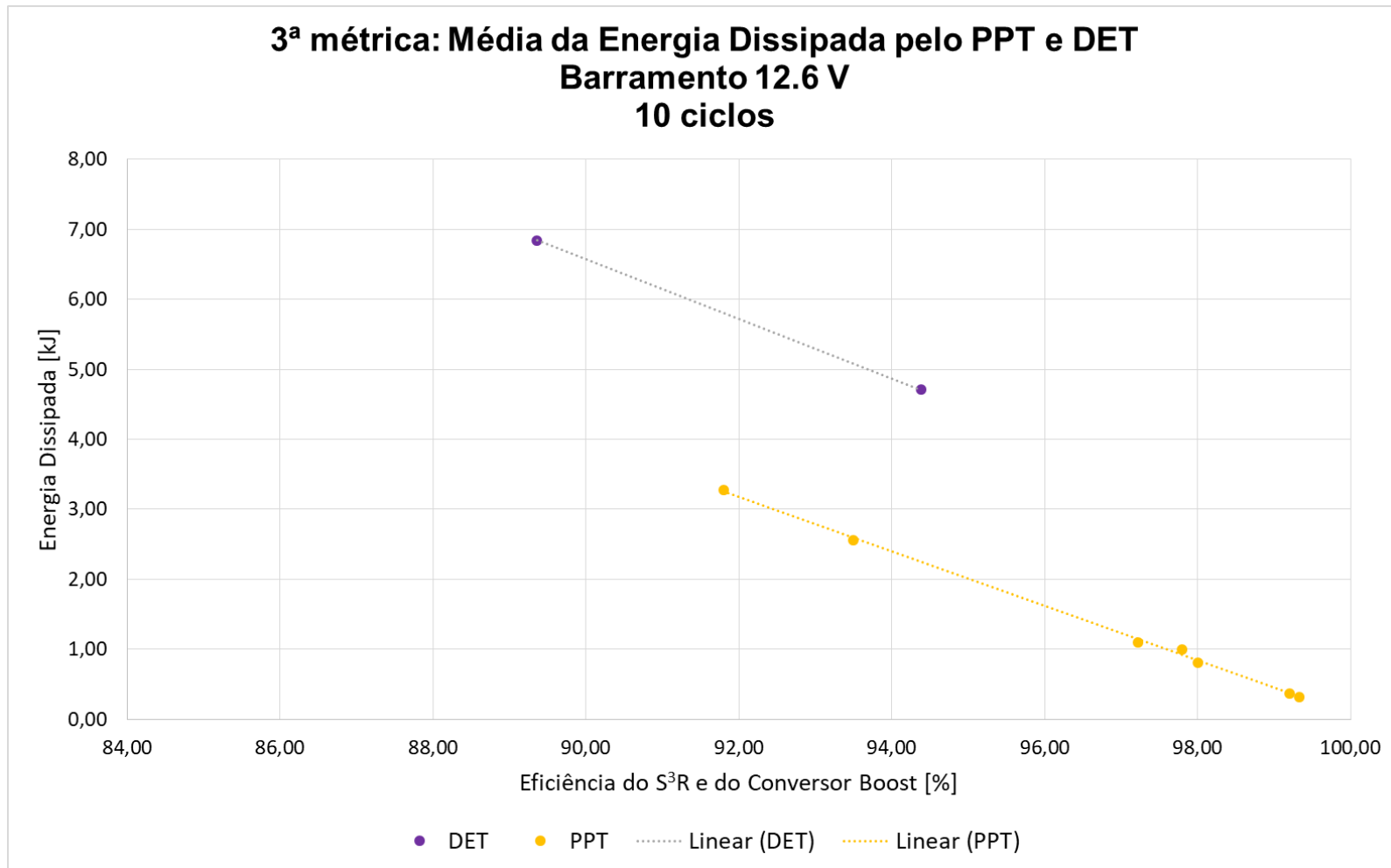
Tabela 6.15 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pela topologia DET com V_{bus} de 12,6 V.

Eficiência do S³R [%]	Tensão de queda do diodo [V]	Média da energia dissipada no DET [kJ]
89,36	1,50	6,84
94,38	0,75	4,71

Fonte: Produção da autora.

Todos os valores de energia dissipada utilizados foram retirados dos gráficos, resultados das simulações. Todos os gráficos se encontram no Apêndice B.3.

Figura 6.14 - 3ª Métrica: Média da energia dissipada pelo PPT e DET – Barramento de 12,6 V.

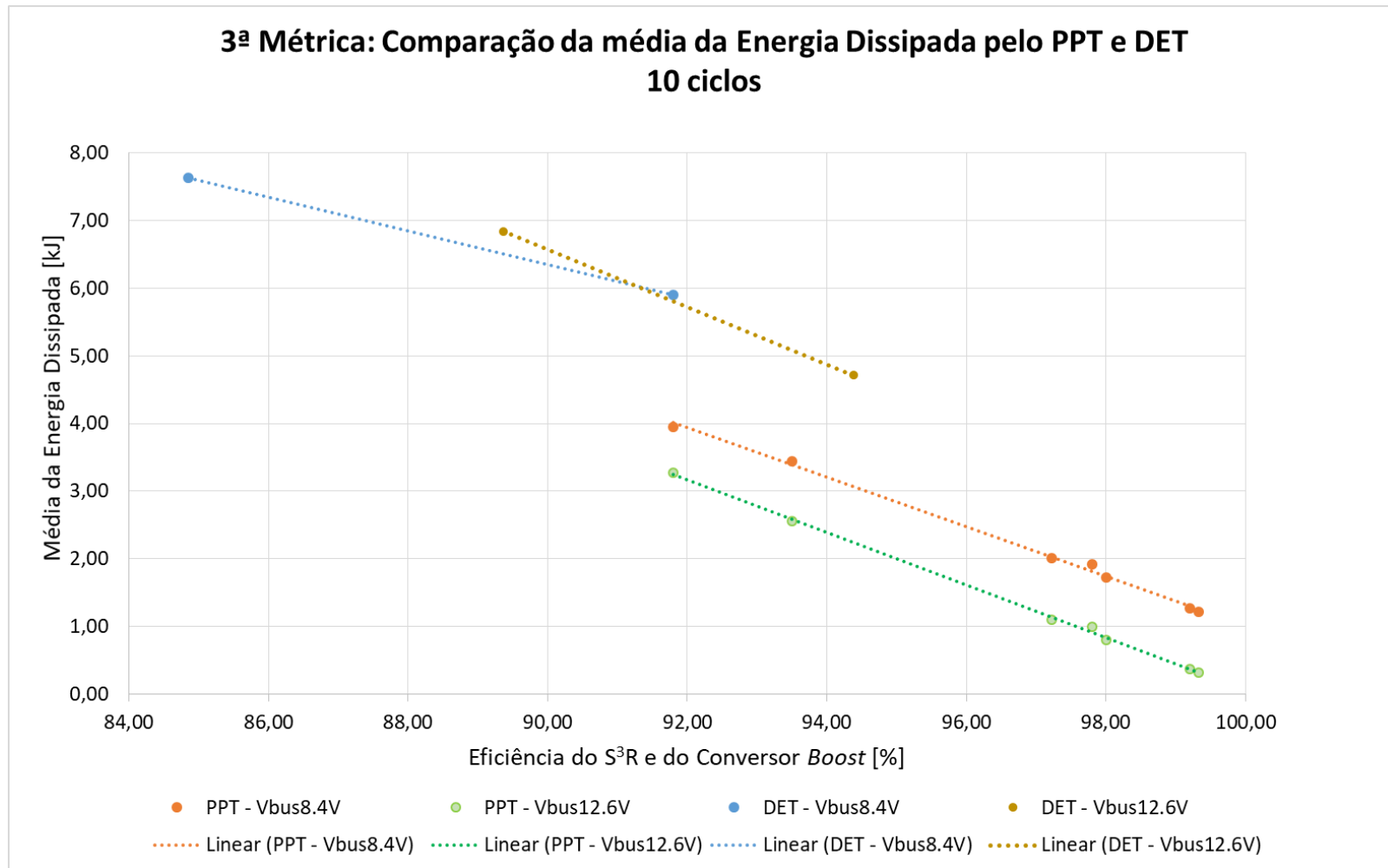


Fonte: Produção da autora.

Pelo gráfico é possível verificar que, assim como no caso 1, a média das energias dissipadas pelas topologias PPT e DET diminuem à medida que a eficiência do conversor *Boost* e do S³R aumentam. Analisando verticalmente, observa-se que para uma eficiência de 92% para o S³R e para o conversor *Boost*, a média da energia dissipada pela topologia DET é de $\approx 4,5$ kJ enquanto a média da energia dissipada pela topologia PPT é de $\approx 3,5$ kJ. A topologia DET tem uma diferença de média de energia dissipada de 1 kJ a mais que o PPT.

A Figura 6.15 faz a comparação da média da energia dissipada pelas topologias PPT e DET em ambos os barramentos.

Figura 6.15 - 3ª Métrica: Comparação da média da energia dissipada pelas topologias PPT e DET.



Fonte: Produção da autora.

Observa-se, pelo gráfico que a energia dissipada pelas topologias PPT e DET, em barramento 12,6 V, é menor que a energia dissipada em barramento 8,4 V.

7 CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as considerações finais, as contribuições referentes aos objetivos desse trabalho, as dificuldades encontradas e as recomendações para trabalhos futuros sobre o tema.

7.1 Conclusões e contribuições

Neste trabalho foram estudadas as principais topologias de EPS categorizadas segundo com dois critérios: o método de transferência de energia e o método de regulação da tensão de barramento. A primeira contribuição deste trabalho foi a inclusão, nesta categorização, das topologias de barramento regulado que utilizam conversores bidirecionais (BCDR), conversores B³R e S⁴R.

Foram apresentados os modelos elétricos em malha fechada das topologias PPT e DET em barramento não regulado. Estes modelos são compostos de painel solar, conversor, bateria e carga, os quais, também, foram modelados neste trabalho.

Foi utilizado um critério para comparação e escolha da melhor topologia que leva em consideração, a eficiência. Este critério consiste em medir a energia dissipada pelas topologias durante: 1) o *Sunlight*; 2) 1 órbita; e 3) 10 órbitas.

As topologias PPT e DET foram simuladas no software *Matlab/Simulink* o que permitiu facilmente a verificação do critério de eficiência energética para as topologias citadas. O uso de modelos computacionais facilita enormemente o cálculo desse requisito, o qual seria dificilmente obtido por meios analíticos por causa do barramento não regulado, com sua tensão variada, juntamente com os diversos dispositivos não lineares presentes. A segunda contribuição deste trabalho foi a modelagem, implementação e simulação computacional das topologias PPT e DET em barramento não regulado em *Matlab/Simulink*.

Foram apresentados os processos e dimensionamentos do painel solar e bateria para o estudo de caso, a missão RaioSat. Os resultados dos dimensionamentos foram utilizados para simulação das topologias. Estes dimensionamentos foram a terceira contribuição deste trabalho.

Neste trabalho constatou-se que o aumento da tensão de barramento (hipótese 1) diminui a energia dissipada, ou seja, a eficiência do sistema aumenta. Constatou-se, também, que o aumento da eficiência do conversor *Boost* e do S³R (hipótese 2) diminui a energia dissipada pelo sistema.

No trabalho em questão, pode-se observar que em média a energia total dissipada na topologia DET foi maior do que na topologia PPT. Assim, de acordo com o critério de eficiência, recomenda-se a topologia PPT para o EPS da missão RaioSat. Os resultados desta comparação poderiam ser diferentes se comparadas e avaliadas segundo outros critérios como custos e confiabilidade, não analisados neste trabalho.

7.2 Dificuldades encontradas

As principais dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho foram:

- A não familiaridade da autora com o processo de pesquisa de conhecimento acerca da problemática das investigações, com o funcionamento do sistema de energia e dos seus equipamentos; e como software *Matlab/Simulink* e seus recursos;
- Erros numéricos gerados pelo Solver (nos simuladores) do *Simulink*. Estes erros numéricos surgiram em razão de descontinuidades de processos que, por sua vez, são causados por elementos chaveados, presente nos modelos (mais detalhes no Apêndice C);
- Conciliar família, maternidade, trabalho e estudo; e
- Devido à pandemia do COVID-19, por motivos pessoais, os estudos e, conseqüentemente, a evolução e análises foram adiados, o que gerou uma certa incerteza se os objetivos propostos seriam alcançados.

7.3 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- Melhorias nos modelos de painel solar, bateria, conversores e carga;
- Análise da influência das cargas na energia dissipada por cada topologia;
- Análise de sensibilidade, conforme método de Monte Carlo, para analisar a variação dos resultados em diferentes situações.
- A continuidade da comparação, das topologias DET e PPT, para outras topologias e segundo outros critérios, tais como: a) massa; b) confiabilidade; c) custos; ou
- Estudo comparativo, relacionado a otimização, sobre os tamanhos de painéis solares para cada topologia, procurando responder qual o menor painel solar que atende a uma determinada demanda de potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M.C.P. **Simulação de Sistemas Espaciais (CSE-304-4)**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, 03 nov. 2020. Notas de aula.

BARUEL, M. F. **Estudo da variação da corrente fotogerada nos painéis solares dos satélites do INPE** – Dissertação (Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

BELTRAME, F.; DUPONT, F. H.; SARTORI, H. C.; AND PINHEIRO, J. R. Design methodology to improve the converters' efficiency applied to photovoltaic systems. In: IECON 2014 - 40TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, DALLAS, TX, 2014. **Proceedings...**, 2014. p. 1397-1403. doi: 10.1109/IECON.2014.7048684

BIELA, J.; KOLAR, J. W.; DEBOY, G. Optimal design of a compact 99.3% efficient single-phase PFC rectifier. In: APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION, 25., 2010. **Proceedings...**, 2010, p. 1397 - 1404.

BROWN, J. **Point of load converters**: the topologies, converters, and switching devices required for efficient conversion. 2002. Disponível em: <<http://www.vishay.com/docs/72779/72779.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2020.

BURT, R. **Distributed electrical power system in cubesat applications**. Thesis (Master of Science in Electrical Engineering) - Utah State University, Logan, Utah, 2011, 83 p.

CAL POLY. **CubeSat design specification**: Rev 13, Cal Poly SLO. Feb. 2014. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf>. Acesso em 20 dez. 2019.

CANAL SOLAR. 2020. **Curva painel solar**. Disponível em:<<https://canalsolar.com.br/index.php/artigos/item/59-entendendo-as-curvas-iv-e-pv-dos-modulos-fotovoltaicos>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

CAPEL, A.; PEROL, P. Comparative performance evaluation between the S4R and the S3R regulated bus topologies. In: ANNUAL POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 32., 2001. **Proceedings...** IEEE, 2001. p. 1963-1969. doi: 10.1109/PESC.2001.954409.

CAPEL, A.; SULLIVAN, D.O. Influence of the bus regulation on telecommunication spacecraft power system and distribution. In: ESA ANNUAL IEEE PESC, 16., 1985, Toulouse. **Proceedings...** Toulouse: IEEE, 1985. (ESA SP-230, may 1985).

CARVALHO, M. R. S. D. **Modelagem de conversor c.c./c.c. de alto ganho e alta eficiência baseado no boost com indutor acoplado e entrada intercalada para integração em módulos fotovoltaicos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **CubeSats. Resumo executivo.** Brasília, DF: 2018. ISBN: 978-85-5569-142-3, 46p. Disponível em:<https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/CGEE_resumoexecutivo_CubeSats_Web.pdf>. Acesso em: 20 Jan. 2020.

CHO, B. H.; LEE, J. R. AND LEE, F. C. Large-signal stability analysis of spacecraft power processing systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 5, n. 1, p. 110-116, 1990. doi: 10.1109/63.46005. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee.org.ez61.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=46005&isnumber=1740>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

DAIGLE, M.; KULKARNI, C. S. **End-of-discharge and end-of-life prediction in lithium-ion batteries with electrochemistry-based aging models** [S.l.]: AIAA Infotech @ Aerospace, 2016.

DATASHEET SLPB 554374H DA KOKAM. **Cell specification data: SLPB 554374H.** Kokam, 2004. Disponível em: <<https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000206541DS01/datenblatt-206541-kokam.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2021.

DATASHEET XTJ PRIME DA SPECTROLAB. **XTJ_prime_data_sheet.** 2018. Disponível em: <https://www.spectrolab.com/photovoltaics/XTJ-Prime_Data_Sheet.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2019.

DIAS, A. V. **Chave de proteção com limitação de corrente para aplicações espaciais.** Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2019.

DONATO, C. J. **Projeto e implementação de uma unidade de controle de potência para o satélite universitário ITASAT.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.

DUBARRY M.; VUILLAUME N.; LIAW B. Y. From single cell model to battery pack simulation for Li-ion batteries [J]. **Journal of Power Sources**, v. 186, p. 500 – 507, 2009.

EAKMAN, D.; LAMBECK, R.; MACKOWSKI, M.; SLIFER, L. **Small spacecraft power and thermal subsystems**. [S.I.]: NASA, 1994.

FREIRE, C. F. S. **Estudo de topologias de subsistemas de suprimento de energia de satélites e desenvolvimento de um procedimento de projeto da topologia híbrida**. 2009. 236p. (INPE-15778-TDI/1521). Dissertação (Mestrado em Mecânica Espacial e Controle) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/34RUHR2>>. Acesso em: 28 nov. 2019.

FREEMAN, W. E., Peak-power tracker versus direct energy transfer electrical power systems. In: INTERSOCIETY ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE, 27., 1992. **Proceedings...** 1992. v.2.

GIANNIOTO, G.; SCORZAFAVA, E.; CARLANI, D. A new, single diode, sequential switching shunt regulator. In: E3S WEB CONFERENCE, 2017. **Proceedings...** 2017. v. 16, p. 14013.

HART, D. **Eletrônica de potência**: análise e projetos de circuitos. [S.I.]: McGraw Hill; Artmed, 2012.

HARTLEY T. T.; JANNETTE A. G. A first principles battery model for the International Space Station [A]. In: INTERNATIONAL ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE, 3., 2005. **Proceedings...** 2005.

HU X.; LI S.; PENG H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries [J]. **Journal of Power Sources**, v. 198, p. 359 – 367, 2012.

JEON, S.K.; FOOTDALE, J. N. Scaling and design of a modular origami solar array. In: AIAA SPACECRAFT STRUCTURES CONFERENCE, 2018, Kissimmee, Florida. **Proceedings...** 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.2514/6.2018-2204>>. Acesso em: 24 jan. 2020.

JULIO FILHO, A. C.; TIKAMI, A.; PAULA, E. S. F.; PIÑEROS, J. M.; FERNANDES, G. F.; CARMARGO, L. P.; SANTOS, C. A. M. B.; DOS SANTOS, W. A.; NACCARATO, K. CubeSat development for lightning flashes detection: RaioSat project. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 12, p. 80-93, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5028/jatm.cab.1161>>. Acesso em: 17 nov. 2021.

KNAP, V.; VESTERGAARD, L.K.; STROE, D.-I. A review of battery technology in cubesats and small satellite solutions. **Energies**, v. 13, e 4097, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en13164097>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

KOLAR, J.; BIELA, J.; MINIBOECK, J. Exploring the pareto front of multi-objective single-phase pfc rectifier design optimization - 99.2% efficiency vs. 7kW/dm³ power density. In: INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE, 6., 2009. **Proceedings...** 2009. p. 1 – 21.

KULU, E. **Nanosats database**. Disponível em: <<https://www.nanosats.eu/>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

LEY, W.; WITTMANN, K.; HALLMANN, W. **Handbook of space technology**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

MAGALHÃES, R. O. **Modelagem, simulação e validação experimental de um sistema de rastreamento de potência máxima para geradores solares de satélites artificiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/ibi/6qtX3pFwXQZGivnJSY/HSJEj?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR>>. Acesso em: 10 set. 2021.

MAGALHÃES, R. O. **Estudo de avalanche térmica em um sistema de carga e descarga de bateria em satélites artificiais**. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3B7FP2H>>. Acesso em: 14 out. 2021.

MAGALHÃES, R. O.; MOREIRA, H.J.P. Space power topology selection and its system level modeling and control. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 12, e2720, 2020. ISSN 2175-9146. Disponível em: <<https://doi.org/10.5028/jatm.v12.1158>>. Acesso em: 14 out. 2021.

MATHWORKS. **Ordinary Differential Equation Solvers ODE23 and ODE45. 2014**. Disponível em: <<https://blogs.mathworks.com/cleve/2014/05/26/ordinary-differential-equation-solvers-ode23-and-ode45/>>. Acesso em: 03 jan. 2021.

MOLINA, M.G.; ESPEJO, E.J. Modeling and simulation of grid-connected photovoltaic energy conversion systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 16, p. 8702-8707, 2014.

MORAES, C. **Célula fotovoltaica: tudo que você precisa saber**. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>. Acesso em: 14 fev. 2021.

MOREIRA, H. J. P. **Uma abordagem para seleção e análise de um sistema de suprimento de energia para aplicação em satélites de médio e grande portes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

MOURRA, O.; FERNANDEZ, A.; TONICELLO, F. Buck Boost Regulator (B2R) for spacecraft solar array power conversion. In: ANNUAL IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION (APEC), 25., 2010. **Proceedings...** 2010. p. 1313-1319. doi: 10.1109/APEC.2010.5433399. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez61.periodicos.capes.gov.br/document/5433399>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

MOURRA, O.; FERNANDEZ, A.; TONICELLO, F.; LANDSTROEM, S. Multiple port DC converter for spacecraft power conditioning unit. In: ANNUAL IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION (APEC), 26., 2012. **Proceedings...** 2012. p. 1278-1285, doi: 10.1109/APEC.2012.6165983. Disponível em: <<https://ieeexplore-ieee-org.ez61.periodicos.capes.gov.br/document/6165983>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **State of the art small spacecraft technology: small spacecraft systems.** 2018. Disponível em: <<https://sst-soa.arc.nasa.gov/>>. Acesso em: 10 out. 2019.

ORABY, O. A.; MOHAMED, F. E.; HANNA, T. E.; FAHMY, F. H. UASat solar array design and performance characteristics. **International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)**, v. 3, n. 2, 2014.

PATEL, M. R. **Spacecraft power systems.** Boca Raton: CRC Press, 2005. 658p.ISBN 0849327865.

PATIL, A. R.; CHO, S. H.; LEE, F. C. Design considerations for a solar array switching unit. In: INTERSOCIETY ENERGY CONVERSION ENGINEERING CONFERENCE, 25., 1990. **Proceedings...** 1990. p. 373-379. doi: 10.1109/IECEC.1990.716919.

PAULA, E. S. F.; MAGALHÃES, R. Análise de balanço de potência, projeto preliminar de painel solar e dimensionamento de bateria de um *cubesat* 3u para detecção de raios. In: CONGRESSO AEROESPACIAL BRASILEIRO, 2., 2019. **Anais...** Santa Maria (RS): Universidade Federal de Santa Maria, 2019. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/2cab2019/224874-analise-de-balanco-de-potencia-projeto-preliminar-de-painel-solar-e-dimensionamento-de-bateria-de-um-CubeSat-3u/>>. Acesso em: 20 dez. 2019.

PESSOTTA, F. A. **Uma estratégia para tratamento de falhas sistêmicas (FDIR) em ACDHs de satélites de pequeno e médio porte.** 2018 Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais - Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018. Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/06.11.18.44/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

PRADHAN, A.; PANDA, B. A simplified design and modeling of boost converter for photovoltaic system. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, v. 8, n. 1, p.141-149, 2018.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. [S.l.]: Makron, 1999.

RAUSCHENBACH, H. S. **Solar cell array design handbook: the principles and technology of photovoltaic energy conversion**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1980. 549p. ISBN 0-442-26842-4.

RIBES-MALLADA, U.; LEYVA, R.; GARCES, P. Sensitivity analysis in boost converters optimal design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, 11., 2011. **Proceedings...** IEEE, 2011. p. 1-6.

ROCHA, S. L. **Power control unit development model of the ITASAT university satellite energy supply subsystem**. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Eletrônica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

SANTOS, M. A. D. **Regime internacional aplicável a pequenos satélites de baixa complexidade**: propostas para salvaguardar atores espaciais e mitigar impactos ambientais no espaço exterior. 2019. Tese (Doutorado em Direito Ambiental Internacional) - Universidade Católica de Santos, Santos, 2019. Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/06.27.17.03/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

SHEKOOFA, O.; KARBASIAN, S. Design criteria for electrical power subsystem's topology selection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN SPACE TECHNOLOGIES, 6., 2013. **Proceedings...** IEEE, 2013.

SHEKOOFA, O.; KOSARI, E. Comparing the topologies s satellite electrical power subsystem based on system level specifications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN SPACE TECHNOLOGIES, 6., 2013. **Proceedings...** 2013. p. 671-675.

SILVA, J. C. D. **Análise e projeto de um conversor boost de três níveis intercalado**. 215.108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015. Disponível em:<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1752/1/PB_PPGEE_M_Silva%2C%20Jean%20Carlos%20da_2015.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2020.

SOUZA, M. L. O.; TRIVELATO, G. C. **Simulators and simulations: their characteristics and applications to the simulation and control of aerospace vehicles**. 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.4271/2003-01-3737>>. Acesso em: 25 jan. 2022.

SULLIVAN, D. O. Satellite power system topologies. **ESA Journal**, v.13, p. 77-88, 1989.

SULLIVAN, D. O.; WEINBERG, A. The sequential Serial Shunt Regulator -S³R. In: ESTEC SPACECRAFT POWER CONDITIONING SEMINAR, 3., 1977, Noordwijk, The Netherlands. **Proceedings...** 1977. p. 123–131.

TIBURSKI, M. J.; BRIDI, É.; SARTORI, H. C.; J. R. PINHEIRO. Analysis and design of a high step-up boost converter applied to fuel cell. In: 13th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 2018. **Proceedings...** 2018. pp. 817-824. doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627066.

TREMBLAY, O.; DESSAINT L. A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. **World Electric Vehicle Journal**, v. 3, 2009.

TSAI, H. L.; SIANG, T. C. Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING COMPUTER SCIENCE, 2008. **Proceedings...** 2008.

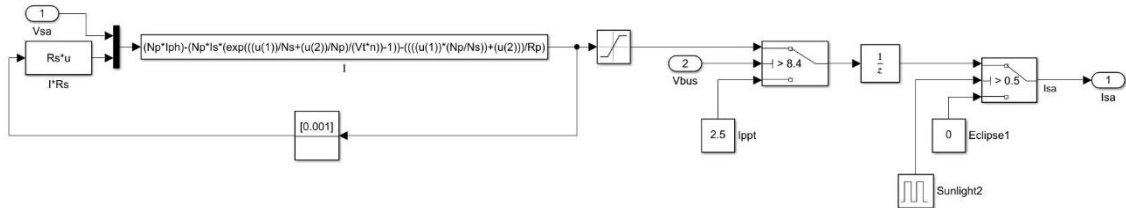
TWIGGS, R. Origin of *CubeSat*. In: HELVAJIAN, H.; JANSON, S.W. **Small satellite: past, present and future**. El Segundo, CA: The Aerospace Press, 2008. p. 151-173.

WERTZ, J.; LARSON, W. **Space mission analysis and design**. 3.ed. [S.l.]: Microcosm, 1999. 976 p. ISBN 9780792359012.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DOS MODELOS EM *SIMULINK*

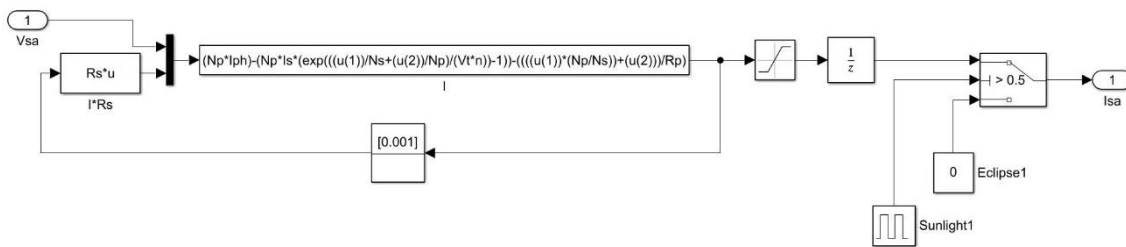
As Figuras A.1-A.8, a seguir, detalham os blocos desenvolvidos em *Simulink*, para os modelos utilizados neste trabalho.

Figura A.1 - Bloco painel solar PPT.



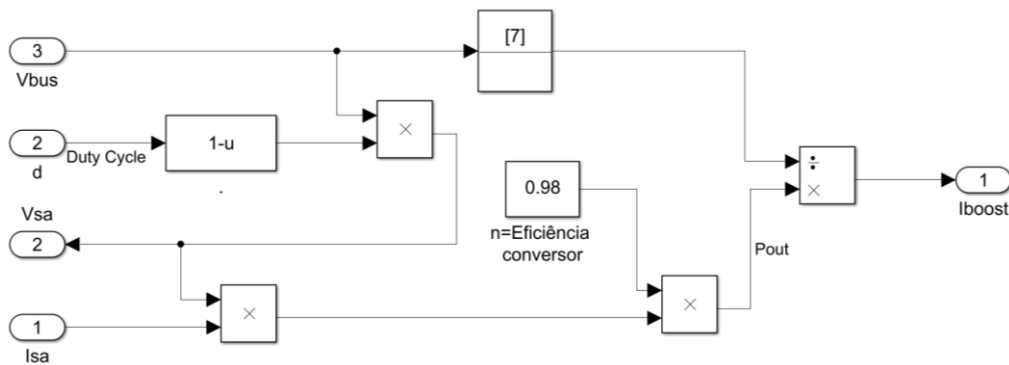
Fonte: Produção da autora.

Figura A.2 - Bloco painel solar DET.



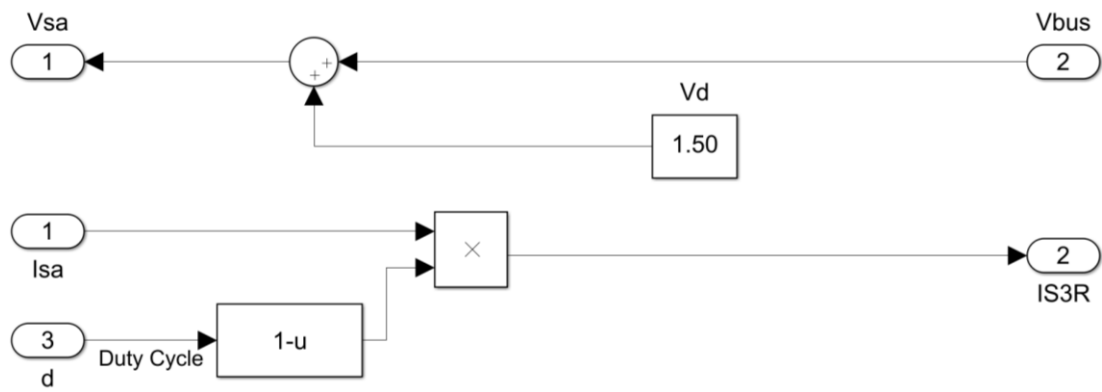
Fonte: Produção da autora.

Figura A.3 - Bloco conversor Boost.



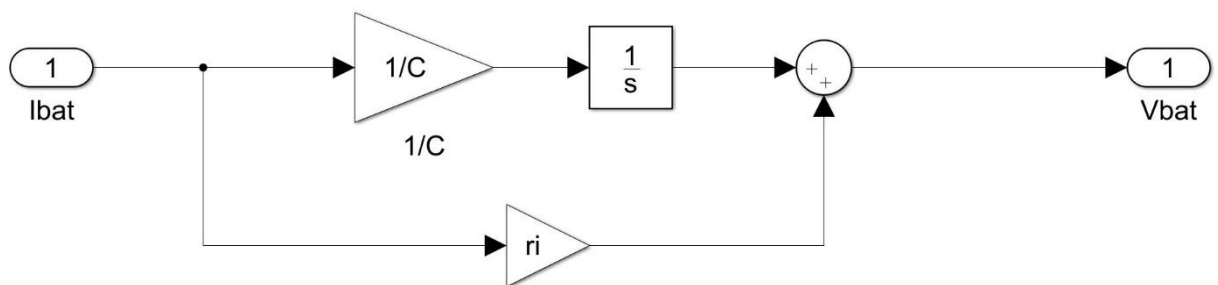
Fonte: Produção da autora.

Figura A.4 - Bloco S³R.



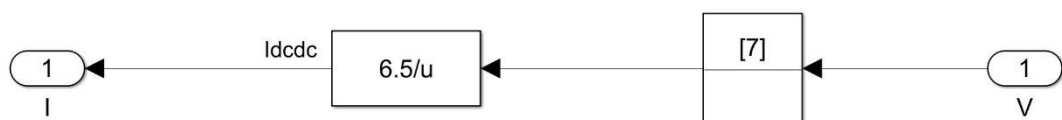
Fonte: Produção da autora.

Figura A.5 - Bloco Bateria



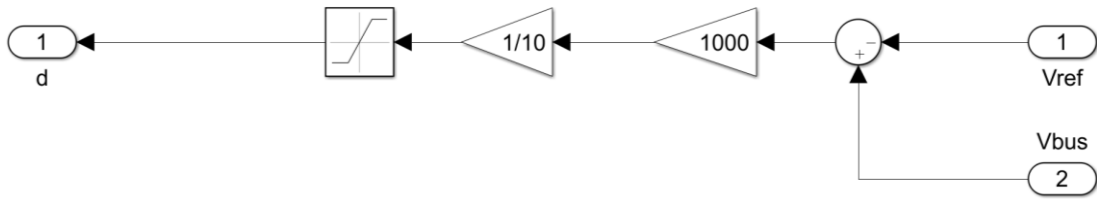
Fonte: Produção da autora.

Figura A.6 - Bloco Carga.



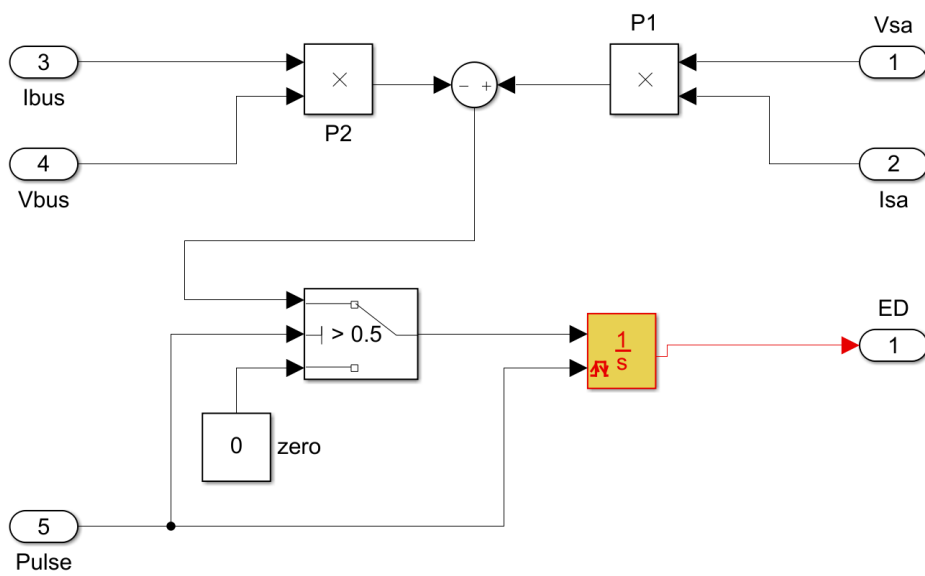
Fonte: Produção da autora.

Figura A.7 - Bloco controle PPT e DET.



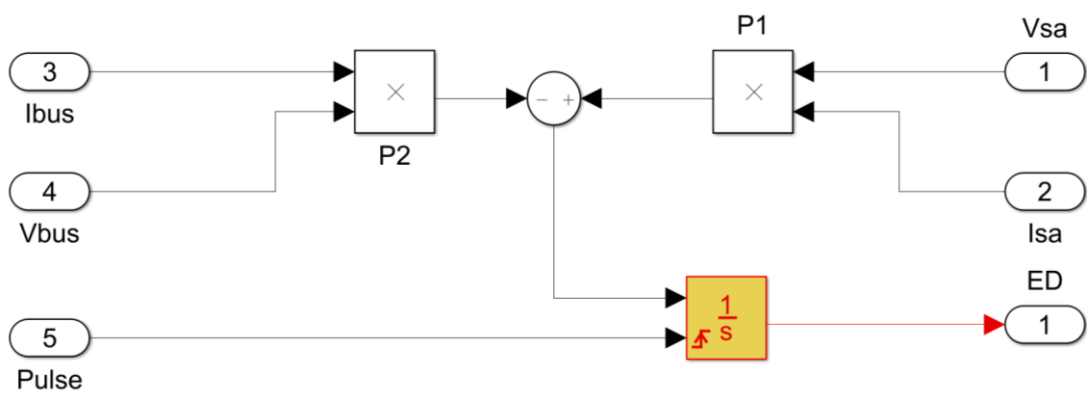
Fonte: Produção da autora.

Figura A.8 - Bloco Energia Dissipada (1ª métrica).



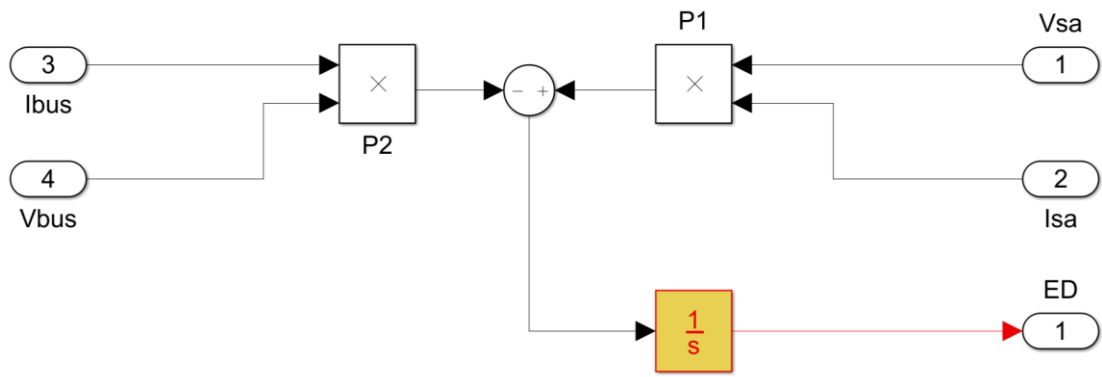
Fonte: Produção da autora.

Figura A.9 - Bloco Energia Dissipada (2ª métrica).



Fonte: Produção da autora.

Figura A.10 - Bloco Energia Dissipada (3ª métrica).



Fonte: Produção da autora.

APÊNDICE B – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

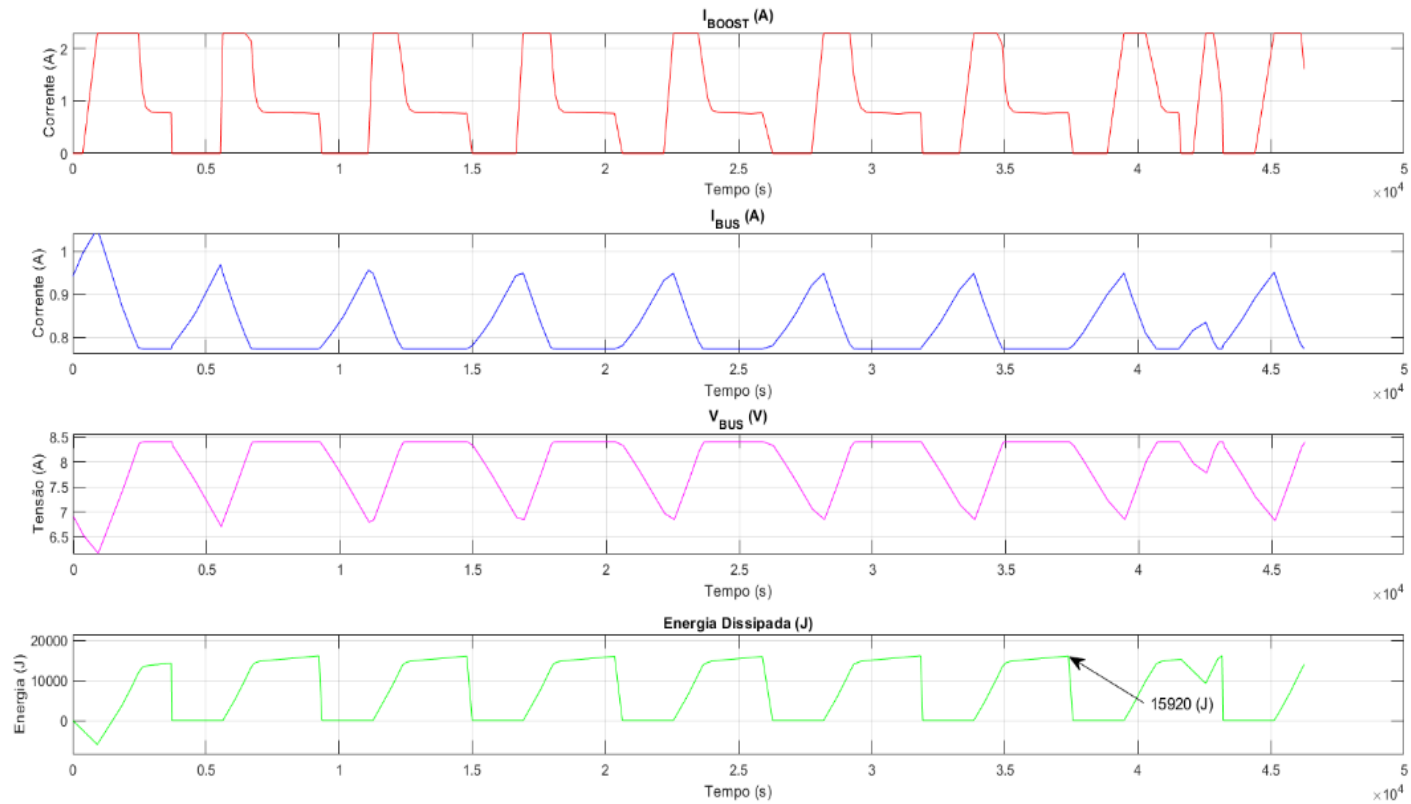
Este Apêndice apresenta os resultados das simulações para a primeira, segunda e terceira métrica.

B.1 - Resultados para a primeira métrica

As Figuras B.1-B.18, a seguir, mostram as correntes no barramento (I_{BOOST}/I_{S3R}) e na carga útil (I_{BUS}), a tensão no barramento (V_{BUS}), e a energia dissipada (ED) no PPT e no DET com barramentos de 8,4 V e 12,6 V, para **primeira métrica**, citados na Seção 6.5.1.

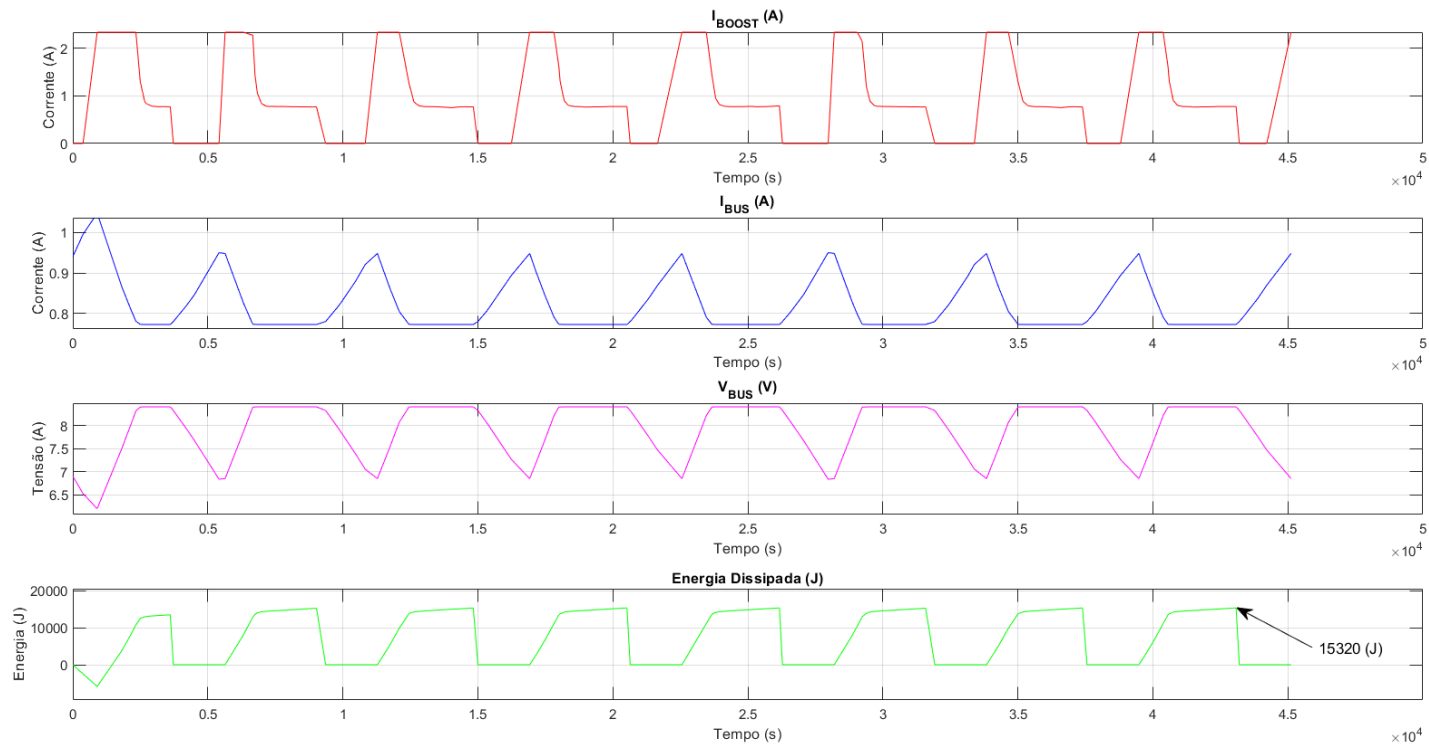
B.1.1 - PPT em barramento 8,4 V

Figura B.1 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.



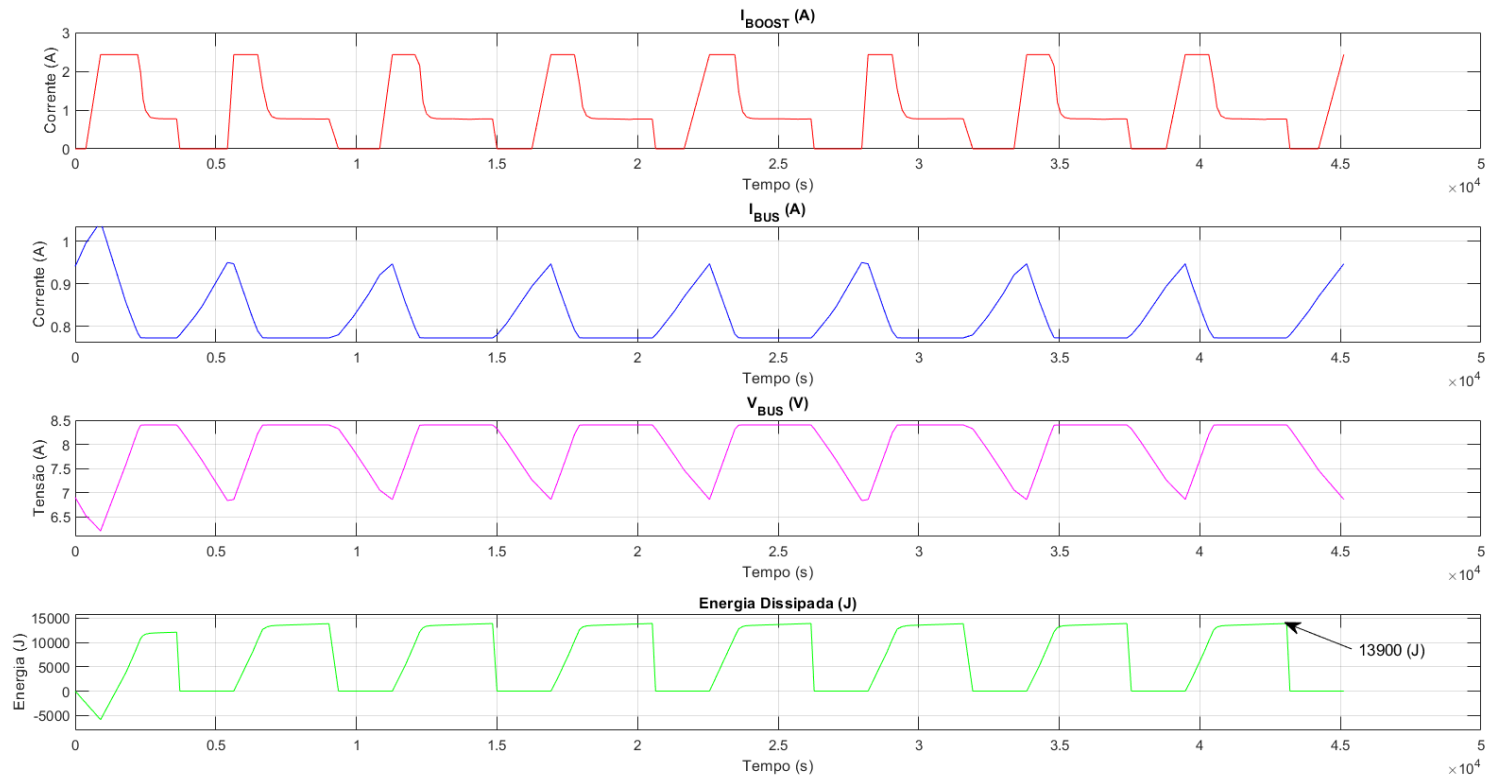
Fonte: Produção da autora.

Figura B.2 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.



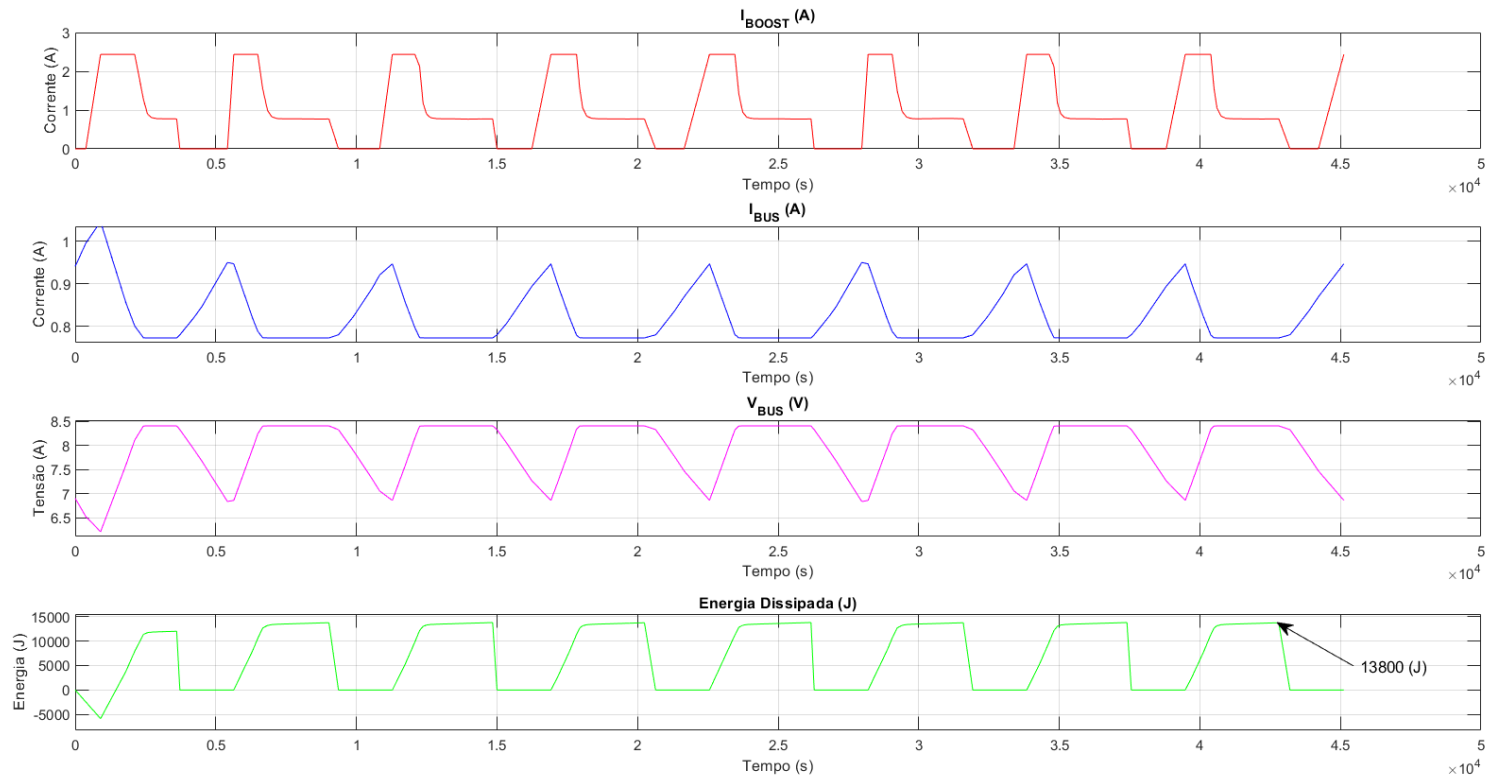
Fonte: Produção da autora.

Figura B.3 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.



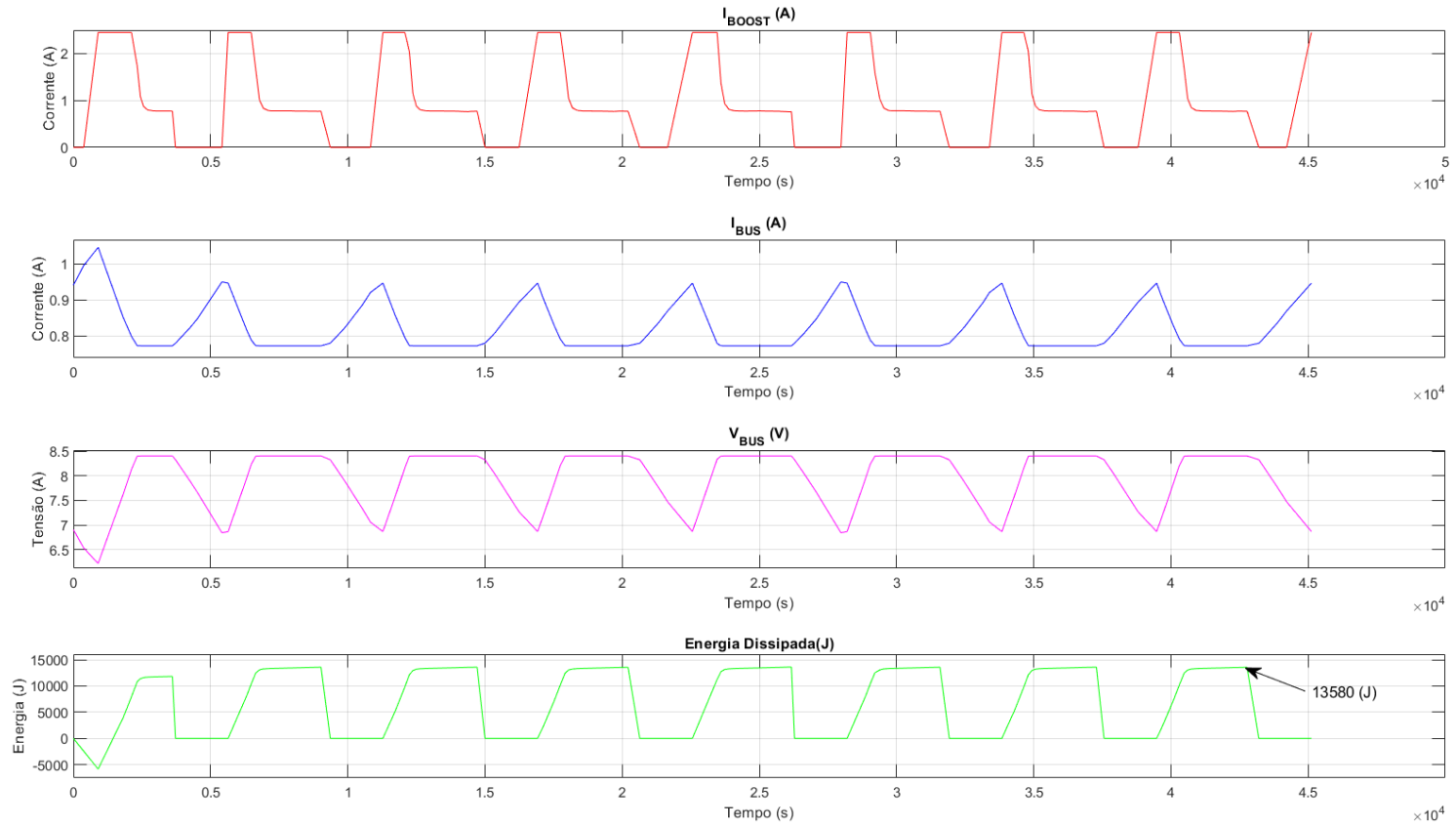
Fonte: Produção da autora.

Figura B.4 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.



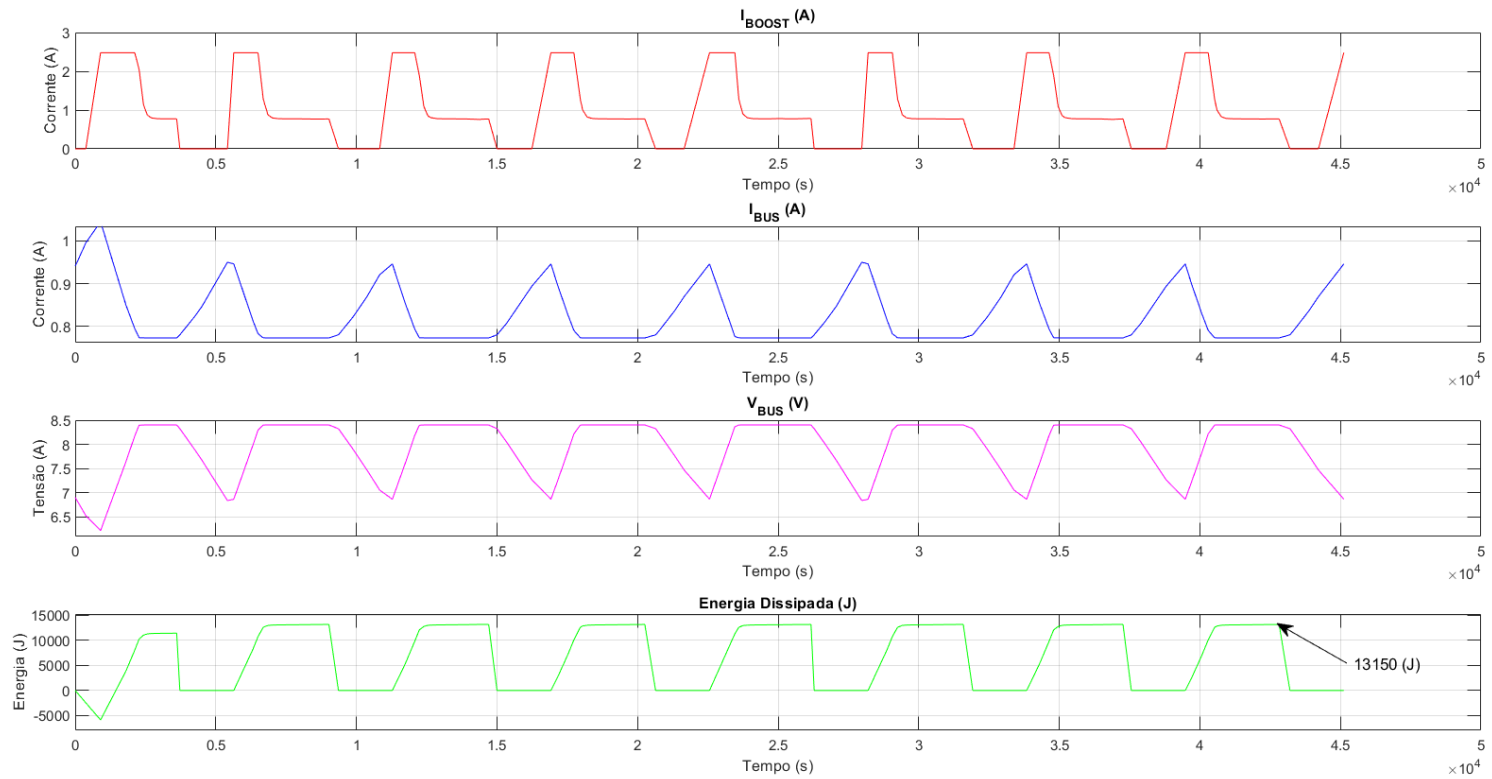
Fonte: Produção da autora.

Figura B.5 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.



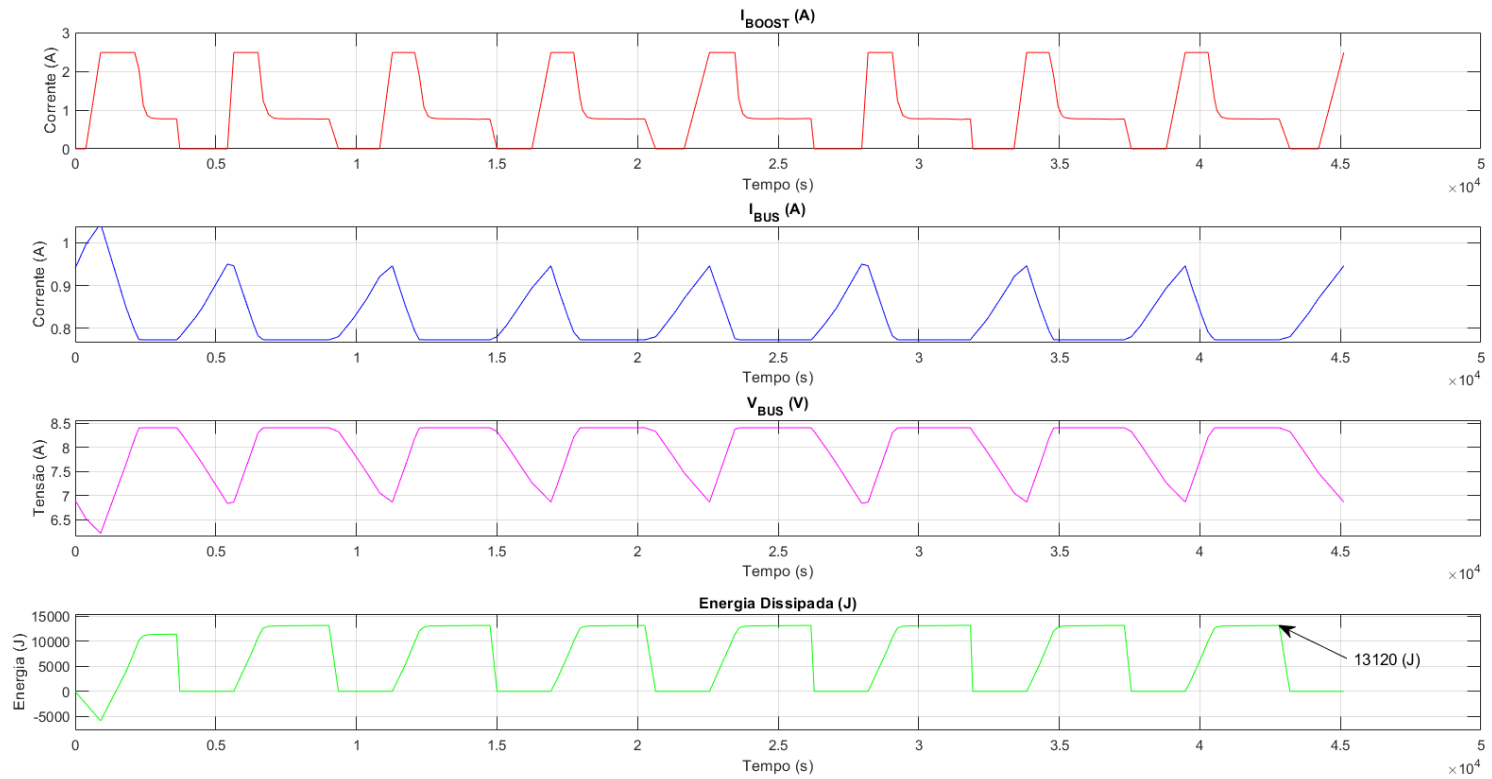
Fonte: Produção da autora.

Figura B.6 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

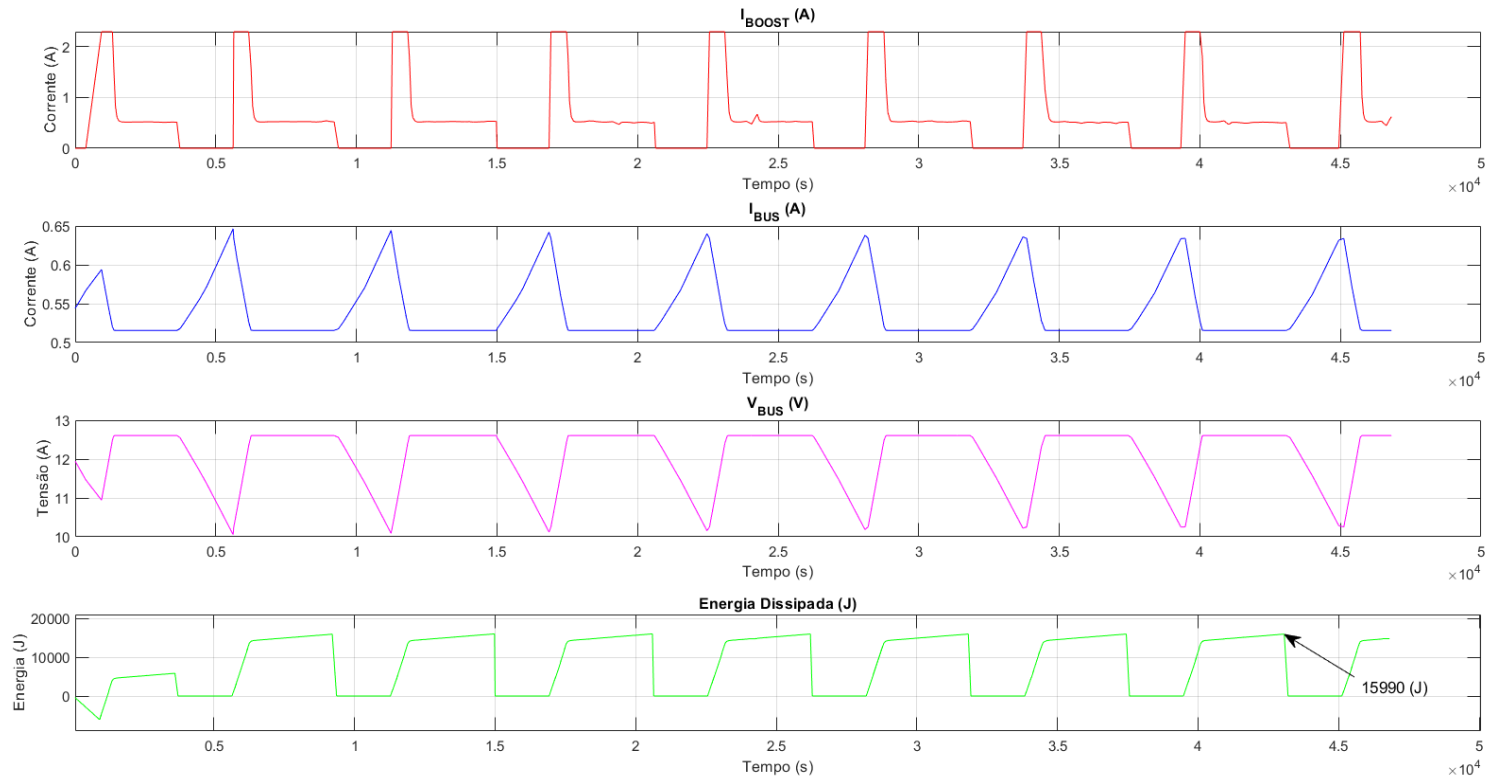
Figura B.7 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

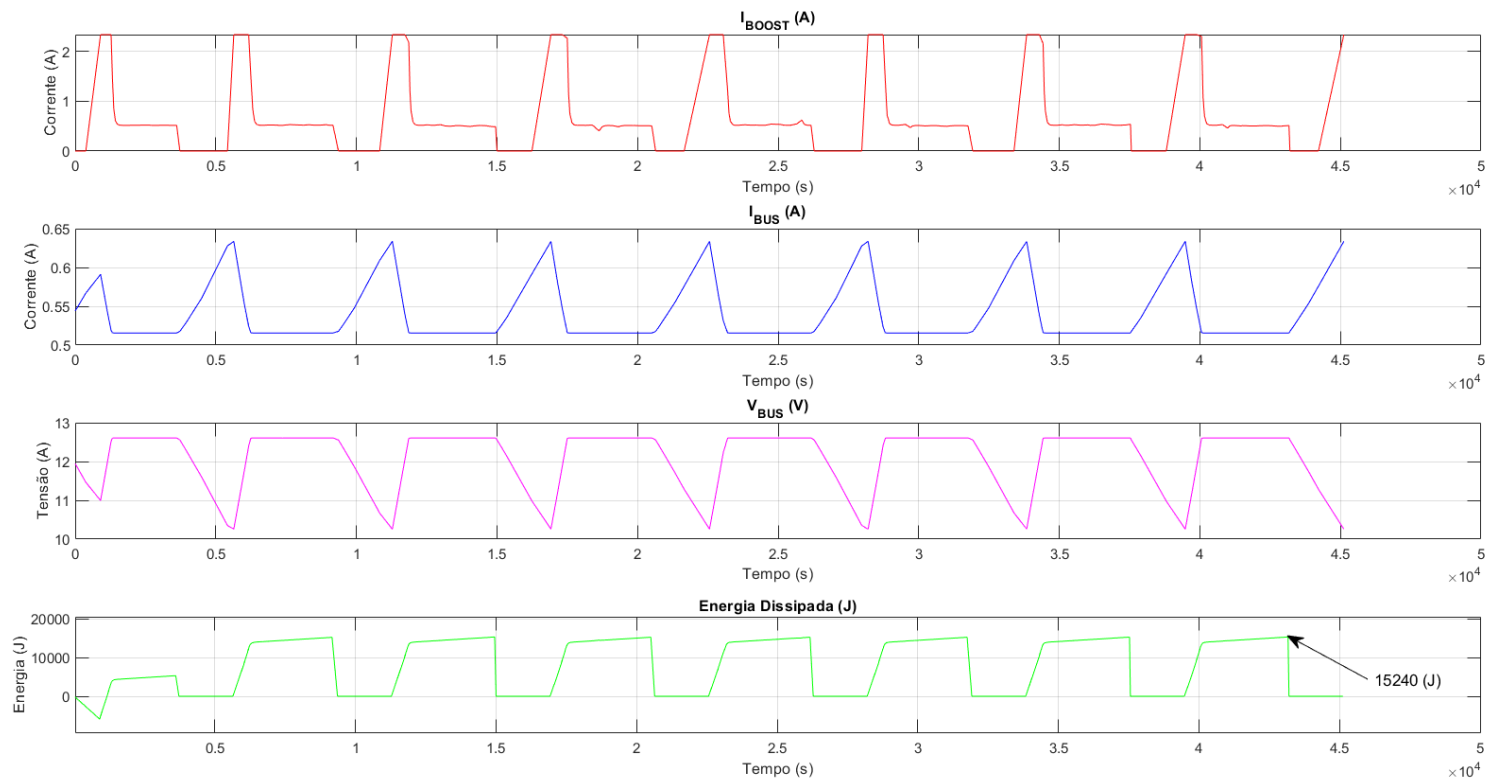
B.1.2 - PPT em barramento 12,6 V

Figura B.8 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.



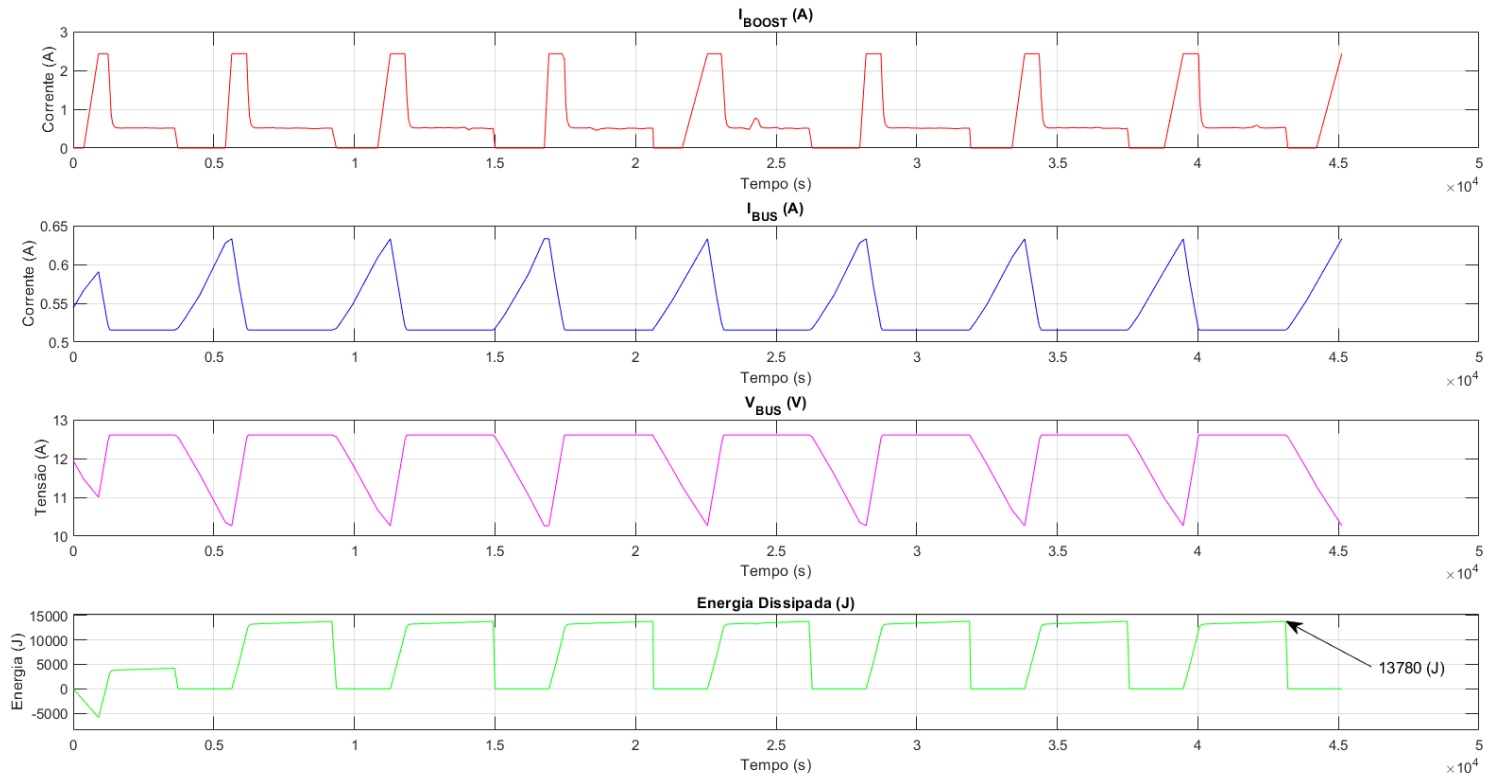
Fonte: Produção da autora.

Figura B.9 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.



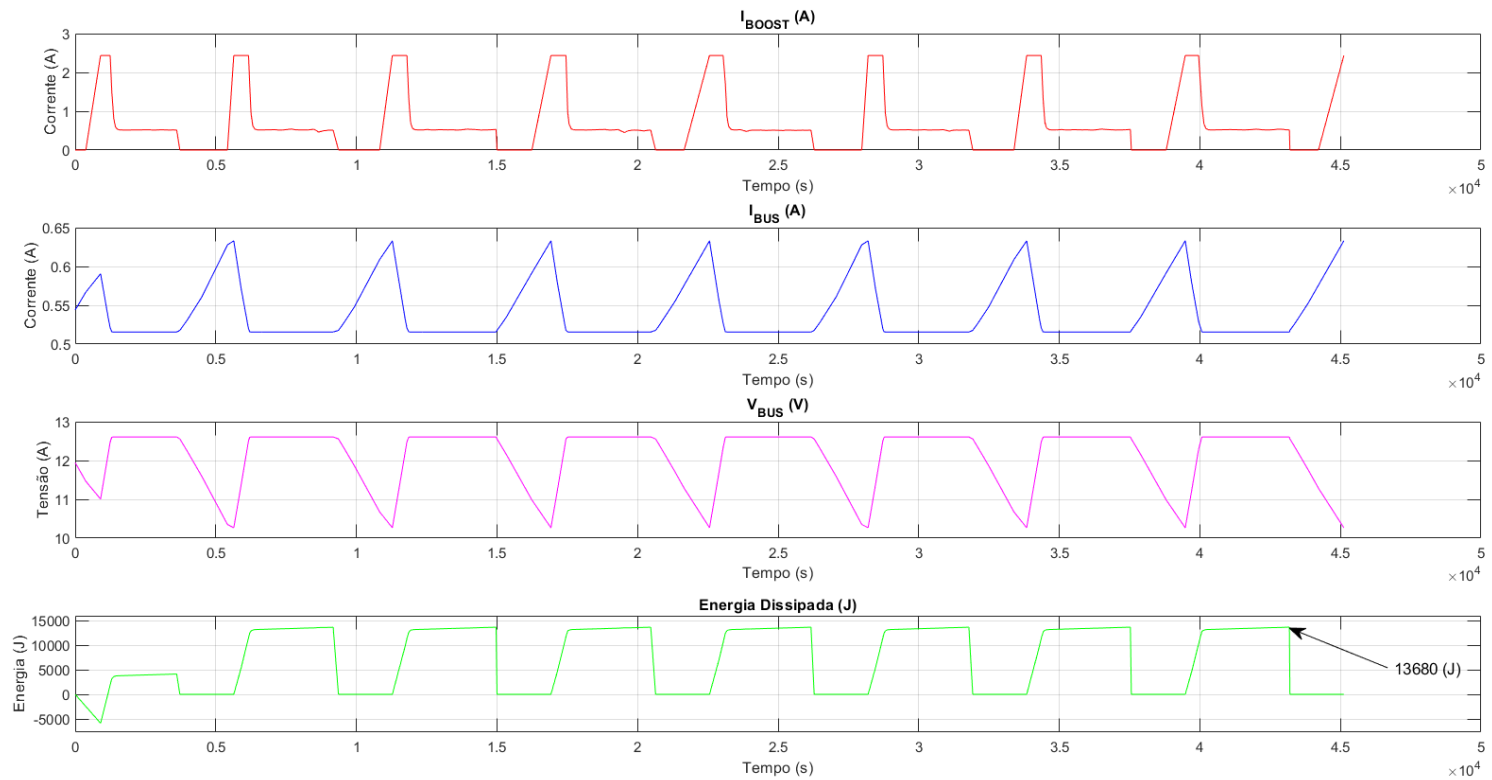
Fonte: Produção da autora.

Figura B.10 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.



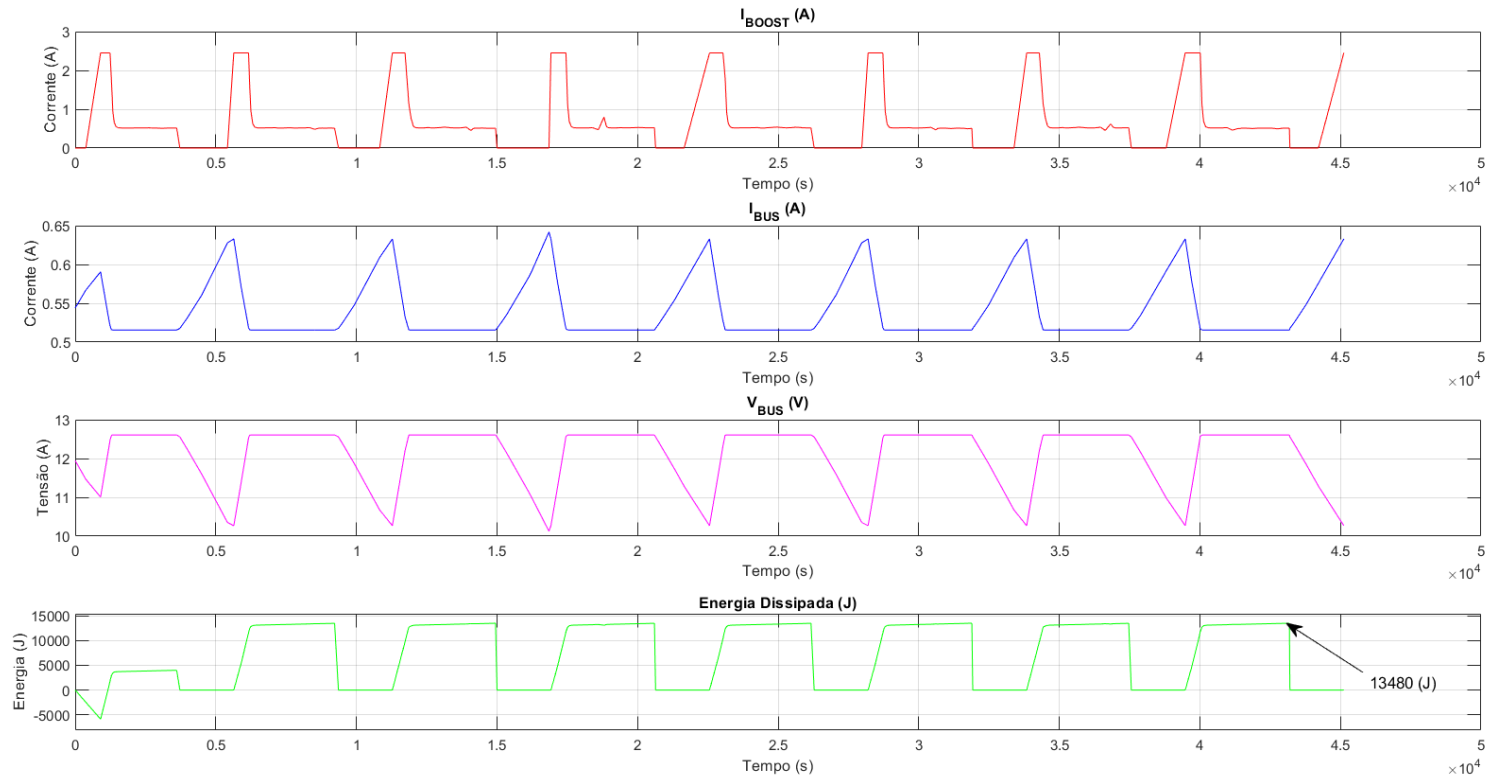
Fonte: Produção da autora.

Figura B.11 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.



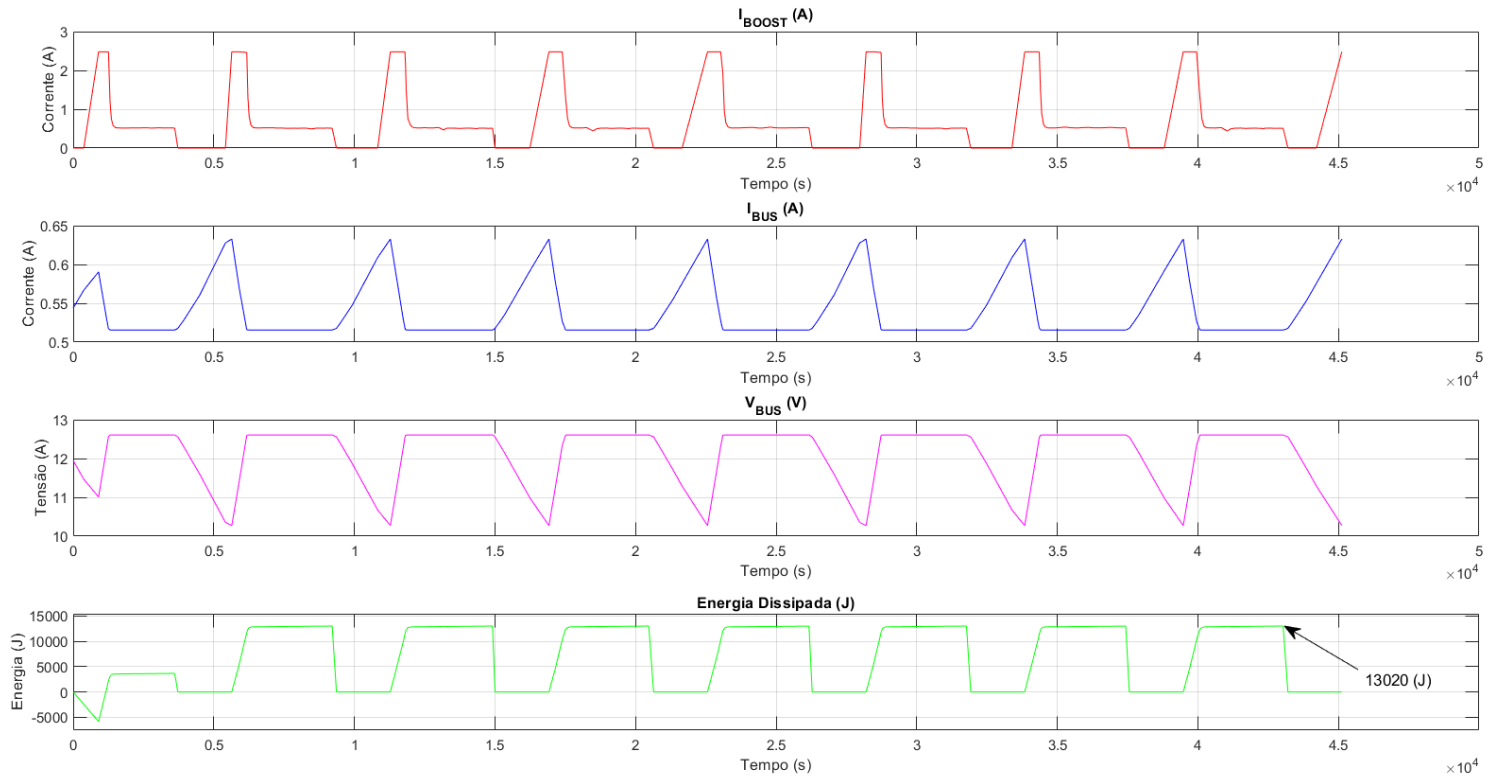
Fonte: Produção da autora.

Figura B.12 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.



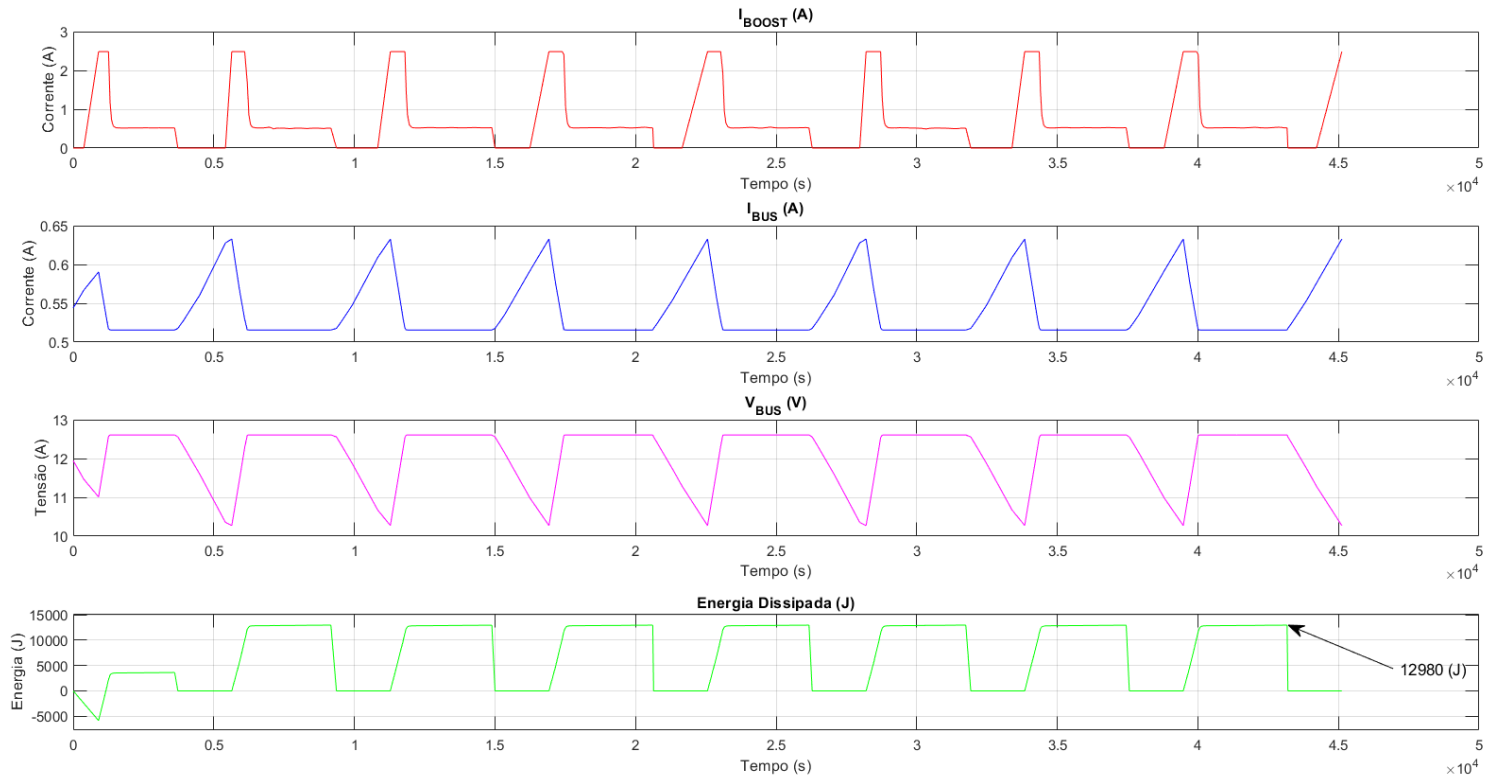
Fonte: Produção da autora.

Figura B.13 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

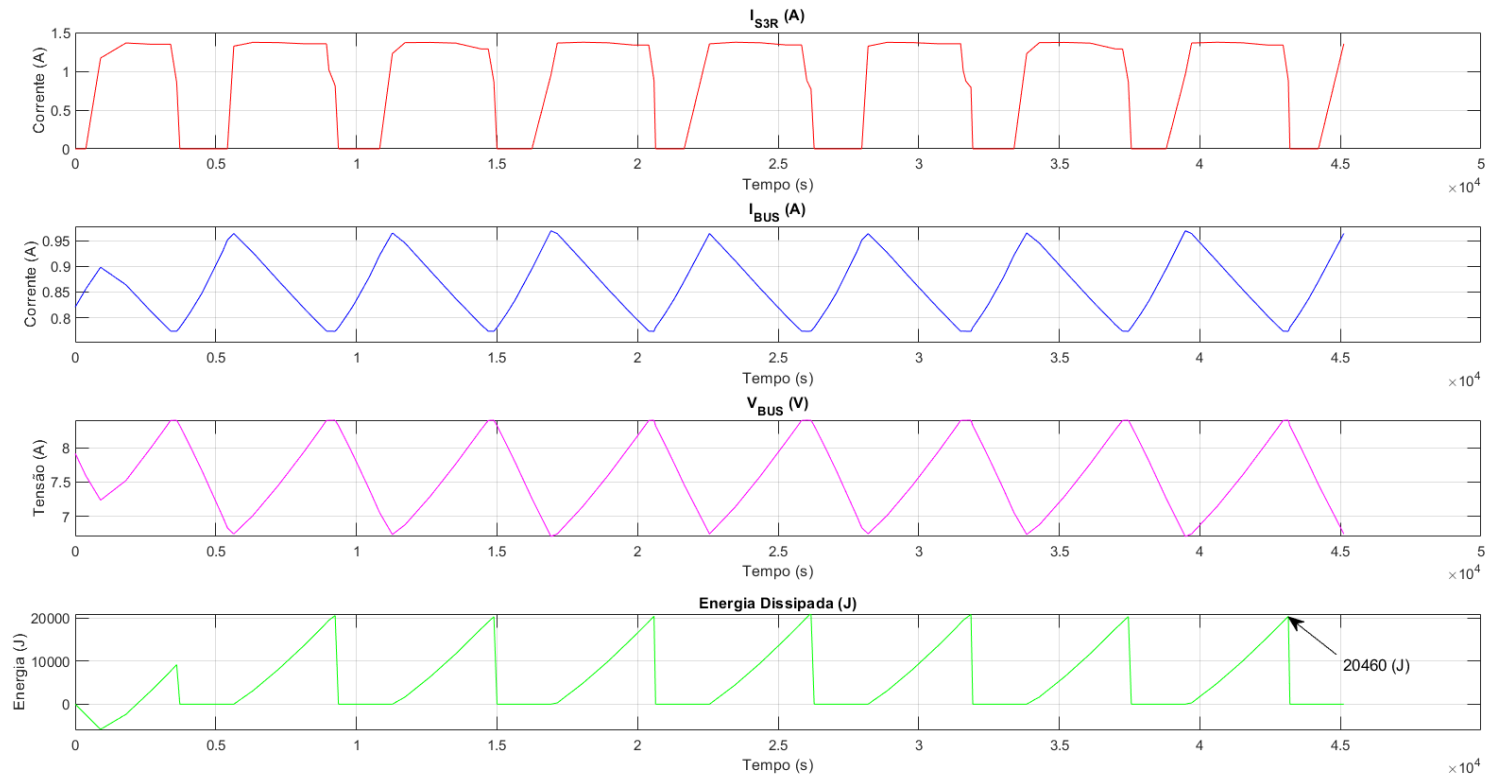
Figura B.14 - 1ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

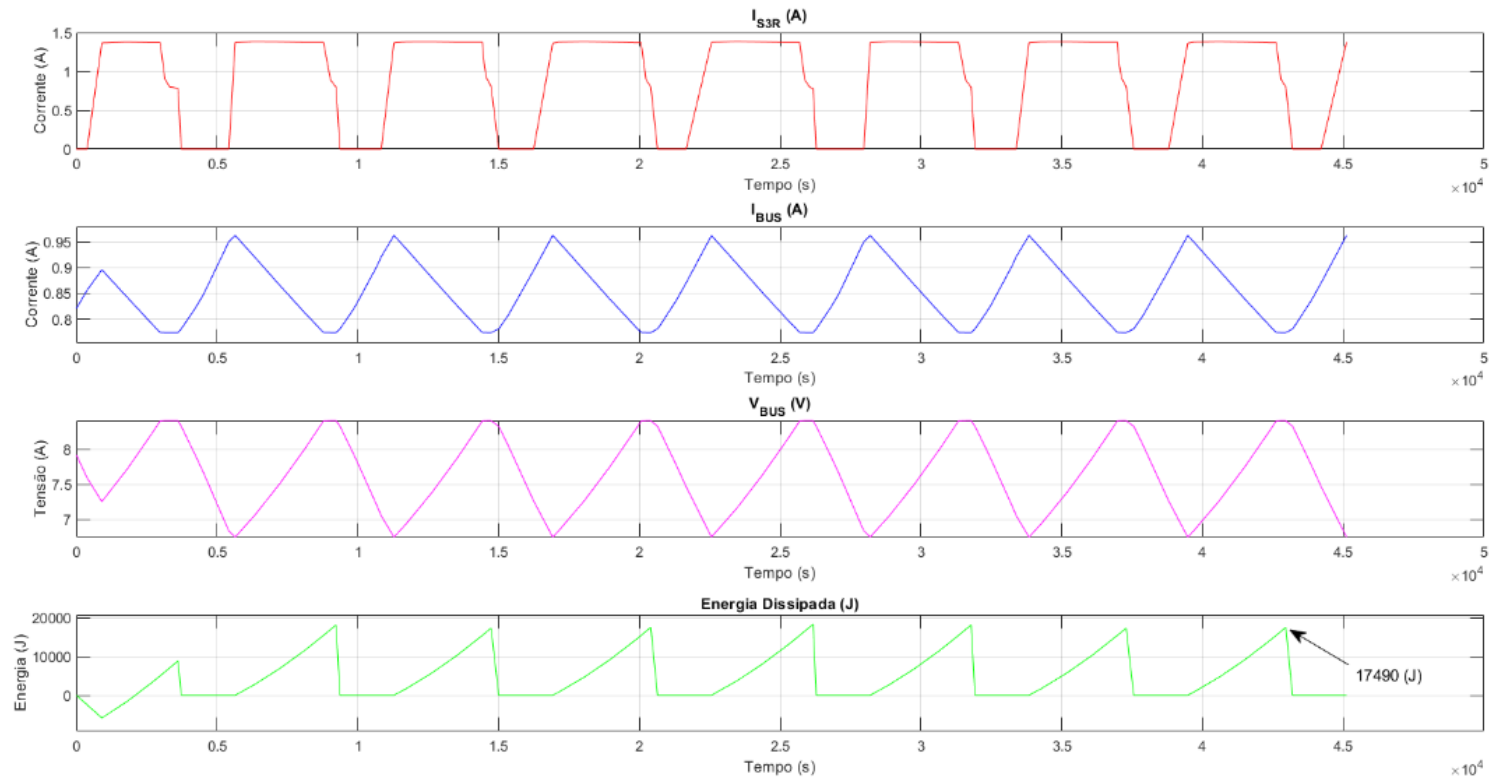
B.1.3 - DET em barramento 8,4 V

Figura B.15 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S³R com queda de diodo de 1,5 V.



Fonte: Produção da autora.

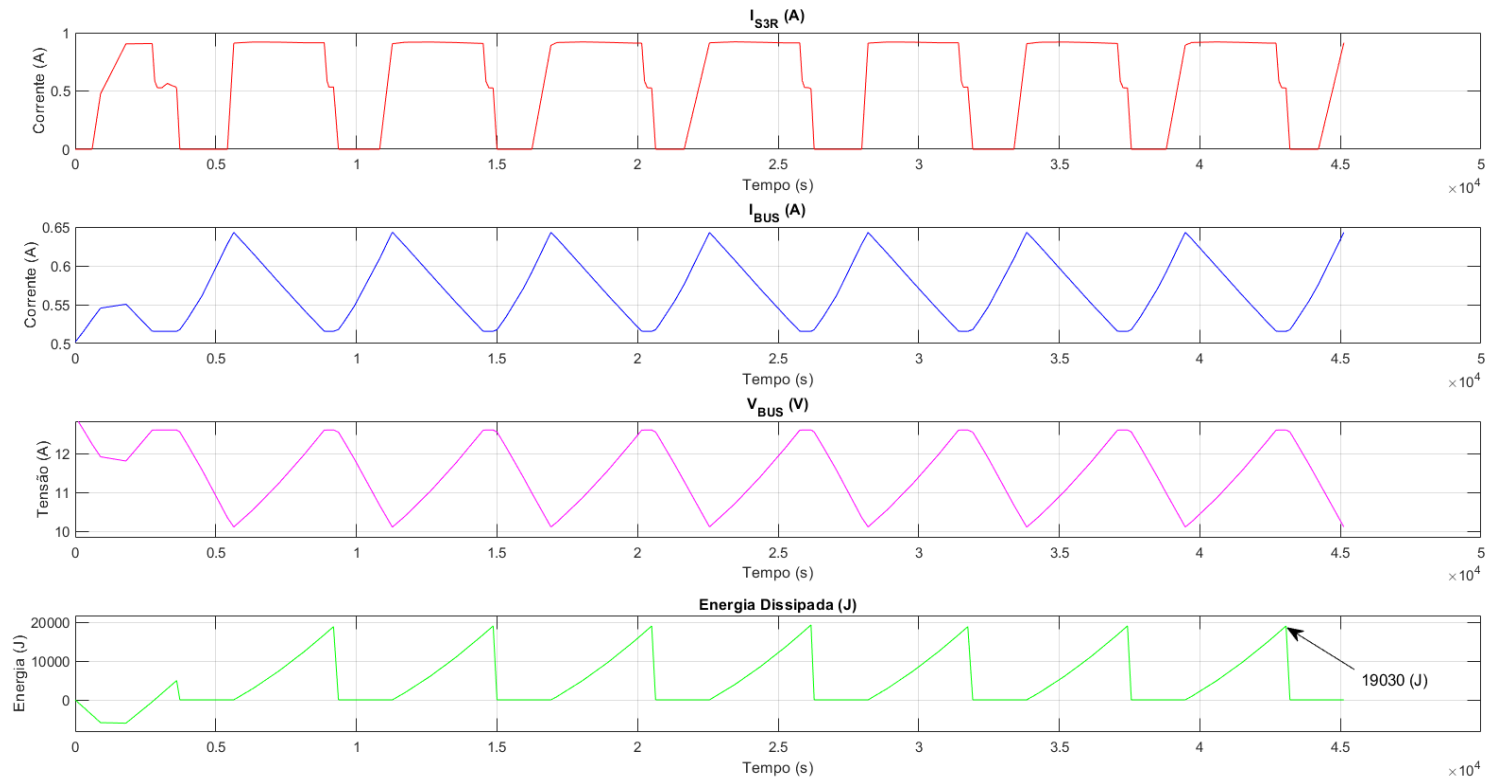
Figura B.16 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S³R com queda de diodo de 0,75 V.



Fonte: Produção da autora.

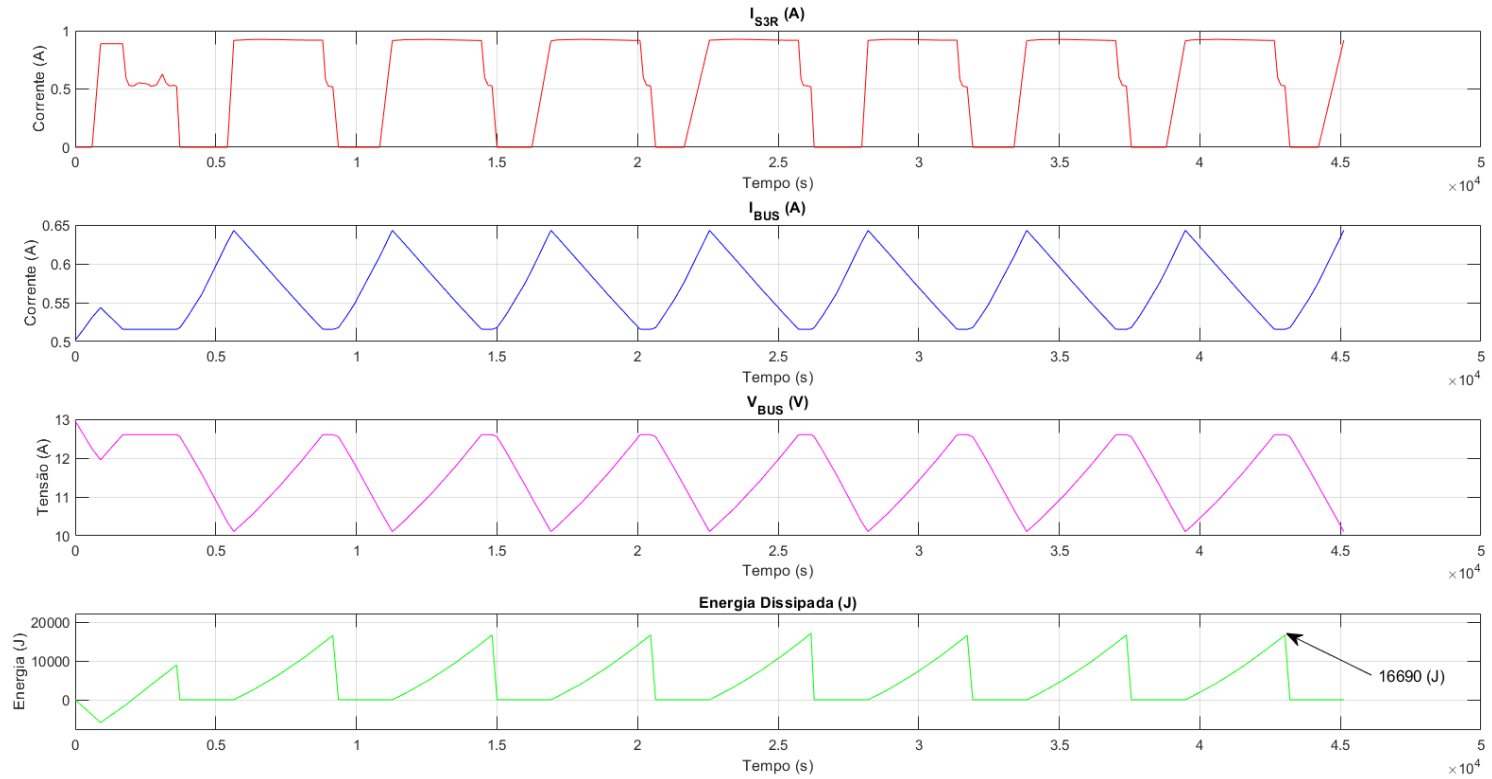
B.1.4 - DET em barramento 12,6 V

Figura B.17 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S³R com queda de diodo de 1,5 V.



Fonte: Produção da autora.

Figura B.18 - 1ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S³R com queda de diodo de 0,75 V.



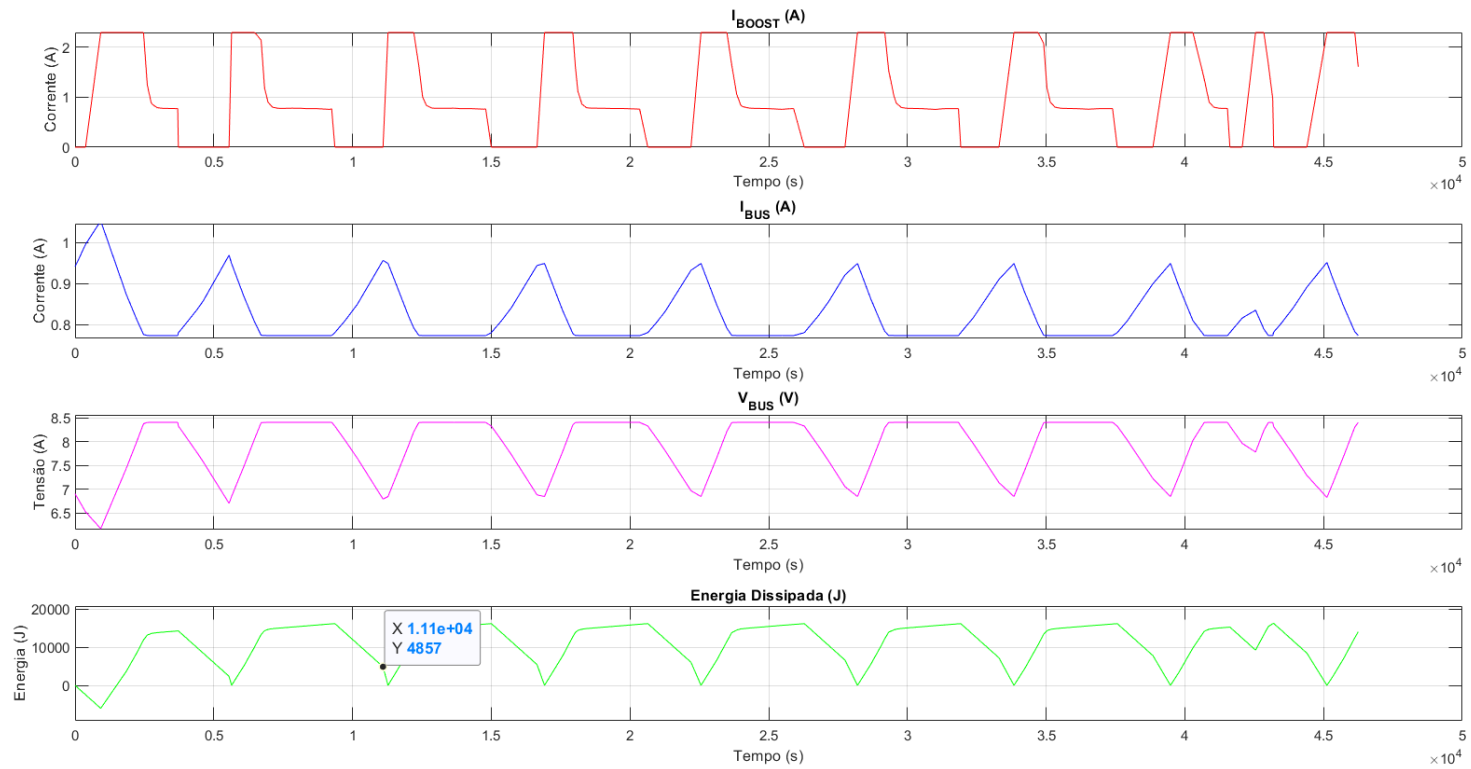
Fonte: Produção da autora.

B.2 - Resultados para a segunda métrica

As Figuras B.19-B.36, a seguir, mostram as correntes no barramento (I_{BOOST}/I_{S3R}) e na carga útil (I_{BUS}), a tensão no barramento (V_{BUS}), e a energia dissipada (ED) no PPT e no DET com barramentos de 8,4 V e 12,6 V, para **segunda métrica**, citados na Seção 6.5.2.

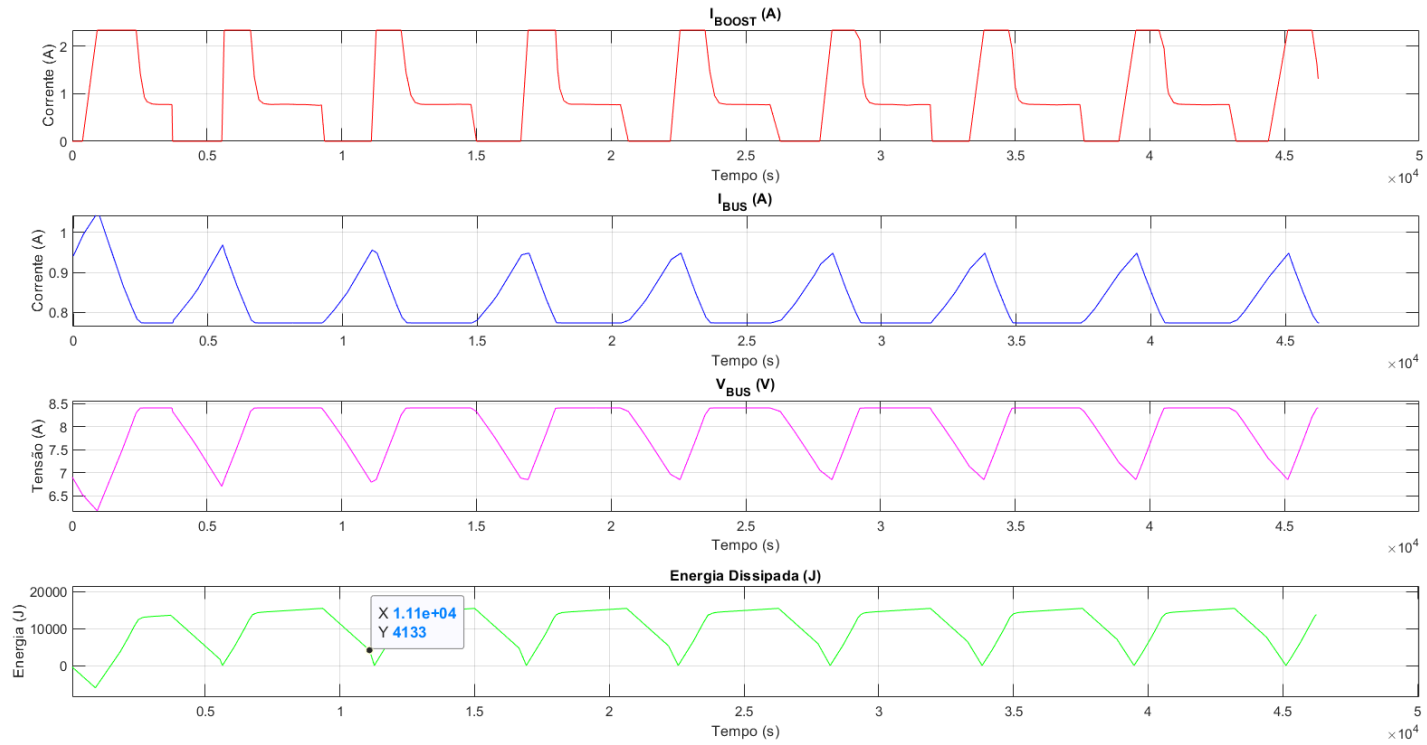
B.2.1 - PPT em barramento 8,4 V

Figura B.19 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.



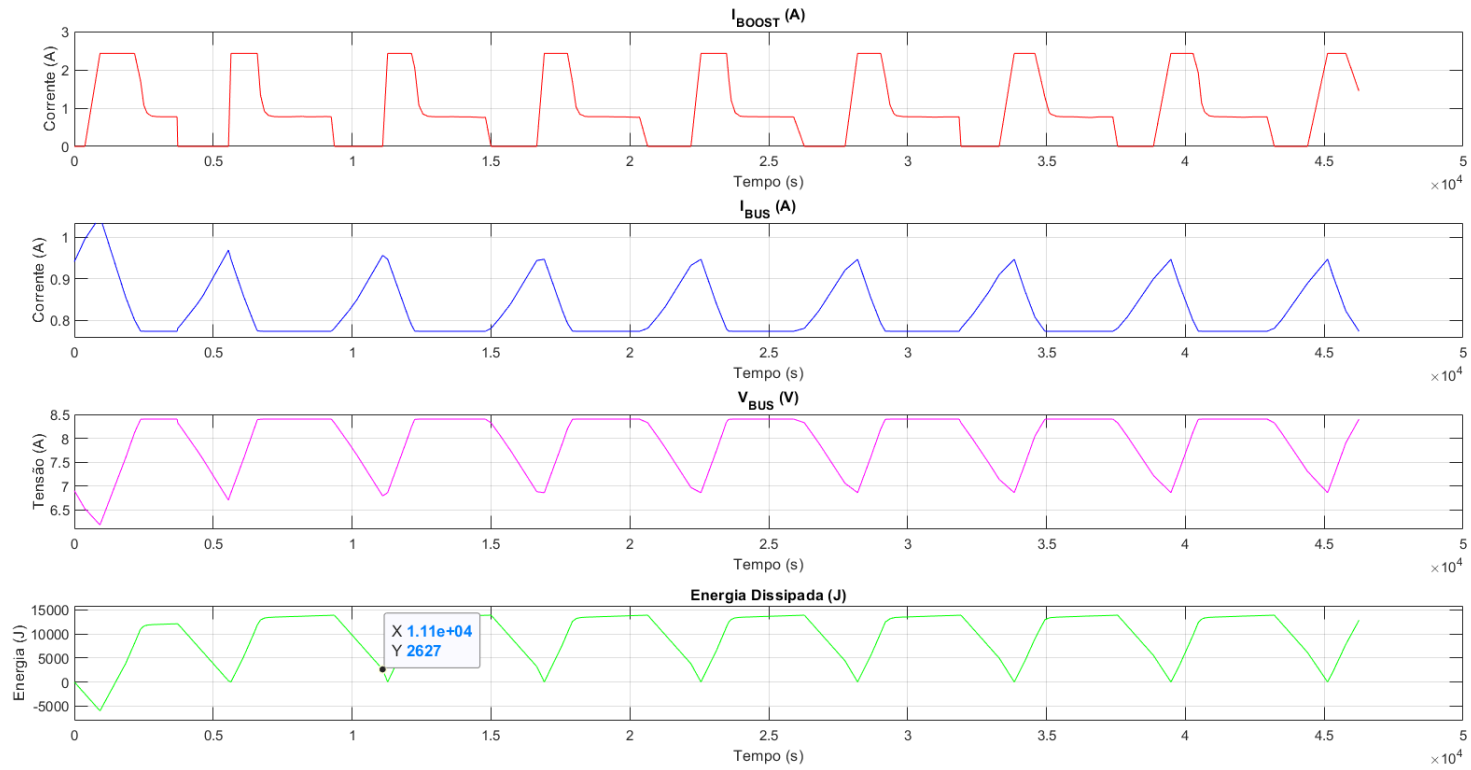
Fonte: Produção da autora.

Figura B.20 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.



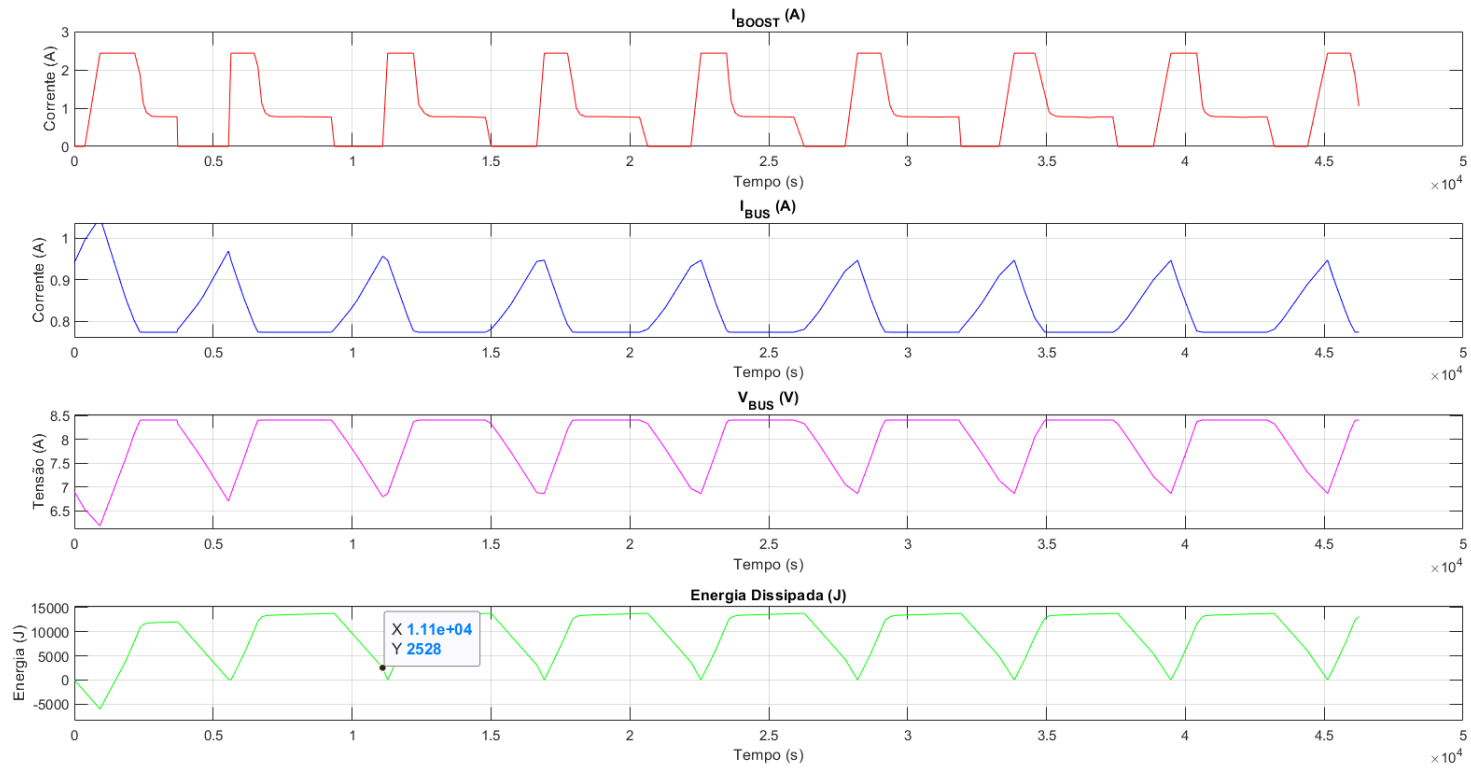
Fonte: Produção da autora.

Figura B.21 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.



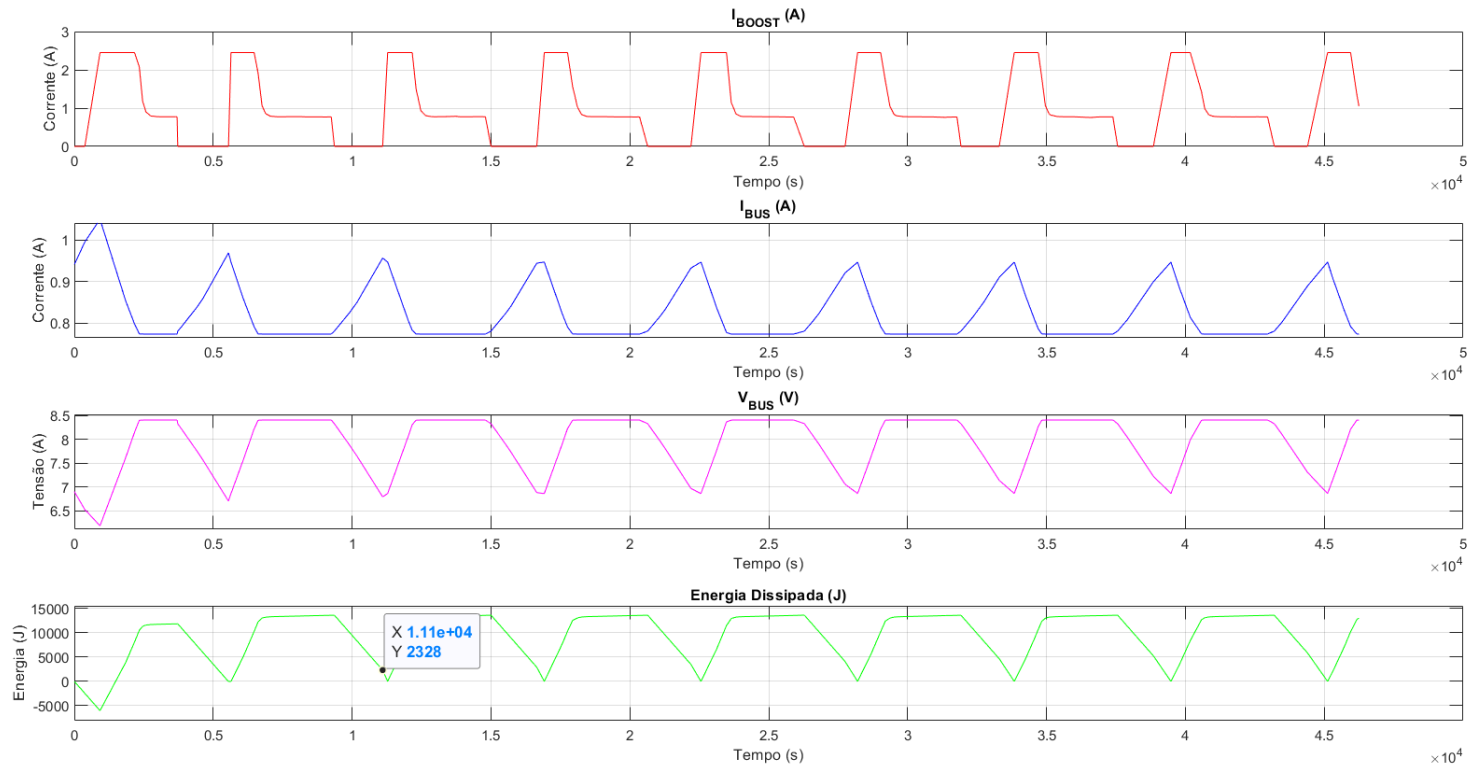
Fonte: Produção da autora.

Figura B.22 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.



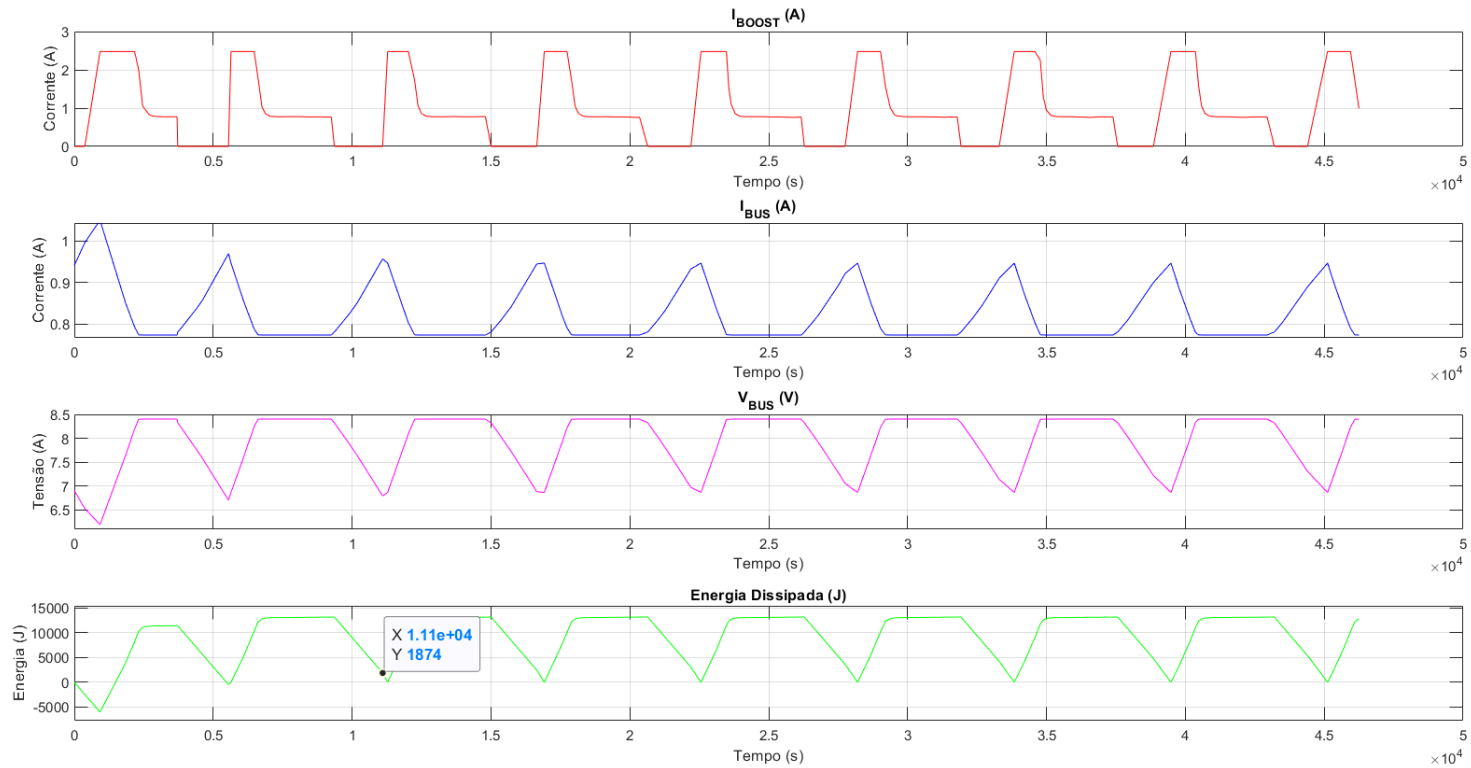
Fonte: Produção da autora.

Figura B.23 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.



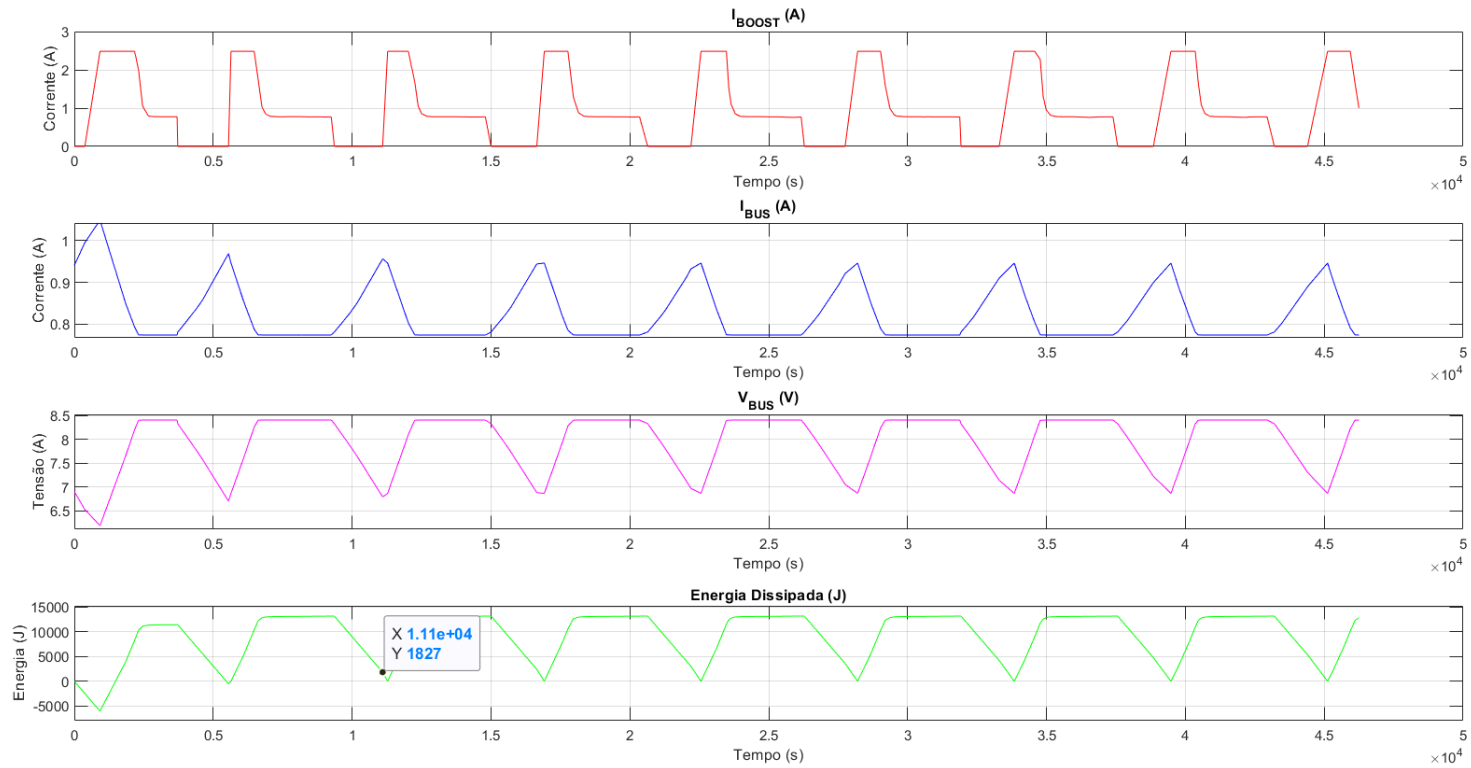
Fonte: Produção da autora.

Figura B.24 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

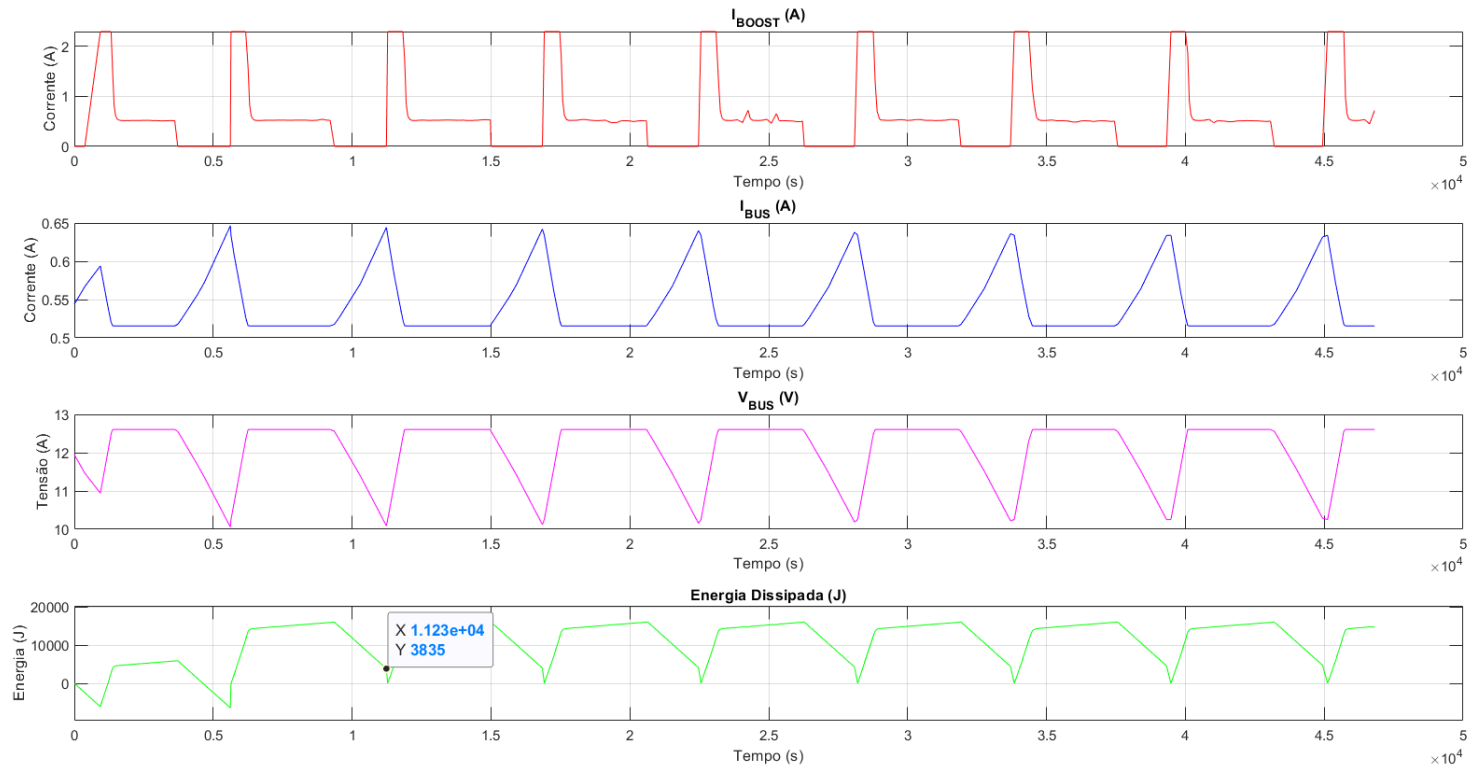
Figura B.25 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

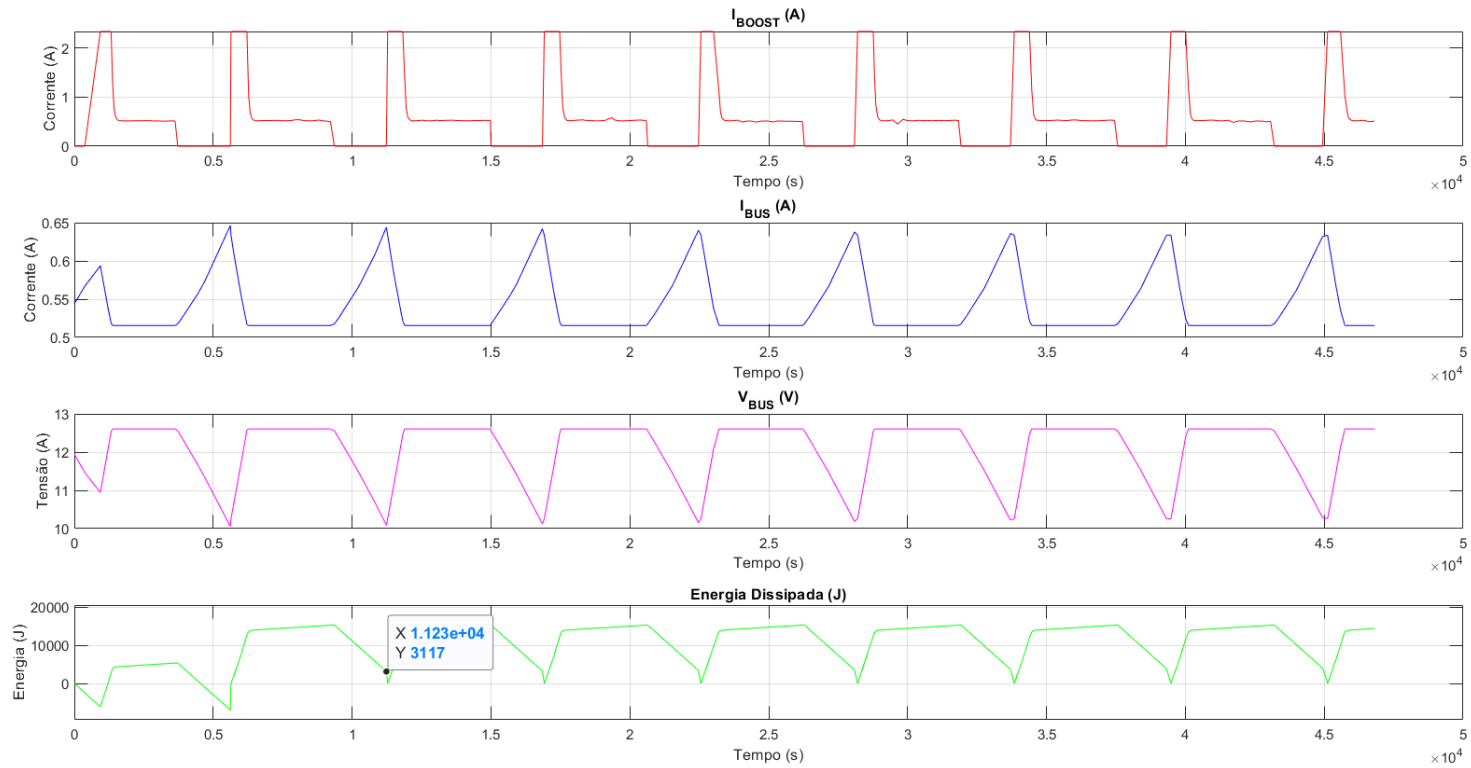
B.2.2 - PPT em barramento 12,6 V

Figura B.26 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.



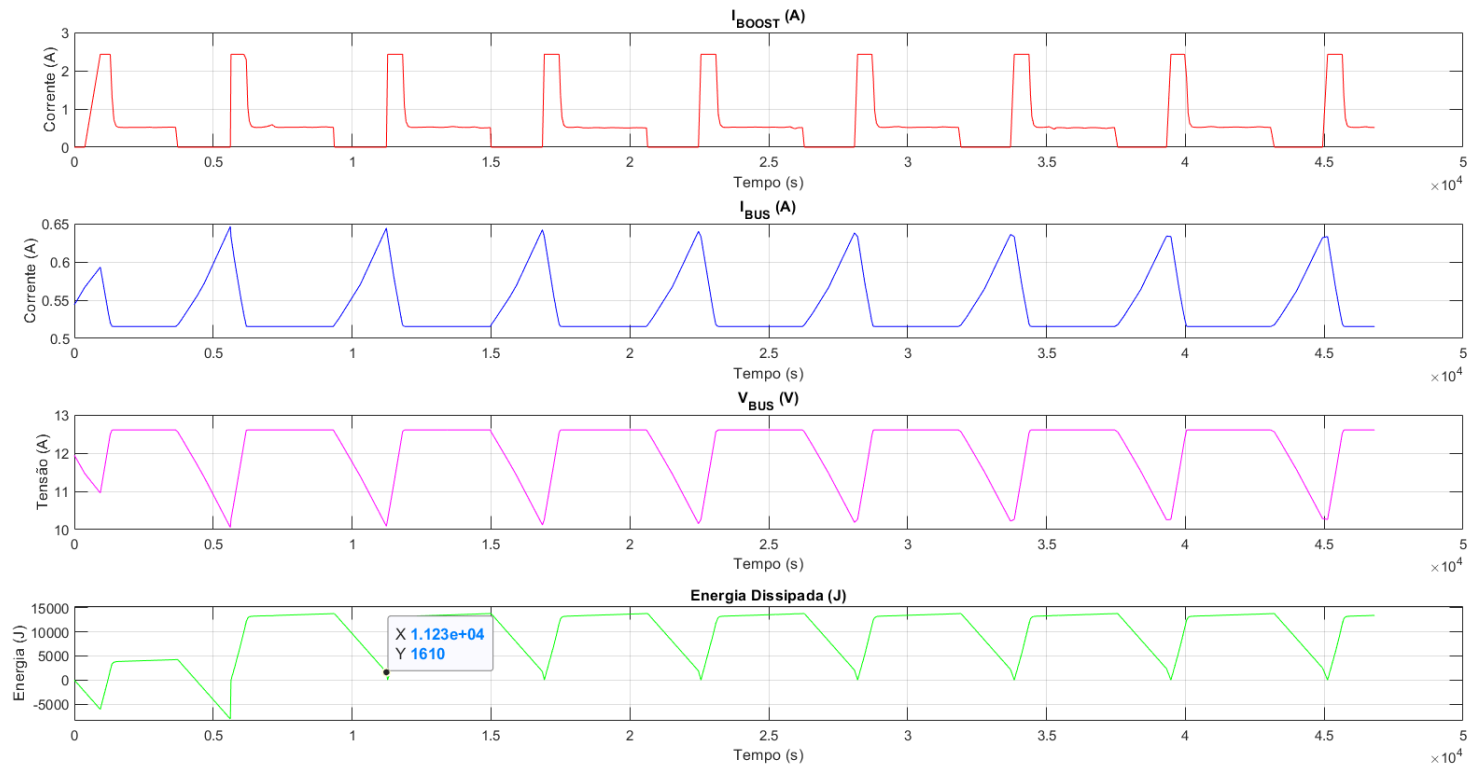
Fonte: Produção da autora.

Figura B.27 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.



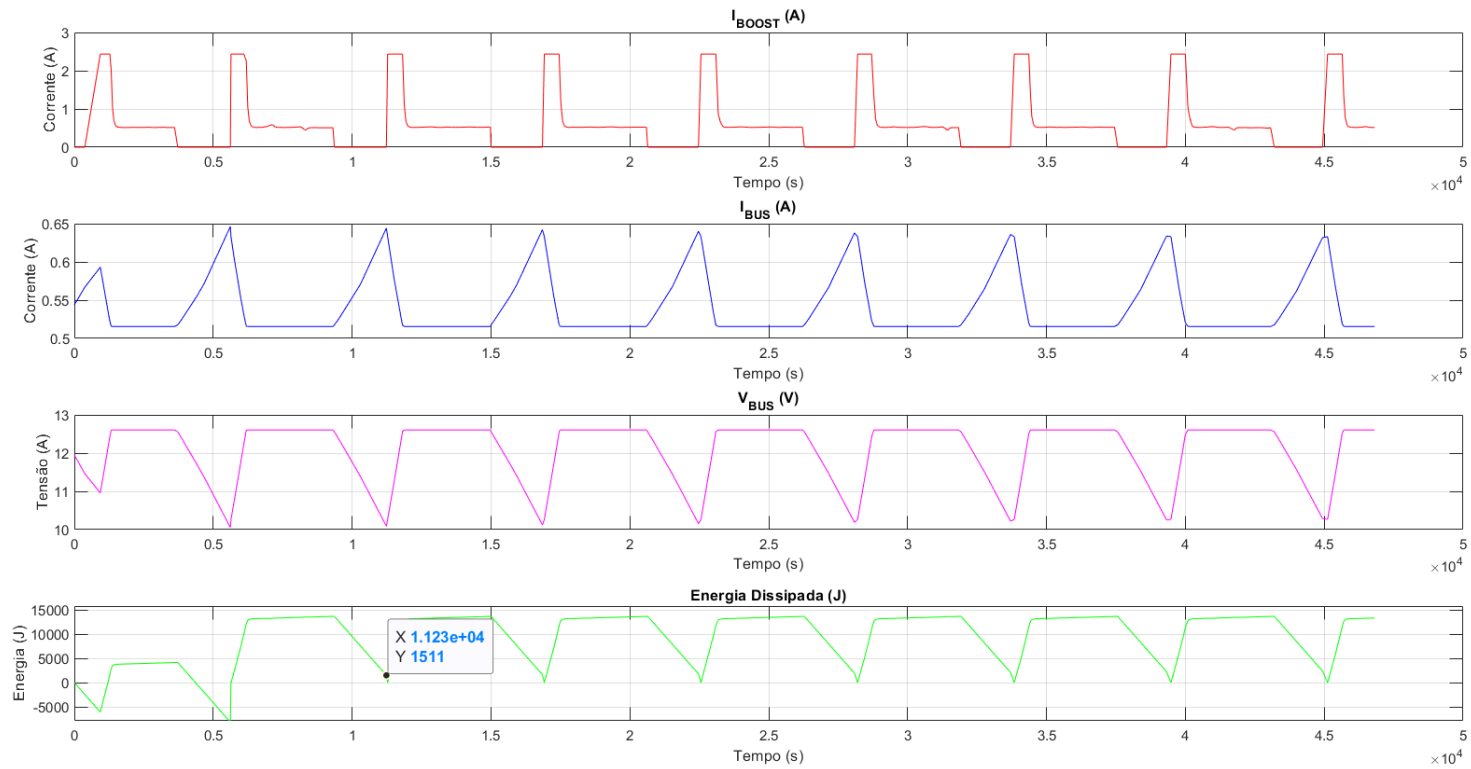
Fonte: Produção da autora.

Figura B.28 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.



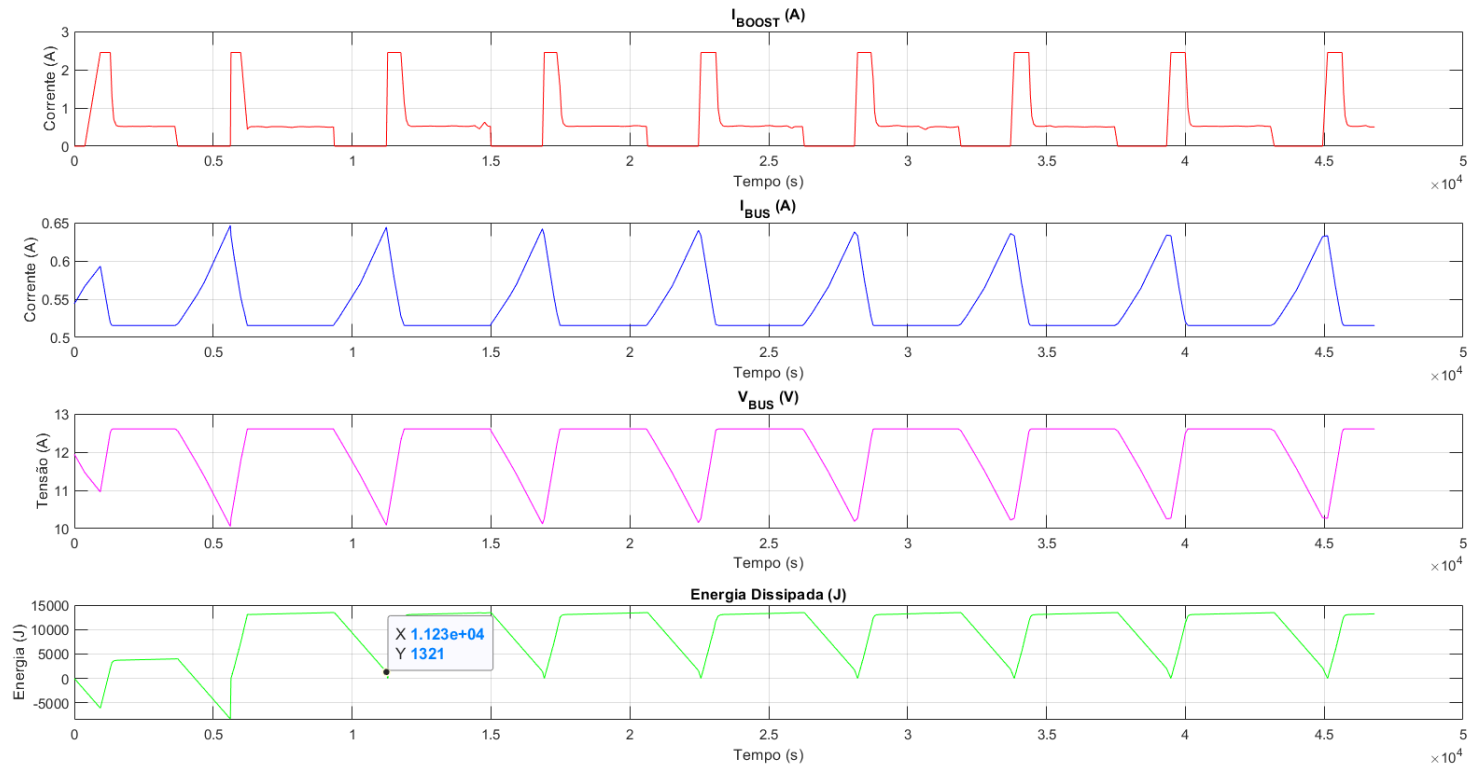
Fonte: Produção da autora.

Figura B.29 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.



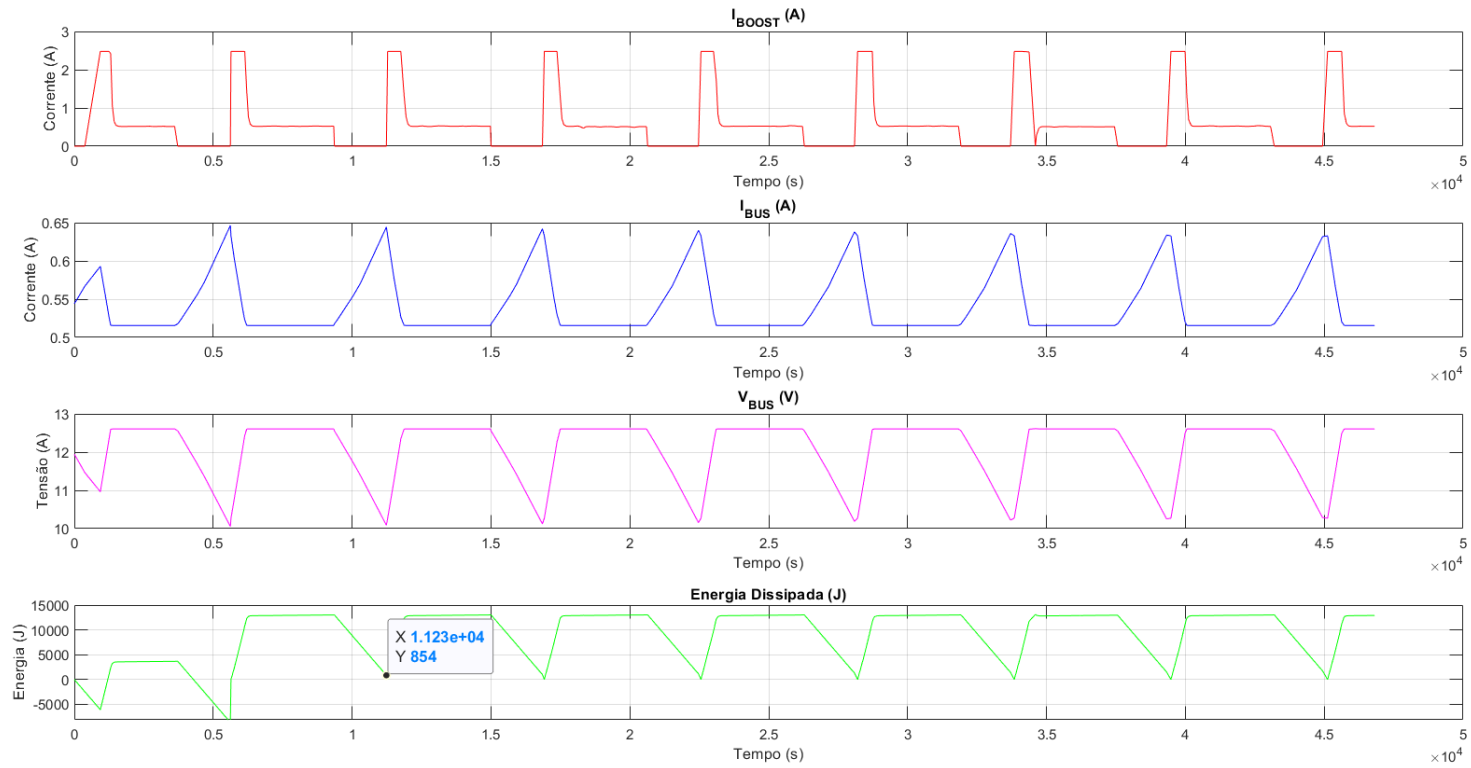
Fonte: Produção da autora.

Figura B.30 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.



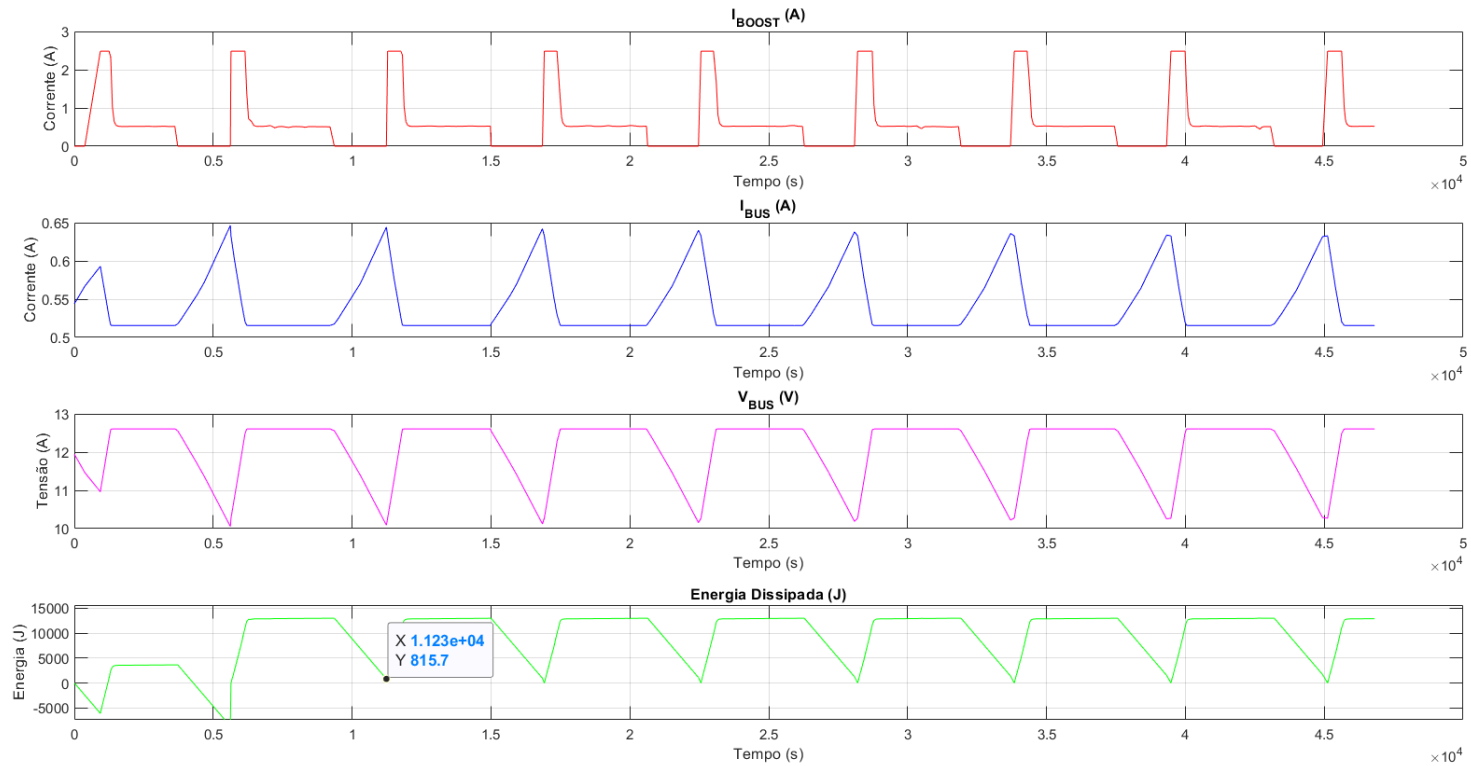
Fonte: Produção da autora.

Figura B.31 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

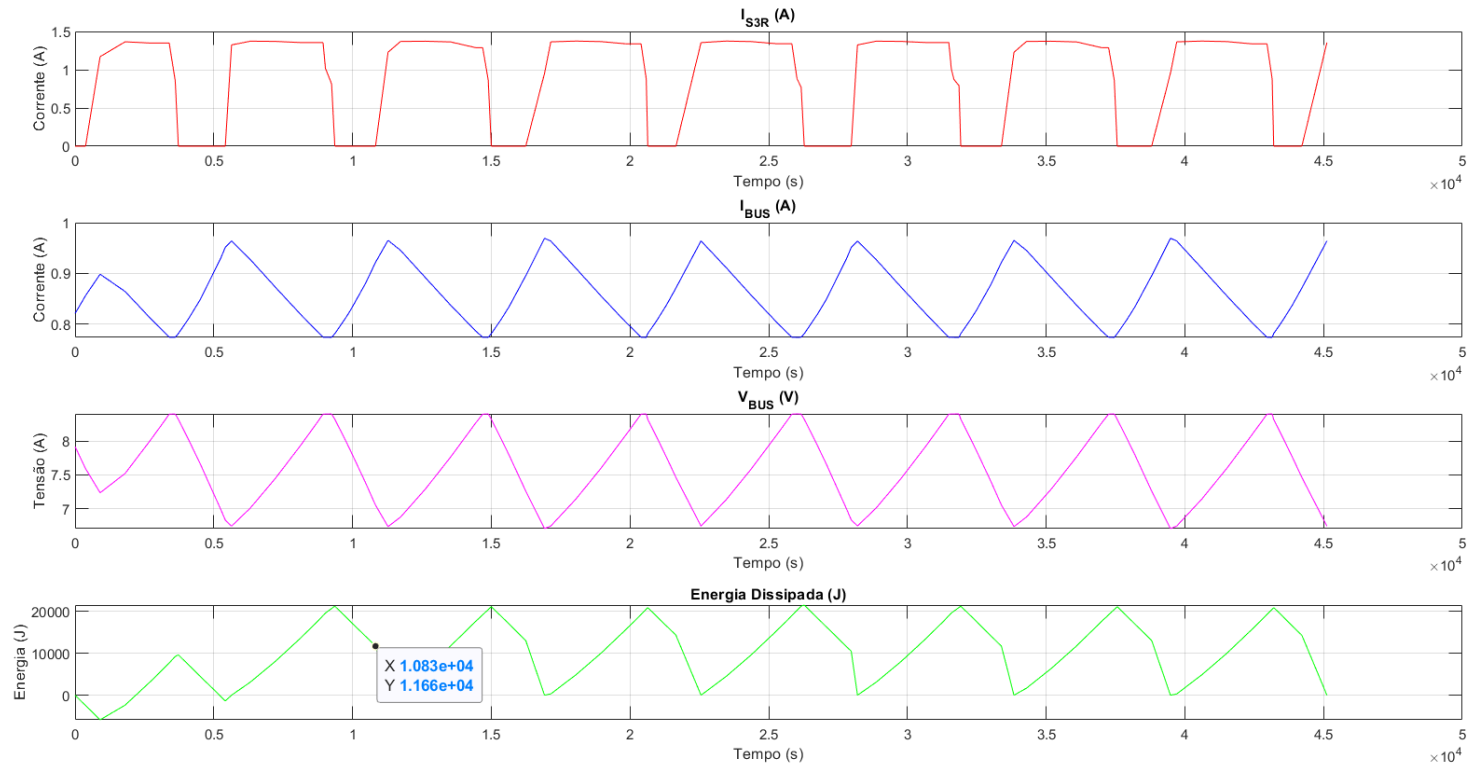
Figura B.32 - 2ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

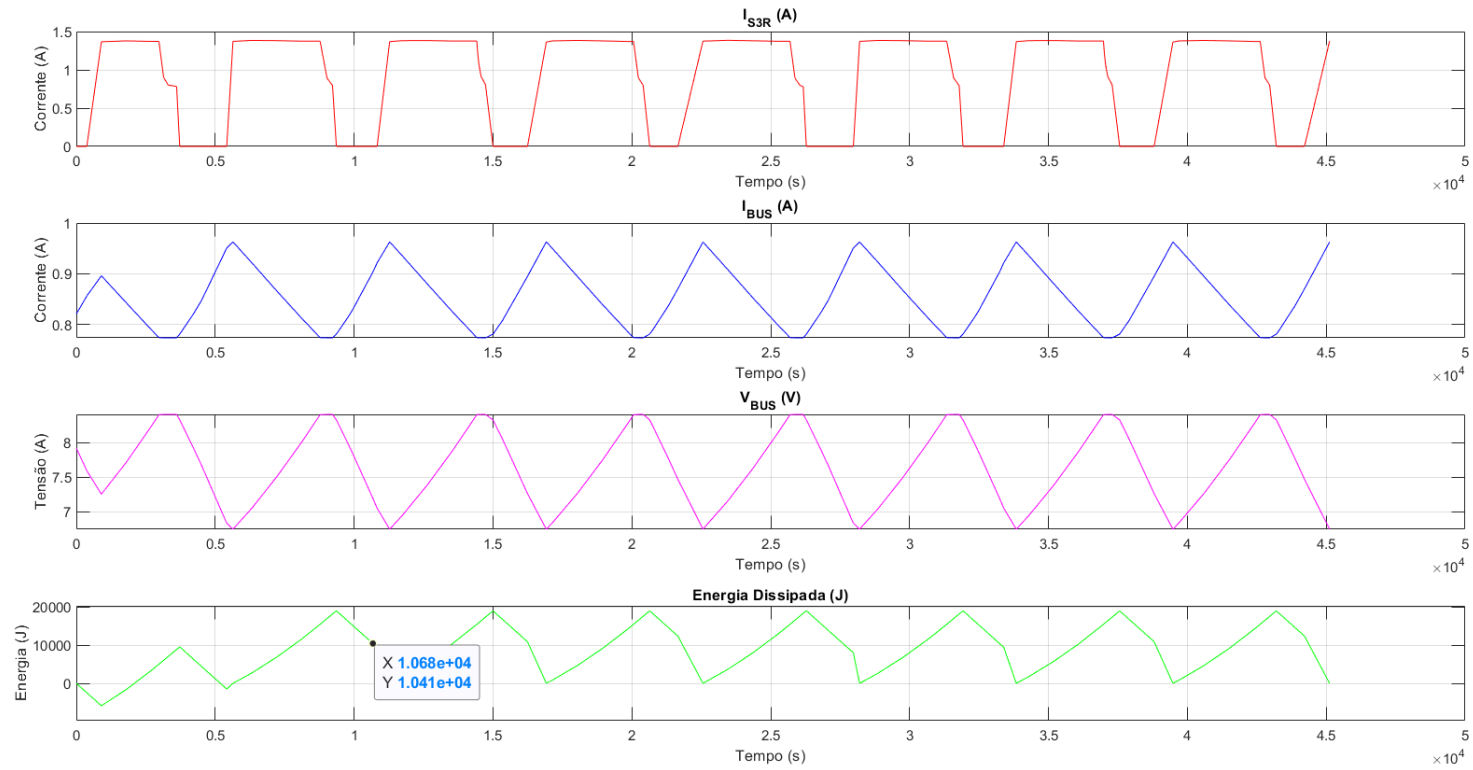
B.2.3 - DET em barramento 8,4 V

Figura B.33 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S³R com queda de diodo de 1,5 V.



Fonte: Produção da autora.

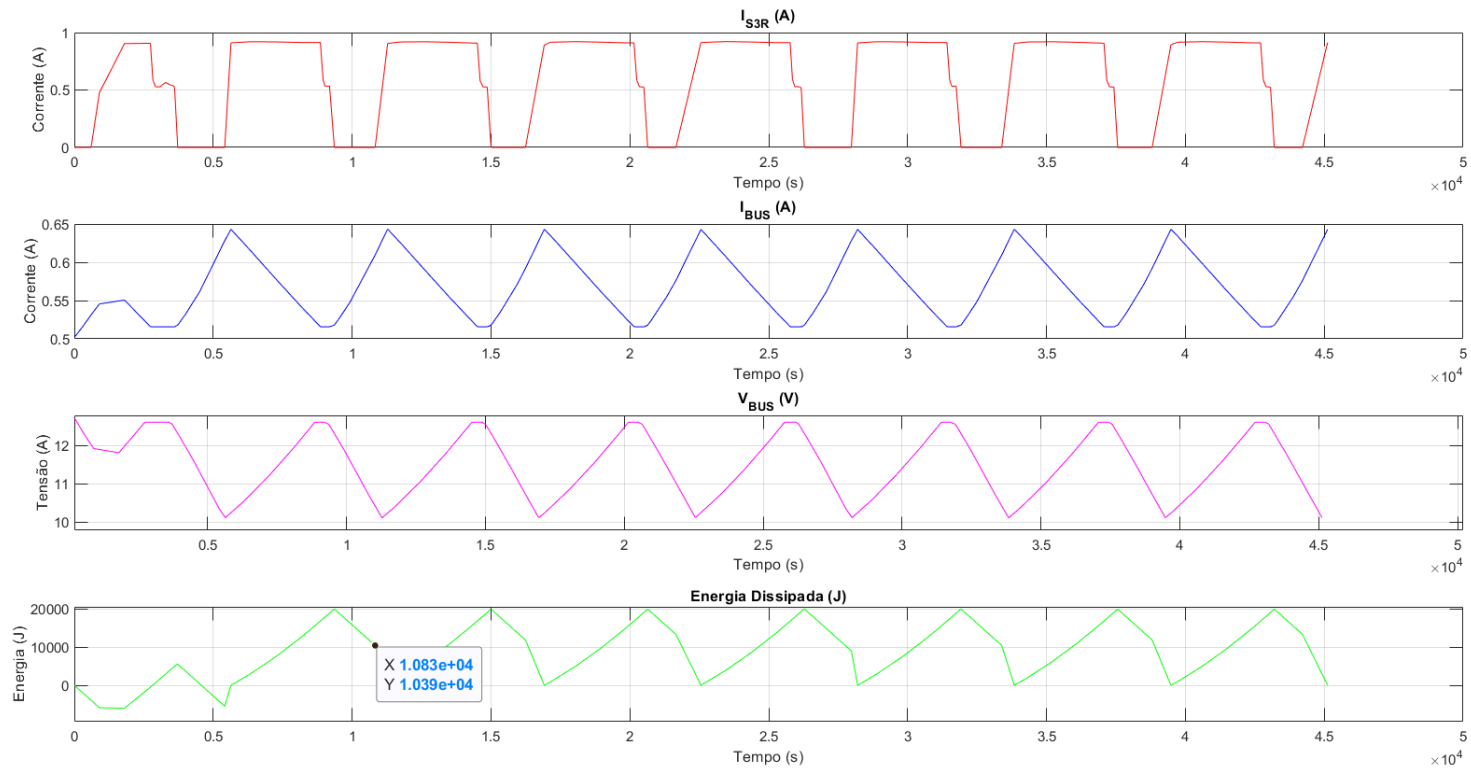
Figura B.34 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S³R com queda de diodo de 0,75 V.



Fonte: Produção da autora.

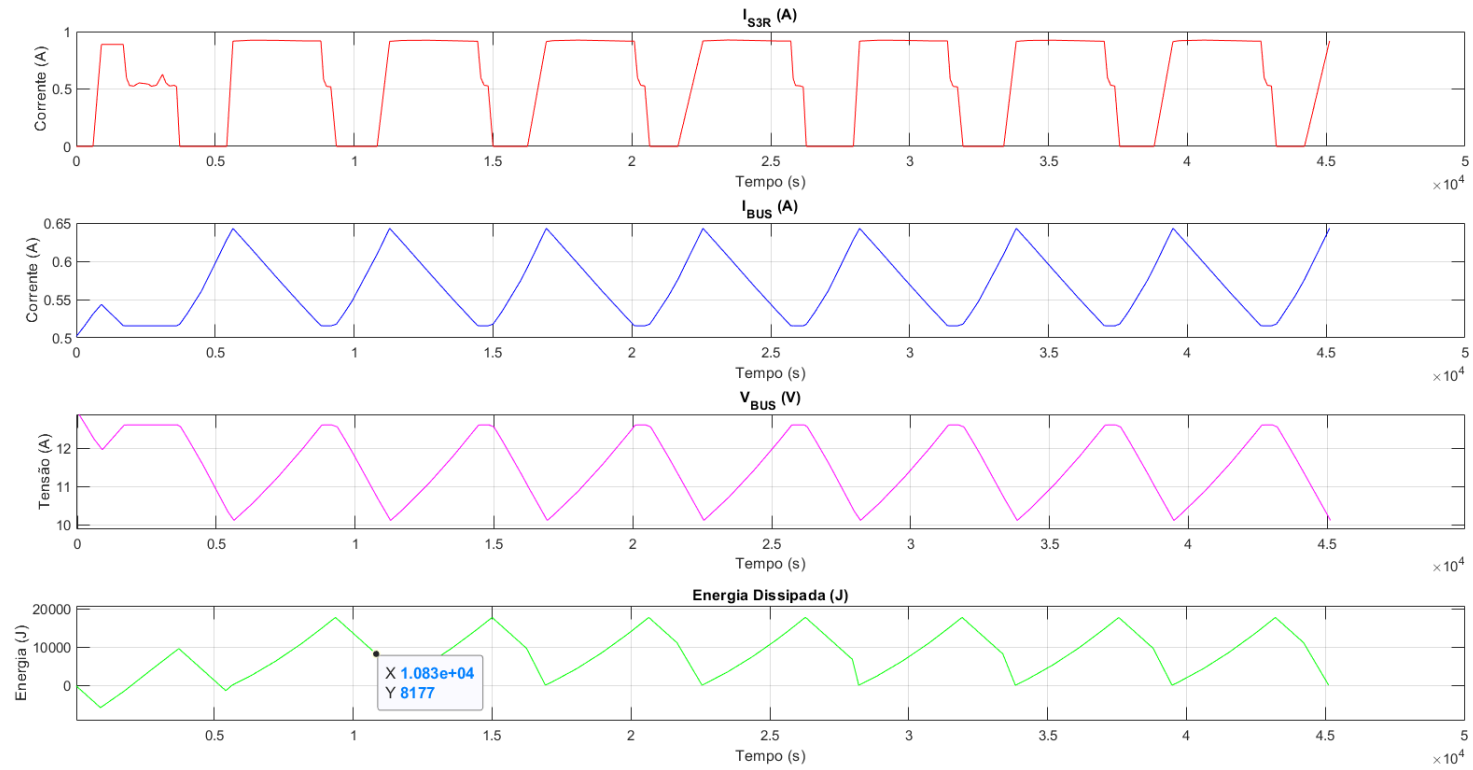
B.2.4 - DET em barramento 12,6 V

Figura B.35 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S³R com queda de diodo de 1,5 V.



Fonte: Produção da autora.

Figura B.36 - 2ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S³R com queda de diodo de 0,75 V.



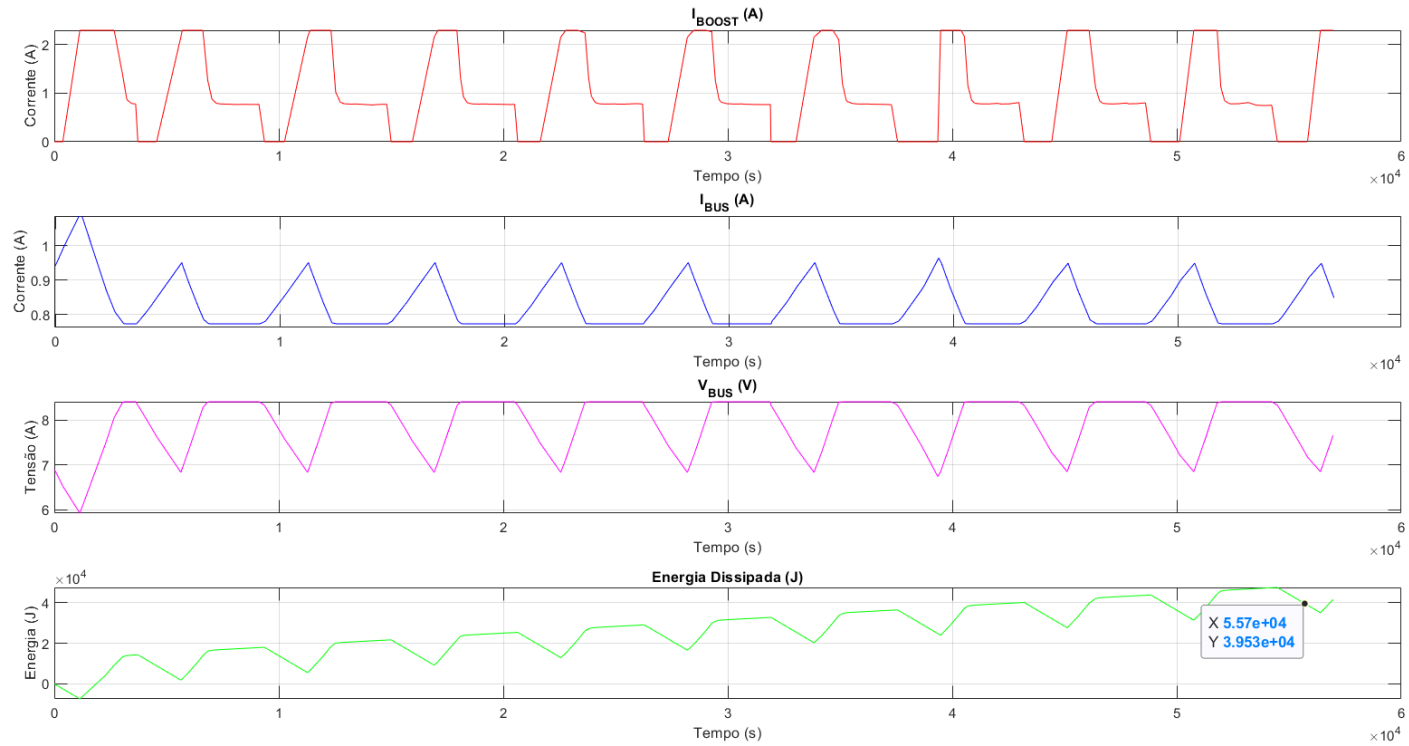
Fonte: Produção da autora.

B.3 - Resultados para a terceira métrica

As Figuras B.37-B.54, a seguir, mostram as correntes no barramento (I_{BOOST}/I_{S3R}) e na carga útil (I_{BUS}), a tensão no barramento (V_{BUS}), e a energia dissipada (ED) no PPT e no DET com barramentos de 8,4 V e 12,6 V, para **terceira métrica**, citados na Seção 6.5.3.

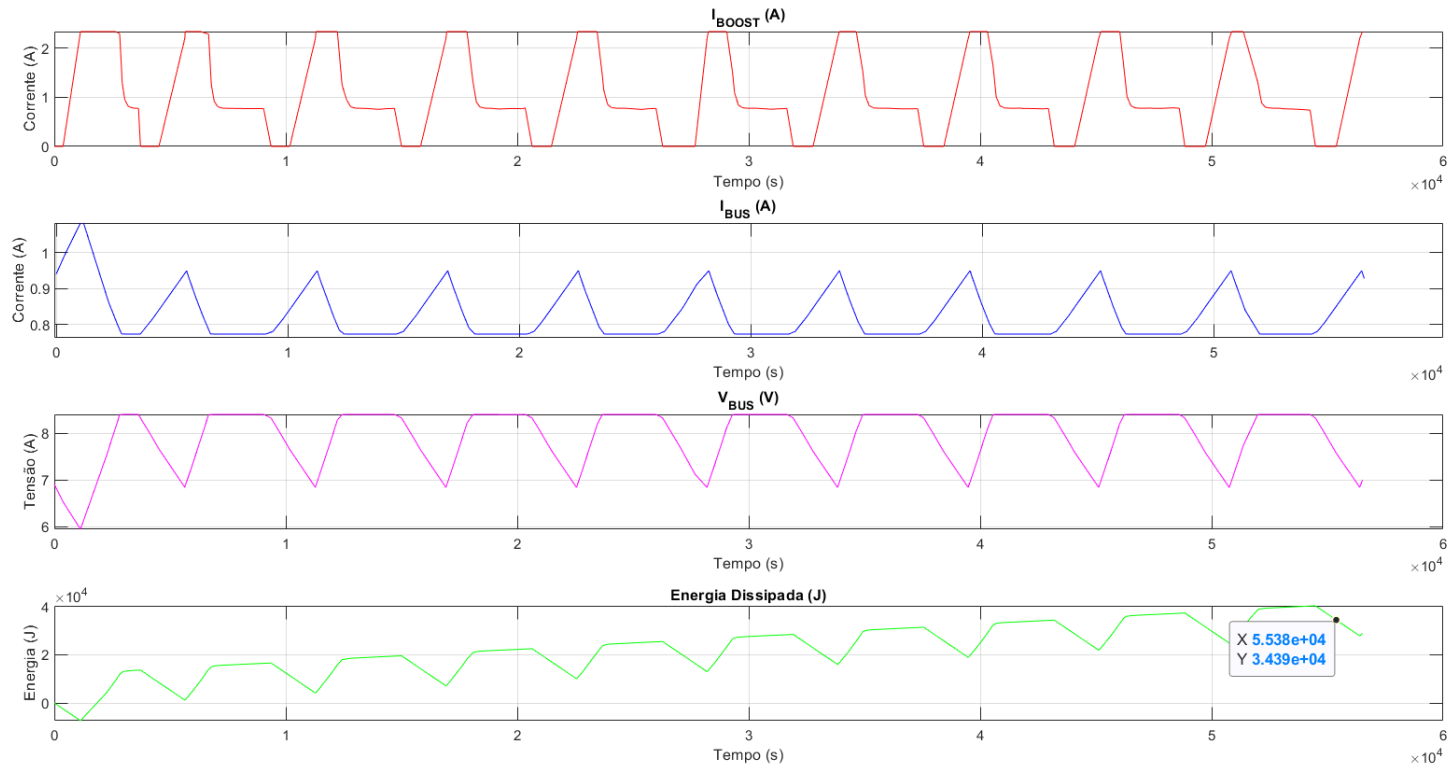
B.3.1 - PPT em barramento 8,4 V

Figura B.37 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.



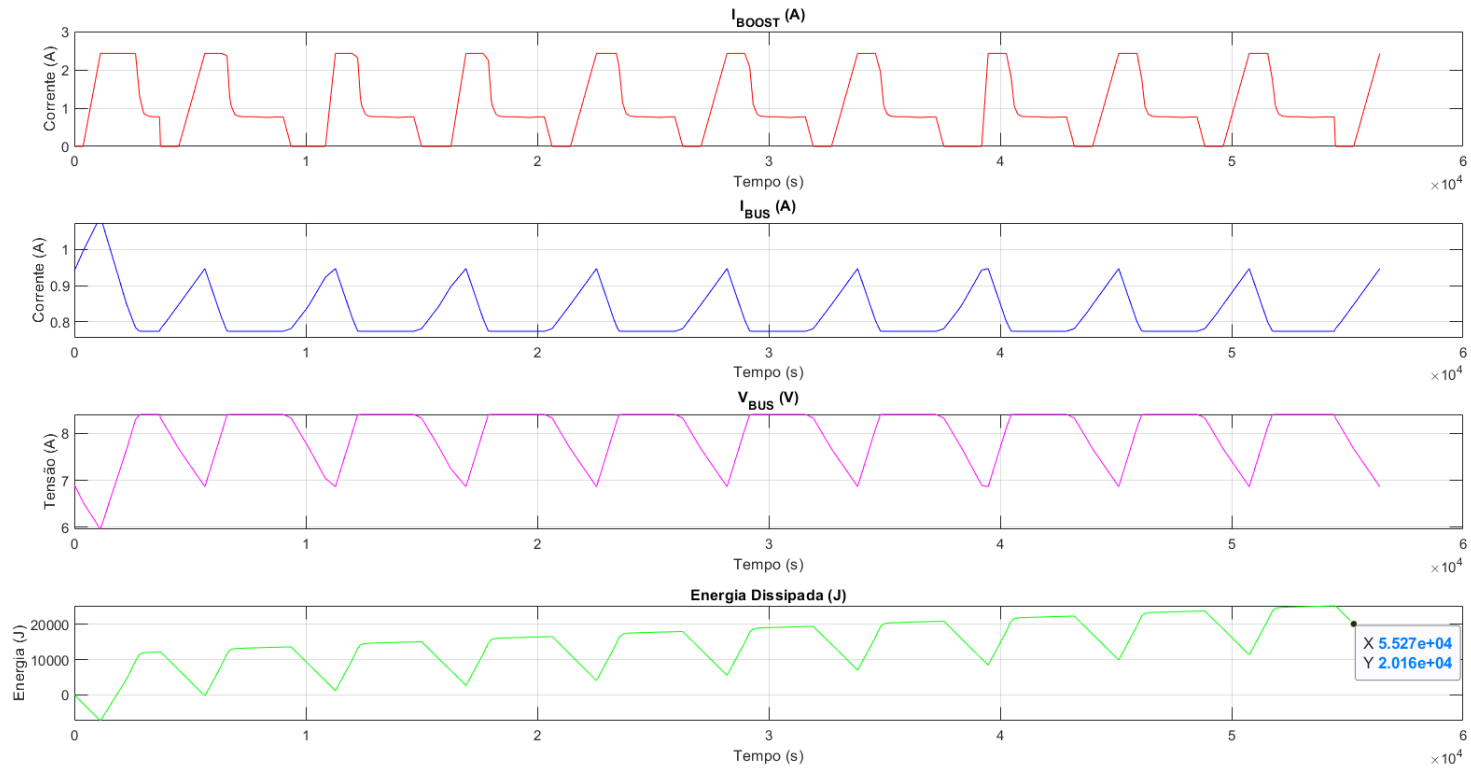
Fonte: Produção da autora.

Figura B.38 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.



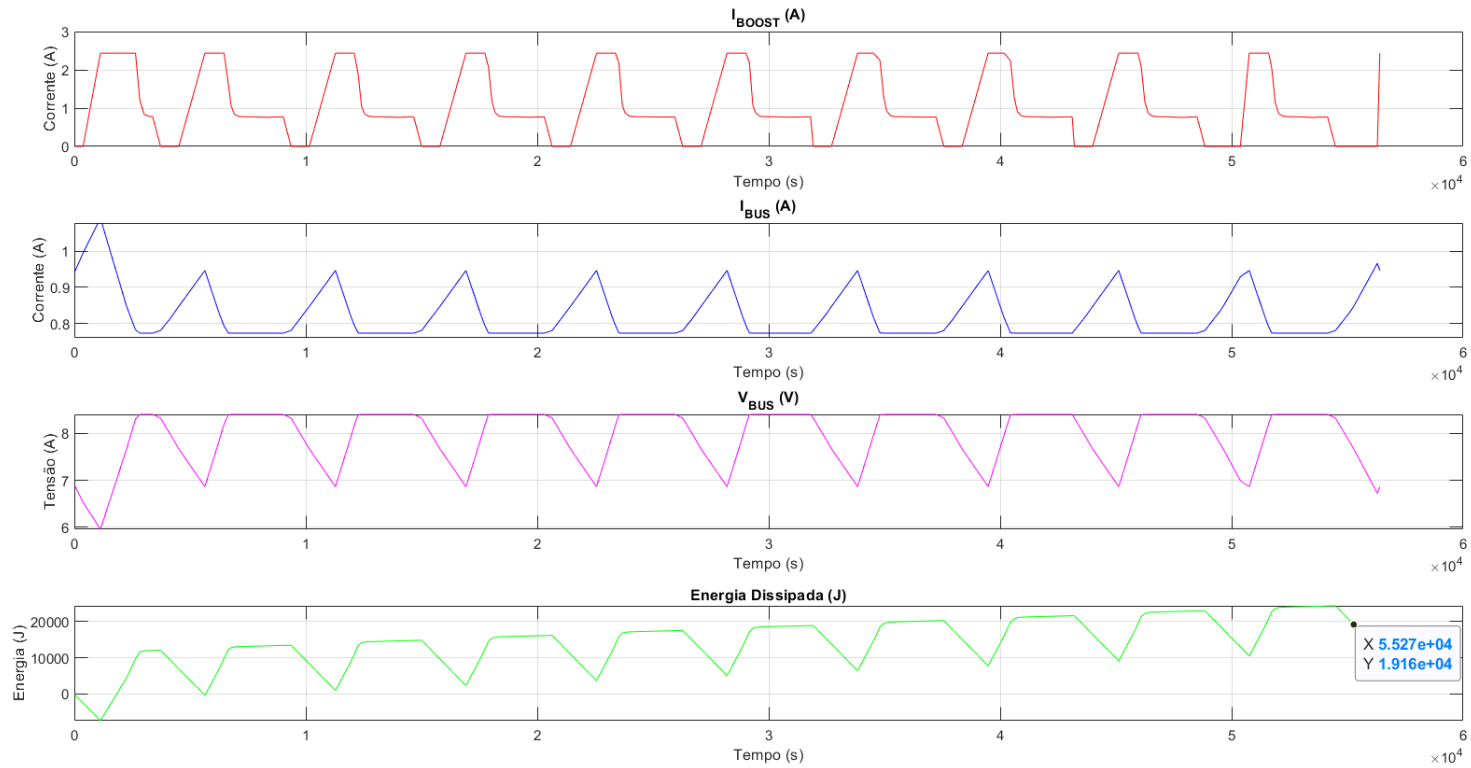
Fonte: Produção da autora.

Figura B.39 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.



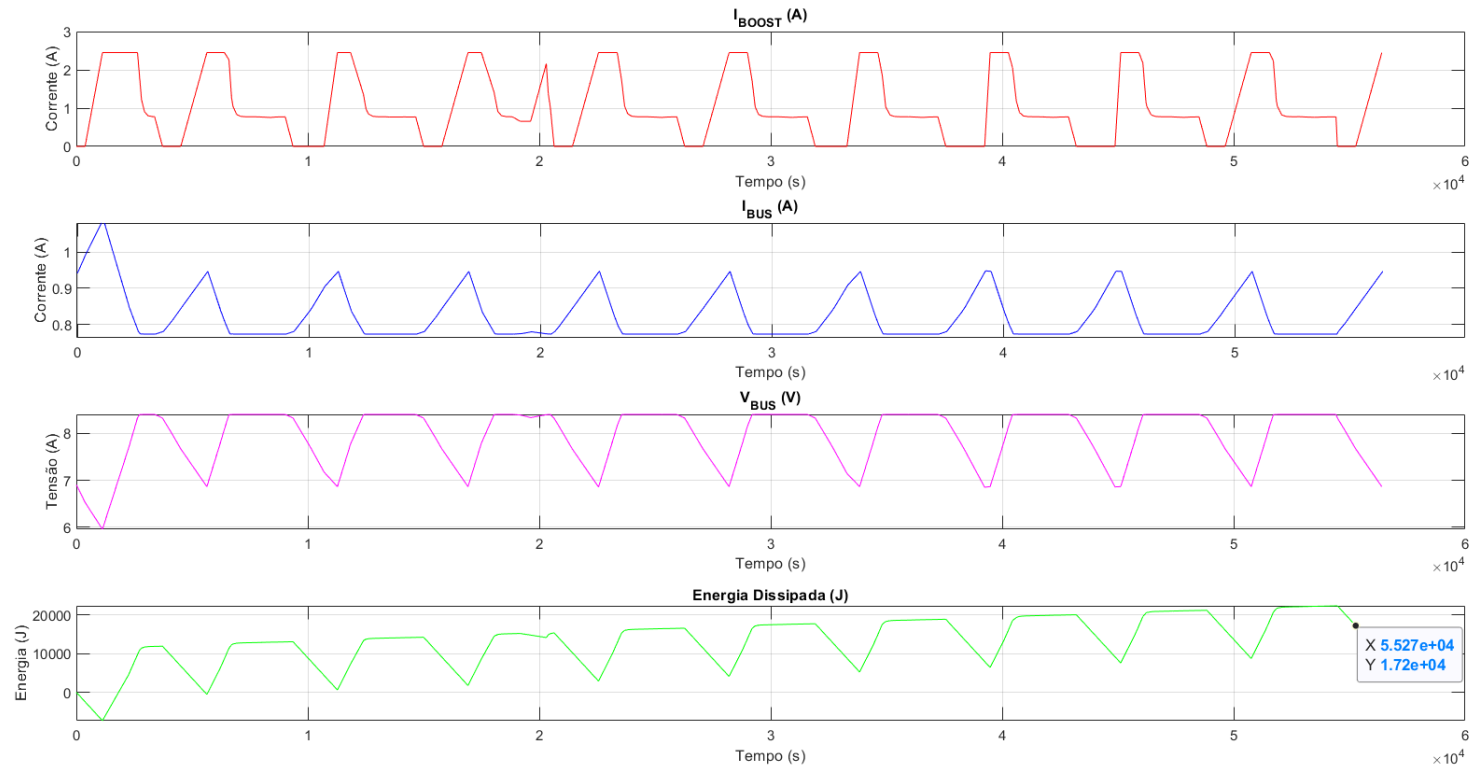
Fonte: Produção da autora.

Figura B.40 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.



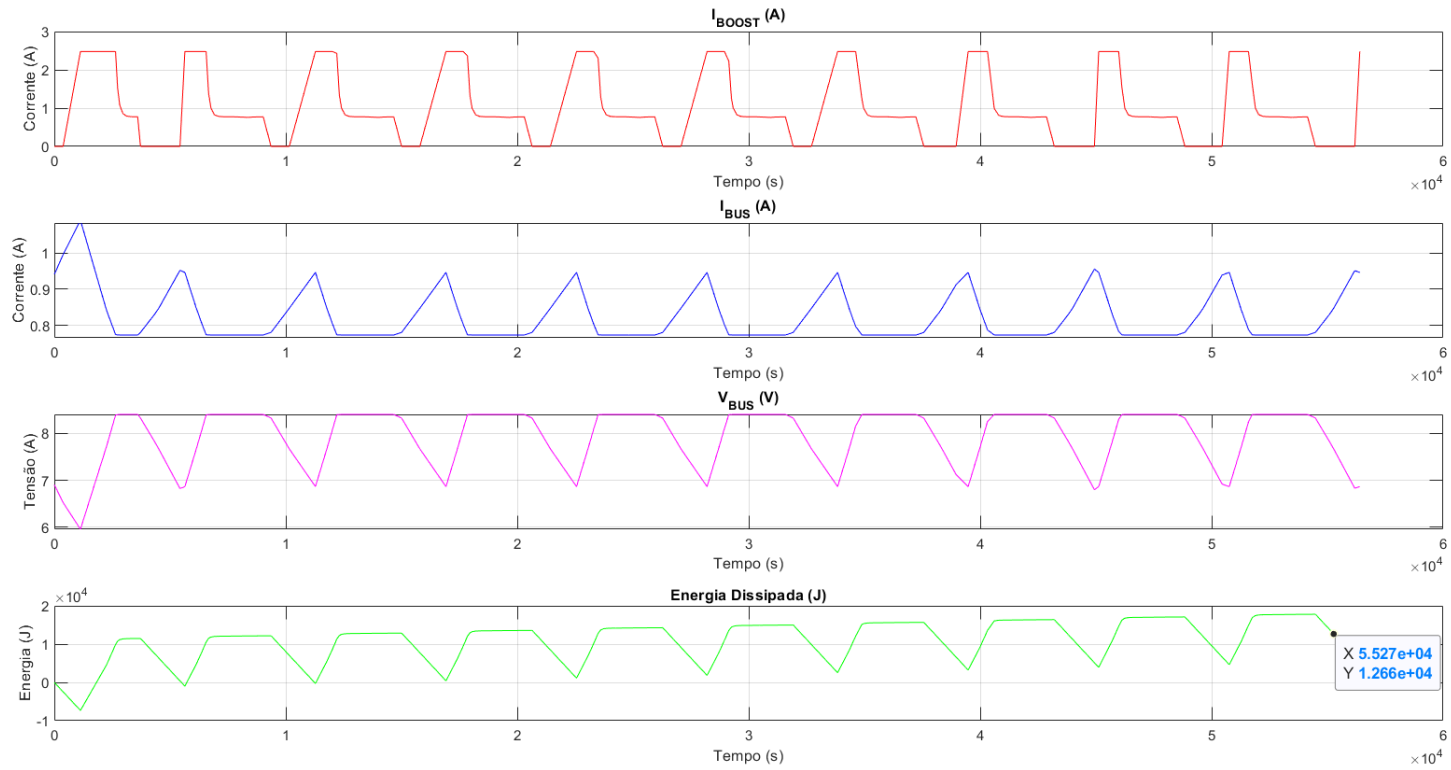
Fonte: Produção da autora.

Figura B.41 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.



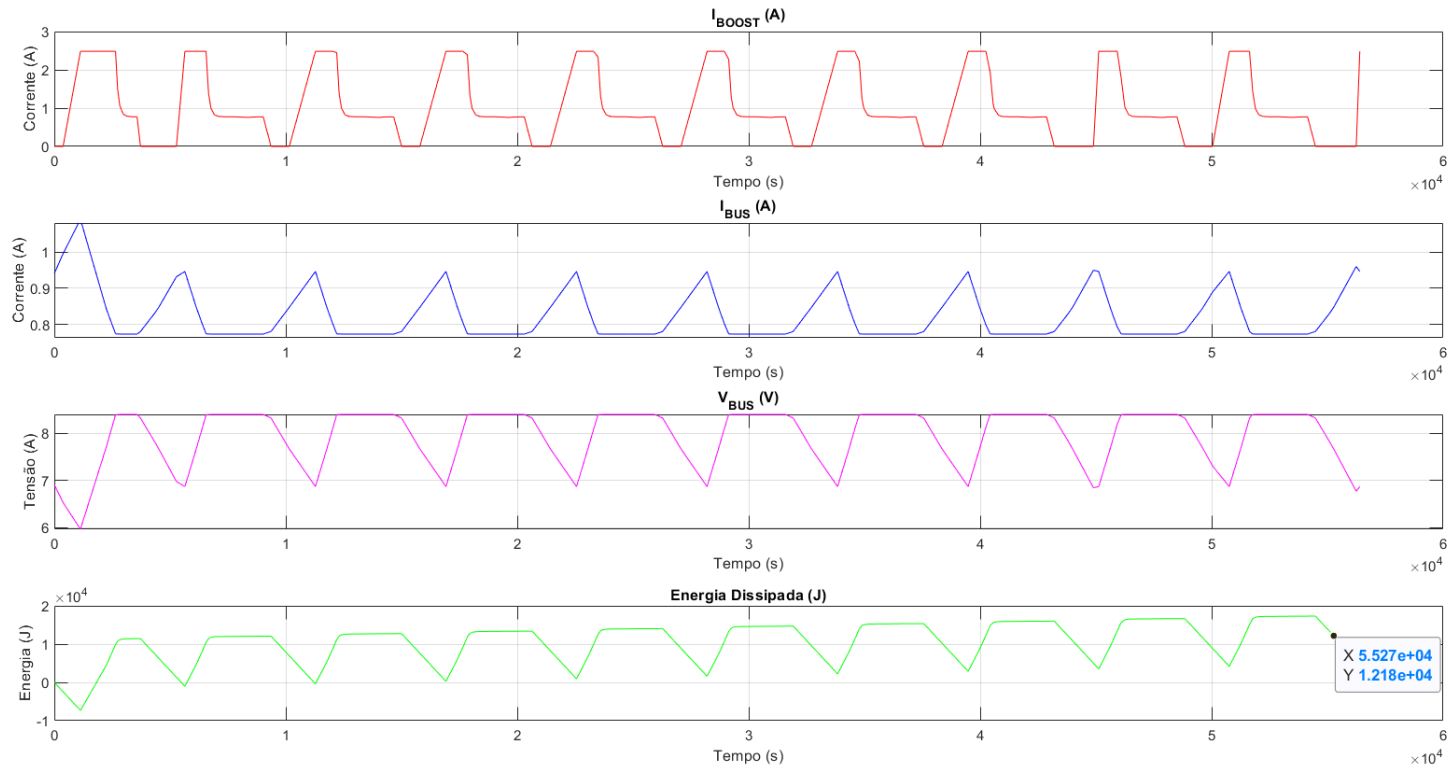
Fonte: Produção da autora.

Figura B.42 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

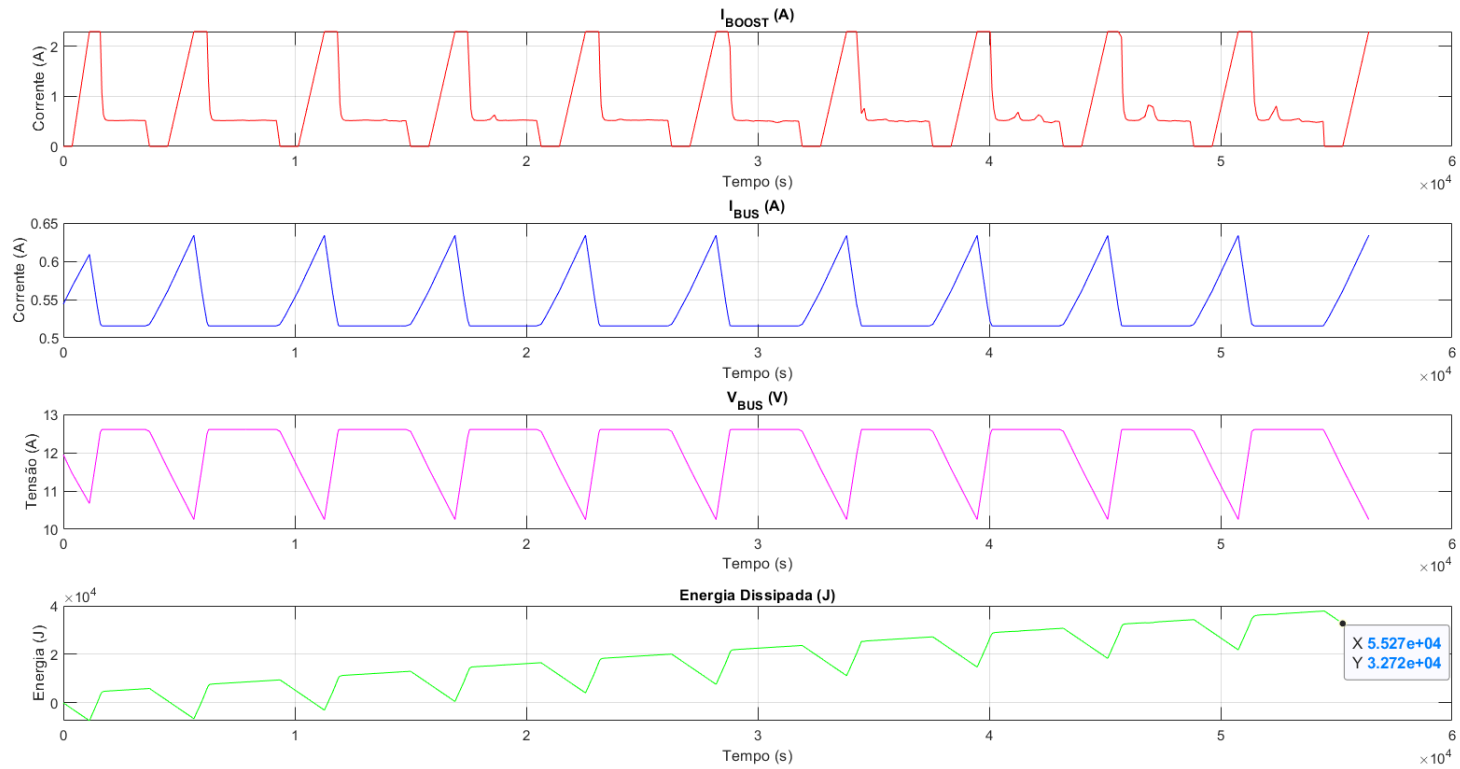
Figura B.43 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (8,4 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

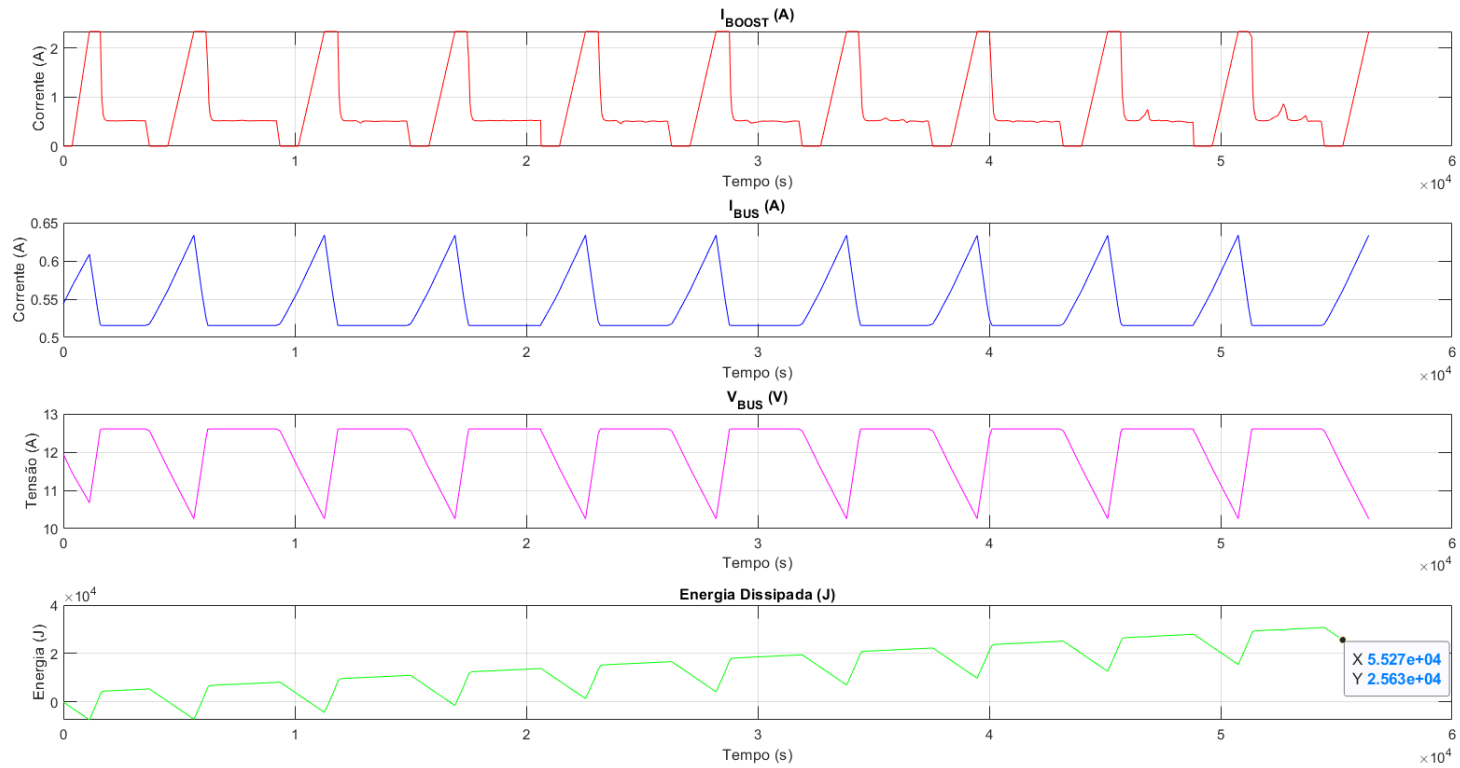
B.3.2 - PPT em barramento 12,6 V

Figura B.44 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 91,80% de eficiência.



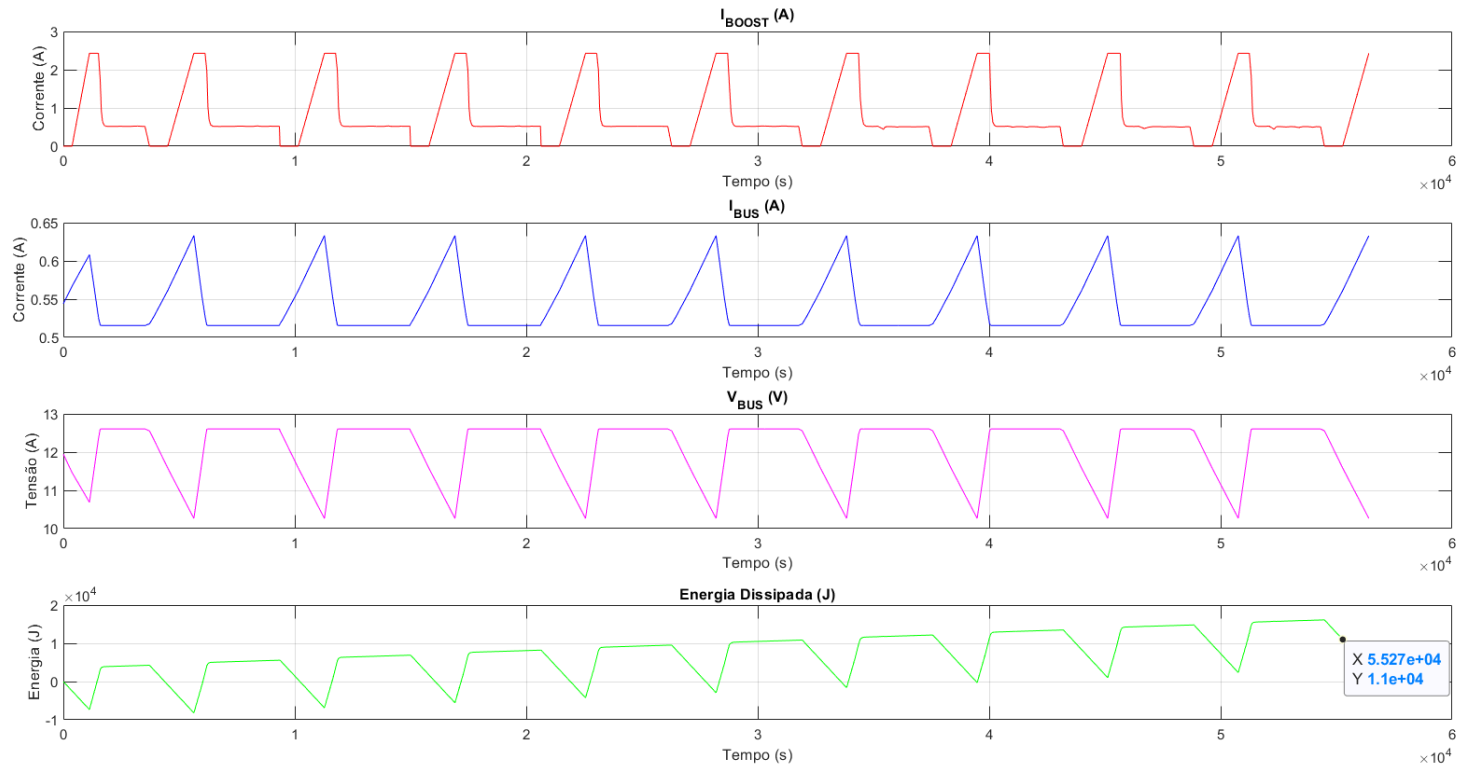
Fonte: Produção da autora.

Figura B.45 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 93,50% de eficiência.



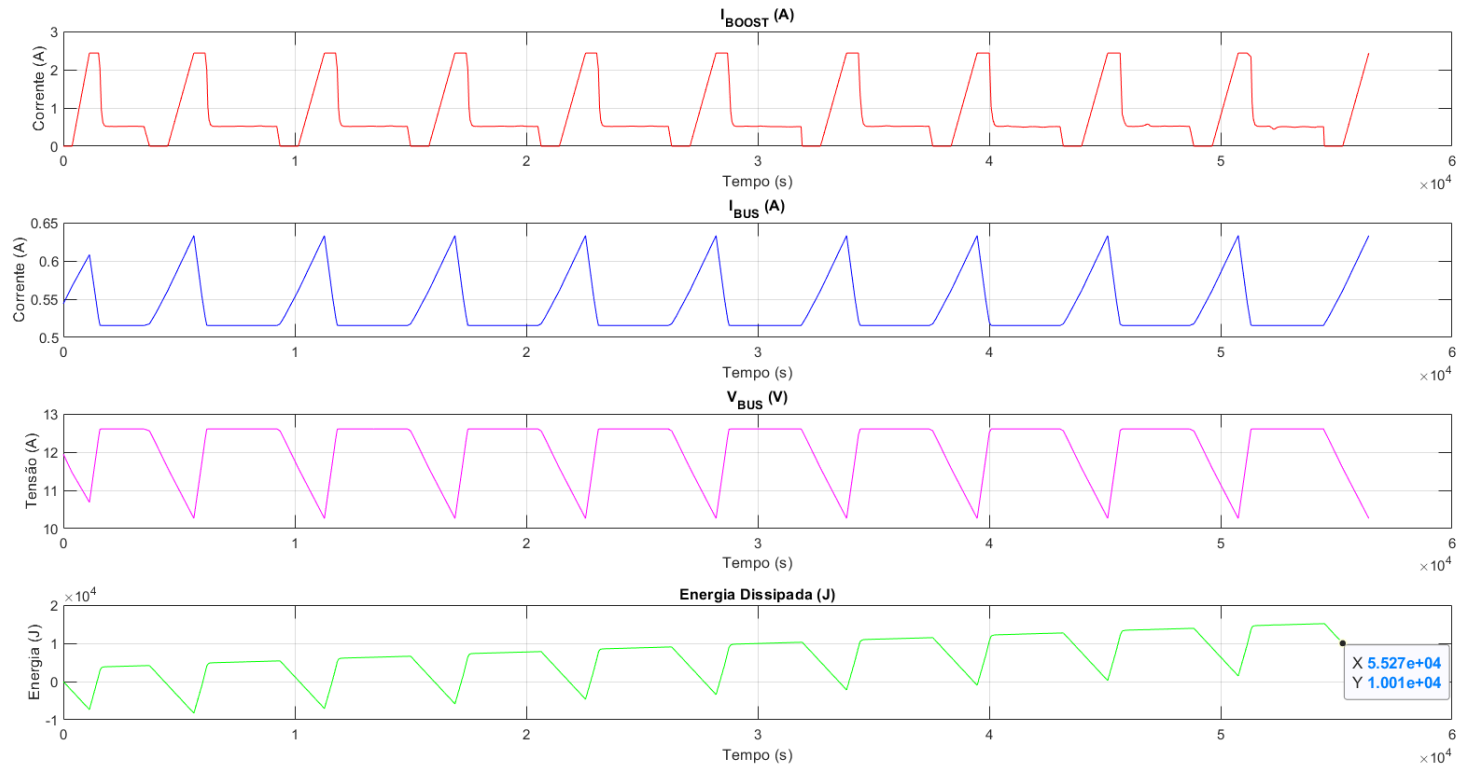
Fonte: Produção da autora.

Figura B.46 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,22% de eficiência.



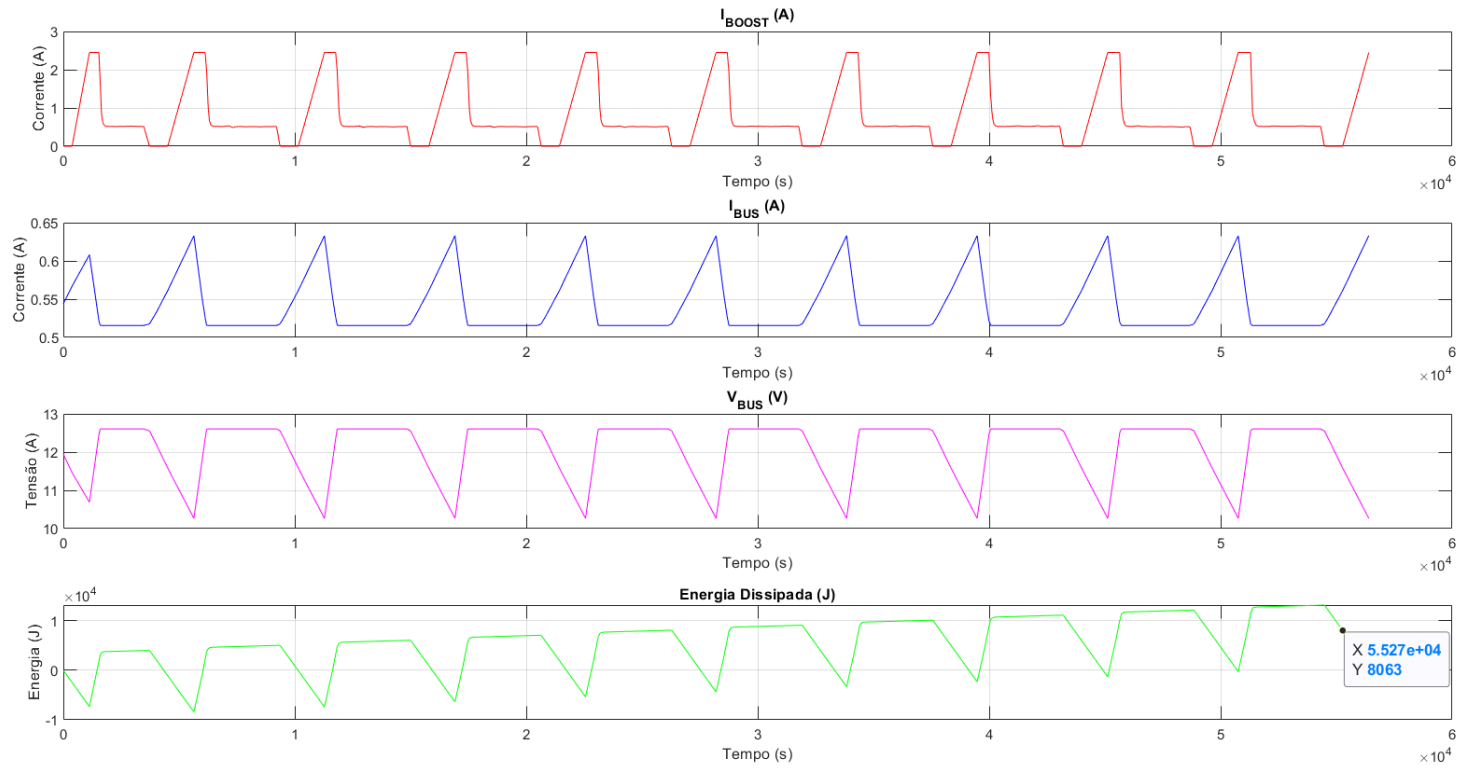
Fonte: Produção da autora.

Figura B.47 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 97,48% de eficiência.



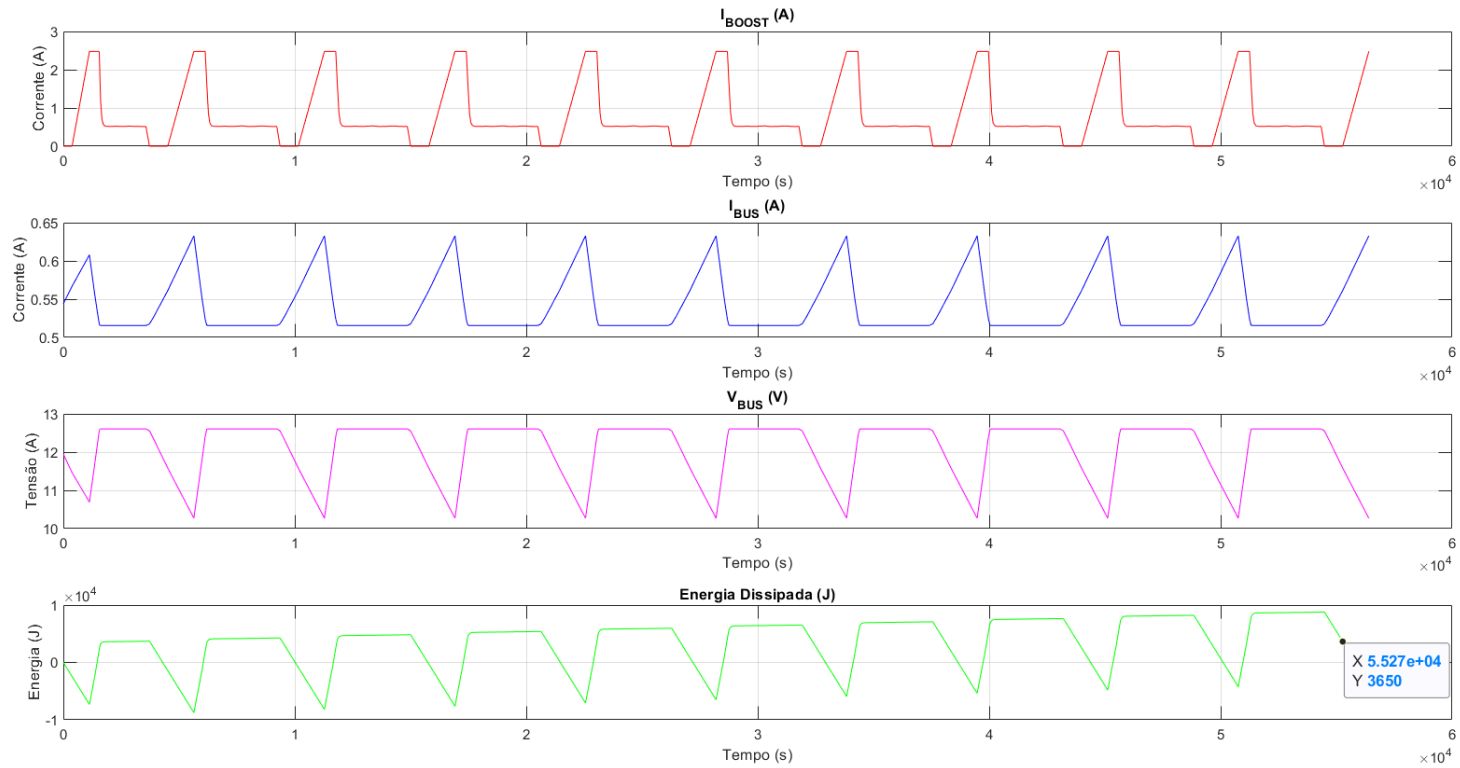
Fonte: Produção da autora.

Figura B.48 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 98% de eficiência.



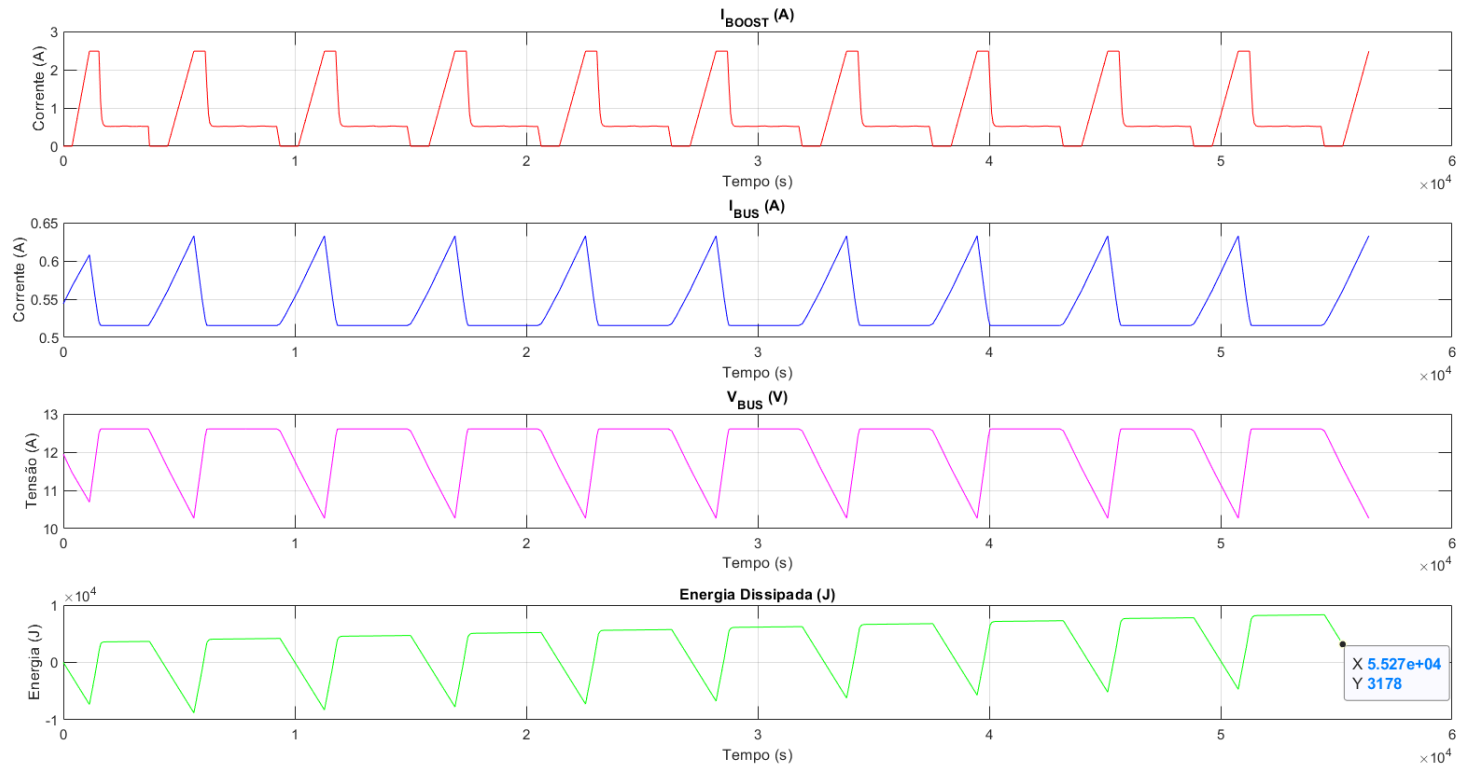
Fonte: Produção da autora.

Figura B.49 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,20% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

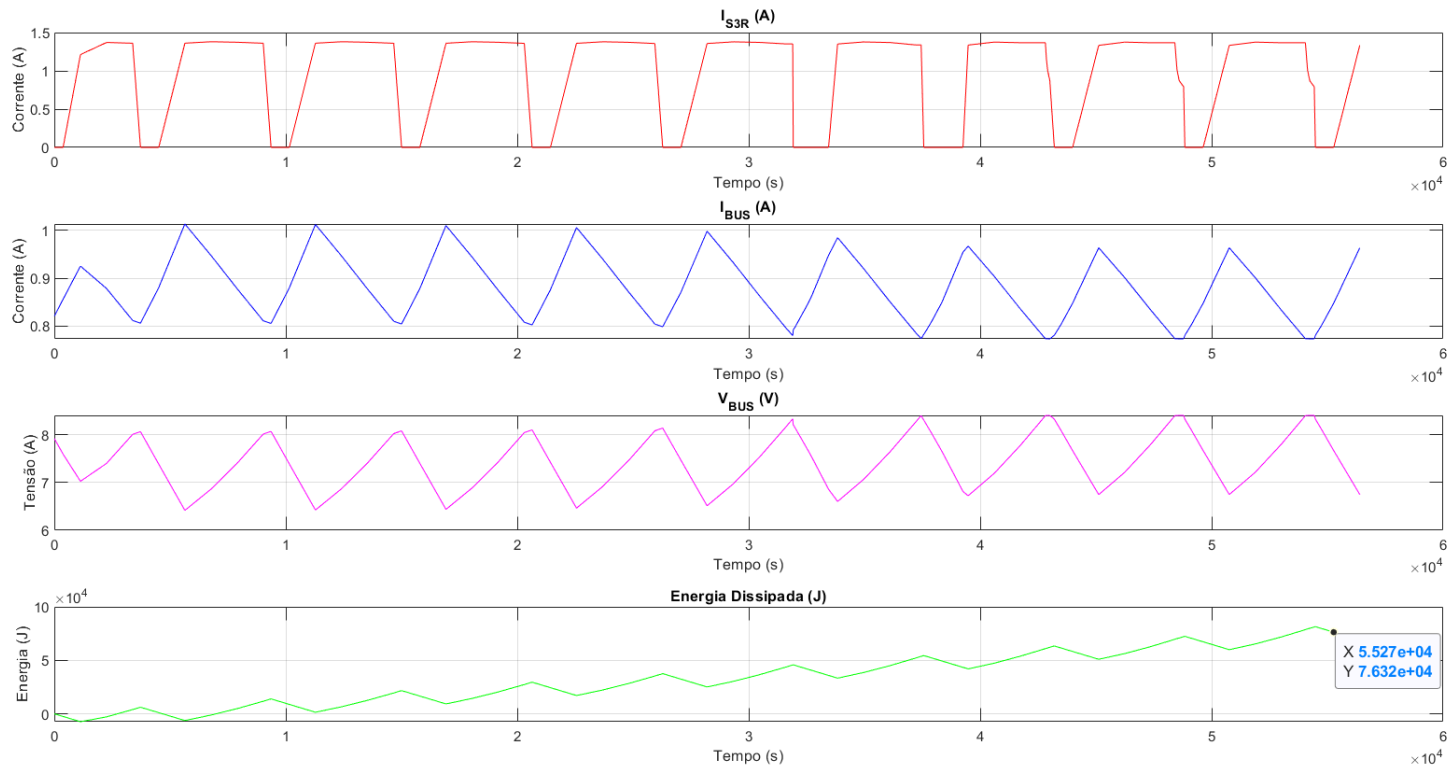
Figura B.50 - 3ª Métrica: Energia dissipada no PPT (12,6 V), com DCDC Boost de 99,33% de eficiência.



Fonte: Produção da autora.

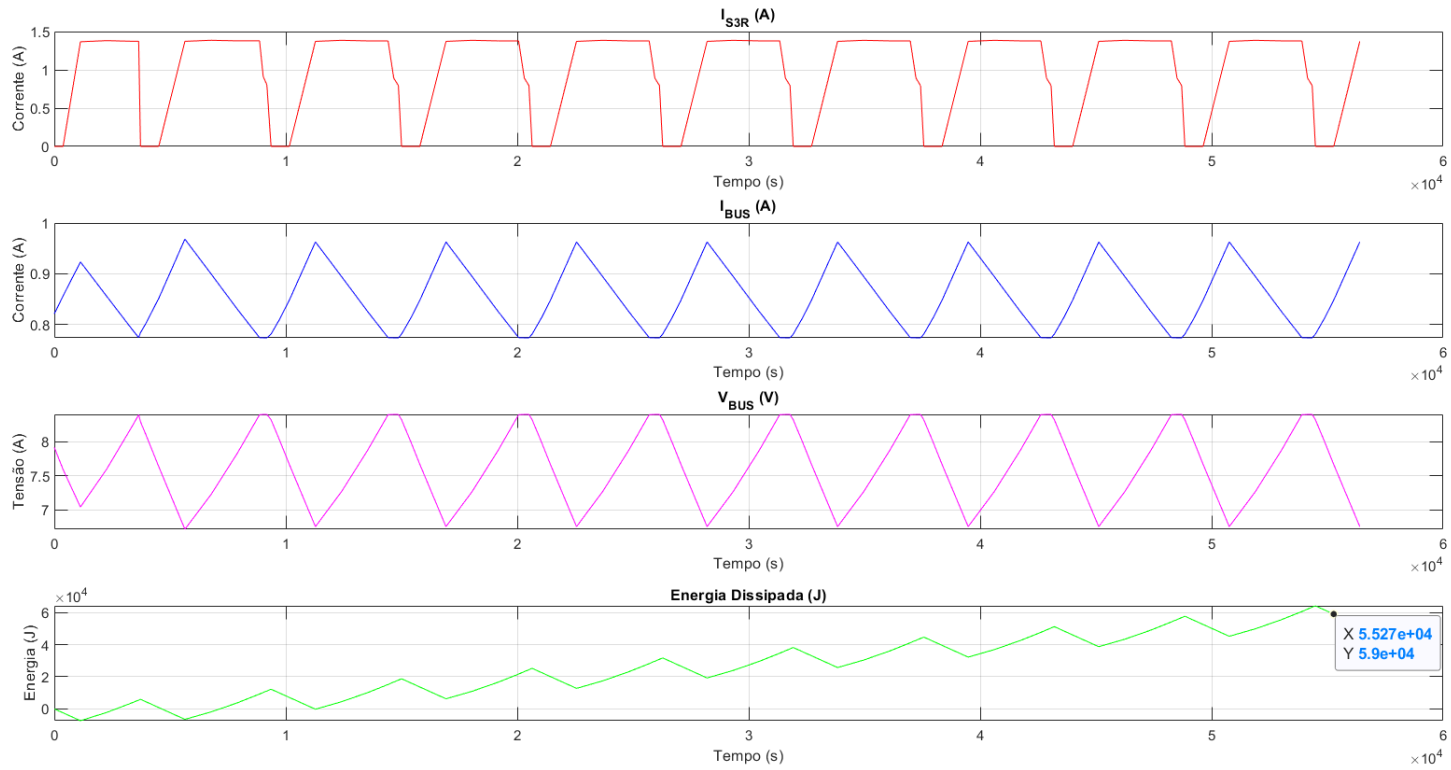
B.3.3 - DET em barramento 8,4 V

Figura B.51 - 3ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S³R com queda de diodo de 1,5 V.



Fonte: Produção da autora.

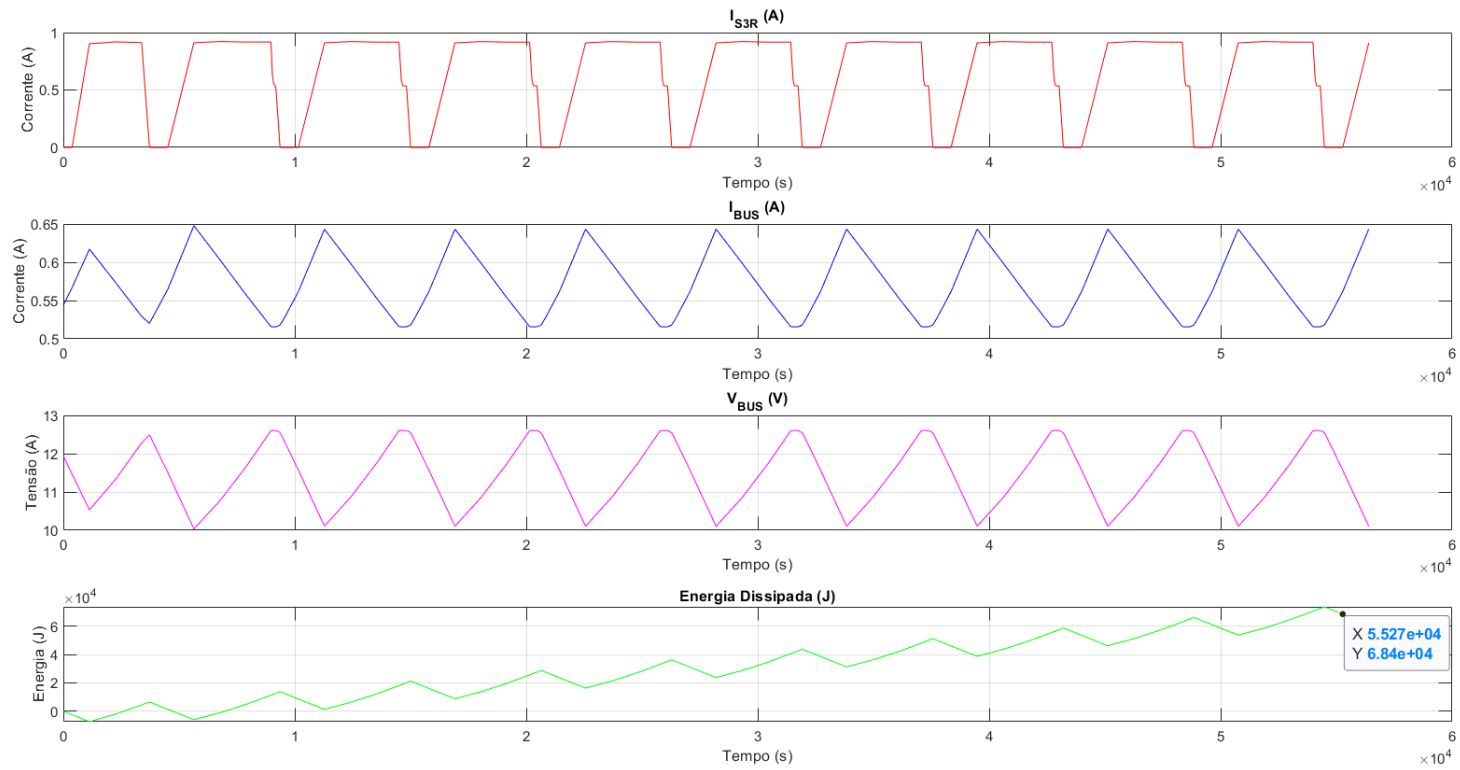
Figura B.52 - 3ª Métrica: Energia dissipada no DET (8,4 V), S³R com queda de diodo de 0,75 V.



Fonte: Produção da autora.

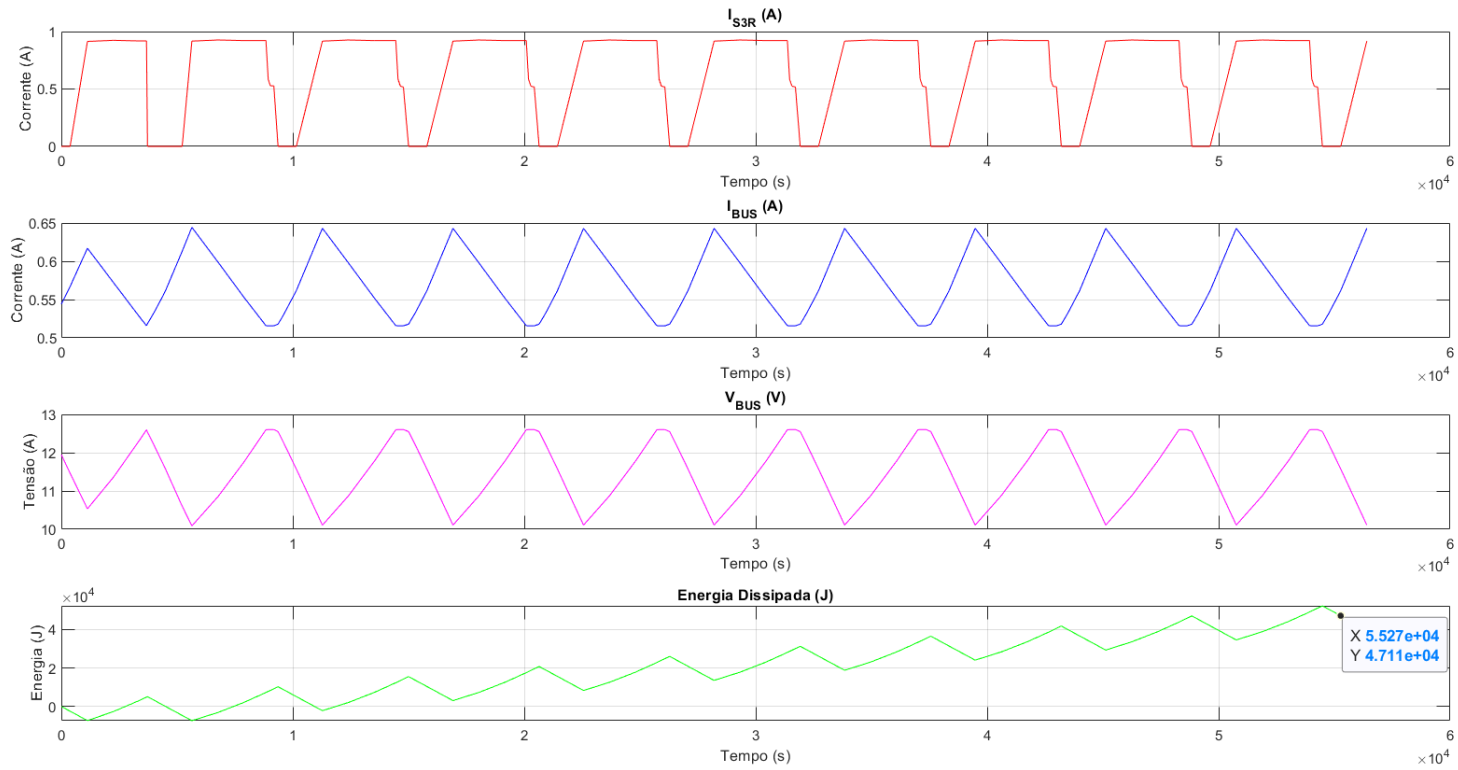
B.3.4 - DET em barramento 12,6 V

Figura B.53 - 3ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S³R com queda de diodo de 1,5 V.



Fonte: Produção da autora.

Figura B.54 - 3ª Métrica: Energia dissipada no DET (12,6 V), S³R com queda de diodo de 0,75 V.



Fonte: Produção da autora.

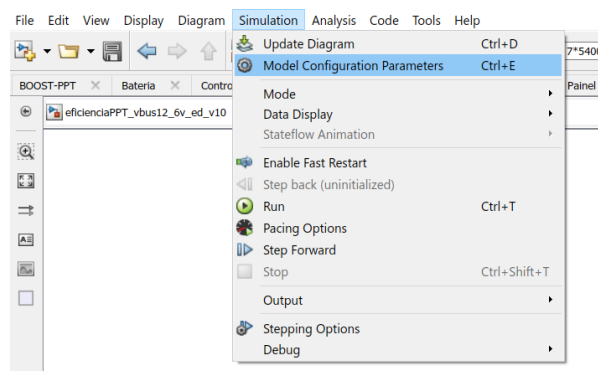
APÊNDICE C – SOLVER E PROBLEMAS DE SIMULAÇÃO

C.1 – Configuração do Solver

O solucionador escolhido para as simulações foi o ODE45 que é um integrador que uso o método Runge-Kutta de quarta e quinta ordem, com maior precisão numérica que o solucionador ODE23 (integrador de baixa ordem) que usa o método Runge-Kuta de segunda e terceira ordem. Tanto o ODE45 e ODE23 são solucionadores de equações diferenciais ordinárias de etapa única (MATHWORKS, 2014).

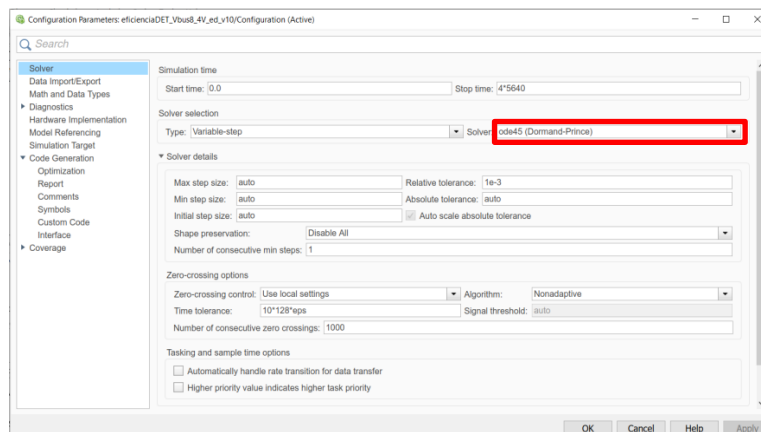
O solver ODE45 foi configurado conforme ilustrado nas Figura C.1 e Figura C.2.

Figura C.1 - Configuração do solucionador.



Fonte: Produção da autora.

Figura C.2 - Configuração dos parâmetros do solucionador.

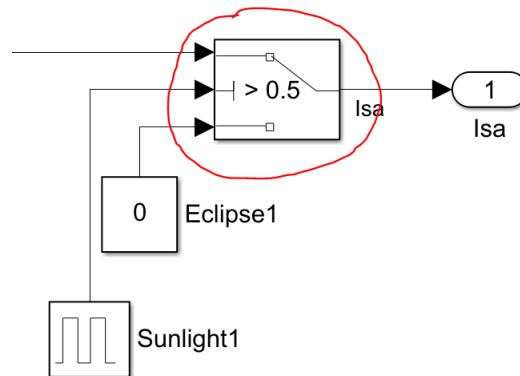


Fonte: Produção da autora.

C.2 – Problemas encontrados durante as simulações

Durante as simulações surgiram erros numéricos causados por discontinuidades de processos. Tais discontinuidades são causadas por elementos chaveados (Figura C.3), utilizados para simular os tempos de *Sunlight* e eclipse.

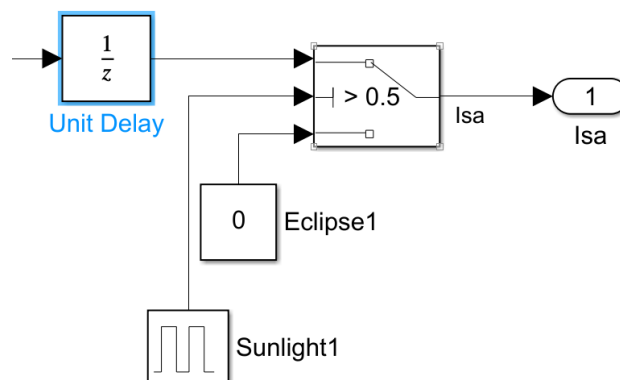
Figura C.3 - Elemento chaveador do *Sunlight* e eclipse.



Fonte: Produção da autora.

A solução encontrada para resolver este problema foi utilizar o bloco *Unit Delay* (Figura C.4). Este bloco gera um atraso na entrada da chave para que o solucionador não fique “confuso” quanto ao valor que deve ser utilizado.

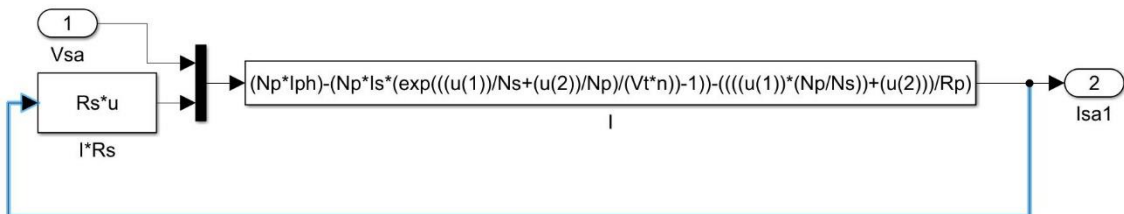
Figura C.4 - Bloco *Unit Delay*.



Fonte: Produção da autora.

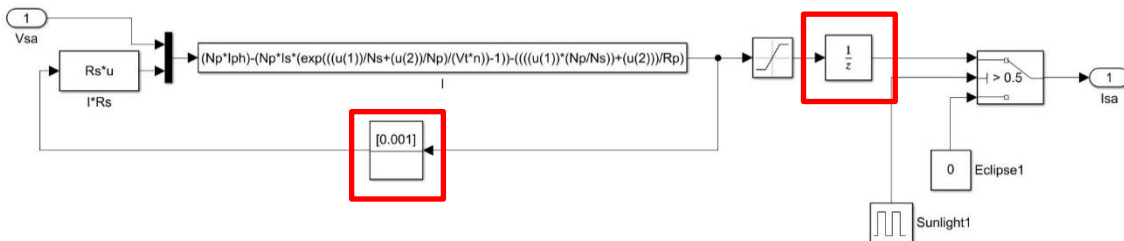
Outro problema encontrado diz respeito a erros de *loop* algébricos, quando o bloco utiliza sua saída como entrada. Isso ocorreu no bloco Painel Solar, cuja equação característica, é realimentada com a corrente de saída (Figura C.5). A solução mais utilizada para corrigir este problema é adicionar o bloco **Unit Delay**, que atrasa em um passo a simulação. Foi adicionado, também, um bloco de condição inicial para corrente de saída, conforme a Figura C.6.

Figura C.5 - Realimentação da corrente do painel solar.



Fonte: Produção da autora.

Figura C.6 - Bloco *Initial Condition*.

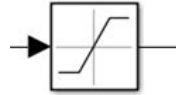


Fonte: Produção da autora.

No bloco **Painel Solar** foi necessário incluir, na sua saída, o bloco *Saturation* para zerar quando a corrente de saída (ISA) for menor que 0, pois quando ocorre o chaveamento do *Sunlight* para o eclipse, ou seja, quando o satélite não recebe a luz do Sol, matematicamente, o painel solar continua alimentando o conversor *Boost* ou *S³R*. Isso faz com que o conversor *Boost* ou *S³R* continue integrando os valores e isto vai acumulando erros matemáticos, ou seja, o controle (amplificador de erro) continua matematicamente operando. Quando o satélite volta para o *Sunlight*, o conversor *Boost* ou *S³R* está com uma condição inicial

negativa, o que faz que que o bloco **Painel Solar** inverta o sinal, gerando um erro, uma não linearidade do sistema, pois o painel solar não pode gerar corrente durante o eclipse. Para se evitar isso utilizou-se o bloco *Saturation* (Figura C.7).

Figura C.7 - Bloco *Saturation*.



Fonte: Produção da autora.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o International Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São as sequências de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.