



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/06.09.11.30-TDI

UMA ABORDAGEM PARA SELEÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA PARA APLICAÇÃO EM SATÉLITES DE MÉDIO E GRANDE PORTES

Herbi Júnior Pereira Moreira

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Engenharia
e Tecnologia Espaciais/Engenharia
e Gerenciamento de Sistemas
Espaciais, orientada pelo Dr.
Renato Oliveira de Magalhães,
aprovada em 20 de maio de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42L53DB>>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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 - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/06.09.11.30-TDI

UMA ABORDAGEM PARA SELEÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA PARA APLICAÇÃO EM SATÉLITES DE MÉDIO E GRANDE PORTES

Herbi Júnior Pereira Moreira

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Engenharia
e Tecnologia Espaciais/Engenharia
e Gerenciamento de Sistemas
Espaciais, orientada pelo Dr.
Renato Oliveira de Magalhães,
aprovada em 20 de maio de 2020.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42L53DB>](http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42L53DB)

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Moreira, Herbi Júnior Pereira.

M813a Uma abordagem para seleção e análise de um sistema de suprimento de energia para aplicação em satélites de médio e grande portes / Herbi Júnior Pereira Moreira. – São José dos Campos : INPE, 2020.

xxiv + 67 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/06.09.11.30-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientador : Dr. Renato Oliveira de Magalhães.

1. Fonte de alimentação chaveada. 2. Gráficos de ligações. 3. Suprimento de energia para satélites. 4. Topologia completamente regulada. 5. Conversores DC/DC bidirecionais. I.Título.

CDU 621.311:629.78



Esta obra foi licenciada sob uma [Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

A FOLHA DE APROVAÇÃO SERÁ INCLUIDA APÓS RESTABELECIMENTO DAS ATIVIDADES PRESENCIAIS.

Por conta da Pandemia do COVID-19, as defesas de Teses e Dissertações são realizadas por vídeo conferência, o que vem acarretando um atraso no recebimento nas folhas de aprovação.

Este trabalho foi aprovado pela Banca e possui as declarações dos orientadores (confirmando as inclusões sugeridas pela Banca) e da Biblioteca (confirmando as correções de normalização).

Assim que a Biblioteca receber a Folha de aprovação assinada, esta folha será substituída.

Qualquer dúvida, entrar em contato pelo email: pubtc@inpe.br.

Divisão de Biblioteca (DIBIB).

“A jornada de mil milhas começa com um passo.”

LAO TZI
em “*Tao Te Ching*”

*A todos que me ajudaram nessa jornada: orientadores,
amigos, funcionários da instituição, em especial aos meus
pais **Herbi** e **Delcia** e aos meus irmãos **Helba** e
Herion.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu saúde e força ao longo desse caminho. Agradeço as palavras de ânimo recebidas pela minha família, meus amigos e de todos que se compadeceram nos momentos em que tive fraqueza. Agradeço a dedicação de todos os meus professores no decorrer de minha vida acadêmica, a paciência comigo e o carinho em ensinar, sem isso nada seria possível. Agradeço ao INPE e a CAPES, pela grande oportunidade e confiança em mim depositada.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem para a análise das principais topologias utilizadas no subsistema de suprimento de energia de satélites e define os critérios que auxiliarão na escolha da topologia mais adequada para uma dada missão. Nessa abordagem, as topologias são tratadas do ponto de vista da continuidade de energia e seus componentes, como elementos processadores desse fluxo de energia interno ao sistema. Para isso, um processo de modelagem, conhecido como *Bond Graph*, será aplicado, permitindo ao estudo uma análise comparativa, de acordo com critérios de redução de massa, volume e melhor eficiência estabelecidos. Essa análise aponta os motivos pela preferência das topologias de barramento regulado, sendo complementada com a comparação entre a topologia Híbrida e a Completamente Regulada, a partir da qual o estudo se concentra, levando em conta a substituição do Regulador de Carga da Bateria (BCR) e o Regulador de Descarga da Bateria (BDR) por um equipamento unificado de condicionamento de energia da bateria, com BCR e BDR fundidos em um único conversor bidirecional. O trabalho apresenta um estudo de caso da missão Amazônia, baseado na Plataforma Multimissão (PMM), a fim de validar a metodologia de escolha adotada. Por fim, o comportamento funcional do sistema modificado é validado por um modelo baseado em Simulink, com a topologia selecionada sendo controlada em malha fechada para fornecer um barramento de energia primário de 28V regulado.

Palavras-chave: Fonte de alimentação chaveada. Gráficos de ligações. Suprimento de energia para satélites. Topologia Completamente Regulada. Conversores DC/DC bidirecionais.

AN APPROACH FOR THE ANALYSIS, SELECTION AND SIMULATION OF AN ENERGY SUPPLY SUBSYSTEM FOR MEDIUM AND LARGE SATELLITES APPLICATIONS

ABSTRACT

This work presents an approach for the analysis of the main topologies used in the satellite energy supply subsystem and it defines the criteria that will assist in the choice of the most appropriate topology for a given mission. In this approach, topologies are treated from the point of view of the continuity of energy and its components, as processing elements of this energy flow internal to the system. For this, a modeling process, known as Bond Graph, will be applied, allowing the study to have a comparative analysis, according to the established criteria of mass and volume reduction and better efficiency. This analysis points out the reasons for the preference of the regulated bus topologies, being complemented with the comparison between the Hybrid and the Completely Regulated topology, from which the study focuses, taking into account the replacement of the Battery Charge Regulator (BCR) and the Battery Discharge Regulator (BDR) by a unified battery energy conditioning equipment, with BCR and BDR merged into a single bidirectional converter. The work presents a case study of the Amazon mission, based on the Multimission Platform (PMM), in order to validate the methodology of choice adopted. Finally, the modified system's functional behavior is validated by a Simulink-based model, with the selected topology being controlled in closed loop to provide a regulated 28V primary power bus.

Keywords: Switching Power Supply. Bond Graph. Satellite Power Supply. Fully Regulated Topology. Bidirectional DC/DC Converter.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Arquitetura de um PSS genérico.	6
2.2 Diagrama de blocos das topologias do PSS.	7
2.3 Diagrama de um canal Shunt.	8
2.4 Topologia típica conversor <i>non-isolated half-bridge</i>	13
2.5 Delimitação do Sistema/Ambiente.	16
2.6 Reticulação do sistema.	16
2.7 Sistema e suas ligações energéticas.	17
2.8 Interação entre variáveis de ligação de energia.	17
2.9 Ilustração da equação de conservação de massa.	19
2.10 Armazenamento e dissipação de energia do sistema.	21
2.11 Continuidade de energia do sistema.	21
2.12 Tipos de junções ideais.	22
3.1 Impacto na massa dos conversores DC/DC devido à variação da tensão de entrada.	25
3.2 Conexão SAG/Fonte de energia.	25
3.3 Potência SAG (superior) x Tensão da Bateria (inferior).	26
3.4 Técnicas de modularização: S3R (esquerda) and <i>Average Current Mode</i> (direita).	28
3.5 Definição Sistema (S) e Meio Ambiente (E).	29
3.6 Diagramas em <i>Bond Graph</i> das topologias candidatas.	30
3.7 <i>Bond Graph</i> das topologias candidatas considerando a eficiência.	33
3.8 Eficiência da topologia Híbrida e da Completamente Regulada alcançada com a alteração do parâmetro ξ	36
3.9 Eficiência da topologia Híbrida e da Completamente Regulada alcançada com a alteração do parâmetro Fator de Carga.	37
3.10 Perfil de Potência.	39
3.11 Módulo S3R desenvolvido no INPE.	40
3.12 Módulo MEA desenvolvido pelo INPE.	42
3.13 Diagrama em blocos do design da PCU para PMM usando a topologia Híbrida.	44
3.14 Diagrama em blocos do design da PCU para PMM usando a topologia Completo. Reg. Bidirecional.	45
4.1 Topologia típica de um conversor <i>non-isolated half-bridge</i>	47
4.2 Unidade de Chaveamento.	48

4.3	Formas de onda unidade de chaveamento.	49
4.4	Formas de onda da corrente de entrada da unidade de chaveamento. . . .	49
4.5	Modelo de média da unidade de chaveamento.	50
4.6	Modelo de média do conversor <i>Half-Bridge</i>	50
5.1	Diagrama em bloco topologia Completamente Regulada Bidirecional em malha fechada.	51
5.2	<i>Three-domain control</i>	53
5.3	Controle do sistema em malha fechada	54
5.4	Formas de onda de simulação: Bateria Recarregando.	56
5.5	Formas de onda de simulação: Controlador MEA.	56
A.1	Diagrama de um canal BC.	65
A.2	Curvas de eficiências da fonte SMP.	67

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Informações do PSS usado nas primeiras missões espaciais brasileiras. . .	13
2.2 Comparação do equipamento Shunt das gerações CBERS.	14
2.3 Variáveis generalizadas equivalentes para um sistema elétrico.	18
3.1 Comparação do processamento de energia entre as topologias.	32
3.2 Comparação de eficiência do sistema entre Híbrida e Completamente Regulada Bidirecional.	35
3.3 Características do equipamento S3R e a configuração para cada topologia.	40
3.4 Características do equipamento BDR.	41
3.5 Características do equipamento MEA e a configuração para cada topologia.	42
3.6 Características do equipamento BC.	43
3.7 Características do equipamento BCDR.	44
3.8 Características da PCU usando a topologia Híbrida.	45
5.1 Parâmetros usados na simulação.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BC	– Battery charger
BCR	– Battery charger regulator
BDR	– Battery discharger regulator
CBERS	– China-Brazil Earth-Resources Satellite
CSC	– Current Source Converter
EMI/EMC	– Electromagnetic Interference/Eletromagnetic Compatibility
EoC	– End of Charge
EoD	– End of Discharge
ESA	– European Space Agency
ESPC	– European Space Power Conference
FAA	– Federal Aviation Administration
GEO	– Geostationary Orbit
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LEO	– Low Earth Orbit
MEA	– Main Error Amplifier
MECB	– Missão Espacial Completa Brasileira
MPPT	– Maximum Peak Power Tracking
PCU	– Power Conditioning Unit
PDU	– Power Distribution Unit
PMM	– Plataforma Multimissão
PSS	– Power Supply Subsystem
PWM	– Pulse Width Modulation
S3R	– Sequential Switching Shunt Regulators
SAG	– Solar Array Generator
SCD	– Satélite de Coleta de Dados
SMT	– Surface Mount Technology
SSR	– Satélite de Sensoriamento Remoto
VDC	– Voltage Direct Current

LISTA DE SÍMBOLOS

d	–	duty cycle
i_{BCDR}	–	Corrente do equipamento BCDR
i_{BDR}	–	Corrente do equipamento BDR
i_{CARGA}	–	Corrente consumida pela carga
i_D	–	Corrente de descarga da bateria
i_{RC}	–	Corrente de recarga da bateria
i_S	–	Corrente do barramento principal
i_{S3R}	–	Corrente do equipamento S3R
t_{on}	–	Tempo da chave ligada
T_{sun}	–	Período de <i>sunlight</i>
v_{bat}	–	Tensão da bateria
v_{bus}	–	Tensão no barramento principal
v_{EoC}	–	Tensão de fim de carga da bateria
V_M	–	Tensão máxima na entrada do conversor DC/DC
V_m	–	Tensão mínima na entrada do conversor DC/DC
v_{MEA}	–	Tensão de referência do controlador MEA
v_{REF}	–	Tensão de referência
ρ	–	densidade de massa
η	–	eficiência

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivo do trabalho	2
1.3 Metodologia da pesquisa	3
1.4 Generalidade e utilidade	3
1.5 Organização do trabalho	4
2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Subsistema de suprimento de energia - PSS	5
2.2 Topologias de PSS	6
2.3 Unidade de condicionamento de potência - PCU	8
2.3.1 Regulador shunt	8
2.3.2 Regulador de carga da bateria - BCR	9
2.3.3 Regulador de descarga da bateria - BDR	9
2.4 Topologias de barramento regulado	10
2.4.1 Topologia completamente regulada	10
2.4.2 Topologia híbrida	11
2.5 Conversores DC/DC bidirecionais	11
2.6 PSS do Programa Espacial Brasileiro	13
2.7 Bond Graph	14
2.7.1 Visão geral	15
2.7.2 Continuidade de energia	18
2.7.3 Tipos de junções	21
3 ANÁLISE E SELEÇÃO DA TOPOLOGIA	23
3.1 Dilema da escolha	23
3.1.1 Influência do tipo de barramento.	24
3.1.2 Uso eficiente de painéis solares	25
3.1.3 Modularidade	27
3.2 Seleção das topologias reguladas	28
3.2.1 Seleção das topologias utilizando a modelagem em Bond Graph: critério da eficiência	29
3.2.1.1 Primeira análise	29

3.2.1.2	Segunda análise	32
3.2.1.3	Análise complementar: influência dos equipamentos BDR e BCDR na eficiência do sistema em relação aos parâmetros ξ e fator de recarga das baterias.	35
3.2.1.3.1	- Variação do parâmetro ξ	35
3.2.1.3.2	- Variação do fator de recarga (FR).	36
3.2.2	Seleção das topologias utilizando um estudo de caso da PMM: critério de massa e volume	37
3.2.2.1	Especificação de potência da PMM	38
3.2.2.2	Solução de PCU ao perfil de potência proposto	39
3.2.2.2.1	- Módulos S3R	39
3.2.2.2.2	- Módulos BDR	41
3.2.2.2.3	- Módulos MEA	41
3.2.2.2.4	- Módulos BC	42
3.2.2.2.5	- Módulos BCDR	43
3.2.2.2.6	- Motherboard	44
3.2.2.3	Comparativo massa x volume entre as topologias Híbrida e Complet. Reg. Bidirecional	45
4	MODELAGEM DO CONVERSOR DC/DC BIDIRECIONAL (BCDR).	47
4.1	Conversor bidirecional <i>Half-bridge</i>	47
4.2	O método de média	47
5	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA EM MALHA FECHADA	51
6	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	APÊNDICE A - EFICIÊNCIAS DOS MÓDULOS S3R, BC e BDR/BCDR	65
A.1	Eficiência do equipamento S3R	65
A.2	Eficiência do equipamento BC	65
A.3	Eficiência do equipamento BDR e do BCDR	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

O Subsistema de Suprimento de Energia de um satélite (*Power Supply Subsystem* - PSS) tem como função principal prover continuamente energia a todos os demais subsistemas (HYDER et al., 2000). Ele é responsável pela geração, armazenamento, condicionamento e distribuição de energia para as várias cargas do satélite. Isso significa que o PSS é um subsistema crítico, uma vez que todos os demais subsistemas precisam de energia para funcionar.

Desde o primeiro satélite lançado em 1957, o Sputnik, com cerca de 83,6 kg e uma carga útil com consumo elétrico na ordem de 1 W (HYDER et al., 2000), observa-se até hoje um aumento gradual da potência elétrica, demandada pela maior complexidade e sofisticação desses sistemas (FORTEESCUE et al., 2011). Esse aumento de potência é acompanhado pelo aumento da massa e volume do subsistema como um todo. Segundo Patel (2005), o PSS representa cerca de 25 % a 40 % da massa total do satélite, cujo impacto no custo de lançamento não pode ser desprezado, já que o custo médio do lançamento em 2002 era, aproximadamente, de US\$ 10.000/kg para órbita baixa (LEO) e US\$ 50.000,00/kg para órbita geoestacionária (GEO).

Em seu relatório, a Administração Federal de Aviação dos EUA (*Federal Aviation Administration* - FAA) descreve algumas tendências do setor de transporte espacial. Destacam-se alguns detalhes do custo de lançamento praticados atualmente por alguns veículos lançadores, por exemplo, o custo de lançamento do foguete *Falcon 9*, é de US\$ 5.000/kg (LEO) enquanto o lançador Atlas V, mais confiável que o anterior, custa US\$ 13.000/kg na mesma órbita (FAA, 2018). No site da empresa *Spaceflight* (SPACEFLIGHT, 2020), é possível consultar os valores para o lançamento de um satélite de 1000 kg para órbita LEO orçados em até US\$ 28.000.000,00 podendo variar de acordo com veículo lançador selecionado. Vale ressaltar que os preços citados referem-se ao preço/kg da capacidade total do lançador, uma vez que, o valor total será cobrado independente do lançamento de uma carga parcial (JOHNSON, 2019). Outro ponto é que há diferenças entre valores praticados para entidades governamentais e para o setor privado (ZAPATA, 2017).

Portanto, os desafios relacionados à escolha da topologia a ser utilizada em um PSS surgem, não só na capacidade de processamento de energia ou duração da missão, mas também como novas exigências de massa, volume e eficiência impostas ao sistema.

A escolha da topologia para o PSS é uma tarefa antiga desde os primeiros estudos realizados pela Agência Espacial Europeia (ESA) nos anos 80, dos quais pode-se destacar o artigo de O'Sullivan (1989) intitulado: "*Satellite Power System Topologies*", onde o autor apresenta a topologia Híbrida (descrita na Subseção 2.4.2) como a ideal para órbitas baixas, e a topologia Completamente Regulada (conhecida por *Fully Regulated* e descrita na Subseção 2.4.1) recomendada para órbitas geoestacionárias.

No entanto, com o avanço tecnológico e o surgimento de novos controladores de circuitos integrados na indústria, com aplicação em conversores DC/DC bidirecionais, ambas as funções de controle de carga e descarga das baterias existentes podem ser condensadas em um único módulo, tornando atualmente alguns aspectos de cada topologia superados.

1.2 Objetivo do trabalho

Tendo em vista a busca constante por sistemas mais eficientes, a dissertação tem como objetivo apresentar uma revisão da atual solução técnica empregada para o fornecimento de energia dos satélites de médio e grande porte do programa espacial brasileiro, tendo como resultado o estudo de uma unidade de condicionamento de potência (PCU) redesenhada e adaptativa de tal forma que atenda aos requisitos necessários às missões, não só no contexto nacional, mas podendo se estender para qualquer missão de órbita LEO e GEO. Esse estudo mostra o impacto sobre a eficiência geral, no volume e na massa do subsistema de suprimento de energia devido à escolha da topologia da PCU.

Pretende-se, com a aplicação de conversores bidirecionais, demonstrar que topologia Completamente Regulada é compatível com as órbitas baixas, com a vantagem de ser mais eficiente em termos do uso do gerador solar quando comparada com a topologia Híbrida.

Para alcançar esse objetivo, optou-se por decompor o trabalho nos seguintes tópicos:

- I Apresentar uma breve revisão sobre topologias de suprimento de energia para satélites e seus componentes básicos;
- II Apresentar uma breve revisão bibliográfica do programa espacial brasileiro;
- III Identificar critérios importantes para abordagem proposta nesse trabalho, no que diz respeito à redução de massa e volume; ao aumento da eficiência e a modularidade;

- IV Apresentar uma modelagem em *Bond Graph* que permita a análise das topologias escolhidas;
- V Realizar um estudo de caso, propondo um design preliminar de PCU utilizando alguns módulos já desenvolvidos no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), visando atender à especificação de potência da Plataforma Multimissão (PMM);
- VI Validar, através de simulação, o funcionamento da topologia escolhida, regulando um barramento de potência, através do uso de um conversor DC/DC bidirecional.

1.3 Metodologia da pesquisa

O trabalho faz uso de uma revisão da literatura disponível em uma das mais importantes conferências de discussão sobre subsistemas de fornecimento de energia para satélite, a *European Space Power Conference (ESPC)*, a base de dados do *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)* e obras anteriores do próprio INPE.

A pesquisa limita-se ao estudo do impacto da PCU na massa, volume e na eficiência global do sistema espacial, entre dois tipos de topologias: Híbrida e Completamente Regulada. Para isso, são apresentados fatores que impactam diretamente nesses critérios. Como próximo passo, é feita a modificação da topologia Completamente Regulada com uso de conversores bidirecionais, culminando em duas análises: a primeira entre três topologias reguladas (Híbrida, Completamente Regulada Unidirecional e Completamente Regulada Bidirecional) e a segunda entre a Híbrida e a Completamente Regulada Bidirecional.

Por fim, são discutidos os resultados e apresentada a conclusão final em torno do que foi desenvolvido nesse trabalho.

1.4 Generalidade e utilidade

A generalidade deste trabalho advém de permitir a aplicação de uma abordagem por *Bond Graph* a vários projetos de PSS para satélites, a outros projetos da área espacial e a outras áreas que tenham interesse no uso da abordagem utilizada.

A utilidade deste trabalho advém de colaborar com um estudo dentro do escopo das atividades desenvolvidas pelo grupo de Divisão Eletrônica Aeroespacial (DEA) do INPE, podendo ser aproveitado para aplicações futuras que envolvam os assuntos aqui abordados.

1.5 Organização do trabalho

Um resumo de cada capítulo é apresentado abaixo:

- **Capítulo 2:** Introduz os conceitos fundamentais para a compreensão do trabalho, limitando-se à apresentação das topologias mais tradicionais utilizadas num projeto espacial de satélites de médio e grande porte e cujo projeto é essencialmente limitado aos sistemas que fazem utilização de painéis fotovoltaicos como fonte de energia primária. Estende-se ainda na descrição do PSS no programa espacial brasileiro e em descrever conceitos da modelagem por *Bond Graphs*;
- **Capítulo 3:** É o capítulo central desse trabalho, pois apresenta em detalhes os pontos importantes que norteiam esse estudo na escolha da topologia candidata. É apresentada a modelagem por *Bond Graphs* que permite a análise e a comparação das topologias de barramento regulado, incluindo a utilização do conversor DC/DC bidirecional. Apresenta a análise e seleção segundo um critério de eficiência bem como pelo critério massa e volume, aplicados a um estudo de caso dentro do contexto da PMM. Para tal, faz-se reuso dos módulos já desenvolvidos pelo INPE na configuração de uma PCU para as topologias candidatas.
- **Capítulo 4:** Demonstra a modelagem do conversor DC/DC bidirecional utilizado pela topologia Completamente Regulada Bidirecional;
- **Capítulo 5:** Apresenta a modelagem e simulação do sistema em malha fechada e os resultados obtidos;
- **Capítulo 6:** Apresenta a conclusão obtida do estudo e estende-se em recomendar como trabalhos futuros alguns desdobramentos possíveis.

2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, será apresentada a descrição de um Subsistema de Suprimento de Energia (PSS), seus principais elementos, as topologias usadas nesse trabalho, bem como conceitos que norteiam os próximos capítulos desse trabalho.

2.1 Subsistema de suprimento de energia - PSS

Em complemento ao que já foi apresentado na introdução, destacam-se as seguintes funções do PSS:

- Geração de energia;
- Armazenamento de energia;
- Condicionamento;
- Distribuição;
- Proteção.

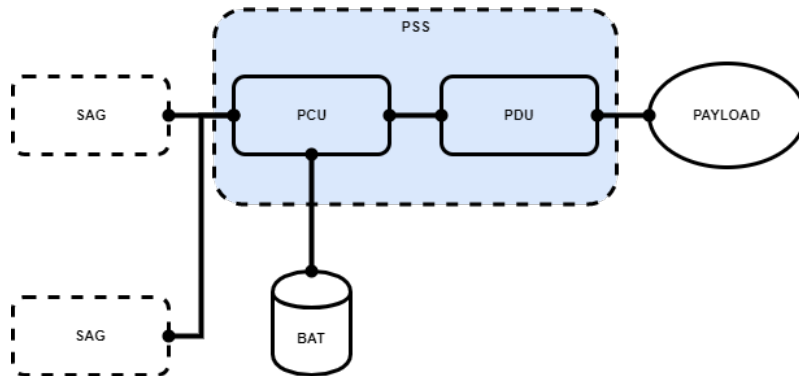
Geralmente, o PSS ([Figura 2.1](#)), é composto por ([FORTESCUE et al., 2011](#)):

- Uma fonte de energia primária;
- Uma unidade de armazenamento de energia;
- Uma unidade eletrônica para condicionamento (PCU) da energia recebida pela fonte de energia primária;
- Um sistema responsável pela distribuição e proteção (PDU) da energia para as cargas úteis e demais subsistemas.

A maioria dos satélites atuais utilizam painéis solares (SAG) como fonte primária, convertendo a energia irradiada do Sol, pelo princípio fotovoltaico, em energia elétrica. Usualmente a unidade de armazenamento são baterias (BAT) recarregáveis, responsáveis por fornecer a energia necessária aos subsistemas e à carga útil do satélite quando a fonte primária está indisponível, isto é, durante os períodos de eclipse¹. No projeto de um PSS deve-se levar em consideração uma série de fatores, de modo que o PSS desenvolvido seja capaz de fornecer a energia necessária para o satélite durante toda a vida útil ([O'SULLIVAN, 1989](#)).

¹Considerando um sistema com painéis solares.

Figura 2.1 - Arquitetura de um PSS genérico.



Fonte: Autor.

2.2 Topologias de PSS

Na literatura são encontrados diversos tipos de topologias de regulação e controle de barramento usadas por sistemas de fornecimento de energia para satélites, sendo que as diferenças podem estar associadas a inúmeros fatores, por exemplo, sua especificação quanto à órbita, características das cargas, o porte do satélite (WERTZ; LARSON, 1999), entre outros. Seus principais requisitos, regras básicas e princípios gerais são estabelecidos por padrões como o padrão da Agência Espacial Europeia (ESA) para engenharia espacial (ECSS-E-ST-20C-REV.1, 2019). Muito embora a estrutura do hardware admita grandes diferenças de um tipo de missão para outra, a configuração, ou seja, o funcionamento é, na maioria das vezes, definido em dois grupos básicos:

- **Barramento não Regulado**

- MPPT (*Maximum Peak Power Tracking*);
- Barramento de tensão não regulada (*Unregulated Power Bus Voltage*);
- Barramento de tensão regulada durante o período iluminado (*Sunlight Regulated Power Bus*).

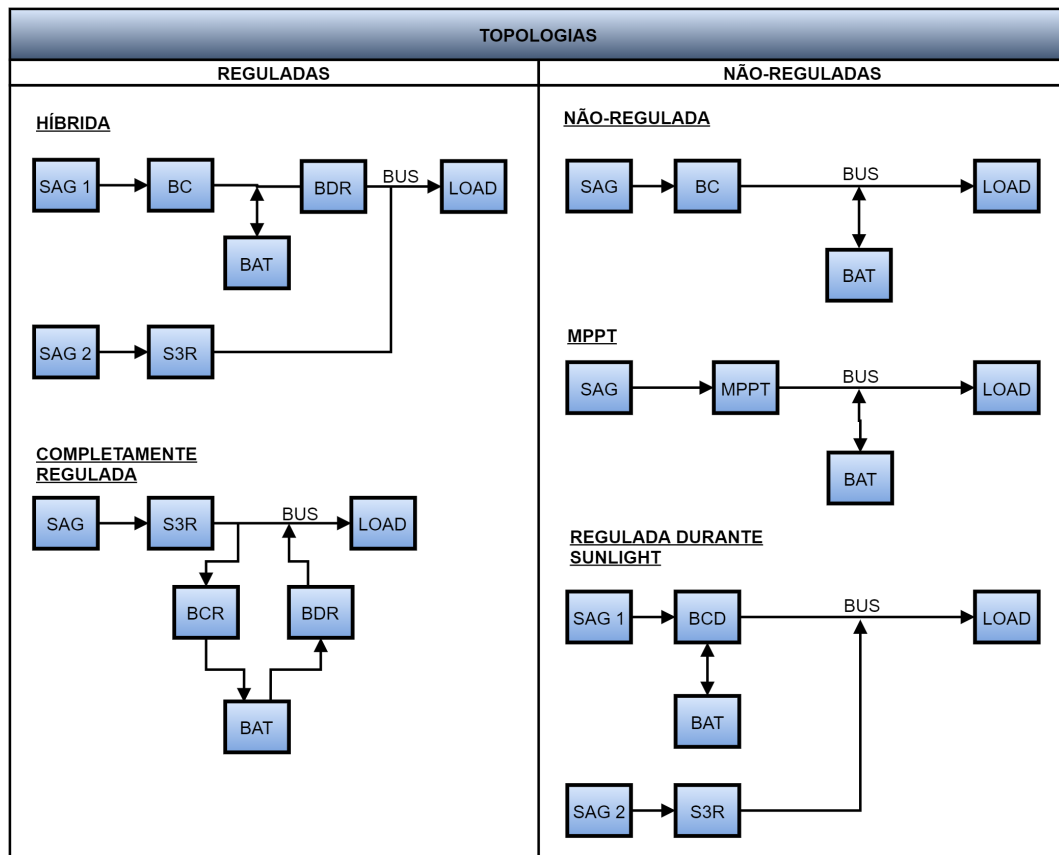
- **Barramento Regulado**

- Barramento de tensão completamente regulada (*Fully Regulated Power Bus Voltage*);

- Barramento híbrido (*Hybrid Regulated Power Bus Voltage*).

O diagrama em blocos para cada uma dessas topologias pode ser visto na [Figura 2.2](#).

Figura 2.2 - Diagrama de blocos das topologias do PSS.



Fonte: Autor.

As topologias de barramento não regulado têm como objetivo um sistema de potência simples, do ponto de vista estrutural. Sua tarefa principal é fornecer uma tensão variável dentro de uma faixa conhecida aos usuários. Essencialmente, essas topologias atribuem à carga a regulação da tensão para seu funcionamento. Esse conceito é conhecido como sistema de energia descentralizado. Existem outras variações dessas topologias que implementam uma sofisticação para que haja tensão regulada durante o *sunlight*, como é o caso da *Sunlight Regulated Power Bus* ².

²É importante dizer que a topologia *Sunlight Regulated Power Bus* também pode apresentar

Já a abordagem das topologias de barramento regulado é o oposto das não reguladas, pois a tensão do barramento permanece constante ao longo de toda a órbita. São mais complexas, porém apresentam um design que possibilita um melhor aproveitamento do painel solar.

2.3 Unidade de condicionamento de potência - PCU

Suas funções principais, além de proteção, são: controlar a energia fornecida pelo painel solar e controlar a carga e a descarga da bateria.

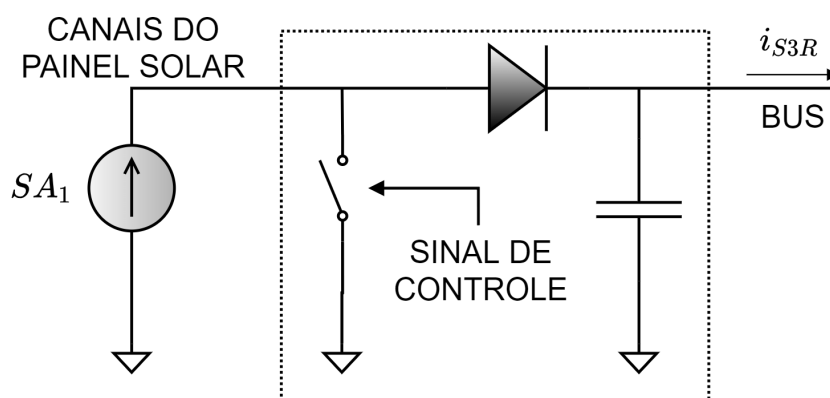
Para isso, alguns equipamentos são fundamentais: SHUNT, BCR e BDR. Eles são descritos nas seções a seguir:

2.3.1 Regulador shunt

O regulador Shunt tem a função de controlar a energia fornecida pelo painel solar, dissipando o excesso de energia ao espaço.

O módulo Shunt é dividido em vários canais, sendo cada canal responsável por uma seção correspondente do painel solar. Um dos métodos de regulação é baseado em PWM (*Pulse Width Modulation*), em que o *duty cycle* do chaveamento do canal fornece a corrente solicitada (conforme [Figura 2.3](#)).

Figura 2.3 - Diagrama de um canal Shunt.



Fonte: Autor.

uma configuração Híbrida, entretanto, a intenção da tabela é de apenas identificar, dentro das duas categorias, seus principais arranjos e não de descrever todas as eventuais possibilidades de arquiteturas.

Cada seção pode ser curto-circuitada (condição chave *on*) ou conectada diretamente ao barramento (condição chave *off*) através de um diodo. Esse método popular foi desenvolvido pela ESA e é conhecido como *Sequential Switching Shunt Regulator* (S3R) (O'SULLIVAN; WEINBERG, 1977). Como a exigência de corrente no barramento sofre constante variação devido ao regime de funcionamento das cargas, haverá sempre um conjunto de canais com suas chaves abertas e outro conjunto com suas chaves fechadas. Durante *sunlight*, para que haja um ajuste de corrente, um canal controla a corrente do painel de modo que a diferença demandada pelo barramento seja o complemento exato fornecido por esse canal. Isso é possível através de um regime de chaveamento, de modo que a corrente média seja exatamente a necessária.

2.3.2 Regulador de carga da bateria - BCR

O regulador BCR gerencia o processo de carregamento da bateria nos períodos iluminados, controlando a corrente de carga de modo a reduzi-la a zero precisamente no instante que a bateria estiver completamente carregada.

Em alguns casos, como na topologia Híbrida, não há regulação - por isso o uso do nome BC (*Battery Charger*) - e o início ou fim do processo de carga se dá apenas pelo abrir e fechar de uma chave simples.

Os BCR são essencialmente conversores DC/DC, circuitos eletrônicos que convertem um sinal DC em sua entrada, para outro sinal DC em sua saída, com amplitude diferente e com a maior eficiência elétrica possível, cuja topologia escolhida varia de acordo com a arquitetura elétrica usada para o satélite. Sua saída está conectada diretamente aos terminais da bateria, provendo corrente para sua carga, enquanto a entrada se conecta ao barramento principal, no caso da topologia Completamente Regulada.

2.3.3 Regulador de descarga da bateria - BDR

São iguais ao BCR, porém nesses equipamentos a bateria está diretamente conectada a sua entrada enquanto a saída está ligada ao barramento principal. A tensão de saída entregue por esses conversores é apropriada ao nível de tensão do barramento principal, mantendo-a sempre regulada. Sua operação de regulação da tensão de saída é possível em virtude de um controle via PWM. O controlador atua sobre o equipamento através de uma malha de controle fechada, comparando a tensão do barramento com sua referência, de modo a equalizar e manter o barramento principal nos níveis aceitáveis.

Pelo fato de estarem conectados diretamente à bateria, tais conversores são sujeitos a variações da tensão na entrada, à medida que a bateria descarrega.

A topologia escolhida, assim como nos conversores usados no BCR, varia de acordo com a arquitetura elétrica do projeto escolhida para as missões a que se destinam.

2.4 Topologias de barramento regulado

A característica principal dessas topologias é fornecer um barramento principal com tensão regulada. Isso é possível graças a malha de controle que atua sobre os três reguladores já mencionados (SHUNT, BCR e BDR), definindo assim o princípio dos domínios de operação.

No escopo de desenvolvimento desse trabalho, como mencionado na introdução, utilizam-se duas topologias do tipo barramento de tensão regulada: a topologia Completamente Regulada e a topologia Híbrida, cujos aspectos serão discutidos em detalhes nos próximos capítulos.

2.4.1 Topologia completamente regulada

A topologia Completamente Regulada apresenta as três operações de regulação, já descritas anteriormente:

- a) Shunt (S3R);
- b) BCR (Battery Charge Regulator);
- c) BDR (Battery Discharge Regulator).

Na configuração dessa topologia as fontes de energia, nesse caso, painel solar e bateria, estão isoladas eletricamente entre si. Isso é possível graças aos reguladores existentes na PCU.

Devido ao alto nível de potência transferida entre o barramento e as cargas, ou até mesmo entre o painel solar e a bateria, os reguladores utilizados são projetados com alta eficiência e, portanto, devem ser de baixa dissipação. Para contornar esse problema, o BCR e o BDR utilizam dispositivos eletrônicos, MOSFETs, por exemplo, trabalhando em chaveamento em alta frequência, acionado por um controlador PWM e são basicamente conversores DC/DC.

A capacidade de fornecer e distribuir um barramento de tensão regulada com varia-

ções mínimas, na ordem de 2% da tensão nominal (PATEL, 2005); baixa EMI/EMC (*Electromagnetic Interference/Eletromagnetic Compatibility*) são as principais características dessa topologia. Esse desempenho é atingido devido aos três *loops* de controle atuando sobre os reguladores (BCR, BDR e SHUNT) via um sistema de controle que utiliza uma única tensão de referência associada ao amplificador de erro da tensão do barramento. O sinal de controle, é enviado aos três reguladores e são ativados através de referências específicas geradas para cada uma das três funções³. Consequentemente, somente um dos reguladores estará atuando em um determinado momento como o responsável pela regulação da tensão do barramento. Como resultado, obtém-se um barramento de tensão sempre constante, independente da condição de iluminação ou sombra.

2.4.2 Topologia híbrida

É uma topologia padrão ESA (*European Space Agency*) desenvolvida para suprir as necessidades voltadas para órbita LEO. Sua topologia, embora variante da descrita anteriormente, difere-se pela substituição do módulo BCR por uma seção do painel solar e um carregador simples destinados a mesma função, tal como é adotado na topologia dos satélites da série CBERS (MAGALHÃES, 2009). Esse arranjo elétrico, onde cerca de 50% do painel solar é conectado ao barramento principal, via regulador Shunt, é conhecido como DET (*Direct Transfer Energy*) devido à alta eficiência na transferência de energia (93% para 28 VDC, (O’SULLIVAN, 1989)). Os outros 50% são conectados ao carregador da bateria. Um controlador de fim de carga (*End of Charge switch* - EoC) da bateria é responsável pelo acionamento do carregador.

Esta topologia é versátil, permitindo que cargas pulsadas ou estáticas sejam usadas, uma vez que um barramento não regulado pode ser derivado diretamente da bateria e, para as cargas mais suscetíveis às variações do nível de tensão, tem-se o barramento regulado. Outra diferença entre a topologia Híbrida e a Completamente Regulada é a inexistência de uma das malhas de controle, devido à ausência do BCR. O sinal de erro é distribuído apenas aos reguladores Shunt e BDR, de modo que, eles são ativados sequencialmente através de referências específicas geradas para cada um deles.

2.5 Conversores DC/DC bidirecionais

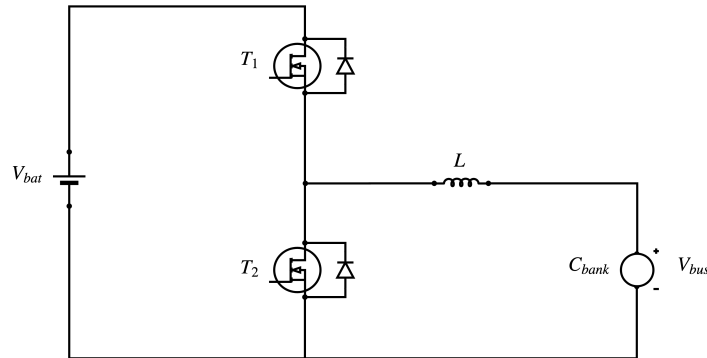
Dentro do contexto espacial, O’Sullivan (1989) apontou que o avanço tecnológico poderia possibilitar mesclar as funções BCR e BDR em uma nova configuração, oti-

³No controle moderno isso é conhecido como *three-domain controlled*.

mizando a topologia Completamente Regulada para órbita LEO, porém não apresentou nenhum desenvolvimento a respeito. Weinberg e Lopez (1998) afirmam que Mata e Rueda (1993) foi o primeiro a apresentar a possibilidade de fundir BCR e BDR no mesmo conversor bidirecional. Em seu trabalho, estenderam este estudo prévio do ponto de vista do sistema baseado em software, totalizando as massas dos componentes necessários para cada topologia. Concluíram que a topologia Completamente Regulada com BCDR era uma ótima solução, em termos de massa e volume, especialmente para a órbita LEO, onde o menor tempo de *sunlight* para recarregar a bateria exige maior potência para o conversor. Esta solução foi novamente discutida na ESPC por Pedersen (2008), mas os autores focam apenas no aspecto da solução dos conversores bidirecionais DC/DC sem uma análise do sistema com solução ótima. Em 2014, a topologia com conversores bidirecionais DC/DC aparece novamente (SCHIRONE; MACELLARI, 2014) como uma solução para um *rover* lunar com uma topologia que faz uso de quatro elementos chaveados. Em 2017, um outro estudo apresenta uma solução usando a topologia Completamente Regulada com um diagrama de blocos mostrando um equipamento BCDR (BONNET et al., 2017). No entanto, as funções BCR e BDR são separadas e não executadas pelo conversor bidirecional DC/DC, permanecendo as discussões apenas na arquitetura modular e descentralizada da PCU. No mesmo ano, uma referência ao conversor bidirecional DC/DC é mostrada (RAMACHANDRAN; NYMAND, 2017), onde os autores afirmam ter uma alta eficiência, mas em uma topologia *Full Bridge* implementada com um alto número de elementos chaveados e fora do contexto de PCU.

A tecnologia relacionada aos conversores bidirecionais DC/DC ganhou atenção e melhorias no setor da indústria automobilística e em sistemas de energia renovável, com muitos circuitos integrados sendo fabricados para aplicações específicas. Uma revisão da literatura sobre este tópico é apresentada por Tytelmaier et al. (2016), onde é possível perceber que a maneira mais simples, ou seja, com um número mínimo de comutadores (chaves) e componentes magnéticos, para implementar um conversor DC/DC bidirecional é pela configuração mostrada na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Topologia típica conversor *non-isolated half-bridge*.



Fonte: Autor.

2.6 PSS do Programa Espacial Brasileiro

No final dos anos 70, a primeira missão espacial brasileira (MECB) foi aprovada com a intenção de desenvolver quatro satélites (INPE, 2016). O programa MECB representou um grande desafio para o programa espacial brasileiro, considerando sua complexidade para a época e, acima de tudo, o domínio tecnológico incipiente para o desenvolvimento dos diversos subsistemas que compunham um satélite naquela década.

Os subsistemas de potência utilizados nesses satélites foram desenvolvidos entre 1985 e 1991 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e voou nas missões de coleta de dados (SCD-1, SCD-2A e SCD-2)(INPE, 2003). O resultado foi uma unidade de condicionamento de energia (PCU) composta por BCR, BDR e Shunt. Ainda nesse período, entre 1988 e 1992, foi desenvolvida a PCU do primeiro Satélite de Sensoriamento Remoto (SSR-1). A Tabela 2.1 mostra algumas informações relacionadas aos PSSs mencionados.

Tabela 2.1 - Informações do PSS usado nas primeiras missões espaciais brasileiras.

	Missão	
	SCD	SSR
Potência	110 W	250 W
Tipo de Barramento	Regulado	Regulado

Fonte: DEA (2016).

Com um acordo de cooperação bilateral assinado entre o Brasil e a China para o desenvolvimento de um satélite de sensoriamento remoto: o CBERS, houve um grande salto no desenvolvimento do subsistema de energia, com uma maior demanda de energia e muito mais complexo que os satélites anteriores (INPE, 2018b). Vários setores industriais nacionais estabeleceram parceria com o INPE para o desenvolvimento do subsistema, entre eles a Aeroeletrônica (responsável pela fabricação dos conversores) e a Digicon (fabricação do Shunt e BDR).

Em 2005, o projeto atingiu sua segunda geração de satélites CBERS, culminando na produção do CBERS 3&4 (INPE, 2018a). O novo subsistema de condicionamento de energia dobrou sua demanda de potência e novos processos foram introduzidos, como o uso da *Surface Mount Technology* (SMT), permitindo não apenas um ganho significativo na densidade de potência (massa e volume por Watt) em relação à geração anterior, mas também uma redução considerável no tamanho dos equipamentos (DEA, 2016).

A Tabela 2.2 compara a quantidade demandada de potência e massa do equipamento Shunt e destaca a melhoria significativa na potência específica para as duas gerações CBERS.

Tabela 2.2 - Comparação do equipamento Shunt das gerações CBERS.

	Missão	
	CBERS 1&2	CBERS 3&4
Potência	722,4 W	1344 W
Massa	13,6 kg	6,81 kg
Potência Específica	53,1 W/kg	197,4 W/kg

Fonte: DEA (2016).

2.7 Bond Graph

Essa modelagem será útil para apoiar na decisão de escolha da topologia candidata nos próximos capítulos e para o embasamento teórico. Serão apresentadas as definições discutidas por Paynter (1960), cujo destaque é a continuidade de energia dentro do sistema.

2.7.1 Visão geral

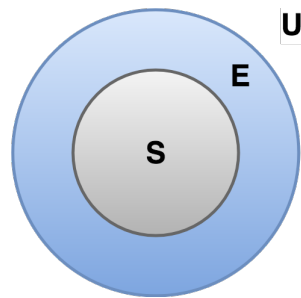
Em muitos sistemas reais há uma certa complexidade em se modelar sua dinâmica, uma vez que há o envolvimento entre diversas áreas da engenharia que o compõem (SILVA, 2005). Tendo em vista essa interação multidisciplinar na elaboração de algum sistema e sendo primordial o desenvolvimento de um projeto em tempo hábil, percebe-se a necessidade de representá-los através de modelos que abordem as características sistêmicas do objeto em estudo. Há várias metodologias para análise e simulação disponíveis, sendo adotada nesse trabalho, entre outras, a modelagem conhecida por *Bond Graph* ou Gráficos de Ligação.

A principal vantagem para esse trabalho, e que será explorada dessa abordagem, é a sua capacidade em descrever o sistema em informações de energias e de fluxos existentes entre as estruturas (subsistemas) que compõem o sistema (ARAUJO, 2009). Em outras palavras, tornar claro (através de sua representação gráfica) como os subsistemas se comunicam entre si e com o meio no qual está inserido. Desta forma, um sistema dinâmico revela em sua estrutura interna elementos básicos como:

- a) Uma fonte de energia;
- b) Um processador ou regulador do fluxo de energia;
- c) Um usuário ou carga desta energia processada.

Tal esquema, alcançado com uso do *Bond Graph*, simplifica a análise do sistema (não necessitando de uma familiaridade com diagramas eletrônicos e simbologias típicas da área) e facilita a incorporação de novos elementos na estrutura à medida que se tornam disponíveis. Para formular uma abordagem para descrever o sistema, concentra-se em suas propriedades e relações de ligação. Portanto, é útil começar com uma teoria geral do sistema e, mais tarde na Subseção 3.2.1, aprofundar-se em uma solução específica. A visão mais geral é mostrada na Figura 2.5 onde o sistema (S) interage com seu ambiente (E) sob as leis definidas pelo seu universo (U).

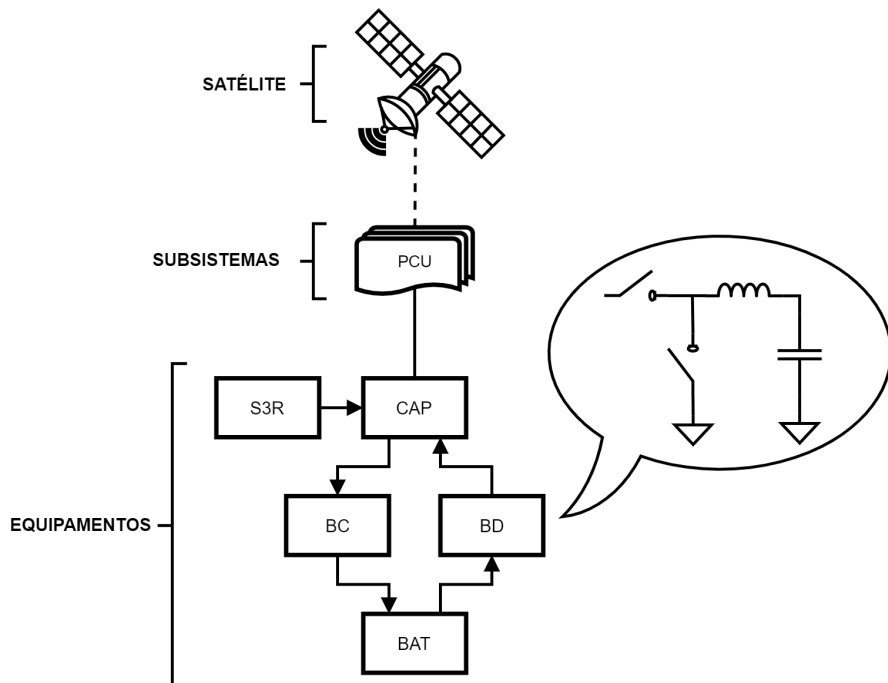
Figura 2.5 - Delimitação do Sistema/Ambiente.



Fonte: Adaptada de Paynter (1960).

Na abordagem da modelagem de sistemas por meio de *Bond Graphs*, um processo chamado reticulação é o próximo passo, do qual o sistema é separado em seus elementos essenciais (PAYNTER, 1960). Este processo racional de dotar o sistema como uma estrutura e seus níveis pode ser visualizado na Figura 2.6.

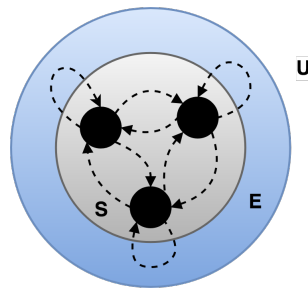
Figura 2.6 - Reticulação do sistema.



Fonte: Autor.

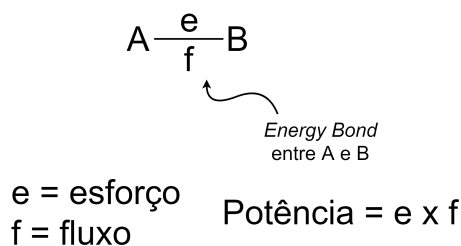
Na reticulação, nota-se que os elementos de um sistema (subsistema e equipamento) são simplesmente sistemas de ordem inferior. O sistema é na verdade uma hierarquia de subsistemas. O esboço das relações importantes entre os elementos e entre cada um dos elementos e o ambiente é o ponto de partida para compreender seu comportamento. Dessa forma, um *energy bond* é uma conexão funcional entre as estruturas dos sistemas reticulados. Essa interação é vista como uma transferência de energia entre as interfaces e é definida por um par de variáveis que medem a potência ou a taxa de fluxo de energia, tal como exemplificado na Subseção 2.7.1. Essas variáveis são generalizadas como um esforço (e) e como um fluxo (f), de modo que a $Potência = esforço \times fluxo$. As Figura 2.7 e Figura 2.8 mostram essas conexões.

Figura 2.7 - Sistema e suas ligações energéticas.



Fonte: Adaptada de Paynter (1960).

Figura 2.8 - Interação entre variáveis de ligação de energia.



Fonte: Autor.

Nessa interação, pode-se estar interessado apenas nas transferências de energia, sem descrição ou qualificação da forma da conexão funcional. Neste caso, a linha entre os

elementos A e B, como mostrado na [Figura 2.8](#), é suficiente e este processo é chamado de *energy bonds*. A [Tabela 2.3](#) lista as variáveis de esforço e o fluxo correspondentes a um sistema elétrico.

Tabela 2.3 - Variáveis generalizadas equivalentes para um sistema elétrico.

Variável generalizada	Variável elétrica correspondente	Unidades no SI
esforço, e	Voltagem (e)	Nm/C=V
fluxo, f	Corrente (i)	C/s=A
Potência, P	$e(t)i(t)$	Nm/s=VA=W

Fonte: Adaptada de [Borutzky \(2011\)](#).

Vale ressaltar que ao se aplicar uma potência no sistema, há o surgimento de duas situações possíveis: essa potência é traduzida num fluxo e como reação num esforço; ou vice-versa. Portanto, se uma direção de causalidade dessas interações é determinada, tem-se um fluxo de sinal bilateral, isto é, ocorre um fluxo/esforço de A para B em virtude de um esforço/fluxo fornecido por A.

Essa noção de causalidade é muito utilizada em *Bond Graph* para inspeção dos elementos armazenadores de energia do sistema, por exemplo.

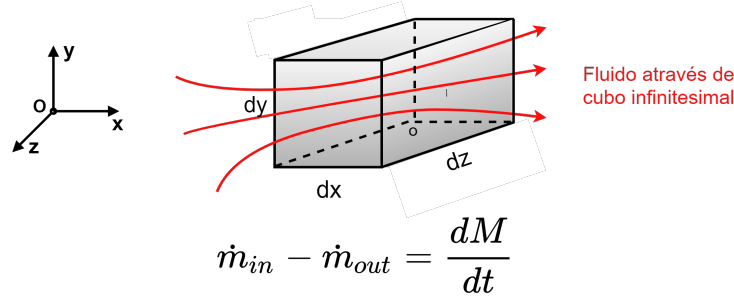
É importante frisar que nesse trabalho, interessa-se apenas nas ligações de energia do sistema reticulado proposto e não pela maneira de propagação da causalidade.

2.7.2 Continuidade de energia

A teoria sobre continuidade de energia começou com a noção de conservação de massa como uma equação de campo que afirma que o fluxo de massa que entra em uma superfície fechada menos o fluxo de massa que sai dessa superfície fechada é igual à mudança de massa dentro da superfície fechada. Isso pode ser descrito matematicamente na [Figura 2.9](#), sendo \dot{m}_{in} a taxa de variação de massa da entrada, \dot{m}_{out} a taxa de variação de massa da saída e $\frac{dM}{dt}$ a taxa de variação da massa adicionada/perdida na superfície.

A afirmação do princípio da conservação de massa como uma equação de campo, segundo [Paynter \(1960\)](#), é:

Figura 2.9 - Ilustração da equação de conservação de massa.



Fonte: Autor.

$$\nabla(\rho \vec{v}) + \partial \rho / \partial t = 0 \quad (2.1)$$

O primeiro termo da [Equação 2.1](#) mede a transferência convectiva de densidades de massa (ρ) através de um ponto no campo (\vec{v}) enquanto o segundo termo é a taxa de variação da densidade local. O lado direito igual a zero significa que não há fonte nem perda de matéria no campo. Mas geralmente, o lado direito pode incluir um termo σ tal que, se positivo, existe uma fonte de massa, se negativo, há perda de massa.

$$\nabla(\rho \vec{v}) + \partial \rho / \partial t = \sigma \quad (2.2)$$

[Paynter \(1960\)](#) acrescenta, que ao invés de pensar apenas em termos de densidade de massa (ρ), esta noção se estende também à continuidade de todas e quaisquer densidades específicas (ϵ) no sistema. Por exemplo, pode-se pensar em densidade de energia. Portanto, a equação generalizada da continuidade é:

$$\nabla(\epsilon \vec{v}) + \partial \epsilon / \partial t = \sigma \quad (2.3)$$

Onde $\epsilon \vec{v}$ é o transporte convectivo de ϵ e \vec{v} é a velocidade de transporte apropriada. Às vezes, para evitar a medição de \vec{v} , é conveniente definir o vetor de fluxo (\vec{F}):

$$\vec{F} = \epsilon \vec{v} \quad (2.4)$$

Assim, pode-se escrever:

$$\nabla(\vec{F}) + \partial\epsilon/\partial t = \sigma \quad (2.5)$$

A generalização vai além e [Paynter \(1960\)](#) declara a equação de continuidade de energia para um campo, baseado no Vetor de Poynting P .

$$-\nabla(\vec{P}) = \partial\epsilon/\partial t + p_d \quad (2.6)$$

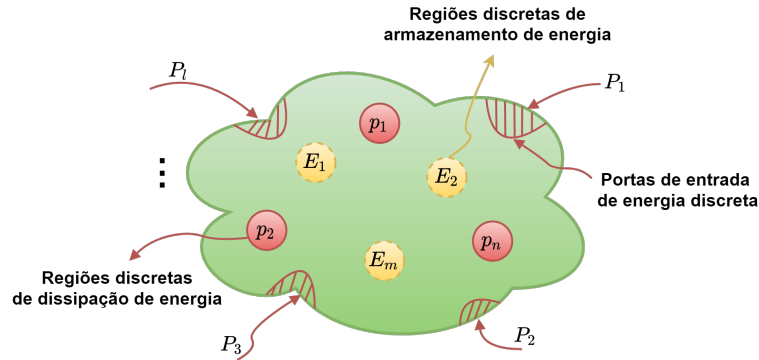
onde \vec{P} é o Vetor de Poynting generalizado, ϵ é a densidade de energia local e p_d é a taxa de perda ou dissipação de energia. Assim, enxerga-se o universo (U) como um campo no qual existe o sistema (S), realizando trocas de energia com o ambiente (E) de acordo com a [Equação 2.6](#).

A reticulação da equação de energia permitirá a análise do sistema energético desde que se assuma: a) a interface S-E é permeável à passagem de energia em áreas restritas chamadas *ports*; b) que o armazenamento de energia do sistema é agrupado em regiões discretas; c) que a propriedade de dissipação do sistema também está confinada a regiões discretas, como mostrado na [Figura 2.10](#).

[Paynter \(1960\)](#) segue utilizando o teorema da divergência à equação de continuidade ([Equação 2.6](#)), convertendo-a em uma forma passível de reticulação. Onde P_i representa a energia que chega ao sistema, E_j é a energia instantânea armazenada em cada região e $(p_d)_k$ é a energia dissipada pelo sistema.

$$-\sum_{i=1}^l P_i = \sum_{j=1}^m \frac{dE_j}{dt} + \sum_{k=1}^n (p_d)_k \quad (2.7)$$

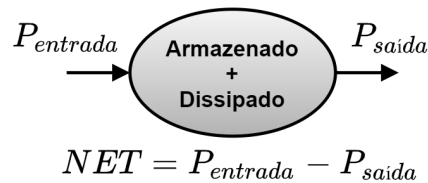
Figura 2.10 - Armazenamento e dissipação de energia do sistema.



Fonte: Adaptada de Paynter (1960).

Este é o objetivo neste trabalho. O significado físico da Equação 2.7 é o seguinte, levando em conta a Figura 2.11. Um fluxo de energia em um sistema é armazenado ou dissipado. O lado esquerdo da Equação 2.7 é o *NET* de potência, ou seja, a potência total de entrada menos a potência total de saída. O primeiro termo do lado direito representa a energia armazenada e o segundo termo, a energia dissipada.

Figura 2.11 - Continuidade de energia do sistema.



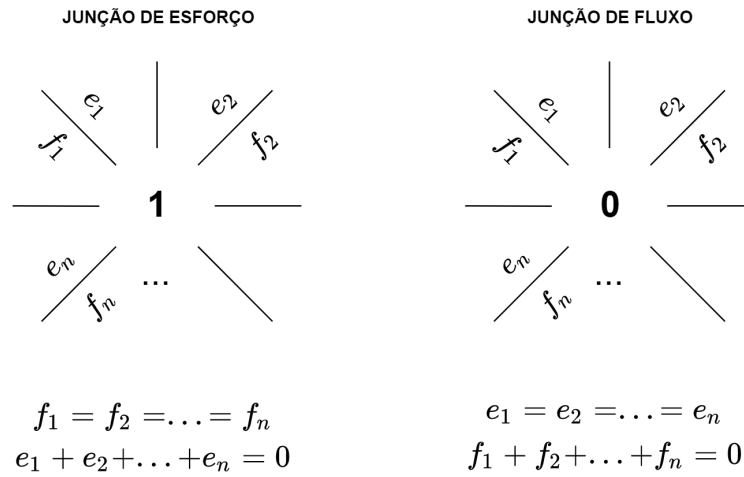
Fonte: Autor.

2.7.3 Tipos de junções

Um conceito importante e que será aplicado na Subsubseção 3.2.1.1 é o conceito de junções ideais. Esses elementos representam o tipo de conexão existente entre os elementos do sistema. São duas (PAYNTER, 1960): a junção de esforço, representada pelo número um, cuja interpretação é a conexão série; e a junção de fluxo, representada pelo número zero, representa a conexão paralelo, conforme descrito na

Figura 2.12. A junção de esforço também é chamada de fluxo comum e a junção fluxo de esforço comum.

Figura 2.12 - Tipos de junções ideais.



Fonte: Autor.

Por serem ideais não há armazenamento ou dissipação, portanto, o *NET* de potência é zero. Isso pode ser expresso pela seguinte equação:

$$e_1 f_1 + e_2 f_2 + \dots + e_n f_n = 0 \quad (2.8)$$

As junções mais simples que satisfazem esta equação são aquelas que têm ou todos os f 's iguais ou todos os e iguais.

3 ANÁLISE E SELEÇÃO DA TOPOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os critérios pelos quais serão avaliadas as topologias candidatas, cuja seleção da mais adequada será discutida em termos de modelagem por *Bond graph* e um estudo de caso baseado nos requisitos da Plataforma Multimissão (PMM).

3.1 Dilema da escolha

O dilema da escolha da topologia é sempre um problema cuja resposta é o projeto ideal, em termos de orçamento de massa, desempenho elétrico, modularidade e custo, que atende aos requisitos da missão. Para uma visão geral dos muitos estudos que buscam uma resposta para tal problema, revisam-se os principais pontos sobre o assunto, resumidos em uma dissertação anterior (FREIRE, 2009). Geralmente, não existe uma solução exclusiva devido à variedade de características dos componentes do sistema e aos diferentes requisitos da missão. Além disso, uma solução ideal hoje pode não ser no futuro, caso o avanço tecnológico desempenhe um papel significativo na atualização do sistema.

Então, como alguém pode responder a esse problema?

Ao revisar a literatura, chega-se à conclusão de que as ferramentas de software têm sido uma maneira de enfrentar o problema. No entanto, nem sempre elas buscam uma topologia ideal. Em muitos casos, na literatura revisada, as ferramentas de software apresentam uma aproximação para a verificação do projeto de alguma missão ou topologia específica. O artigo de Capel et al. (1982) descreve uma abordagem para modelar muitos componentes de sistema, como painéis solares, baterias e unidades de condicionamento de energia, aplicados à missão do ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite*), cuja topologia pertencia ao tipo de barramento não regulado. Na mesma direção, Lee et al. (1988) descreveram outra abordagem de componentes do sistema para simulação e verificação de projeto para uma missão específica por meio de um software chamado *EASY5*.

A seleção da topologia pôde ser encontrada com uso do software *PowerCap*, onde um *trade off* envolvendo três topologias (as reguladas, não reguladas e Híbridas) foi feito para determinar o sistema de suprimento de energia para a constelação de satélites *Skybridge* (CAPEL; DEFOUG, 1999). Além disso, com o mesmo software, Zimmermann et al. (2008) analisaram a topologia regulada e não regulada para a missão do SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

Embora a utilização de softwares tenha sido amplamente empregada e tenha grande importância nesses estudos citados anteriormente, um ponto que merece a devida atenção são os critérios ideais traçados para o projeto.

A solução ideal requer critérios a serem avaliados. Superdimensionamento de fontes de energia, redundâncias em excesso e elevado custo do sistema são penalidades que o projeto do sistema não pode permitir. Não importa quantos tipos de ferramentas de software e sua modelagem, os aspectos de grande importância que devem ser levados em conta ao definirem os critérios devem ser entendidos.

No escopo desse trabalho os principais objetivos são a diminuição de massa e o aumento da eficiência do sistema. O entendimento correto de alguns dos principais fatores que sustentam a modificação do PSS proposta por esse trabalho será brevemente¹ resumido nas próximas seções.

3.1.1 Influência do tipo de barramento.

A tensão do barramento a ser distribuída para as diversas cargas é realizada por meio de conversores DC/DC. A influência da tensão do barramento na massa dos conversores DC/DC foi detalhadamente estudada por [Capel e O'Sullivan \(1985\)](#). Nessa pesquisa são desconstruídos fatos de aparentes benefícios com relação as topologias de barramento não regulado, como seu baixo custo, redução de massa e simplicidade.

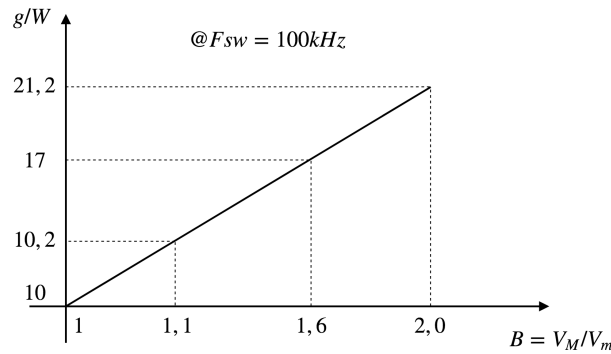
Uma das análises utilizadas para sustentar tais resultados foi o efeito no aumento da massa dos conversores DC/DC quando a tensão de entrada foi submetida a grandes variações. Observou-se também que a eficiência dos conversores foi maior quando eles foram submetidos a uma tensão de entrada fixa. O efeito na massa foi quantificado e a influência na tensão de entrada pode ser vista na [Figura 3.1](#).

O eixo x é a relação entre a tensão de entrada máxima V_M e a tensão de entrada mínima V_m , enquanto o eixo y é o impacto na massa dos conversores DC/DC em gramas por Watt. Observe que no ponto B=2, ou seja, onde a razão da tensão máxima pela mínima na entrada do conversor DC/DC é o dobro, há um acréscimo de 11,2 g para cada Watt processado em relação a um barramento de tensão fixa (B=1).

Tendo isso em vista, a suposta simplificação das topologias de barramento não re-

¹Uma vez que os detalhes e vantagens dos barramentos regulados já foram referenciados e explicados suscintamente por [Freire \(2009\)](#).

Figura 3.1 - Impacto na massa dos conversores DC/DC devido à variação da tensão de entrada.



Fonte: Adaptada de Capel e O'Sullivan (1985).

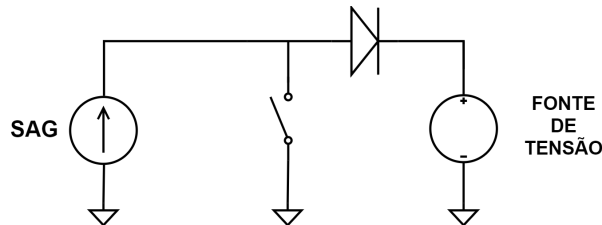
gulado é sobrepujada pelo aumento da massa e uma menor eficiência de conversores DC/DC quando comparadas às topologias reguladas.

3.1.2 Uso eficiente de painéis solares

Outro ponto de amparo à escolha das topologias utilizadas nesse trabalho, é a análise no que diz respeito ao aproveitamento mais eficiente no uso do painel solar.

Sempre que um painel solar estiver diretamente conectado a uma fonte de tensão, seu ponto de operação é definido pela voltagem dessa fonte. Em outras palavras, o ponto de operação desse painel é definido pela voltagem atual da fonte de tensão, no caso, a bateria. Essa conexão direta, mostrada na Figura 3.2, é a mesma dos blocos BC e S3R mostrado na Figura 2.2.

Figura 3.2 - Conexão SAG/Fonte de energia.



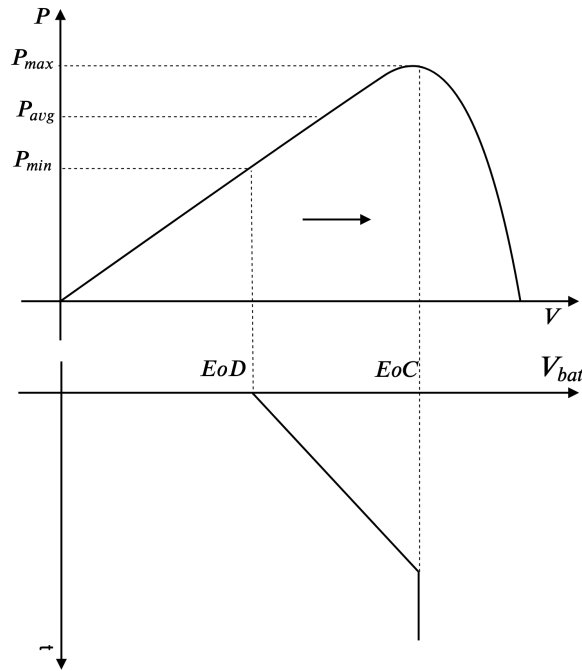
Fonte: Autor.

Esse fenômeno, conhecido como *lock-up*, por estar relacionado à conexão direta entre a bateria e o painel solar, é característico de topologias de barramento não regulado, embora esteja presente também na topologia de barramento regulado Híbrida.

A dinâmica da interação entre SAG e bateria pode ser melhor entendida na [Figura 3.3](#):

No instante em que o satélite está terminando seu período de eclipse, nota-se que a tensão da bateria se encontra em seu ponto de fim de descarga (*End of Discharge* - EoD). Nesse momento o satélite começa a ser iluminado e inicia o processo da recarga da bateria. Voltando novamente à [Figura 3.3](#), percebe-se que o ponto de operação desse painel solar - quando a tensão da bateria é menor - se encontra em P_{min} , bem abaixo do ponto de máxima potência P_{max} . Caso o painel solar não esteja sobredimensionado² ou haja a operação de alguma carga de alto consumo de corrente, o PSS continuará descarregando a bateria (balanço de potência negativo), quando deveria carregá-la.

Figura 3.3 - Potência SAG (superior) x Tensão da Bateria (inferior).



Fonte: Autor.

²Que se traduz não só num aumento de massa, como também em custos: mais células, mais estrutura, entre outros. Cujo intuito é deslocar o ponto de trabalho do Painel Solar para próximo de P_{max} .

É válido dizer que o envelhecimento do painel solar desempenha um papel importante no possível surgimento desse fenômeno, já que um sistema antes livre de seu aparecimento, apresenta fadiga e degradação oriundos das mais diversas fontes, podendo se tornar suscetível ao *lock-up*.

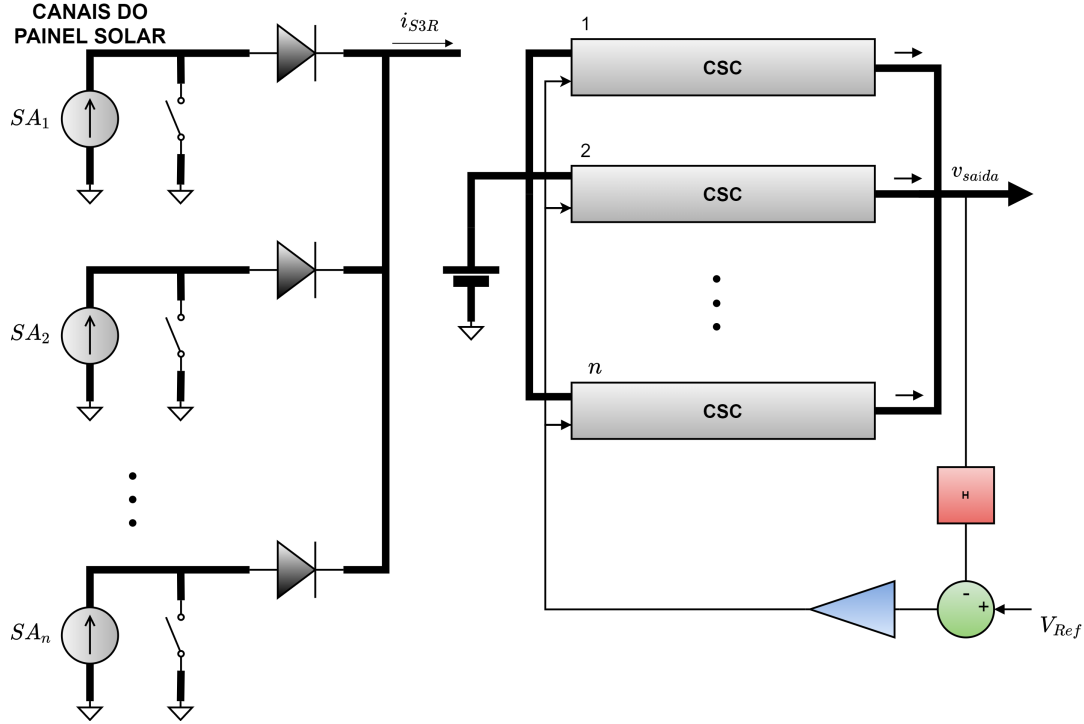
3.1.3 Modularidade

Outro conceito importante para esse trabalho é a modularidade. Nos anos 70, muitos avanços no controle de fontes de alimentação chaveadas ocorreram. Uma nova técnica de controle, desenvolvida pela *Bell Laboratories* e mais tarde popularizada como *Peak Current Mode*, provou trazer novos benefícios. Ao incorporar um *loop* de corrente interno no *loop* de tensão já existente, foi possível transformar o conversor DC/DC em uma fonte de corrente (*current source converter (CSC)*) controlada por tensão (DEISCH,). Dentre as diversas melhorias, destaca-se o paralelismo dos conversores, até então dificultado por problemas de instabilidade e compartilhamento de carga desigual quando mais de um conversor tentava controlar a tensão de saída. Com isso, a incapacidade de equalização de corrente foi resolvida pela nova técnica. O método *Peak Current Mode* foi posteriormente melhorado com o controle da corrente média em vez da corrente de pico, sendo popularizado como *Average Current Mode Control* (DIXON, 1990).

Outro método muito popularizado de paralelismo, é o uso do S3R (*Sequential Switching Shunt Regulators*) (O'SULLIVAN; WEINBERG, 1977). Essa abordagem modular foi adotada para dividir a corrente total do painel solar para quantos canais forem necessários pelo projeto. Essas técnicas de modularização são o núcleo central do sistema proposto neste trabalho. A Figura 3.4 mostra uma visão esquemática deles.

A modularidade também é um ponto-chave na reutilização do mesmo projeto de módulo, melhorando significativamente o custo e os cronogramas de fabricação.

Figura 3.4 - Técnicas de modularização: S3R (esquerda) and *Average Current Mode* (direita).



Fonte: Autor.

3.2 Seleção das topologias reguladas

Somando todos os conceitos apresentados e discutidos anteriormente na [Seção 3.1](#) torna-se evidente alguns pontos fundamentais que norteiam esse estudo. Diferente das topologias reguladas, as topologias não reguladas apresentam uma cablagem mais densa devido às variações das correntes, conversores DC/DC maiores e menos eficientes e painel solar sobredimensionado (efeito *Lock Up*, descrito [Subseção 3.1.2](#)).

É interessante lembrar, que um dos principais estudos da área ([O'SULLIVAN, 1989](#)) afirma que a topologia Híbrida é mais adequada para a órbita LEO, enquanto a topologia Completamente Regulada é indicada para as órbitas GEO, ambas de barramento regulado.

Sendo assim o trabalho segue considerando para análise apenas as topologias reguladas e apresenta a modelagem do sistema nas seções a seguir.

3.2.1 Seleção das topologias utilizando a modelagem em Bond Graph: critério da eficiência

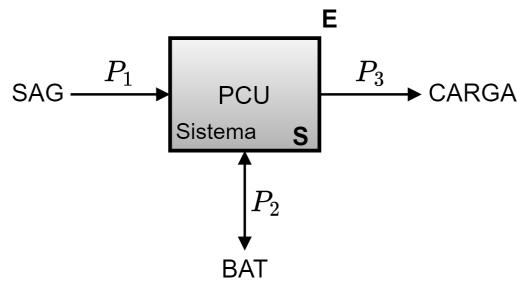
É importante frisar que o uso do termo ligação de energia é entendido como a conexão física entre os elementos do sistema, cujos fluxos energéticos são considerados sem se importar com a relação de causalidade, o que segundo [Paynter \(1960\)](#) se define como *energy bonds*.

3.2.1.1 Primeira análise

O condicionamento de energia pode ser realizado por três topologias de barramento regulado: Híbrida e Completamente Regulada já apresentadas em forma de diagrama de blocos na [Seção 2.2](#), onde a topologia Completamente Regulada agora será dividida em duas subcategorias, isto é, Unidirecional e Bidirecional, sendo a diferença entre elas a existência de um conversor DC/DC bidirecional para processamento de energia da bateria.

A reticulação da PCU identificada como sistema (S) e seu ambiente (E) é apresentada na [Figura 3.5](#).

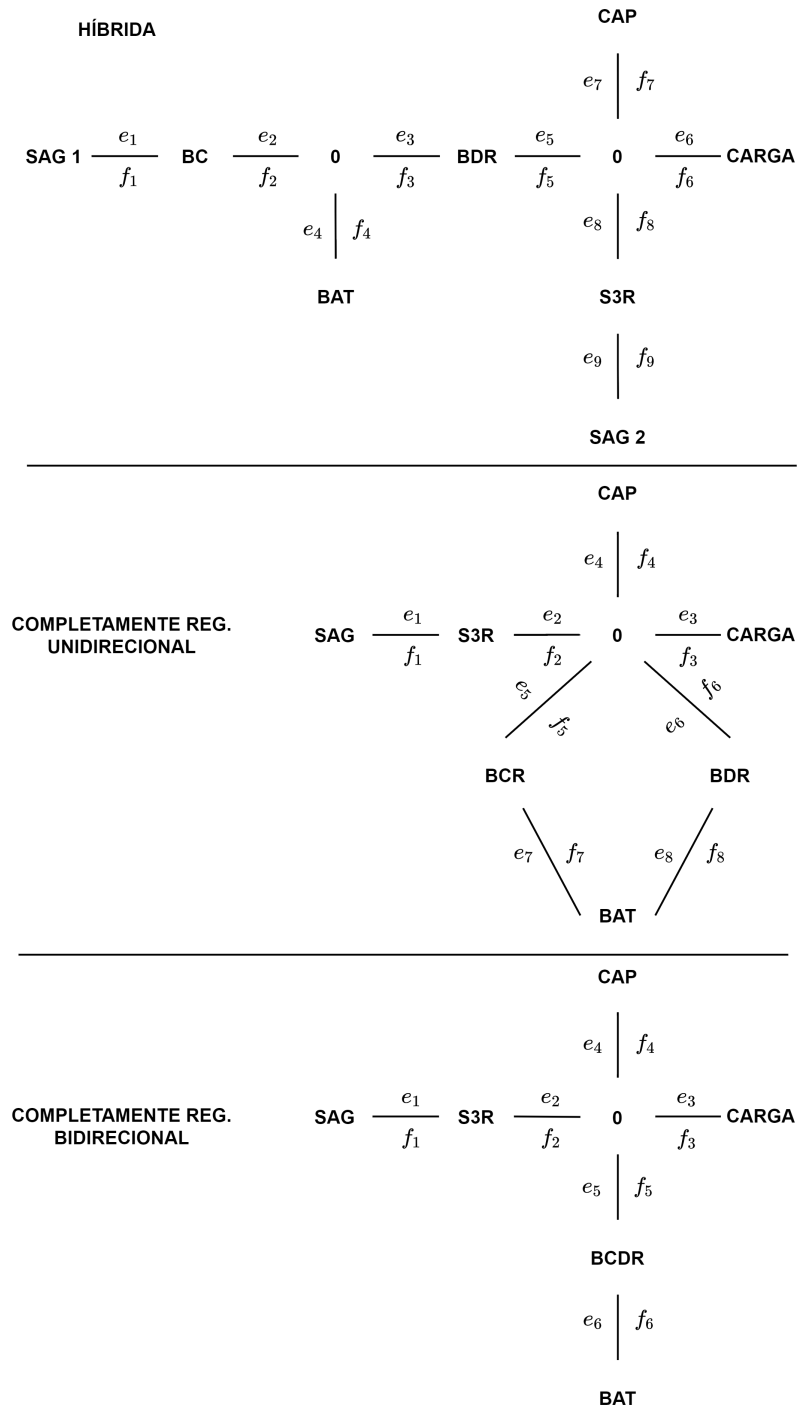
Figura 3.5 - Definição Sistema (S) e Meio Ambiente (E).



Fonte: Autor.

Tendo categorizado as topologias escolhidas, elas são agora vistas na forma de *Bond Graphs*, cujos diagramas são mostrados na [Figura 3.6](#).

Figura 3.6 - Diagramas em *Bond Graph* das topologias candidatas.



Fonte: Autor.

Segue-se a análise, utilizando a modelagem para verificar a capacidade de processamento de energia para cada topologia. Por uma questão de simplicidade, presume-se inicialmente que não há dissipação de energia no fluxo entre os elementos. Isso será feito a seguir. Para esta capacidade de processamento de energia, será verificado o comportamento de cada topologia para cada kW exigido pela carga. Portanto, prosseguindo com esta suposição tem-se:

Para topologia Híbrida, durante o *sunlight*, há um fluxo de 1 kW, fornecido por SAG 2, passando pelo S3R para fornecer energia à carga. Há também 1 kW, fornecido por SAG 1, passando pelo BC para recarregar as baterias que foram descarregadas pelo BDR, que, por sua vez, processou 1 kW durante o eclipse.

Para topologia Completamente Regulada Unidirecional, o S3R deve processar 2 kW de potência fornecido pelo SAG, sendo 1 kW direcionado para a carga e outro 1 kW entregue ao BCR para recarregar as baterias que foram descarregadas pelo BDR que, durante o eclipse, processou outros 1 kW de potência para fornecer à carga.

Quando a topologia Completamente Regulada Bidirecional se funde em um único equipamento, unindo a função BDR e a BCR, a potência que foi dividida entre os dois agora está localizada em um único módulo, ou seja, o S3R processa 2 kW e o módulo BCDR 1 kW.

A análise apresenta um resultado importante derivado de tal modelagem, a capacidade de processamento de energia para cada topologia. A conclusão que se chega pode ser resumida como: para cada kW exigido pela carga,

- a topologia Híbrida possui 3kW de processamento de energia, a nível de uso de equipamento;
- a topologia Completamente Regulada Unidirecional possui 4kW de processamento de energia, a nível de uso de equipamento;
- a topologia Completamente Regulada Bidirecional possui 3kW de processamento de energia.

O resultado está resumido na [Tabela 3.1](#).

Tabela 3.1 - Comparação do processamento de energia entre as topologias.

	Topologia					
	Híbrida		Compl. Reg. Unidirecional		Compl. Reg. Bidirecional	
Equipamento	<i>SUNLIGHT</i>	<i>ECLIPSE</i>	<i>SUNLIGHT</i>	<i>ECLIPSE</i>	<i>SUNLIGHT</i>	<i>ECLIPSE</i>
S3R	1 kW	-	2 kW	-	2 kW	-
BC/BCR	1 kW	-	1 kW	-	-	-
BDR	-	1 kW	-	1 kW	-	-
BCDR	-	-	-	-	1 kW	
Total de Potência Processada	3 kW		4 kW		3 kW	

Fonte: Autor.

Na topologia Híbrida o BC, por estar conectado diretamente ao SAG, pode ser implementado através de uma chave *on/off* simples (como descrito na [Subseção 2.3.2](#)), enquanto a função BCR na topologia Completamente Regulada deve ser implementada por um conversor DC/DC mais complexo, com maior números de componentes eletrônicos.

Se comparada com a topologia Completamente Regulada Unidirecional, a topologia Completamente Regulada Bidirecional implementa em um único módulo (mesmo *frame* mecânico) ambas as funções, BCR e BDR. Portanto, do ponto de vista da complexidade, que implica uma penalidade na massa e volume, a topologia Híbrida e a Completamente Regulada Bidirecional são preferenciais em relação à topologia Completamente Regulada Unidirecional. Quanto mais equipamentos de processamento de energia forem necessários, maior será a massa e o volume dos módulos a serem fabricados para a PCU.

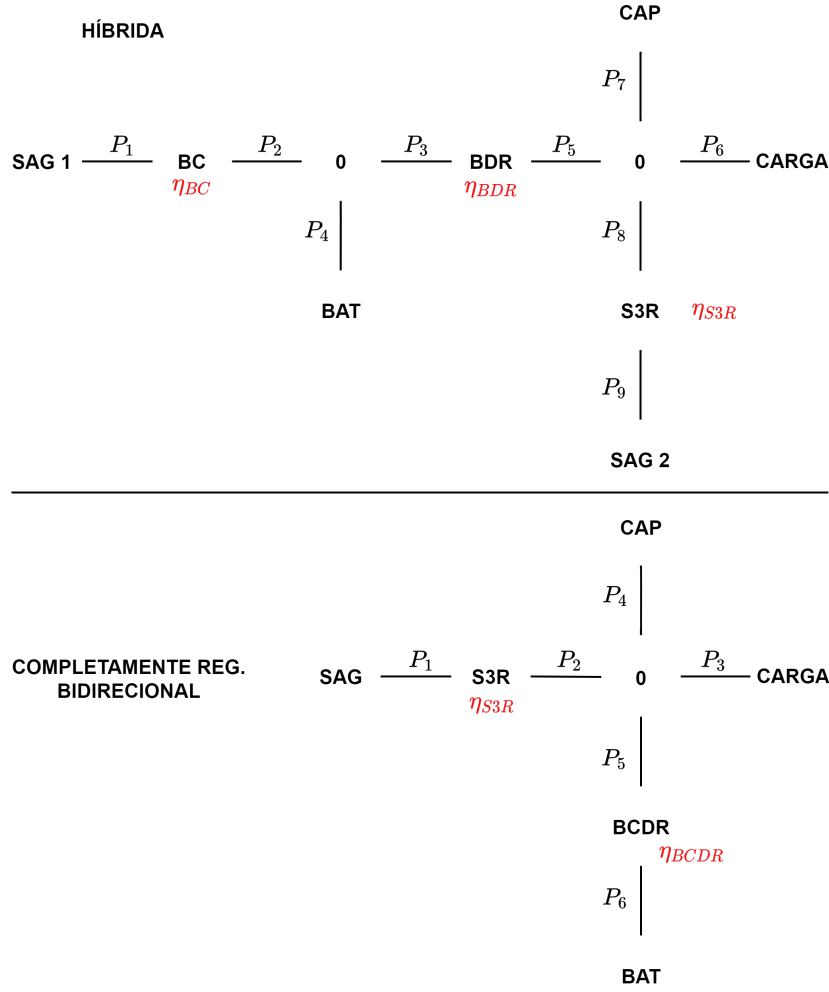
A primeira conclusão para essa primeira análise é que há um empate entre duas topologias relativas à massa devido ao equipamento de processamento de energia.

3.2.1.2 Segunda análise

Como o objetivo desse trabalho é propor uma topologia para a órbita LEO, é interessante lembrar que nela o período iluminado é curto, o que implica em um equipamento de alta potência, capaz de fornecer uma carga rápida da bateria.

Agora, considera-se a dissipação de energia entre os elementos, com isso, prossegue-se a análise entre as topologias restantes do ponto de vista da eficiência, tal como mostrado na [Figura 3.7](#).

Figura 3.7 - *Bond Graph* das topologias candidatas considerando a eficiência.



Fonte: Autor.

A continuidade de energia descrita pela [Equação 2.7](#) pode ser usada para cada elemento da [Figura 3.7](#). Ao processar todo esse fluxo de energia em todo o sistema, pode-se estimar a eficiência total do sistema como um todo. É importante enfatizar aqui que o sistema descrito está em regime estacionário, sem que ocorram transitórios.

Agora, pelo motivo já explicado na [Subseção 3.1.2](#), toda vez que uma parte do SAG é conectada a uma bateria, há uma penalidade de sobredimensionamento do painel solar devido à baixa voltagem da bateria no final do eclipse e início do *sunlight*. A potência P_1 necessária na junção de ligação SAG 1-BC na topologia Híbrida é

a potência média (P_{av}) das potências mínima (P_{min}) e máxima (P_{max}) mostrada na [Figura 3.3](#). Portanto, a potência máxima instalada do SAG é a potência média dividida por um fator ξ , definido pela razão P_{avg}/P_{max} . A eficiência do sistema considerada agora é a potência total do SAG ($P_{SAG\ TOTAL}$) necessária para cada quilowatt de carga útil. A [Tabela 3.2](#)³ mostra o resultado da análise. Para determinar a potência total instalada do painel solar corretamente, levar-se em conta a eficiência de cada equipamento, conforme indicado na [Figura 3.7](#).

Para a topologia Híbrida, há um fluxo de energia entre P_6 até P_1 e P_9 , definido da seguinte forma: P_6 (que corresponde a cada quilowatt de carga) é igual a P_8 menos P_7 (tipo de junção 0) durante o *sunlight*, supondo que S3R tenha energia suficiente para fornecer a carga sem a necessidade de usar a bateria para complementar, portanto P_5 é igual a zero. P_8 é refletido em P_9 através da eficiência de S3R, ou seja, $P_9 = P_8/\eta_{S3R}$. Enquanto isso, o SAG 1 está recarregando a bateria. Portanto, P_4 é igual a P_2 (tipo de junção 0) que, por sua vez, é refletido em P_1 pela eficiência do BC ($P_1 = P_4/\eta_{BC}$). Durante o eclipse, há um fluxo de energia da bateria para o barramento via BDR. P_5 é refletido em P_3 por meio da eficiência de BDR.

Na topologia Completamente Regulada Bidirecional durante o *sunlight* há a alimentação para a carga e recarga da bateria feita pelo S3R, portanto P_3 é igual a P_2 menos ($P_4 + P_5$), considerando que o S3R é suficiente para sustentar ambas as demandas simultaneamente. P_2 é refletido em P_1 , considerando a eficiência de S3R. Durante o eclipse, a bateria mantém o P_3 via BCDR. P_5 é refletido em P_6 pela eficiência do BCDR. Na [Figura 3.7](#) conclui-se que a potência total do SAG instalado para a topologia Híbrida é a soma das potências P_9 mais P_1/ξ , enquanto que para topologia Completamente Regulada Bidirecional é P_1 . A planilha na [Tabela 3.2](#) mostra o resultado da Completamente Regulada Bidirecional tendo eficiência maior que a Híbrida.

O parâmetro fator de recarga é característico da bateria utilizada e tem seu valor definido pelo fabricante. Quanto maior o painel solar, maior o seu custo. Portanto, alcança-se o objetivo de demonstrar, por meio de uma abordagem de *Bond Graph*, que a Completamente Regulada Bidirecional é compatível para a órbita LEO, uma vez que ela apresenta a menor necessidade de potência a ser processada e o menor painel para cada kilowatt de carga.

³Mais detalhes sobre a eficiência considerada η para os equipamentos são apresentados no [Apêndice A](#).

Tabela 3.2 - Comparação de eficiência do sistema entre Híbrida e Completamente Regulada Bidirecional.

Dados			Híbrida		Compl. Reg. Bidirecional	
P_{CARGA}	1000,0 W		SUNLIGHT	ECLIPSE	SUNLIGHT	ECLIPSE
η_{BC}	0,98	P1	590,8 W		1642,3 W	
η_{BDR}	0,95	P2	578,9 W		1609,4 W	
η_{S3R}	0,98	P3		1052,6 W	1000,0 W	1000,0 W
η_{BCDR}	0,95	P4	578,9 W	1052,6 W		
ξ	0,81	P5		1000,0 W	609,4 W	1000,0 W
Fator de Recarga	1,1	P6	1000,0 W		578,9 W	1052,6 W
$t_{ECLIPSE}$	30 min	P8	1000,0 W			
$t_{SUNLIGHT}$	60 min	P9	1020,4 W			
$P_{SAG\ TOTAL}$			1749,74 W		1642,26 W	
η			57,15%		60,89%	
Energia drenada da bateria durante eclipse			526,32 Wh		526,32 Wh	

Fonte: Autor.

3.2.1.3 Análise complementar: influência dos equipamentos BDR e BCDR na eficiência do sistema em relação aos parâmetros ξ e fator de recarga das baterias.

Os equipamentos BDR e BCDR são os mais significativos quanto ao aumento da eficiência do sistema na topologia Híbrida e na Completamente Regulada Bidirecional, respectivamente. Como o objeto de estudo desse trabalho é demonstrar a influência de tais equipamentos sobre a eficiência total do sistema é pertinente considerar a variação de dois parâmetros importantes, o ξ e do fator de recarga da bateria.

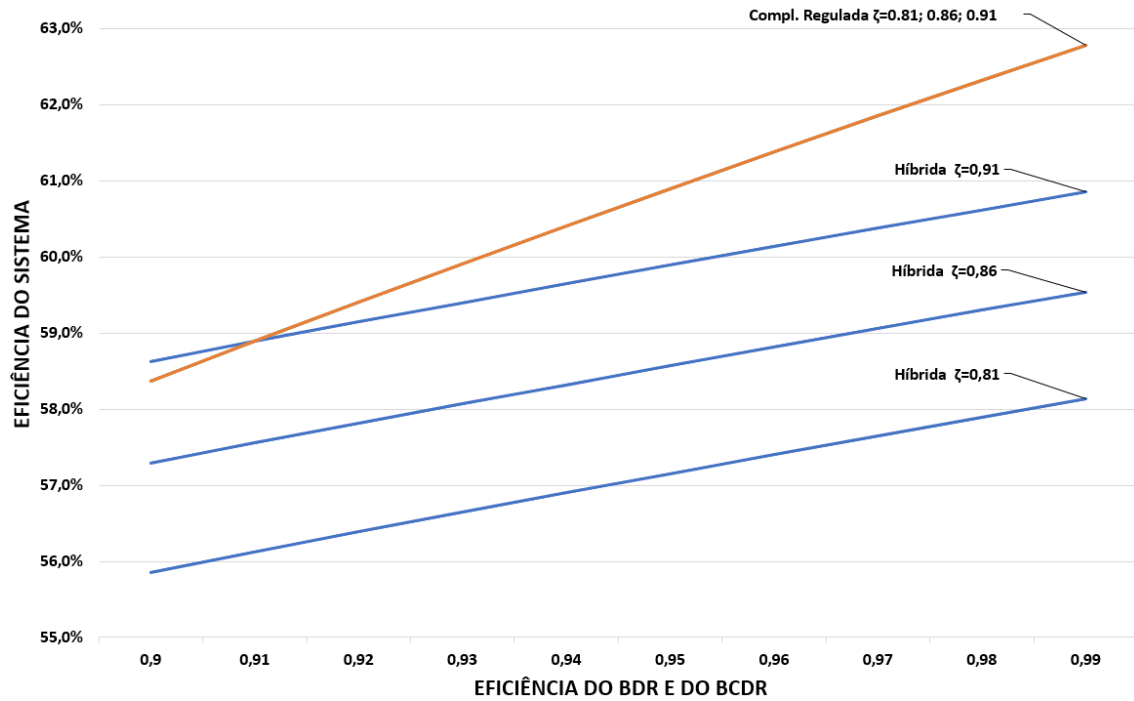
3.2.1.3.1 Variação do parâmetro ξ .

Como já descrito na Subsubseção 3.2.1.2, o parâmetro ξ é próprio da topologia Híbrida e se refere à porção do painel solar dedicada à função de gerar energia para o carregamento da bateria. Sendo assim, considera-se o impacto na eficiência do sistema quando se faz $\xi=0,81$; $\xi=0,86$ e $\xi=0,91$. O gráfico apresentado na Figura 3.8 exibe os valores obtidos.

Por não dispor de tal arranjo que dedica uma determinada parcela do painel solar para a recarga da bateria, a topologia Completamente Regulada Bidirecional permanece com a eficiência obtida apenas em função da eficiência do BCDR. Por outro lado, para cada valor de ξ proposto, é alcançada uma eficiência diferente na topologia Híbrida. Quanto maior o parâmetro ξ , maior é a eficiência da topologia Híbrida.

Observa-se que para o valor de $\xi=0,91$ e os equipamentos BDR e BCDR tendo efi-

Figura 3.8 - Eficiência da topologia Híbrida e da Completamente Regulada alcançada com a alteração do parâmetro ξ .



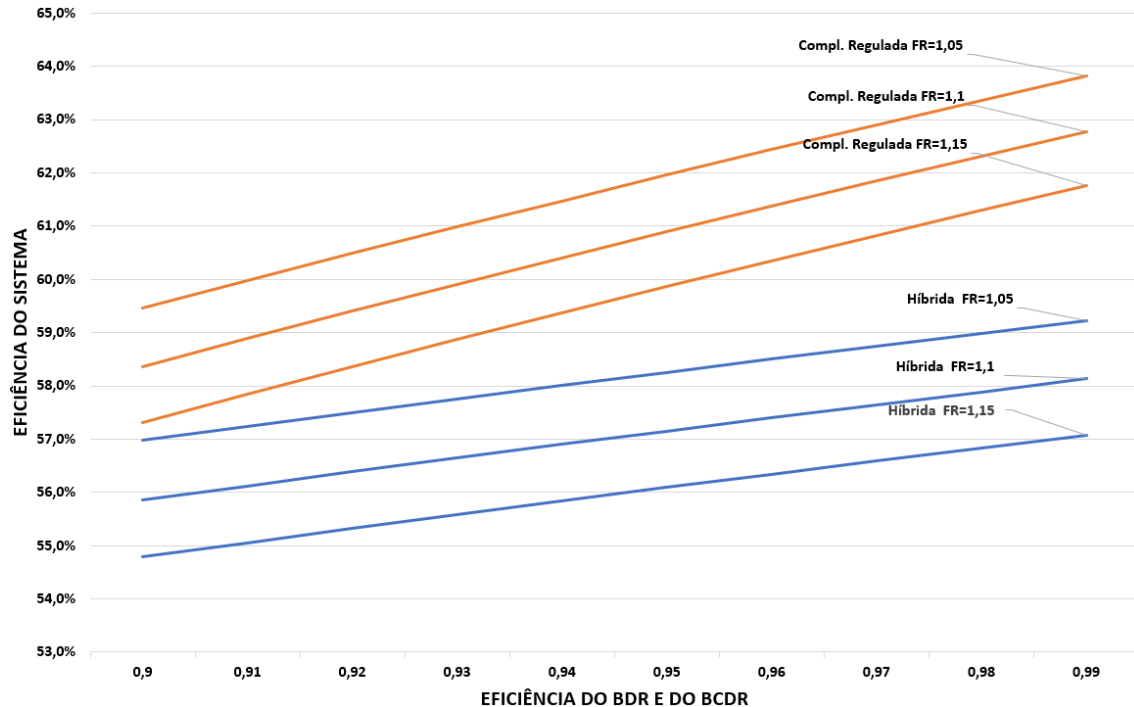
Fonte: Autor.

ciências menores ou iguais à 91%, a topologia Híbrida se apresenta mais eficiente do que a topologia Completamente Regulada Bidirecional. Esse fato ocorre pois, um valor maior de ξ garante um melhor aproveitamento da energia gerada pela seção do painel solar dedicada à recarga da bateria, traduzindo-se numa topologia mais eficiente, uma vez que desonera o sobredimensionamento (abordado na [Subseção 3.1.2](#)) do painel solar. No entanto, as condições para que isso ocorra implicam que as eficiências do BDR e BCDR sejam da ordem de 91%. Essas condições não se satisfazem no atual estado tecnológico desses equipamentos e por isso ainda se pode dizer que a topologia Completamente Regulada Bidirecional tem prevalência sobre a Híbrida.

3.2.1.3.2 Variação do fator de recarga (FR).

De forma análoga ao item anterior, faz-se a análise da influência da variação do fator de recarga da bateria na eficiência do sistema. Assume-se $FR=1,05$; $FR=1,1$ e $FR=1,15$. Os resultados obtidos são apresentados na [Figura 3.9](#).

Figura 3.9 - Eficiência da topologia Híbrida e da Completamente Regulada alcançada com a alteração do parâmetro Fator de Carga.



Fonte: Autor.

Observa-se que quanto menor o FR, maior será a eficiência global de ambas as topologias. Isso ocorre, pois quanto menor o valor de FR, menor será a energia necessária ao processo de recarga da bateria. Portanto, ocorre um aumento na eficiência do sistema sempre que houver aumento da eficiência dos equipamentos BDR e BCDR.

3.2.2 Seleção das topologias utilizando um estudo de caso da PMM: critério de massa e volume

Da seção anterior observa-se um melhor desempenho, do ponto de vista da eficiência elétrica, da topologia Completamente Regulada Bidirecional em relação à topologia Híbrida. Faz-se agora um estudo comparativo entre elas para a seleção da topologia candidata baseada no critério de massa e volume dos equipamentos.

Alguns dos equipamentos aqui citados foram desenvolvidos pelo próprio INPE, sendo, portanto, aplicados como equipamentos funcionais da PCU proposta. Suas características elétricas são conhecidas (DEA, 2013a) (DEA, 2013b) e apresentam

herança de voo nos satélites da série CBERS.

3.2.2.1 Especificação de potência da PMM

Ao adicionar ou remover módulos, a capacidade de processamento de potência da PCU é configurada de acordo com a especificação, conforme desejado. Um estudo de caso será apresentado para comparação, seleção entre ambas as topologias e exemplificar o processo de configuração.

Considera-se uma missão que tem os seguintes requisitos de potência para a PCU proposta:

a) Potência de Saída

A PCU deve ter a capacidade de fornecer, simultaneamente, pelo menos, a potência média de 400 W para as cargas e de 500 W para recarregar a bateria.

b) Capacidade de Potência Máxima

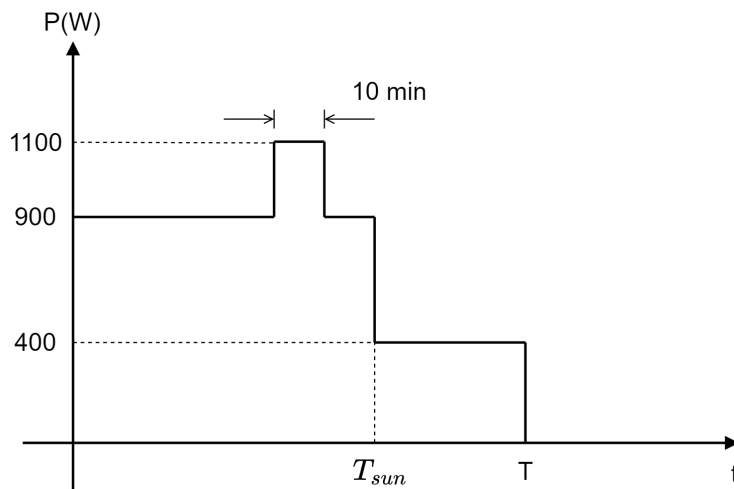
A PCU deve ter a capacidade de fornecer às cargas um pico de potência instantâneo repetitivo de 1100 W durante 10 minutos por órbita.

c) Tolerância a falhas de ponto simples

A perda de qualquer unidade funcional não pode afetar o desempenho do subsistema.

Esses requisitos podem ser traduzidos no perfil operacional mostrado na [Figura 3.10](#), conhecido como perfil de potência.

Figura 3.10 - Perfil de Potência.



Fonte: Autor.

3.2.2.2 Solução de PCU ao perfil de potência proposto

A seguir apresentam-se as características de cada equipamento usados na configuração da PCU proposta na [Subsubseção 3.2.2.1](#) para cada topologia candidata. É importante frisar que os módulos apresentados a seguir são padrões de potência, os quais permitem, dessa forma, serem utilizados para uma ampla variedade de missões, facilitando o reuso, diminuindo custos e cronograma de projeto, principalmente quando se leva em conta que durante as fases iniciais de desenvolvimento de uma missão há uma grande incerteza quanto ao consumo real das diversas cargas de um satélite.

3.2.2.2.1 Módulos S3R

A função do S3R foi descrita na [Subseção 2.3.1](#) e esse equipamento ([Figura 3.11](#)), já foi desenvolvido no INPE. Cada módulo S3R é composto por dois canais e tem suas características resumidas na [Tabela 3.3](#)⁴.

⁴Os termos L, A e P na coluna DIMENSÕES referem-se à largura, altura e a profundidade do módulo, respectivamente

Figura 3.11 - Módulo S3R desenvolvido no INPE.



Fonte: Autor.

Portanto, define-se a seguinte configuração necessária para cada topologia candidata.

Tabela 3.3 - Características do equipamento S3R e a configuração para cada topologia.

EQUIPAMENTO	CARACTERÍSTICAS POR MÓDULO				
	MASSA (g)	POTÊNCIA (W)	DIMENSÕES (mm)		
			L	A	P
S3R	941	448	28,5	180	220
	CONFIGURAÇÃO NECESSÁRIA				
	HÍBRIDA		COMPLET. REG. BIDIRECIONAL		
NÚMERO DE MÓDULOS	3		3		
POTÊNCIA TOTAL (W)	1344		1344		
POTÊNCIA COM FALHA DE UM CANAL (W)	1120		1120		
MASSA TOTAL (g)	2823		2823		
VOLUME TOTAL (cm3)	3385,8		3385,8		

Fonte: Autor.

O Shunt é um equipamento comum para ambas as topologias e, portanto, apresentam a mesma configuração, uma vez que, durante o período de *sunlight* a energia oriunda do painel solar para realizar as operações do satélite (recarga da bateria, funcionamento de cargas úteis, etc.) é processada por esse equipamento. Para ser aplicável à especificação acima, faz-se necessária a utilização de três módulos, totalizando seis canais, cuja potência total é 1344 W. Mesmo em caso de falha de um dos canais, o equipamento S3R se mantém capaz de processar a energia necessária

(1100 W) ao barramento.

3.2.2.2.2 Módulos BDR

Esse equipamento, exclusivo à topologia Híbrida, também já foi desenvolvido pelo INPE e tem suas características apresentadas na [Tabela 3.4](#).

Tabela 3.4 - Características do equipamento BDR.

EQUIPAMENTO	CARACTERÍSTICAS POR MÓDULO				
	MASSA (g)	POTÊNCIA (W)	DIMENSÕES (mm)		
			L	A	P
BDR	1169,7	448	28,5	180	220
CONFIGURAÇÃO NECESSÁRIA					
HÍBRIDA					
NÚMERO DE MÓDULOS	2				
POTÊNCIA TOTAL (W)	896				
POTÊNCIA COM FALHA DE UM CANAL (W)	672				
MASSA TOTAL (g)	2339,4				
VOLUME TOTAL (mm ³)	2257,2				

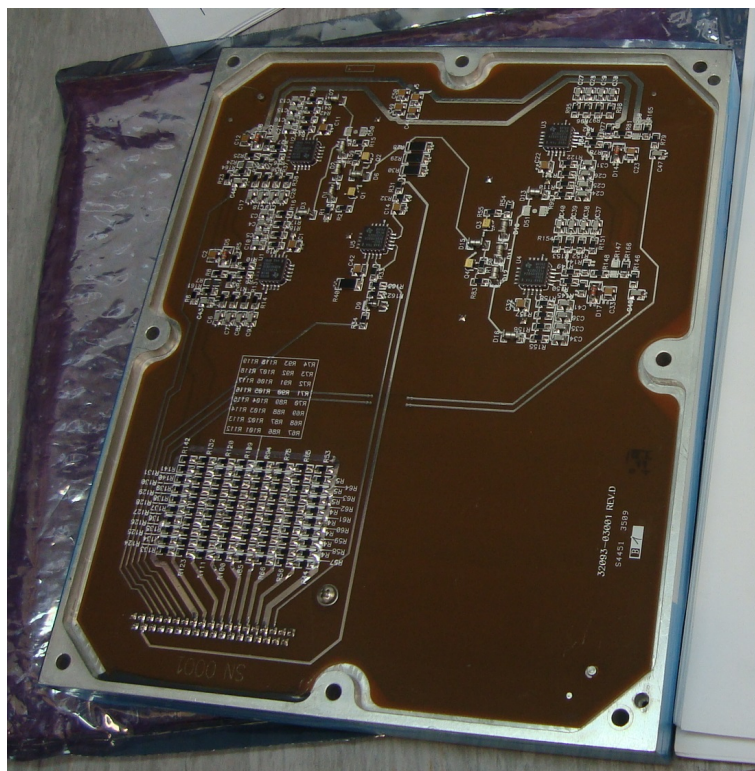
Fonte: Autor.

Para descarregar a bateria, faz-se necessário um arranjo capaz de processar 400 W. Três canais processam 672 W, mas devido ao fator de ser tolerante a falhas de ponto simples, um quarto canal deve ser adicionado. Portanto, tem-se dois módulos, num total de quatro canais.

3.2.2.2.3 Módulos MEA

O módulo MEA (*Main Error Amplifier*), mostrado em [Figura 3.12](#), é o principal controlador do sistema, determinando a operação correta do S3R, BC, BDR e do BCDR. Além disso, é composto de quatro canais idênticos e independentes, arranjados de tal forma que a saída do MEA é o sinal selecionado de um dos quatro canais. Por ser o controlador do sistema, os canais são configurados como redundância quente. A [Tabela 3.5](#) apresenta as características desse equipamento.

Figura 3.12 - Módulo MEA desenvolvido pelo INPE.



Fonte: Autor.

Tabela 3.5 - Características do equipamento MEA e a configuração para cada topologia.

EQUIPAMENTO	CARACTERÍSTICAS POR MÓDULO			
	MASSA (g)	DIMENSÕES		
MEA		L	A	P
	941	28,5	180	220
	CONFIGURAÇÃO NECESSÁRIA			
	HÍBRIDA	COMPLET. REG. BIDIRECIONAL		
NÚMERO DE MÓDULOS	1	1		
MASSA TOTAL (g)	941	941		
VOLUME TOTAL (cm3)	1128,6	1128,6		

Fonte: Autor.

3.2.2.2.4 Módulos BC

Outro equipamento, exclusivo da topologia Híbrida, e disponível no INPE é o BC. A [Tabela 3.6](#) apresenta suas características e o arranjo necessário para topologia Híbrida dentro da especificação de potência. Embora a função de potência seja

relativamente simples, constituindo-se apenas de uma chave estrutural semelhante ao S3R, há associado a essa topologia toda a eletrônica de controle de carga e descarga da bateria. Baseado nos módulos existentes para o satélite CBERS 3&4, é possível fundir a eletrônica de potência e de controle num único frame com uma capacidade de carga de 720 W ($60\text{ V} \times 12\text{ A}$). A estrutura topológica de potência do BC é tolerante a falha em série e em aberto de diodos e mosfets e a eletrônica de controle é redundante. Portanto um único módulo seria suficiente para o caso em estudo.

Tabela 3.6 - Características do equipamento BC.

EQUIPAMENTO	CARACTERÍSTICAS POR MÓDULO				
	MASSA (g)	POTÊNCIA (W)	DIMENSÕES (mm)		
			L	A	P
BC	941	720	28,5	180	220
	CONFIGURAÇÃO NECESSÁRIA				
	HÍBRIDA				
NÚMERO DE MÓDULOS	1				
POTÊNCIA TOTAL (W)	720				
MASSA TOTAL (g)	941				
VOLUME TOTAL (cm3)	1128.6				

Fonte: Autor.

3.2.2.2.5 Módulos BCDR

Para a função BCDR⁵, exclusiva à topologia Completamente Regulada Bidirecional, é possível personalizar um módulo composto por duas fontes de alimentação SRM (*Switching Regulator Modules*), cada uma capaz de fornecer 8 A, totalizando 448 W por módulo (dois canais de 224 W). Em termos de processamento para recarga da bateria isso seria o suficiente (tendo em vista que no período de eclipse, T_{sun} até T , são gastos 400 W), mas para tolerar falhas de ponto simples, faz-se necessário o uso de mais um módulo. A [Tabela 3.7](#) resume os valores alcançados.

A capacidade de potência total é, portanto, de 896 W, o suficiente para as funções de carga e descarga da bateria.

⁵Em termos de número de componentes eletrônicos, o equipamento BCDR aproxima-se do equipamento BDR, portanto, como estimativa inicial, adotam-se as mesmas características de tal equipamento.

Tabela 3.7 - Características do equipamento BCDR.

EQUIPAMENTO	CARACTERÍSTICAS POR MÓDULO				
	MASSA (g)	POTÊNCIA (W)	DIMENSÕES (mm)		
			L	A	P
BCDR	1169,7	448	28,5	180	220
CONFIGURAÇÃO NECESSÁRIA					
COMPLET. REG. BIDIRECIONAL					
NÚMERO DE MÓDULOS	2				
POTÊNCIA TOTAL (W)	896				
POTÊNCIA EM FALHA (W)	672				
MASSA TOTAL (g)	2339,4				
VOLUME TOTAL (cm3)	2257,2				

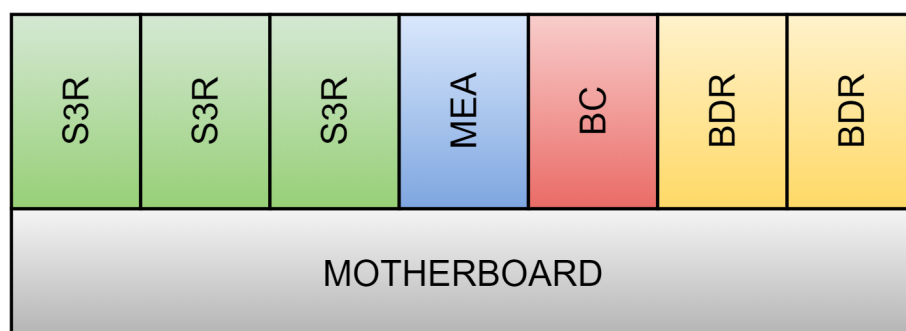
Fonte: Autor.

3.2.2.2.6 Motherboard

Um módulo de placa-mãe é necessário para fornecer a interface completa entre todos os outros módulos acima, bem como para o painel solar, a carga útil e a bateria.

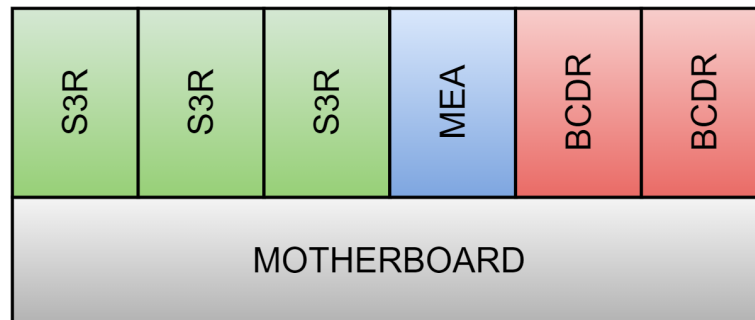
A configuração da montagem dos módulos da PCU que satisfazem os requisitos citados anteriormente para ambas as topologias em estudo é mostrada na [Figura 3.13](#) e na [Figura 3.14](#).

Figura 3.13 - Diagrama em blocos do design da PCU para PMM usando a topologia Híbrida.



Fonte: Autor.

Figura 3.14 - Diagrama em blocos do design da PCU para PMM usando a topologia Complet. Reg. Bidirecional.



Fonte: Autor.

3.2.2.3 Comparativo massa x volume entre as topologias Híbrida e Complet. Reg. Bidirecional

De acordo com o arranjo encontrado anteriormente tem-se, na tabela [Tabela 3.8](#), resumidamente o volume e a massa da PCU para cada uma das topologias.

Tabela 3.8 - Características da PCU usando a topologia Híbrida.

TOPOLOGIA HÍBRIDA		TOPOLOGIA COMPLET. REG. BIDIRECIONAL	
EQUIPAMENTO	QUANT.	EQUIPAMENTO	QUANT.
MÓDULOS S3R	3	MÓDULOS S3R	3
MÓDULOS BDR	2	MÓDULOS BCDR	2
MÓDULOS BC	1	MÓDULOS MEA	1
MASSA TOTAL PCU (kg)	7044,4	MASSA TOTAL PCU (kg)	6103,4
VOLUME TOTAL PCU (cm3)	7900,2	VOLUME TOTAL PCU (cm3)	6771,6

Fonte: Autor.

Observa-se que a topologia Híbrida apresenta uma massa e um volume cerca de 16% maior do que a topologia Completamente Regulada Bidirecional em um mesmo cenário operacional. Logo, dentro dos critérios abordados nesse trabalho, fica demonstrado que com a aplicação de um equipamento que funde as funções de carga e descarga da bateria, através do uso de conversores DC/DC bidirecionais e utilizando a topologia Completamente Regulada Bidirecional apresenta uma leve vantagem em termos de massa e volume.

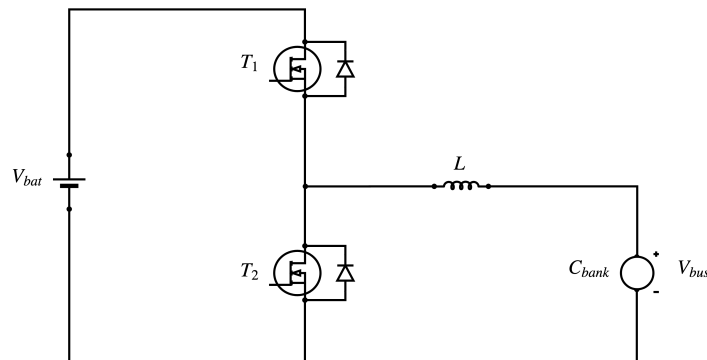
4 MODELAGEM DO CONVERSOR DC/DC BIDIRECIONAL (BCDR).

Na seção anterior, concluiu-se que a topologia Completamente Regulada Bidirecional é a topologia candidata escolhida em termos de menor massa, volume e maior eficiência. Nas seções a seguir será apresentada a modelagem do conversor DC/DC bidirecional escolhido.

4.1 Conversor bidirecional *Half-bridge*

A tecnologia relacionada aos conversores bidirecionais DC/DC ganhou atenção e melhorias no setor da indústria automobilística e em sistemas de energia renovável, com muitos circuitos integrados sendo fabricados para aplicações específicas. Uma revisão da literatura sobre este tópico é apresentada em [Tytelmaier et al. \(2016\)](#), onde é possível ver que a maneira mais simples, ou seja, um número mínimo de comutadores (chaves) e componentes magnéticos, para implementar um conversor DC/DC bidirecional não isolado é pela configuração mostrada na [Figura 4.1](#).

Figura 4.1 - Topologia típica de um conversor *non-isolated half-bridge*.



Fonte: Autor.

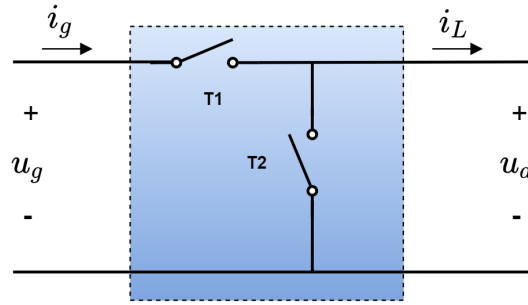
4.2 O método de média

O processo de cálculo da média consiste em extrair o valor médio das variáveis, normalmente um sinal de corrente ou tensão. Matematicamente, dado qualquer sinal $x(t)$, pode-se definir a média instantânea (*moving average*) de acordo com a [Equação 4.1](#) ([SPIAZZI, 2009](#)).

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t x(\tau) d\tau \quad (4.1)$$

Referindo-se à [Figura 4.1](#), pode-se notar que os elementos que tornam este sistema não-linear são representados pelas chaves T_1 e T_2 . Portanto, o primeiro passo no processo de modelagem corresponde à substituição desses elementos do circuito por uma rede de duas portas (ou três portas, dependendo do uso), caracterizada pelos sinais médios das variáveis mostradas na [Figura 4.2](#).

Figura 4.2 - Unidade de Chaveamento.



Fonte: Autor.

As formas de onda associadas de u_d e i_L são mostradas na [Figura 4.3](#) para os dois estados T_{1on}/T_{2off} (intervalo $[0, t_{on}]$) e T_{1off}/T_{2on} (intervalo $[t_{on}, T_s]$). A fração de tempo em que a chave T_1 permanece ligada chama-se *duty-cycle* (d) e consiste, matematicamente na razão entre o instante t_{on} e o período fixo de chaveamento T_s .

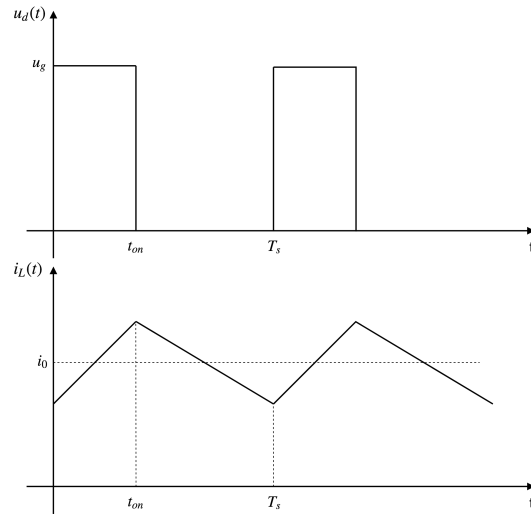
Como o interesse é no valor médio dos sinais, pode-se escrever:

$$\bar{u}_D(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t u_D(\tau) d\tau \quad (4.2)$$

$$\bar{u}_D(t) = \frac{1}{T_s} u_g(t_{on}) = d u_g \quad (4.3)$$

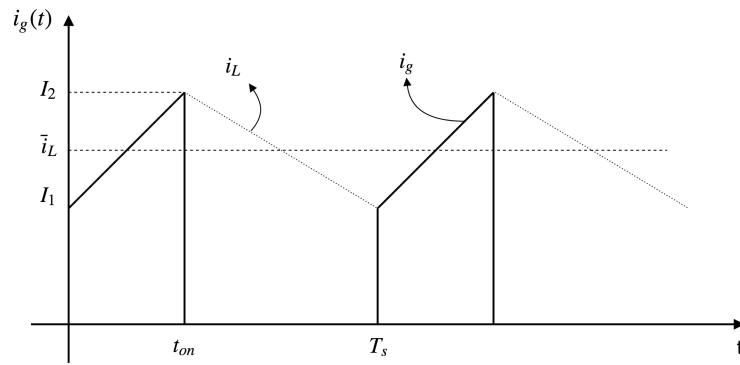
Considerando a [Figura 4.4](#), também pode-se obter uma expressão para o valor médio da corrente de entrada da unidade de chaveamento.

Figura 4.3 - Formas de onda unidade de chaveamento.



Fonte: Autor.

Figura 4.4 - Formas de onda da corrente de entrada da unidade de chaveamento.



Fonte: Autor.

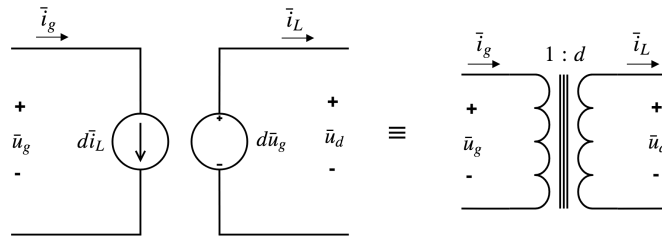
$$\bar{i}_g(t) = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t i_g(\tau) d\tau = \frac{1}{T_s} \frac{I_1 + I_2}{2} t_{on} = \frac{t_{on}}{T_s} \bar{i}_L \quad (4.4)$$

Então:

$$\bar{i}_g = d\bar{i}_L \quad (4.5)$$

Observando a [Equação 4.3](#) e a [Equação 4.5](#) surge uma analogia com um transformador DC/DC fictício, tal como mostrado na [Figura 4.5](#). Sendo assim, a unidade de chaveamento pode ser substituída por fontes de tensão e corrente correspondentes ao comportamento médio dos sinais chaveados apresentados anteriormente.

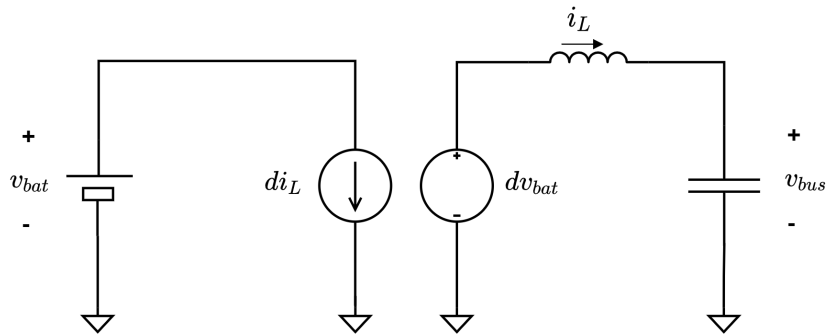
Figura 4.5 - Modelo de média da unidade de chaveamento.



Fonte: Autor.

Substituindo o modelo médio da unidade de chaveamento no lugar das chaves T_1 e T_2 , mostradas na [Figura 4.1](#), obtém-se o modelo de média do conversor BCDR, conectando bateria e barramento, mostrado na [Figura 4.6](#).

Figura 4.6 - Modelo de média do conversor *Half-Bridge*.

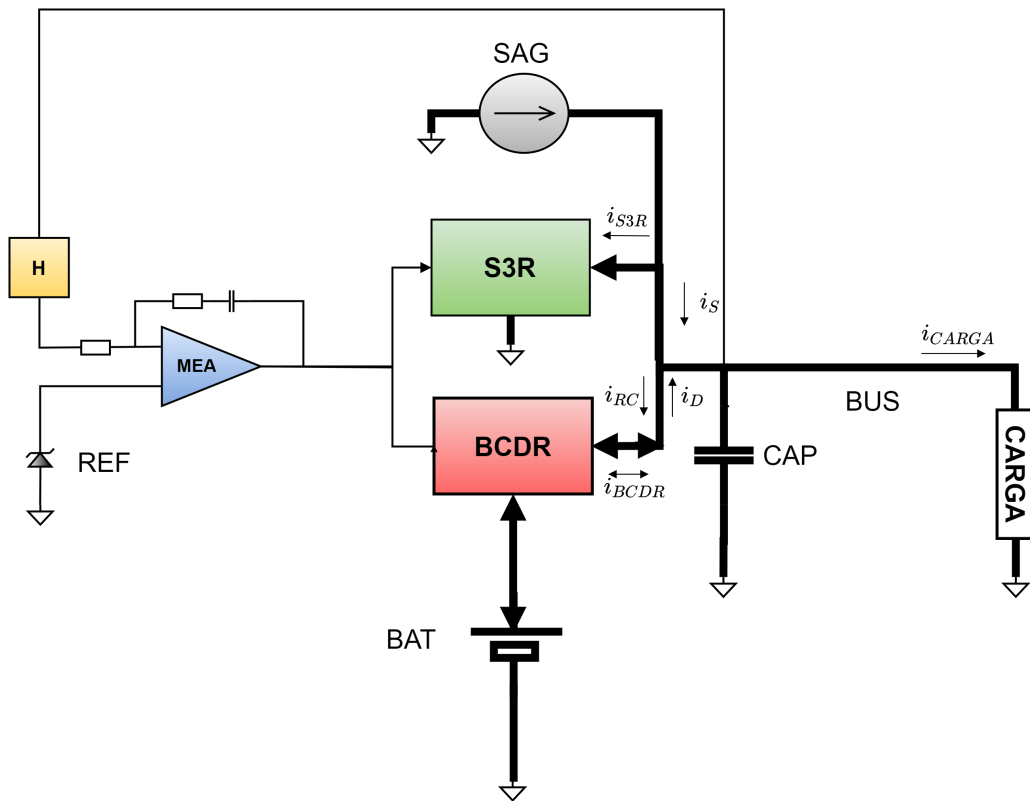


Fonte: Autor.

5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA EM MALHA FECHADA

Neste capítulo, apresenta-se um modelo baseado no Simulink para simular o problema de controle do subsistema. O principal requisito é a regulação da tensão do barramento principal, que é realizada pelo controlador MEA, o principal controlador do sistema. Os princípios de controle são baseados no controle de condutância e controle de três domínios (O'SULLIVAN, 1989). Um esquema pode ser visualizado na Figura 5.1 e Figura 5.2.

Figura 5.1 - Diagrama em bloco topologia Completamente Regulada Bidirecional em malha fechada.



Fonte: Adaptada de O'Sullivan (1989).

O MEA detecta a tensão do barramento no banco de capacitores, compara a uma tensão de referência e controla as correntes no nó do banco de capacitores, equalizando as correntes no nó do banco de capacitores para manter a voltagem do barramento principal estabilizada. Durante o período iluminado, quando o SAG tem

energia suficiente para suprir a demanda do barramento e recarregar a bateria, o primeiro modo de controle (mostrado na [Figura 5.2](#)) é ajustar a corrente S3R (Modo S3R) a fim de manter a igualdade mostrada na [Equação 5.1](#):

$$i_S = i_{SAG} - i_{S3R} \quad (5.1)$$

Se a corrente SAG (i_{SAG}) cair ou houver uma demanda de potência máxima acima da capacidade S3R, o MEA começará a controlar a corrente de recarga da bateria i_{RC} , diminuindo-a para equalizar a corrente (mostrada pela [Equação 5.2](#)) do barramento (Modo BCR):

$$i_S = i_{RC} + i_{CARGA} \quad (5.2)$$

Se não houver SAG, ele vai para o terceiro modo (Modo BDR¹) onde a energia é retirada da bateria ([Equação 5.3](#)) para fornecer a corrente necessária ao barramento principal, portanto:

$$i_D = i_{CARGA} \quad (5.3)$$

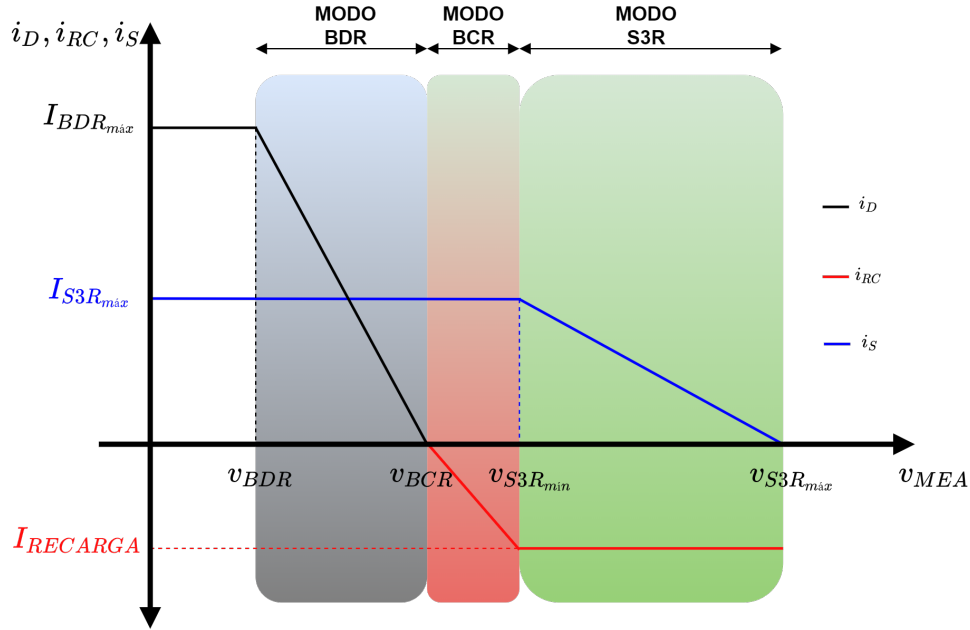
O bloco BCDR durante o eclipse descarrega a bateria, operando como um conversor DC/DC abaixador de tensão (*Buck*)². Durante o período iluminado, o BCDR funciona como um conversor DC/DC elevador de tensão (*Boost*), recebendo energia do barramento para recarregar a bateria. O método típico de recarga para uma bateria íon-lítio, a ser usada neste sistema, inclui uma corrente de carga constante (CC) para uma tensão de 3,9 V a 4,2 V e, em segundo momento, manter a tensão de carga constante (CV) enquanto a corrente cai ([MCKISSOCK et al., 2009](#)).

Embora o controle de três domínios de tal sistema tenha sido apresentado por [Mata e Rueda \(1993\)](#) e por [Weinberg e Lopez \(1998\)](#), os autores não deram detalhes da modelagem de controle. Nesse trabalho, o controle de três domínios por meio do controle de condutância é exposto no diagrama de blocos da [Figura 5.3](#). Na abordagem de

¹Em condições normais de operação a situação mais comum para que o MEA entre no modo BDR é o período de eclipse, mas num eventual cenário cujo controle dos modos S3R e BCR, não satisfaça a demanda de corrente do barramento principal esse modo pode ser acionado, forçando a descarga da bateria, para complementar a corrente necessária.

²Desde que na configuração utilizada a tensão da bateria seja maior que a tensão do barramento principal: $v_{bat} > v_{bus}$.

Figura 5.2 - *Three-domain control*.



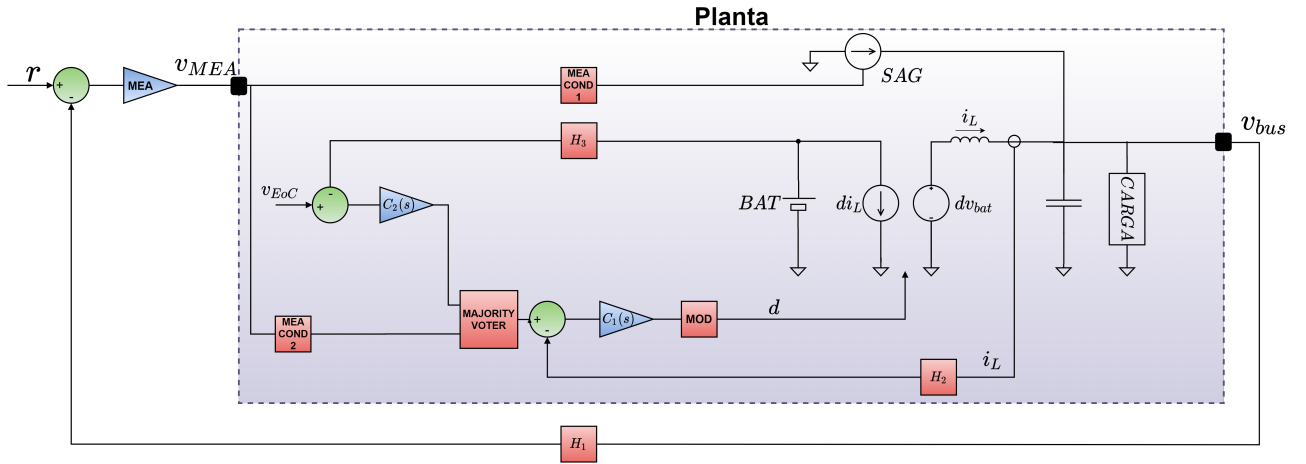
Fonte: Autor.

modelagem considerada aqui, pode-se ver que a planta ou processo a ser controlado é um sistema de uma entrada/uma saída. O *loop* de corrente de realimentação interna dentro do BCDR foi considerado como uma parte intrínseca da planta, porque no final, ele transforma o conversor DC/DC em uma fonte de corrente controlada por tensão, o mesmo ocorrendo para S3R. Esta é uma simplificação, pois toda a planta é transformada em um sistema de primeira ordem com apenas um integrador: o banco de capacitores. No entanto, é importante enfatizar que o objetivo desta simulação é demonstrar a viabilidade do esquema de controle da topologia Completamente Regulada com um conversor bidirecional DC/DC, mostrando a possibilidade de inserir a técnica de controle de condutância e dos três domínios.

Por enquanto, provou-se suficiente considerar o controlador MEA um controlador PI³, não sendo do escopo desse trabalho a apresentação do ajuste desse controle. Neste esquema de controle, o MEA está inserido no *loop* externo de tensão, gerando o sinal de referência para o *loop* interno de corrente.

³A ação proporcional gera um sinal proporcional ao erro e a ação I reduz o erro em relação à referência no estado estacionário.

Figura 5.3 - Controle do sistema em malha fechada



Fonte: Autor.

A simulação será baseada em um consumo de energia do barramento inicialmente em standby, seguido por um pico na demanda de potência pela carga útil durante *sunlight*, buscando um cenário de operação nominal típico de um satélite de sensoriamento remoto equipado com câmeras ópticas, por exemplo. Os parâmetros das simulações são mostrados na [Tabela 5.1](#).

Tabela 5.1 - Parâmetros usados na simulação.

Parâmetros <i>Three-domain control</i>			Valor
S3R	$V_{S3Rm\acute{a}x}$		20 V
	$V_{S3Rm\acute{i}n}$		12 V
	$I_{S3Rm\acute{a}x}$		48 A
BCDR	Recarga	V_{BCR}	10 V
		$I_{RECARGA}$	12 A
	Descarga	V_{BDR}	2 V
		$I_{BDRm\acute{a}x}$	65 A

Fonte: Autor.

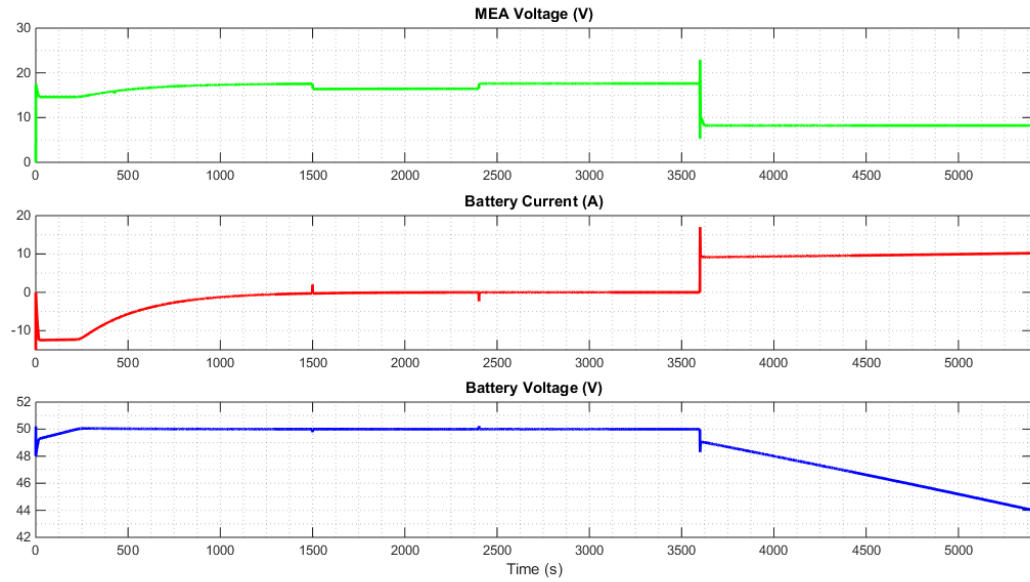
Os resultados são apresentados na [Figura 5.4](#) e [Figura 5.5](#):

A simulação começa em *sunlight*. Neste estado, tem-se o SAG provendo energia ao barramento através do S3R para fornecer a corrente para carga de 14,3 A (400 W/28 V \approx 14.3 A) e a de recarga⁴ da bateria de 17,85 A. Portanto, tem-se num primeiro instante uma corrente sendo drenada do S3R de 32,15 A. No primeiro momento, a bateria (que se encontra em seu ponto de tensão de fim de descarga (EoD)) experimenta uma corrente de recarga contínua enquanto sua tensão sobe. Quando a bateria atinge o ponto de tensão de fim de carga (EoC = 50 V), o circuito de controle da voltagem da bateria assume, mantendo-a constante e diminuindo gradualmente sua corrente de recarga.

Em determinado momento do período de *sunlight* ($t = 1500$ s), há um pico de corrente da carga, representando, por exemplo, uma operação de imageamento. Imediatamente o S3R injeta corrente para manter a tensão do barramento regulada. Isso é feito com a atuação do controlador MEA, que reduz ligeiramente sua voltagem. Quando o eclipse começa ($t = 3600$ s), a corrente oriunda do SAG não está disponível. O MEA então diminui seu sinal de controle até atingir o modo BDR, onde controla a descarga da bateria, alimentando o banco de capacitores, mantendo então o barramento regulado, enquanto a bateria é descarregada, até que o período de *sunlight* recomece.

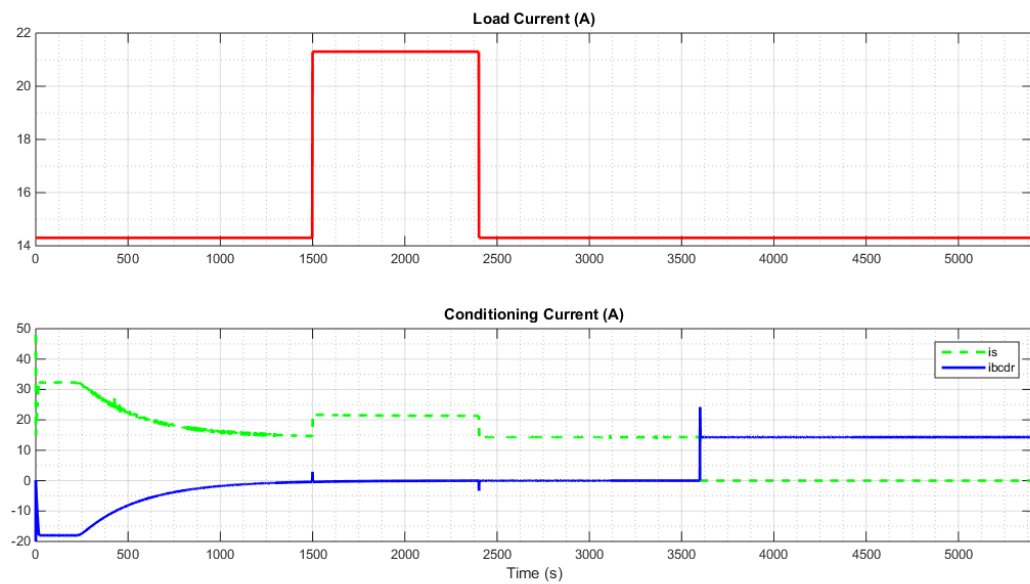
⁴Pois, 500 W/28 V \approx 17,85 A, considerando o lado do barramento principal. O sinal negativo da corrente na [Figura 5.4](#) significa corrente de recarga e o sinal positivo a corrente fornecida pela bateria (corrente de descarga).

Figura 5.4 - Formas de onda de simulação: Bateria Recarregando.



Fonte: Autor.

Figura 5.5 - Formas de onda de simulação: Controlador MEA.



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho realizou um estudo comparativo entre vários tipos de topologias utilizadas no condicionamento de energia de um satélite, tendo como critério a menor massa, volume e a melhor eficiência do sistema.

As topologias não reguladas foram excluídas devido a desvantagens para a aplicação proposta, conforme discutido na [Subseção 3.1.1](#). Dois tipos de topologias reguladas usadas no subsistema de suprimento de energia para satélite, seguiram como escolhidas, sendo uma delas modificada com a implementação de um conversor bidirecional para função de carga e descarga da bateria ([Seção 3.2](#)), resultando em três topologias candidatas.

A seleção por modelagem do tipo *Bond Graph*, desprezando a potência dissipada, auxiliou a análise do primeiro modelo ([Subsubseção 3.2.1.1](#)), conforme o estudo comparativo, apresentado na [Seção 3.2](#), das três topologias candidatas. A comparação buscou a topologia candidata para as missões de satélites de médio e grande porte em órbita baixa. Nela, a topologia Híbrida e a Completamente Regulada Bidirecional apresentaram ter a mesma quantidade de potência em equipamentos para se processar um quilowatt de carga útil, enquanto a topologia Completamente Regulada Unidirecional apresentou uma potência de processamento maior.

Em seguida, a escolha entre as topologias Híbrida e Completamente Regulada Bidirecional baseou-se na redução de massa e volume e no aumento da eficiência do sistema. O critério de eficiência, foi visto como a potência instalada no painel solar necessária para cada kW de potência de carga útil (apresentado na [Tabela 3.2](#)). Enquanto na Híbrida obtem-se um total de 1749,7 W para a potência necessária de painel solar, na Completamente Regulada Bidirecional tem-se um total de 1642,3 W, representando respectivamente uma eficiência de 57% para Híbrida e 61% para Completamente Regulada Bidirecional. Dois parâmetros importantes são utilizados para comparação final das topologias Híbrida e Completamente Regulada: o ξ e o FR, dos quais a Completamente Regulada Bidirecional tem melhor desempenho.

No [Subseção 3.2.2](#) o critério de menor massa e volume é aplicado a um estudo de caso dentro do contexto da PMM. Para tal, faz-se reuso dos módulos já desenvolvidos pelo INPE na configuração de uma PCU para as topologias: Híbrida e a Completamente Regulada Bidirecional. A massa e o volume final foram: 7,05 kg e 7900 cm^3 ; e 6,1 kg e 6772 cm^3 para a topologia Híbrida e para topologia Completamente Regulada Bidirecional, respectivamente.

Das análises realizadas anteriormente, percebe-se que existe uma diferença quantitativa no valor da eficiência e na massa/volume total da PCU aplicada às topologias Híbridas e Completamente Regulada Bidirecional. No caso da aplicação da PMM, pôde-se observar que a diferença de construção foi de apenas um módulo, no caso o módulo BC. Isso se deve à padronização existente e a especificação mais baixa para a PMM. O mesmo módulo, no entanto, poderia ser usado numa missão de maior potência e, nesse caso, essa diferença pode passar a ser de dois módulos, quando se compara as duas topologias, uma vez que apenas um módulo BC não seria suficiente para fazer a recarga da bateria de um satélite de maior porte. Com isso, pode-se dizer que a topologia Completamente Regulada Bidirecional é tanto melhor quanto maior for a potência do satélite, mas essa vantagem diminui à medida que a potência necessária para recarga da bateria diminui.

Pode-se definir como trabalho futuro o projeto e a prototipagem¹ de um conversor bidirecional em uma topologia de *non-isolated half-bridge* para ser usada como um módulo BCDR, sendo tal estudo estendido ao desempenho de controle do conversor bidirecional DC/DC, como os transientes ou a definição de um ajuste mais fino para tempo de recuperação, *overshoot* e estabilidade. Tais pontos reforçam a ideia proposta aqui nesse trabalho, seja pelo reaproveitamento de tecnologias já desenvolvidas pelo INPE dando continuidade de estudos anteriores.

¹Atualmente esse processo já está em desenvolvimento no INPE, culminando na fabricação da primeira versão de hardware.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA - AEB. **Linha do tempo Programa Espacial Brasileiro**. 2016. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/programa-espacial-brasileiro/linha-do-tempo/>>. Acesso em: 20 abr. 2020. 13

ARAUJO, L. S. **Modelagem de sistemas de atuação de tuberias através de bond graph**. 71 p. Dissertação — (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <http://www.bdiita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=62860>. 15

BONNET, F.; RIVIÈRE, L.; ELISABELAR, C.; CHIRAT, J.; BRUN, S.; GRAS, H.; DOMINGO-SALVANY, J. Modular and decentralized PCU. **E3S Web of Conferences**, v.16, e18002, 2017. 12

BORUTZKY, W. **Bond graph modelling of engineering systems**. New York, NY: Springer New York, 2011. ISBN 978-1-4419-9367-0. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-9368-7>>. 18

CAPEL, A.; DEFOUG, S. The power system trade off of the multimedia constellation satellite for the Skybridge Missions. Trade off study using the PowerCap software. In: **IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 1999. Proceedings... IEEE, 1999**. [S.l.: s.n.], 1999. p. 217–225. 23

CAPEL, A.; FERRANTE, J.; CORNET, J.; LEBLANC, P. Power system simulation of low orbit spacecraft: the eblos computer programme. In: **IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 1982. Proceedings... IEEE, 1982**. [S.l.: s.n.], 1982. p. 272–286. 23

CAPEL, A.; O’SULLIVAN, D. Influence of the bus regulation on telecommunication spacecraft power system and distribution. In: **IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 1985. Proceedings... IEEE, 1985**. [S.l.: s.n.], 1985. p. 307–318. 24, 25

DEISCH, C. W. Simple switching control method changes power converter into a current source. In: **IEEE ANNUAL POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 1978. Proceedings... IEEE, 1978**. [S.l.: s.n.]. 27

DIVISÃO DE ELETRÔNICA AEROESPACIAL (DEA) - GRUPO DE SUPRIMENTO DE ENERGIA. **CBERS Shunt regulator - Interface Data Sheet - as built - MV4 - Flight Model - RBDA-IDS-0024-As-Built-SN05-00**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013a. 37

DIVISÃO DE ELETRÔNICA AEROESPACIAL (DEA) - GRUPO DE SUPRIMENTO DE ENERGIA. **Proposta de desenvolvimento de uma nova geração de PCU (Power Conditioning Unit)**. São José dos Campos: Grupo de Suprimento de Energia, 2016. 13, 14

DIVISÃO DE ELETRÔNICA AEROESPACIAL (DEA) - GRUPO DE SUPRIMENTO DE ENERGIA. **CBERS Battery discharge regulator - Interface Data Sheet - As Built - FM - Flight Model - RBDB-IDS-0025-As-Built-SN04/00**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013b. 37

DIXON, L. Average current mode control of switching power supplies. 1990. Disponível em: <https://e2echina.ti.com/cfs-file/__key/telligent-evolution-components-attachments/13-112-00-00-00-00-44-35/Average-Current-Mode-Control-of-Switching-Power-Supplies.pdf>. 27

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION. **ECSS-E-ST-20C-Rev.1: space engineering electrical and electronic**. Noordwijk, The Netherlands: ESA-ESTEC, 2019. 6

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA. **The annual compendium of commercial space transportation: 2018**. Washington, DC, 2018. 255 p. Disponível em: <https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/2018_ast_compendium.pdf>. 1

FORTESCUE, P.; STARK, J.; SWINERD, G. **Spacecraft systems engineering**. 4. ed. [S.l.: s.n.], 2011. 724 p. ISBN 978-0-470-75012-4. 1, 5

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**. 238 p. Dissertação — (Mestrado em Mecânica Espacial e Controle) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. 23, 24

GIANNIOTO, G.; SCORZAFABA, E.; CARLANI, D. A new, single diode, sequential switching shunt regulator. **E3S Web Conf.**, v. 16, p. 14013, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171614013>>. 65

HYDER, A.; WILEY, R.; HALPERT, G.; FLOOD, D.; SABRIPOUR, S. **Spacecraft power technologies**. London: Imperial College Press, 2000. 498 p. ISBN 1860941176. 1

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **1º Satélite de Coleta de Dados - SCD-1**. 2003. Disponível em: <http://www.inpe.br/scd1/site_scd/scd1/osatelite.htm>. Acesso em: 20 abr. 2020. 13

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **CBERS 3&4**. 2018. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cbbers3-4.php>>. Acesso em: 24 set. 2018. 14

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **INPE/CBERS**. 2018. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/sobre/index.php>>. Acesso em: 20 abr. 2018. 14

JOHNSON, E. **Rockets: what is cost of sending 1 kg weight into space?** 2019. Disponível em: <<https://www.quora.com/Rockets-What-is-cost-of-sending-1-kg-weight-into-space>>. 1

LEE, J. R.; CHO, B. H.; KIM, S. J.; LEE, F. C. Modeling and simulation of spacecraft power systems. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 24, p. p. 295–304, 1988. 23

MAGALHÃES, R. O. Power conditioning and distribution unit of China-Brazil satellite CBERS 3. In: **BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 2009. Proceedings... 2009**, p. 1104–1107, 2009. 11

MATA, P.; RUEDA, P. A bidirectional BRU converter. In: **EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE, 5. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1993. 12, 52

MAXIM INTEGRATED. **APPLICATION NOTE 4266: An efficiency primer for switch-mode, DC-DC converter power supplies**. [s.n.], 2008. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/4/4266.html>>. 67

MCKISSOCK, B.; LOYSELLE, P.; VOGEL, E. **Guidelines on Lithium-ion battery use in space applications**. [s.n.], 2009. 54 p. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090023862.pdf>>. 52

O'SULLIVAN, D. Satellite power system topologies. **ESA Journal**, v. 13, p. 77–88, 01 1989. 2, 5, 11, 28, 51

O'SULLIVAN, D.; WEINBERG, G. The sequential switching shunt regulator S3R. In: **SPACECRAFT POWER CONDITIONING SEMINAR, 1977. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1977. p. 123–131. 9, 27

PATEL, M. R. **Spacecraft power systems**. Boca Raton: CRC Press, 2005. 1–4 p. ISBN 0849327865. 1, 11

PAYNTER, H. **Analysis and design of engineering systems: class notes for M.I.T. course 2.751**. Cambridge, Massachusetts: M.I.T. Press, 1960. 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 29

PEDERSEN, F. Bidirectional DC/DC converter. In: **EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE, 8., 2008. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008. (ESA Special Publication, v. 661), p. 29. 12

RAMACHANDRAN, R.; NYMAND, M. Loss modelling and experimental verification of a 98.8% efficiency bidirectional isolated DC-DC converter. **E3S Web of Conferences**, v.16; 18003, 2017. 12

SCHIRONE, L.; MACELLARI, M. Design issues for the power system of a lunar rover. In: **EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE, 2014. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2014. 12

SILVA, I. P. **Modelagem e identificação de uma máquina de extrusão através de bond-graphs**. 158 p. Dissertação — (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <http://www.bdata.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000541046>. 15

SPACEFLIGHT. **Spaceflight - schedule and pricing**. 2020. Disponível em: <<https://spaceflight.com/schedule-pricing/{#}schedulehttp://spaceflight.com/schedule-pricing/{#}pricing>>. 1

SPIAZZI, G. Modeling approaches for switching converters: a short course. In: **BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE. Anais...** Bonito, Mato Grosso do Sul: [s.n.], 2009. 47

TYTELMAIER, K.; HUSEV, O.; VELIGORSKYI, O.; YERSHOV, R. A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems. In: **INTERNATIONAL YOUNG SCIENTISTS FORUM ON APPLIED PHYSICS AND ENGINEERING, 2., 2009. Proceedings...** IEEE, 2009. [S.l.: s.n.], 2016. p. 22–28. 12, 47

WEINBERG, S. H.; LOPEZ, A. A bidirectional BDR/BCR for satellite applications. **EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE, 5., 1998. Proceedings...** 1998., 1998. ISSN 03796566. 12, 52

WERTZ, J.; LARSON, W. **Space mission analysis and design**. Netherlands: Springer, 1999. (Space Technology Library). ISBN 9780792359012. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=veyGEAKFbiYC>>. 6

ZAPATA, E. The state of play US space systems competitiveness. In: **FUTURE IN SPACE OPERATIONS SEMINAR, 2017. Proceedings...** [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170009967.pdf>>. 1

ZIMMERMANN, S.; LUCA, A. D.; DEFOUG, S.; BLANCQUAERT, T. A power system analysis and selection for a reference low earth orbit satellite using the Powercap tool. In: **EUROPEAN SPACE POWER CONFERENCE, 8., 2008. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008. v. 661. 23

APÊNDICE A - EFICIÊNCIAS DOS MÓDULOS S3R, BC e BDR/BCDR

Os valores apresentados na [Tabela 3.2](#) foram levantados como mostrado a seguir:

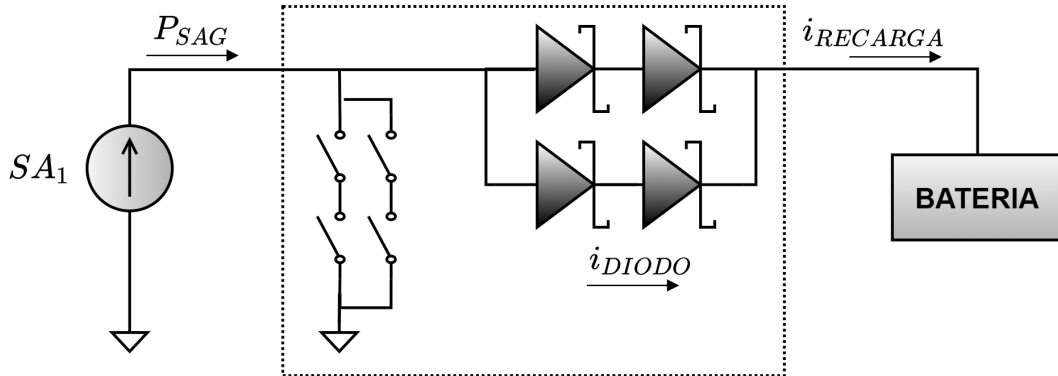
A.1 Eficiência do equipamento S3R

O estado da arte hoje permite que sejam construídos módulos SHUNT com eficiências da ordem de 98%. Pode-se destacar o equipamento S3R utilizado na missão *COSMO-SkyMed Second Generation (CSG) Constellation*, cuja configuração proposta foi apresentada na ESPC em 2016 ([GIANNIOTO, G. et al., 2017](#)).

A.2 Eficiência do equipamento BC

O equipamento BC apresenta uma arquitetura bastante parecida com a do S3R ([Figura A.1](#)), sendo a tensão existente em sua saída equivalente a da bateria, nesse caso, cerca de 60 VDC e um capacidade de processar 12 A. As demais características elétricas são listadas abaixo:

Figura A.1 - Diagrama de um canal BC.



Fonte: Autor.

- a) **Potência de saída:** A potência de saída por canal do equipamento BC é dada pela [Equação A.1](#).

$$P_{saída} = V_{bat} \times I_{RECARGA} \quad (A.1)$$

Portanto:

$$P_{saída} = 60 \text{ V} \times 12 \text{ A} = 720 \text{ W} \quad (\text{A.2})$$

- b) **Potência de entrada:** A potência de entrada no canal BC refere-se a seção do painel solar dedicada a fornecer potência para recarregar a bateria somada a potência dissipada pelo arranjo de diodo Schottky, e dada pela [Equação A.3](#).

$$P_{entrada} = P_{SAG} = P_{RECARGA} + P_{DIODO} \quad (\text{A.3})$$

- c) **Potência dissipada no diodo:** A potência dissipada no diodo é diretamente proporcional à corrente do canal fornecida à função de recarga ($I_{RECARGA}$), sendo definida pela [Equação A.4](#).

$$P_{DIODO} = V_{DIODO} \times I_{RECARGA} \quad (\text{A.4})$$

Então:

$$P_{DIODO} = 1,2 \text{ V} \times 12 \text{ A} = 14,4 \text{ W} \quad (\text{A.5})$$

Com o resultado da [Equação A.5](#) substituído na [Equação A.3](#) tem-se a potência de entrada ([Equação A.6](#)):

$$P_{entrada} = P_{SAG} = 720 \text{ W} + 14,4 \text{ W} = 734,4 \text{ W} \quad (\text{A.6})$$

Portanto:

$$\eta_{BC} = \frac{P_{RECARGA}}{P_{SAG}} = \frac{720 \text{ W}}{734,4 \text{ W}} \quad (\text{A.7})$$

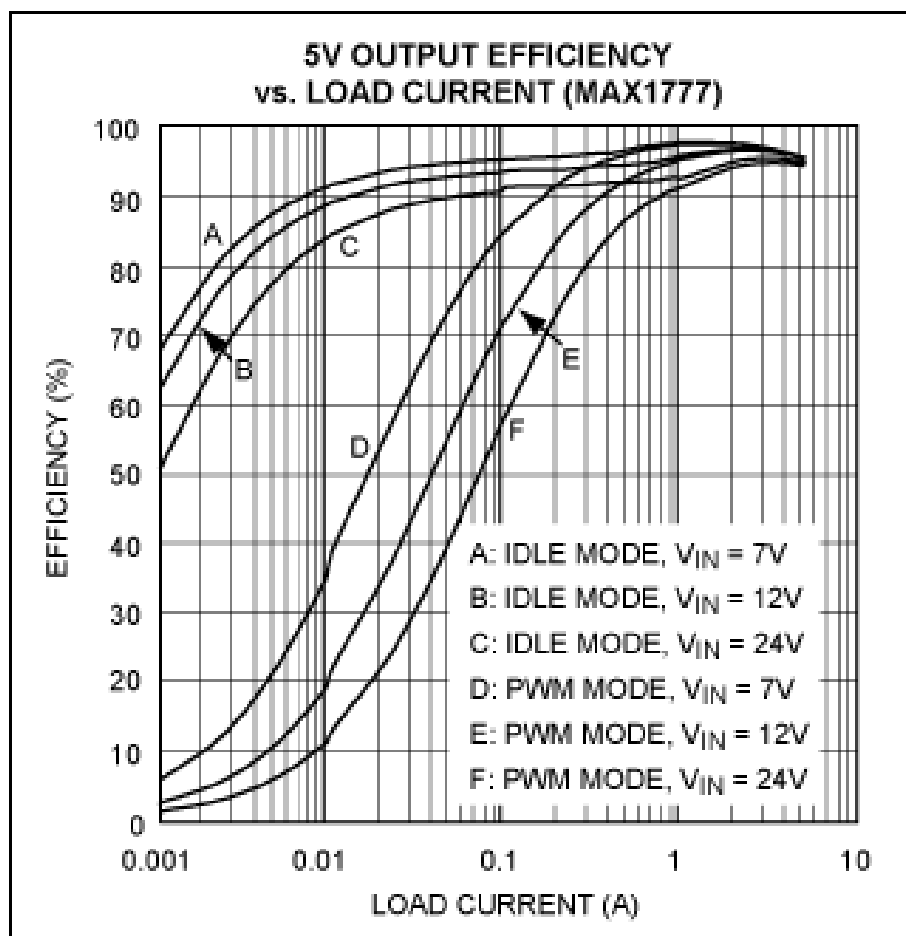
Então:

$$\eta_{BC} = 98,03 \% \quad (\text{A.8})$$

A.3 Eficiência do equipamento BDR e do BCDR

O chaveamento síncrono, utilizando fontes SMPs, permite eficiências maiores. No site da empresa *Maxim Integrated* é apresentado um relatório técnico contendo uma nota de aplicação para uma fonte SMP cuja eficiência da ordem de 95% é um valor comum ([MAXIM INTEGRATED, 2008](#)). A curva obtida na aplicação é apresentada Figura A.2.

Figura A.2 - Curvas de eficiências da fonte SMP.



Fonte: [MAXIM INTEGRATED \(2008\)](#).

