

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME APARECIDO INÁCIO

**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA BASEADO EM
BATERIAS INTELIGENTES E NA UTILIZAÇÃO DE UM
CONVERSOR *BUCK-BOOST* NÃO-INVERSOR**

VIÇOSA
2022

GUILHERME APARECIDO INÁCIO

**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA BASEADO EM
BATERIAS INTELIGENTES E NA UTILIZAÇÃO DE UM
CONVERSOR *BUCK-BOOST* NÃO-INVERSOR**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira
Co-orientador: Prof. Dr. Allan Fagner Cupertino

VIÇOSA
2022

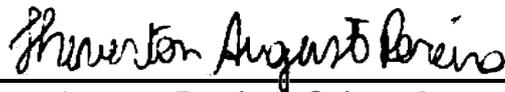
GUILHERME APARECIDO INÁCIO

**SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA BASEADO EM
BATERIAS INTELIGENTES E NA UTILIZAÇÃO DE UM
CONVERSOR *BUCK-BOOST* NÃO INVERSOR**

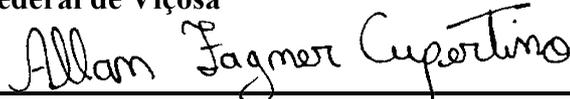
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de dezembro de 2022.

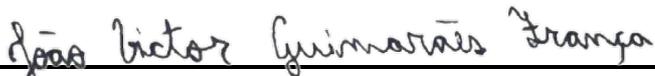
COMISSÃO EXAMINADORA



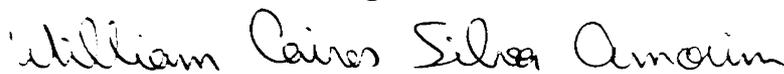
Prof. Dr. Heverton Augusto Pereira - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Allan Fagner Cupertino - Coorientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Eng. João Vitor Guimarães França - Membro
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Prof. Dr. William Caires Silva Amorim - Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Itabirito/MG

“Genialidade é um por cento inspiração e noventa e nove por cento transpiração”

Thomas A. Edison

Dedico esse trabalho a todos que acreditaram que esse sonho um dia iria se realizar.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por estar proporcionando essa conquista maravilhosa. Em seguida, deixo aqui evidenciado todo o apoio que recebi ao longo dessa jornada dos meus pais, Natálio e Consola, e também dos meus irmãos: Claudiano, Caciano, Juliano, Roseane, Graciano, Josilaine e Franciane. Além desses, tem o meu sobrinho Caio que desde que chegou se tornou uma motivação a mais para seguir adiante e, também, sempre tive a sorte de ter ao meu lado nessa caminhada as cunhadas e cunhado, sendo eles: Aline Padilha, Beatriz Ferraz, Leo Souza e Tatiana Torres. Saibam que todos vocês de alguma forma deram a sua contribuição para o cumprimento dessa jornada da minha graduação na Universidade Federal de Viçosa.

Agradeço também ao apoio de diversos amigos que eu já tinha e os que conquistei ao longo desses últimos anos. Ana Carla foi uma das primeiras a saber da minha aprovação no vestibular e desde então sempre me apoiou. Me recordo como se fosse hoje do grande amigo e professor José Alcir que me apresentou e me situou na cidade de Viçosa no começo de tudo. Já na instituição pude contar com amigos conterrâneos como Ângela Maria e Leandro Silva que, sem dúvida, foram importantes naquele primeiro ano como universitário, onde tudo era novidade para todos nós.

Gratidão também aos amigos do apartamento 1532 que se tornaram minha segunda família nesses últimos anos. Aos colegas e professores do DMA/UFV com os quais eu tive um primeiro contato antes da transição para o curso de Engenharia Elétrica. Um abraço especial ao professor Edson José Teixeira e também para o, agora, professor Renato Quirico.

Já na Engenharia Elétrica deixo registrado meus sinceros agradecimentos para: Anailson, Eduardo Ávila, Gabriel Calais, Helena Martins, João França, Vinícius Maciel e Yan Cosme [...]. Todos esses me deram o suporte inicial naquele primeiro contato com a Engenharia Elétrica. Vocês fizeram e fazem parte da minha trajetória de Vida. Foram muitos apertos e risadas juntos. Quero que saibam que tem aqui um amigo que vocês podem sempre contar.

Por fim, quero agradecer a todos os amigos da parceria GESEP/LEACOPI. Gratidão ao CEFET pela disponibilidade do uso do espaço físico do LEACOPI, situado no Campus Nova Gameleira em Belo Horizonte – MG, para o bom andamento das atividades desse projeto. Agradeço, também, a confiança e a ajuda de sempre dos meus orientadores Prof. Dr. Heverton Pereira e Prof. Dr. Allan Cupertino. Vocês foram cruciais na conclusão dessa monografia e, claro, para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Resumo

A alta penetração de fontes renováveis de energia no sistema elétrico de potência (SEP) brasileiro se tornou uma realidade advinda da necessidade cada vez maior de suprir a demanda energética. Porém, tais fontes apresentam características como a questão da intermitência, gerando desafios no controle de tensão e frequência do SEP. Nesse contexto, o sistema de armazenamento de energia por baterias (BESS, do inglês, *Battery Energy Storage Systems*) tem seu destaque pela possibilidade de prestação de serviços ancilares para as redes de distribuição e, nos últimos anos seu uso tem sido impulsionado pelo setor de mobilidade elétrica com a viabilização da utilização de baterias de segunda vida. Essas baterias são descartadas por esse setor quando atingem em torno de 80% de sua capacidade inicial, mas que ainda podem ser utilizadas em aplicações estacionárias. Contudo, a arquitetura tradicional, aplicada em baixa tensão, de um BESS apresenta desvantagens que são agravadas quando se utiliza de tais baterias de segunda vida. Desta forma, este projeto propõe uma nova arquitetura de BESS, que se baseia na integração de conversores *buck-boost* não inversor e baterias, com intuito de sanar ou mitigar as desvantagens existentes em relação ao modelo difundido no mercado. Neste trabalho é desenvolvido uma modelagem dinâmica do conversor para a realização do controle de tensão do mesmo. Além disso, são implementadas estratégias para o balanceamento do estado de carga das baterias envolvidas no sistema. São realizadas simulações computacionais vetorizadas no *software* PLECS, possibilitando fazer análise de diferentes situações e, em todas elas, observar o processo de balanceamento do estado de carga das baterias e outros parâmetros típicos como tensão e corrente das baterias.

Palavras-Chaves: Sistema de armazenamento, conversor *buck-boost* não inversor, baterias inteligentes, simulação PLECS, estado de carga.

Abstract

The high penetration of renewable energy sources in the Brazilian electrical power system has become a reality arising from the ever-increasing need to meet energy demand. However, such sources have characteristics such as intermittency, creating challenges in the electrical power system voltage and frequency control. In this context, the battery energy storage systems (BESS) stood out due to the possibility of providing ancillary services to the distribution grid and, in recent years, its use has been driven by the energy sector, electric mobility by enabling the use of second-life batteries. These batteries are discarded by this sector when they reach around 80% of their initial capacity, therefore, these still be used in stationary applications. However, the traditional architecture of a BESS has disadvantages, which are aggravated when using second-life batteries. In this way, this project proposes a new BESS architecture, which is based on the integration of non-inverter buck-boost converters and batteries, in order to remedy or mitigate the existing disadvantages in relation to the model widespread in the market. A dynamic modeling of the converter is developed to perform its voltage control. In addition, strategies are implemented to balance the state of charge of the batteries involved in the system. Vectorized computer simulations are carried out in the PLECS software, making it possible to analyze different situations and, in all of them, observe the question of balancing the state of charge and other typical parameters such as voltage and current of the batteries.

Keywords: Storage system, non-inverting buck-boost converter, smart batteries, PLECS simulation, state of charge.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Contexto e relevância	17
1.2	Sistema de armazenamento de energia por baterias	20
1.3	Objetivos.....	24
1.4	Estrutura da Monografia.....	25
2.	BATERIAS INTELIGENTES.....	26
3.	Modelagem matemática	31
3.1	Sistema investigado	31
3.2	Conversor Buck-Boost não inversor.....	31
3.3	Modelo de pequenos sinais.....	33
3.4	Ajustes dos controladores.....	37
3.4.1	Equação dos controladores por alocação de polos	39
3.5	Componentes do conversor	41
3.6	Testes das malhas de controle	42
4	Arranjo de baterias inteligentes.....	46
4.1	Modelo da bateria	46
4.2	Vetorização do modelo	47
4.3	Balanceamento do estado de carga.....	48
5	Resultados	50
5.1	Balanceamento de SOC – capacidades iguais	50
5.2	Balanceamento de SOC – capacidades distintas	54
6	Conclusões.....	57
	Referências Bibliográficas	58

Lista de Figuras

Figura 1: Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica – JUL 22.....	18
Figura 2: Tecnologias de armazenamento de energia	19
Figura 3: Projeção da demanda para baterias de íon-lítio até o ano de 2030.	21
Figura 4: Componentes de um BESS	22
Figura 5: Comparação de arquiteturas de BESS: (a) Tradicional; (b) Proposto.	23
Figura 6: Arquitetura proposta para o <i>IntellBatt</i>	26
Figura 7: Modos de operação para o conversor c.c. bidirecional. (a) Carga. (b) Descarga. (c) <i>Bypass</i> . (d) Passagem	27
Figura 8: Esquemático proposto de um BESS	29
Figura 9: Associação (série/paralelo) de baterias e conversores e conversor único.....	29
Figura 10: Arquitetura de sistema de armazenamento por baterias investigada neste trabalho.	31
Figura 11: Representação do conversor <i>buck-boost</i> conectado a uma bateria.	31
Figura 12: (a) Triangular (b) Chave S1 (c) Chave S4	32
Figura 13: Malha de controle da tensão de saída do conversor <i>buck-boost</i> não inversor.	37
Figura 14: Representação do circuito do conversor.	37
Figura 15: Simplificação do circuito do conversor.	38
Figura 16: Representação do circuito do conversor e aplicação da LKC.....	38
Figura 17: Diagrama da malha de corrente do conversor no PLECS.....	39
Figura 18: Subsistema com o controlador PI na malha de corrente	39
Figura 19: Diagrama da malha de tensão do conversor no PLECS	40
Figura 20: Subsistema com o controlador PI na malha de tensão	40
Figura 21: Gráfico de bode das funções de transferência obtidas. (a) Malha de corrente modo <i>buck</i> . (b) Malha de corrente modo <i>boost</i> . (c) Malha de tensão modo <i>buck</i> . (d) Malha de tensão modo <i>boost</i>	43
Figura 22: Comportamento da corrente na saída de cada conversor	44
Figura 23: Simulação do controle de tensão de saída com degrau de carga	45
Figura 24: Relação SOC [%] x OCV [V] da bateria LiFePO4.....	46
Figura 25: Diagrama da bateria no PLECS	47
Figura 26: Diagrama de vetorização.....	47
Figura 27: Representação do controlador mestre nas simulações	48
Figura 28: Estado de carga das baterias utilizadas	50
Figura 29: Potência processada pelo arranjo de baterias inteligentes	51

Figura 30: (a) Estado de carga de cada bateria inteligente (b) Tensão de saída em cada bateria inteligente.....	52
Figura 31: Tensão no barramento c.c.	53
Figura 32: (a) Corrente em cada bateria (b) Corrente que passa pelo indutor do conversor....	54
Figura 33: Baterias com capacidades diferentes.....	54
Figura 34: (a) Estado de carga de cada bateria inteligente (b) Tensão de saída em cada bateria inteligente.....	55
Figura 35: Tensão no barramento c.c.	56
Figura 36: (a) Corrente em cada bateria (b) Corrente que passa pelo indutor do conversor....	56

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Consumo de energia elétrica na rede apresentado em (EPE, 2021) – dados em GWh	17
Tabela 2 – Parâmetros do conversor	41
Tabela 3 – Projeto dos controladores	42
Tabela 4 – Valores das perturbações visualizadas na Figura 22.....	44
Tabela 5 – Valores das perturbações visualizadas na Figura 29.....	52

Lista de abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BCA	Arranjos de células de bateria inteligente (do inglês, <i>intelligent battery cell array</i>)
BESS	Sistemas de Armazenamento de Energia por baterias (do inglês, <i>Battery Energy Storage Systems</i>)
BMS	Sistema de gerenciamento da bateria (do inglês, <i>Battery Management System</i>)
BNEF	<i>Bloomberg New Energy Finance</i>
c.a.	Corrente alternada
c.c.	Corrente contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EMS	Sistema gestão e monitoramento (do inglês, <i>Energy Management System</i>)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
LiFePO ₄	Fosfato Lítio Ferro
LKC	Lei de <i>Kirchhoff</i> das Correntes
LKT	Lei de <i>Kirchhoff</i> das Tensões
MME	Ministério de Minas e Energia
OCV	Tensão de circuito aberto (do inglês, <i>Open Circuit Voltage</i>)
PCS	Sistema de conversão de potência (PCS, do inglês, <i>Power Conversion System</i>)
PI	Proporcional – Integral
PLECS	<i>Platform of Power Electronic Systems</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RUL	Vida útil restante (do inglês, <i>Remaining Useful Life</i>)
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMBus	Interface para troca de informações (do inglês, <i>System Management Bus</i>)

SOC	Estado de Carga (do inglês, <i>State of charge</i>)
SOH	Estado de Saúde (do inglês, <i>State of Health</i>)
UE	União Europeia
ZOH	<i>Zero – Order – Hold</i>

Lista de Símbolos

Ah_{nom}	Capacidade nominal das baterias
C	Capacitância dos capacitores
C_r	Taxa de carga
d_1 e d_2	Razões cíclicas
D_{medio}	Razão cíclica média na modelagem simplificada
$\frac{di_L}{dt}$	Varição infinitesimal da corrente no indutor em função do tempo
$\frac{dv_o}{dt}$	Varição infinitesimal da tensão no capacitor de saída em função do tempo
i	Perturbação externa de corrente
i_L	Corrente que passa pelo indutor
I_{min}	Corrente mínima na saída do conversor
$\tilde{i}_L, \tilde{v}_o, \tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \tilde{v}_b$ e \tilde{i}	Pequenas variações em relação às respectivas variáveis na modelagem de pequenos sinais
I_L, V_o, D_1, D_2, V_b e I	Valores médio das respectivas variáveis na modelagem de pequenos sinais
f_i	Faixa de passagem da malha de corrente
f_s	Frequência de comutação do conversor
f_v	Faixa de passagem para a malha de tensão
k_{ii} e k_{pi}	Ganho dos controladores para a malha de corrente
k_{iv} e k_{pv}	Ganho dos controladores para a malha de tensão
L	Indutância do indutor
Pot_{TBESS}	Potência total processada pelo BESS
P_s	Potência do conversor em estudo
R	Resistência do conversor na modelagem simplificada
R_L	Resistência do indutor

$rdct$	Redução de tempo de simulação
SOC_{init}	Estado de carga nominal
SOC_{gain}	Função de atuação do controle em função do erro obtido
S_1, S_2, S_3 e S_4	Representação de interruptores
Tol_{SOC}	Tolerância para variação do estado de carga
v_b	Tensão de cada bateria
V_{dc}	Tensão no barramento c.c.
V_{smax}	Tensão de saída máxima do conversor
V_{smin}	Tensão de saída mínima do conversor
ΔV_{max}	Desvio de tensão máximo
ΔSOC_{max}	Diferença máxima de estado de carga para a media

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e relevância

O cenário atual do sistema elétrico brasileiro é caracterizado por diversos desafios. Entre eles pode-se citar a necessidade de suprimento cada vez maior da demanda energética no país. De acordo com histórico anual de consumo nacional da rede de energia elétrica apresentado em (EPE, 2021), no Brasil setores como o residencial, industrial e comercial tem sido os grandes responsáveis pelo aumento gradativo do consumo de energia elétrica ao longo dos últimos anos.

A Tabela 1 detalha esse consumo segmentado pelas respectivas classes mencionadas. É possível observar que os três setores juntos correspondem a mais de 80% da energia elétrica consumida ao longo dos últimos 5 anos consecutivos. Nota-se também um aumento gradativo nesse consumo de energia elétrica com uma diferença de, aproximadamente, 7,5% de 2017 para 2021.

Tabela 1 – Consumo de energia elétrica na rede apresentado em (EPE, 2021) – dados em GWh

Divisão por classes	2017	2018	2019	2020	2021
RESIDENCIAL	134.368	137.915	142.411	148.173	151.253
INDUSTRIAL	167.711	170.066	167.701	166.452	182.205
COMERCIAL	88.292	88.631	92.083	82.524	87.788
TOTAL	467.475	475.764	482.516	476.569	502.567

Além disso, conforme apresentado em (CEMIG & ANEEL, 2021) os meios existentes de produção de energia enfrentam problemas novos e atuais como: tratados internacionais que visam limitar níveis de poluição, o aquecimento global, ações para redução da emissão de dióxido de carbono e a desativação de usinas nucleares com tecnologias ultrapassadas ou a não construção de novas em vários países devido aos altos riscos de acidentes nucleares com consequências graves ao meio ambiente e aos seres humanos. Sendo assim, torna-se imperativo afirmar que tais desafios têm trazido a necessidade de substituir os antigos métodos de geração de energia por novos. Nesse contexto, a penetração de fontes de energias renováveis e de outras potenciais fontes de geração distribuída estão aumentando no Brasil e no mundo.

De acordo com (Eurostat, 2021), em 2020 as fontes de energia renováveis representaram, em média, 37,5% do consumo bruto de energia elétrica da União Europeia (UE).

Suécia (56,4%), Finlândia (43,1%) e Letônia (41%) se destacam como sendo os países-membros da UE cuja energia é proveniente dessas fontes. Além disso, mais de dois terços do total de eletricidade a partir de tais fontes renováveis foram originadas da energia eólica e hídrica, representando cerca de 36% e 33% respectivamente. O terço restante da eletricidade foi gerado a partir da energia solar (14%), biocombustíveis sólidos (8%) e outras fontes renováveis (8%).

No caso do Brasil, o relatório de monitoramento do sistema elétrico apresentado pelo (Ministério de Minas e Energia, 2022) mostra que a capacidade instalada total de geração de energia elétrica no mês de julho no país atingiu 1,96 GW, incluindo geração distribuída (GD) o que representa um aumento percentual de 7% com relação ao mês anterior. Na Figura 1 a seguir é mostrado que as fontes renováveis de energia representaram cerca de 84% da capacidade instalada do mês supracitado.

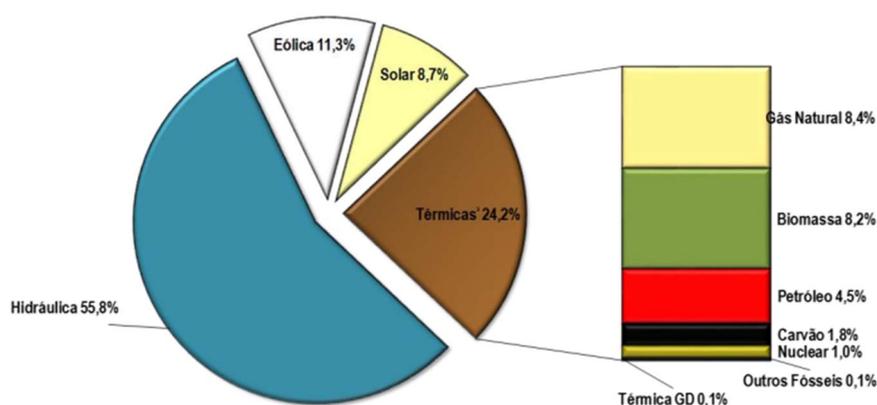


Figura 1: Matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica – JUL 22

Fonte: Adaptado da referência (Ministério de Minas e Energia, 2022)

Ainda de acordo com o documento citado a previsão para dezembro de 2024, é a entrada em operação de 28,04 GW de capacidade instalada de geração, sendo 16,32 GW (58%) de fonte solar centralizada e 7,29 GW (26%) de fonte eólica. Ou seja, a conjectura do sistema elétrico de potência (SEP) atual tem se caracterizado por essa elevada inserção de fontes alternativas renováveis de energia abordadas.

Do ponto de vista técnico, tais alternativas apresentam características como a questão da intermitência, visto que não estão disponíveis de forma constante ao longo do dia e a presença contínua de interrupções temporárias sendo essas caracterizadas por: defeitos de equipamentos, falhas nos sistemas de proteção e controle e condições meteorológicas adversas. Além do mais, em (Komarnicki, Lombardi, & Styczynski, 2017) é enfatizado que somente com

a utilização dessas fontes não se tem, por exemplo, o equilíbrio entre a oferta e demanda de energia elétrica, justamente, pela não existência de um sistema de armazenamento de energia. Consequentemente, isso gera desafios no controle da tensão e frequência do SEP.

Dessa forma, a implementação de sistema de armazenamento de energia tornou-se essencial e estratégica para sanar os problemas supracitados. Além do mais, conforme (Hu, 2017) o armazenamento de energia pode desempenhar algumas funcionalidades na rede de distribuição, sendo elas:

- Nivelamento de carga, fornecimento de energia elétrica de reserva e garantia da segurança e estabilidade da rede;
- Melhorar a qualidade de energia através da regulação de frequência/tensão;
- Melhorar a segurança e confiabilidade do fornecimento de energia;
- Suavizar as flutuações do sistema em baixas e altas frequências;

Os métodos de armazenamento de energia podem ser categorizados por vários critérios, tais como: tempo de resposta (rápido ou não), escala (pequena, média ou em larga escala) e, também, com base na forma de energia armazenada. Com isso, existem diversas alternativas tecnológicas para se armazenar energia, cada uma delas com suas particularidades (vantagens e desvantagens) e aplicações. A Figura 2 ilustra as principais tecnologias classificadas pela forma de energia armazenada.

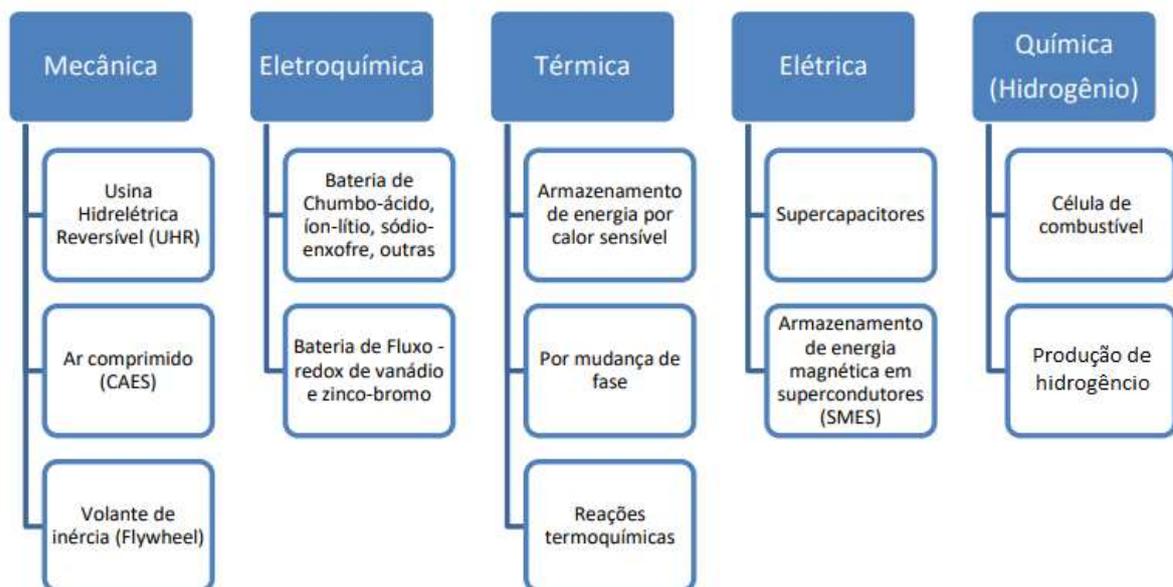


Figura 2: Tecnologias de armazenamento de energia

Fonte: Adaptado de (MassCEC, 2016)

1.2 Sistema de armazenamento de energia por baterias

O armazenamento de energia eletroquímica na forma de baterias, caracterizado em (Hesse et al, 2017) como BESS (do inglês, *Battery Energy Storage Systems*) apresentam vantagens como tempo rápido de resposta, alta eficiência, baixa auto descarga e possibilidade de expansão do sistema devido a uma estrutura modular. É ressaltado também que tais características tornam esta tecnologia fortemente competitiva quando comparada a outras formas de armazenamento de energia.

Além disso, conforme (CEMIG & ANEEL, 2021) o BESS caracteriza-se como sendo uma grande promessa associada à redução nos custos das baterias. Em conjunto, esse sistema propicia uma série de aplicações que atendem muitas das necessidades futuras previstas no tempo atual. Em suma, tais aplicações variam desde equipamentos eletrônicos portáteis como celulares e notebooks até aplicações no setor de mobilidade elétrica que teve um aumento considerável nos últimos anos.

Em se tratando do setor de mobilidade em (REID, 2016) é enfatizado que as baterias são normalmente utilizadas em veículos elétricos até atingirem aproximadamente 80% de sua capacidade de armazenamento de energia original. É válido ressaltar então que tais baterias descartadas ainda apresentam capacidade de armazenar energia e podem ser utilizadas em sistemas estacionários de armazenamento de energia. Desta ideia emerge o conceito de bateria de segunda vida.

A Figura 3 mostra uma projeção elaborada pela BNEF (do inglês, *Bloomberg New Energy Finance*) para a demanda de baterias íon-lítio a serem aplicadas em veículos elétricos. É possível observar um crescimento considerável com relação ao uso de tais baterias. Nesse sentido, as baterias de segunda vida surgem para diluir o alto custo e impacto ambiental como consequência desse uso considerável. Portanto, tais baterias se tornam uma realidade a ser viabilizada de grande interesse do mercado, postergando assim a reciclagem.

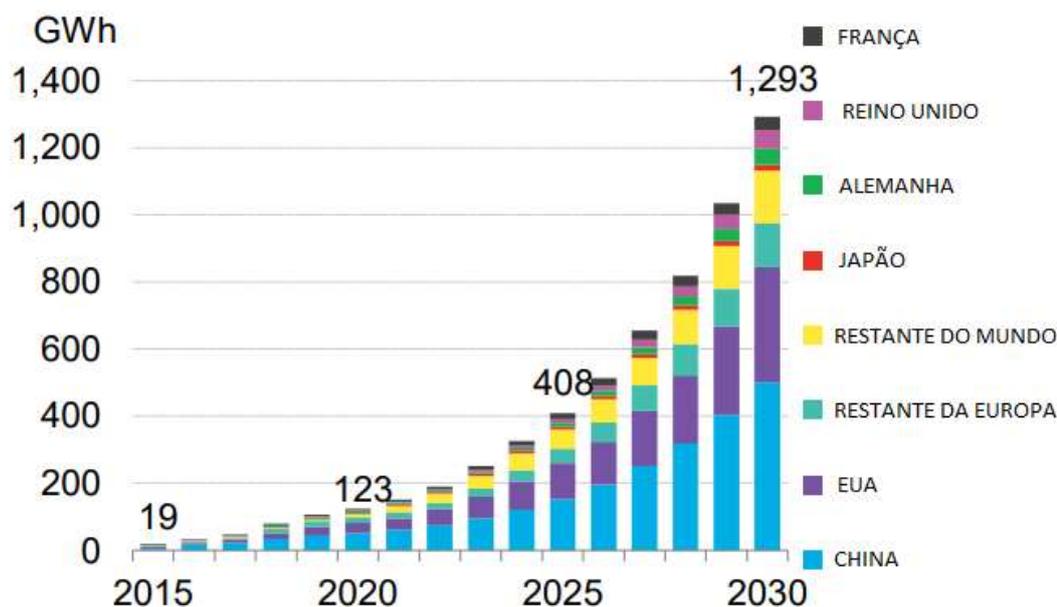


Figura 3: Projeção da demanda para baterias de íon-lítio até o ano de 2030.

Fonte: Adaptado de (BNEF, 2017)

Entretanto, há grandes desafios em reaproveitar baterias de segunda vida, visto que elas apresentam maior variabilidade e maior taxas de falha. Em (Hohmann et al, 2022) é citado a variabilidade das capacidades medidas devidos as diferentes formas de utilização dessas baterias em veículos elétricos. Além disso, tem-se a variabilidade de estado de saúde dessas baterias uma vez que os diferentes módulos de um veículo elétrico estão sujeitos a condições de temperaturas diversas.

Portanto, as baterias de segunda vida, conseqüentemente, podem apresentar características bem diferentes entre si, sendo elas: capacidade, estado de carga, estado de saúde, correntes e tensões nominais, tecnologia, químicas usadas, taxas de carga e descarga, entre outras.

É válido ressaltar que, como em qualquer tecnologia de bateria analisada, as baterias de íon de lítio mencionadas possuem algumas desvantagens que precisam ser elencadas em relação aos inúmeros benefícios supracitados. Em (RAISA, 2022) é destacado duas dessas desvantagens, sendo elas:

- Sistema de proteção/ gerenciamento de baterias necessário: Tais baterias exigem circuitos de proteção integrados de tal forma a garantir que sejam manuseadas dentro de seus limites operacionais seguros;

- Custos: Tem-se que essas baterias apresentam custos que são 40% mais caros de fabricar do que as baterias de níquel-cádmio, por exemplo. Esses altos custos também podem ser estendidos para o processo de reciclagem que varia conforme o tipo de bateria e o preço da matéria prima associada;

Além disso, em (Filho, 2017) é citado que essas baterias apresentam desempenho reduzido sob baixas temperaturas e que os encapsulamentos cilíndricos comercialmente disponíveis tipicamente costumam oferecer menor densidade de energia quando comparado também com outras tecnologias como a de níquel-cádmio.

O diagrama esquemático de um BESS é representado na Figura 4. Ele é formado pelo sistema gestão e monitoramento (EMS, do inglês, Energy Management System), por uma unidade de armazenamento e o Sistema de conversão da potência (PCS, do inglês, Power Conversion System). Conforme (Pinto, 2022) tem-se que:

- EMS: é responsável por monitorar as baterias através de sensores bem como garantir as características elétricas e térmicas. Além disso faz todo o monitoramento do BESS em seu maior nível hierárquico;
- A bateria possui uma unidade básica de armazenamento que é denominado célula. A associação série e/ou paralelo de tais células caracteriza-se como módulo. O sistema de gerenciamento da referida bateria (BMS, do inglês, *Battery Management System*) faz o monitoramento de parâmetros como: temperatura, corrente, tensão e estado de carga. Para a manutenção da proteção do sistema, todos esses elementos mencionados são instalados em caixas de junção, sendo que o conjunto de tais caixas formam o chamado Rack de baterias;
- PCS: é caracterizado por um conversor eletrônico que realiza a conversão da corrente contínua (c.c.) das baterias em corrente alternada (c.a.).

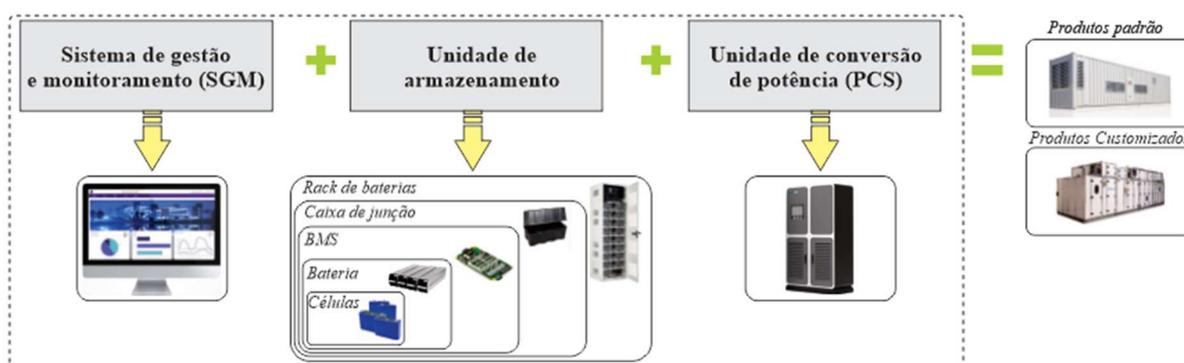


Figura 4: Componentes de um BESS

Fonte: Adaptado de (Pinto, 2022)

A estrutura tradicionalmente empregada nos BESS utilizados na indústria em baixa tensão é detalhada na Figura 5 (a). Trata-se de um modelo que apresenta algumas desvantagens que podem ser potencializadas quando baterias de segunda vida são utilizadas. Tais desvantagens são listadas a seguir:

- 1) As baterias geralmente são conectadas em série, o que significa que elas devem ser carregadas com a mesma corrente;
- 2) A tensão de entrada no sistema de conversão de potência está relacionada com o estado de carga da bateria e isso, de certa forma, dificulta o projeto do referido sistema, que deve ser capaz de operar conectado à rede em frente a essa variação que pode alcançar 30% em algumas químicas, conforme apresentado em (Andrea, 2010);
- 3) Existência de funções duplicadas. Em determinadas soluções comerciais, os conversores c.c./c.c. são aplicados no PCS e no BMS. Isso, de certa forma, pode impactar no custo e na eficiência do sistema;
- 4) O sistema não é tolerante a falhas, visto que uma falha em uma única bateria pode ocasionar a perda das demais. Trata-se uma limitação do próprio modo de conexão em que as baterias estão dispostas.
- 5) Mesmo em situações em que o inversor é desligado tem-se uma elevada tensão no barramento c.c., que pode ser tão alta quanto 1500 V em sistemas comerciais. Neste caso, existem cuidados adicionais em manutenção e riscos de formação de arcos elétricos de alta intensidade.

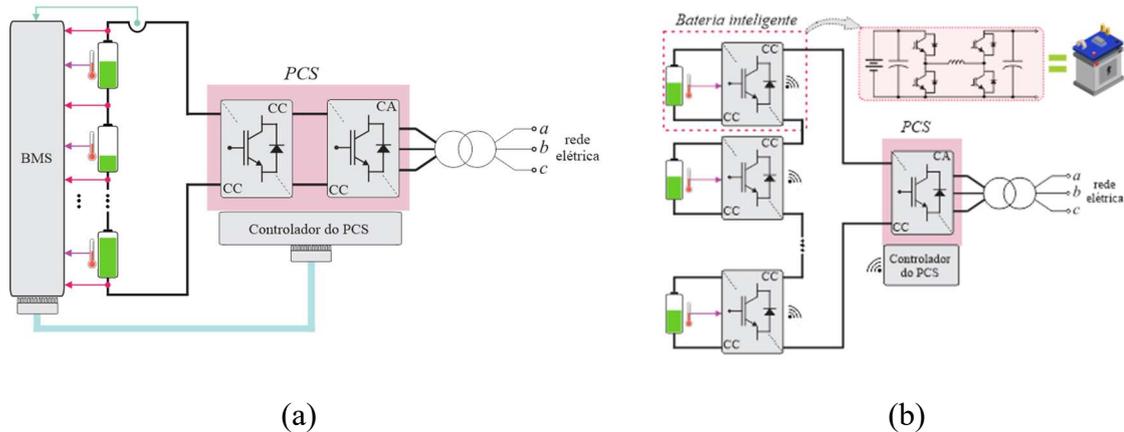


Figura 5: Comparação de arquiteturas de BESS: (a) Tradicional; (b) Proposto.

Neste contexto, este projeto propõe a integração de um conversor eletrônico em cada bateria. Esse conjunto é conhecido como "bateria inteligente", como mostrado na Figura 5 (b), e tem como foco inicial sanar as desvantagens existentes na arquitetura tradicional em destaque.

Sendo assim, o modelo proposto resolve os problemas citados devido as seguintes vantagens:

- Aumento da flexibilidade: O balanceamento do estado de carga das baterias é facilitado uma vez que, as correntes de carga/descarga não precisam ser as mesmas em todas elas. Com isso, a utilização de baterias de diferentes capacidades ou até mesmo químicas diferentes torna-se possível;
- Tensão do barramento c.c. é constante: As baterias inteligentes podem ser controladas de forma que a tensão do barramento de corrente contínua permanece constante. Dessa forma, permite-se utilizar um PCS com um único estágio de conversão, contribuindo para o aumento da eficiência global do sistema;
- Simplificação: No modelo apresentado as funções atribuídas ao BMS e ao PCS são partilhadas entre si, o que resulta em uma simplificação do BESS;
- Confiabilidade e segurança: Um grande destaque da proposta é a operação tolerante a falhas, uma vez que uma bateria com defeito pode ser removida do circuito principal por meio de um by-pass contido no conversor c.c. /c.c.;
- Por fim, quando o PCS estiver desligado, as baterias inteligentes podem entrar em um modo *stand-by* e reduzir a tensão no barramento de corrente contínua, aumentando a segurança durante eventuais inspeções ou manutenções.

1.3 Objetivos

O objetivo principal é realizar a simulação de um sistema de baterias inteligentes empregando um conversor *buck boost* não-inversor. Com isso espera-se contornar a maioria das limitações existentes atualmente devido às vantagens listadas anteriormente. Como objetivos específicos, podem-se citar:

- Desenvolvimento de uma estratégia de controle para o BESS mencionado nesse trabalho;
- Realizar a modelagem dinâmica do conversor buck-boost não inversor assim como o projeto dos controladores;
- Implementação de simulação computacional no *software* PLECS do conjunto bateria + conversor buck-boost não inversor. Trata-se da construção de um modelo de

simulação vetorizado, sendo possível analisar diferentes cenários com o mesmo arquivo de simulação;

1.4 Estrutura da Monografia

Essa monografia foi estruturada em 6 capítulos sendo apresentado um breve resumo sobre eles nesta seção:

- O capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica relacionada ao conceito de baterias inteligentes. São apresentadas as contribuições de diversos trabalhos nessa temática que possibilitaram diferentes contribuições para a sociedade;
- O capítulo 3 apresenta a modelagem matemática da bateria inteligente. São descritas as simplificações a serem utilizadas nas simulações, além disso é desenvolvido o projeto de controle e, por fim, é feita a validação do uso do modelo simplificado;
- O capítulo 4 apresenta a modelagem dinâmica das baterias que serão utilizadas. Além disso, é explicada a questão da simulação vetorizada e o controle desenvolvido para o balanceamento do estado de carga;
- O capítulo 5 apresenta os resultados com base em dois cenários que foram analisados durante as simulações. É feita uma análise comparativa entre ambos;
- Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões a respeito desse estudo e são propostas possibilidades de melhorias para o referido projeto desenvolvido.

2. BATERIAS INTELIGENTES

Historicamente, os primeiros desenvolvimentos sobre as chamadas baterias inteligentes ocorreram por volta do início dos anos 2000. Nessa época, conforme (Chatzakis et al, 2003) já existiam um grande número de soluções integradas utilizando baterias em aplicações de baixa potência como, por exemplo, fonte de alimentação ininterrupta. Associado a isso, a limitação existente era em aplicações de alta potência uma vez que as tecnologias disponíveis não resolviam problemas típicos como desconexão de células de baterias em situações de mau funcionamento e capacidade de equalização da energia durante o processo de carga/descarga. Ao longo dos anos, diferentes trabalhos foram elaborados com relação as baterias inteligentes. Em cada projeto foram feitas abordagens diversificadas sobre o tópico e, conseqüentemente, diferentes contribuições para a sociedade foram alcançadas nesse quesito.

Em (Mandal et al, 2008) foi desenvolvido um projeto na qual a vida útil e a segurança da bateria tiveram destaque, sendo o tópico avaliado o sistema de gerenciamento da bateria inteligente (BMS). É abordado uma tecnologia denominada *IntellBatt* que se caracteriza por ser um novo *design* de arranjos de células de bateria (BCA, do inglês, *intelligent battery cell array*). Esse modelo utiliza múltiplas células geridas por uma única unidade de gestão que atua, por exemplo, no processo de descarga suave e eficiente garantindo o aumento da vida útil requerida para a bateria. A Figura 6 ilustra a arquitetura desse modelo.

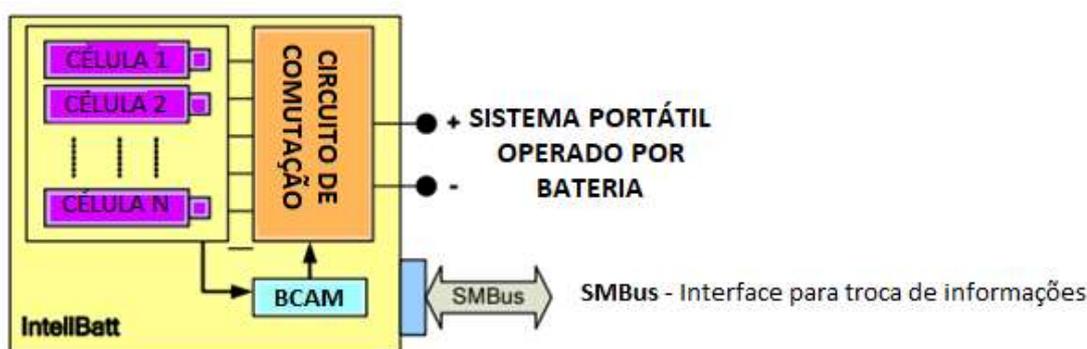


Figura 6: Arquitetura proposta para o *IntellBatt*

Fonte: Adaptado de (Mandal et al, 2008)

De acordo com (Taesic Kim et al, 2010) várias topologias conforme apresentadas na Figura 6 foram desenvolvidas no decorrer dos anos. No referido trabalho é implementado uma melhoria da abordagem citada anteriormente e, sendo assim, estendendo as contribuições desse estudo como o aproveitamento maior da capacidade das baterias, sendo proposto também uma operação tolerante a falhas.

Já em (Kim, 2012) o foco principal do trabalho foi na estimativa do estado de saúde de baterias (SOH). É citado que várias técnicas de balanceamento de tensão já foram desenvolvidas até então e usadas no sistema de gerenciamento da bateria com o objetivo de proteger a mesma contra falhas abruptas e, conseqüentemente, contribuindo para o aumento da vida útil. No entanto, como as características eletroquímicas em cada célula são distintas entre si, tem-se que o balanceamento de tensão não garante o balanceamento do estado de carga (SOC, do inglês, *State of Charge*), o que pode ser prejudicial para o conjunto de baterias. Nesse contexto, são propostos e validados experimentalmente dois processos de triagem com o intuito de agrupar células com características similares de capacidade e resistência contribuindo então para um balanceamento de SOC mais eficiente.

Pode-se afirmar que, tradicionalmente, o conceito de bateria inteligente está relacionado com a existência de um conjunto de baterias integradas com uma topologia de conversor desempenhando uma função mínima de indicar o estado de carga de todas as baterias envolvidas. Em (Ye Li & Yehui Han, 2016) é descrito uma extensão do entendimento dessa tecnologia fazendo uso de um conversor síncrono *c.c./c.c. boost* bidirecional. Para o modelo em estudo foi apresentada a possibilidade de operação em 4 modos, sendo eles: Carga, descarga, desvio (*by-pass*) e passagem (*pass-through*). As atribuições referentes a cada modo são:

- Carga: permitir o fluxo de energia da bateria para a carga;
- Descarga: permitir o fluxo no sentido reverso com o objetivo de carregar as baterias;
- Desvio: Desconectar uma célula sem interromper a passagem de corrente pela série;
- Passagem: Conectar a célula de bateria diretamente à série através de caminho de baixas perdas e alta eficiência.

A Figura 7 a seguir mostra o esquemático desses modos de operação do conversor.

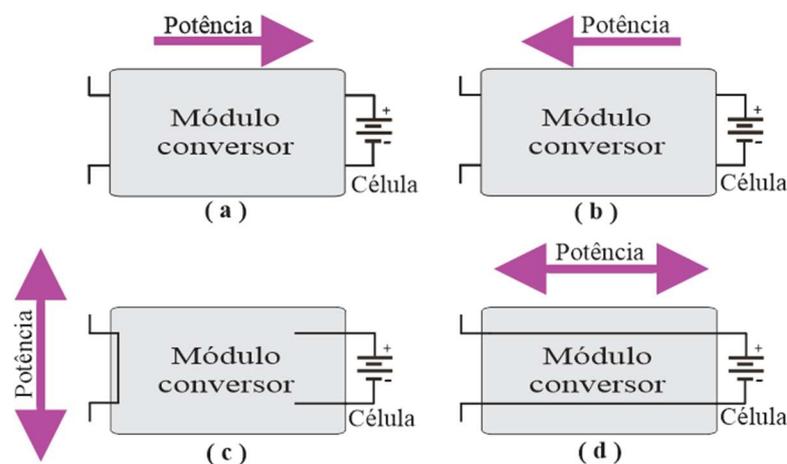


Figura 7: Modos de operação para o conversor c.c. bidirecional. (a) Carga. (b) Descarga. (c) Bypass. (d) Passagem

Fonte: Adaptado de (Ye Li & Yehui Han, 2016)

Uma das principais vantagens mencionadas nessa aplicação está relacionada com a questão do aprimoramento da confiabilidade do sistema uma vez que é possível nessa situação contornar as células defeituosas mantendo o restante do sistema em pleno funcionamento. Uma desvantagem é a utilização de um conversor que só permite elevar a tensão de saída das baterias. Isto, de certa forma, é um fator limitante para as variações máximas de capacidade entre as células do BESS.

É válido ressaltar também que diferentes topologias de conversores integrados a baterias podem ser utilizadas. Em (Khanaki et al, 2019) é feita uma análise comparativa de tais topologias usualmente empregadas, sendo elas: *boost* (elevador de tensão), *buck* (abaixador de tensão) e *buck-boost* tradicional (abaixador-elevador de tensão com inversão de polaridade). A comparação inclui métricas como o número máximo de células, número de módulos com e sem redundância, ciclo de trabalho e número de elementos. Para isso, foram levados em consideração requisitos do conversor para operação da bateria nos modos de carga/descarga, equilíbrio de carga, desvio e passagem. Com os resultados obtidos nas simulações os autores enfatizam que todos os conversores abordados são todos igualmente aplicáveis, levando-se em consideração suas especificações e características particulares.

Em suma, pode-se afirmar que as topologias *buck-boost* apresentam uma maior flexibilidade, uma vez que o conversor é capaz de operar com tensões de saída maiores, menores ou iguais a tensão nos terminais da bateria. Em se tratando dessa topologia, existem duas configurações possíveis: a inversora e a não inversora. Segundo (Callegaro et al, 2019), a configuração não inversora se destaca pela sua versatilidade, estrutura básica, alta eficiência, alta densidade de potência e alcança maiores frequências de comutação.

Recentemente, (Teodorescu et al, 2021) revisita o conceito de bateria inteligente e a indica como uma tecnologia que combina eletrônica de potência avançada, comunicação sem fio e inteligência artificial. O objetivo principal é desenvolver a nova geração de baterias para os mercados de transporte e armazenamento em rede. É enfatizado também que esses grandes avanços da eletrônica de potência aplicada, principalmente, em veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia propiciaram ainda mais o interesse do mercado nessa tecnologia de baterias supracitadas.

No referido trabalho são utilizadas baterias integradas com um conversor em meia ponte, sendo possível inserir ou remover tais baterias dos circuitos de tal forma que possa ser feito o balanceamento do estado de carga da bateria. A comunicação do controlador seguidor com o controlador mestre é baseada em protocolo de comunicação sem fio (do inglês, *wireless communication*). A estrutura de tal bateria inteligente é representada na Figura 8 a seguir.

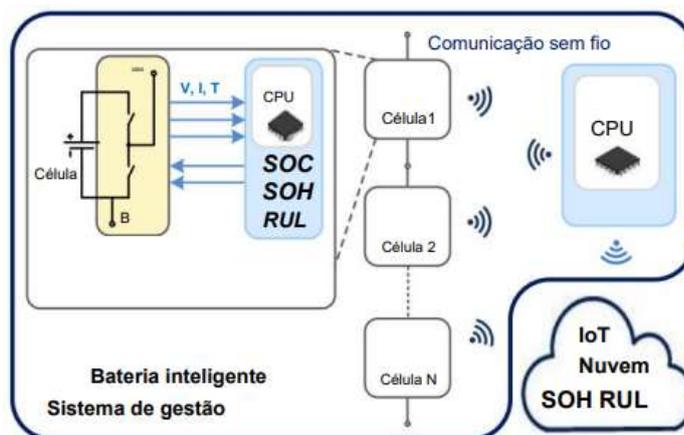


Figura 8: Esquemático proposto de um BESS

Fonte: Adaptado de (Teodorescu et al, 2021)

O controlador seguidor faz o monitoramento de parâmetros como tensão (V), corrente (I) e temperatura (T). Por outro lado, o controlador mestre é responsável por estimar o estado de saúde da bateria (SOH, do inglês, *State of Health*), fazer previsão da vida útil restante da bateria (RUL, do inglês, *Remaining Useful Life*), fazer balanceamento do SOC e SOH e, bem como, o controle de vida útil do sistema como um todo. A limitação associada nesse estudo é o fato de que a tensão do barramento c.c. não se mantém constante uma vez que se tem uma variação de acordo com o número de baterias inseridas no circuito e com o estado de carga.

Já em (Maia et al, 2022) é citado a utilização de um conversor c.c./c.c. bidirecional de dois estágios que é dito ser totalmente controlado por baterias. Ao invés de conectar as baterias diretamente entre si, é proposta uma associação (série/paralelo) entre os conversores de potência e tais baterias de modo a atender as necessidades de potência e tensão requisitadas. O uso de dois estágios faz com que seja permitido o fluxo de potência, através do controle de tensão/corrente, por baterias nas situações de carga e descarga. O esquemático do conjunto utilizado é apresentado na Figura 9:

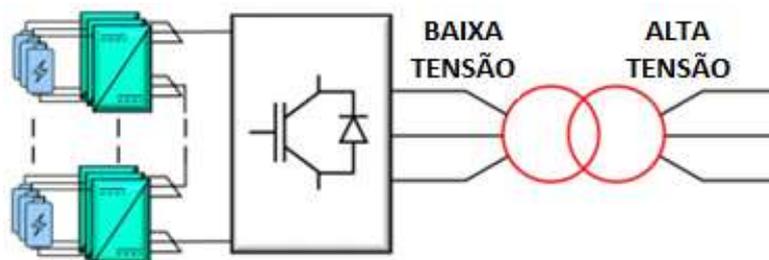


Figura 9: Associação (série/paralelo) de baterias e conversores e conversor único

Fonte: Adaptado de (Maia et al, 2022)

A contribuição do trabalho citado na figura anterior se consolida como sendo uma alternativa para o BESS baseada em uma nova estratégia de controle para o conversor *buck-boost* não inversor, bidirecional e de dois estágios. Com essa estratégia as definições do fluxo de potência podem ser definidas por meio desse controle da tensão/corrente durante a operação, sendo levados em consideração as condições da bateria em tempo real.

Isso, de certa forma, prolonga a vida útil do sistema e, conseqüentemente, fornece energia despachável de qualidade aumentando a confiabilidade e a rentabilidade. É válido ressaltar a questão da flexibilidade para se utilizar, nesse caso, diferentes tecnologias de baterias com uma ampla faixa de degradação. Isso possibilita a modernização de plantas operacionais futuramente e, sem dúvida, construir novos sistemas focados em baterias de segunda vida.

Nessa monografia o conceito de bateria inteligente teve seu enfoque com base na topologia de conversor utilizada, sendo essa o conversor *buck-boost* não inversor. Para a implementação do BESS as saídas de cada bateria inteligente são conectadas em série para constituir o barramento de corrente contínua. Nessa situação a tensão do barramento c.c. é compartilhada entre as baterias ativas, cujas tensões de saída podem ser diferentes. Como uma possibilidade, para fins de controle e configuração, os conversores c.c. /c.c. podem se comunicar com o controlador mestre por meio de um protocolo de comunicação sem fio, similar ao que foi apresentado por (Teodorescu et al, 2021) ou tal comunicação pode ser através de fios também.

3. Modelagem matemática

3.1 Sistema investigado

A Figura 10 ilustra a representação da arquitetura geral desse sistema investigado. O referido sistema é composto por baterias inteligentes em cascata. Além disso, é utilizado a representação de um modelo do PCS que se comporta como uma fonte de corrente em grande parte da operação. O PCS atua tanto no processo de carga quanto de descarga do conjunto de baterias e, com isso, impõe desafios para o sistema como balanceamento de estado de carga de todas as baterias.

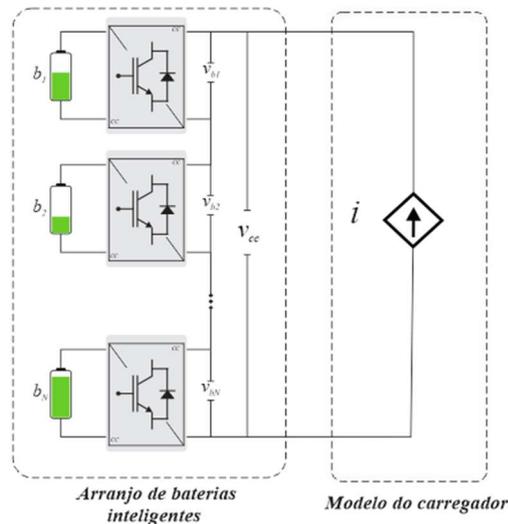


Figura 10: Arquitetura de sistema de armazenamento por baterias investigada neste trabalho.

3.2 Conversor Buck-Boost não inversor

A Figura 11 a seguir mostra uma bateria integrada a um conversor c.c. /c.c. *buck-boost* não inversor. A fonte de corrente (i) representa o consumo de potência na saída de cada bateria inteligente.

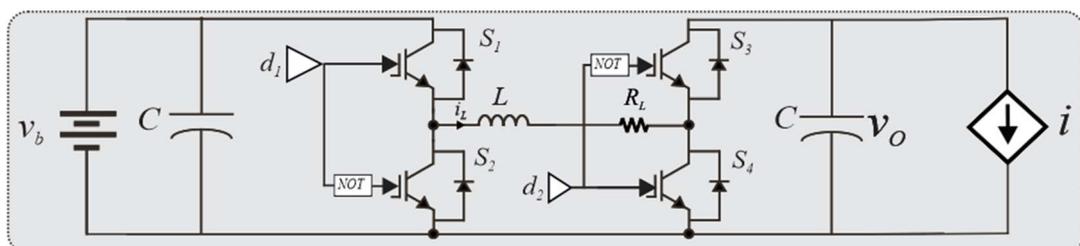


Figura 11: Representação do conversor *buck-boost* conectado a uma bateria.

O funcionamento do modulador PWM é representado na Figura 12 a seguir:

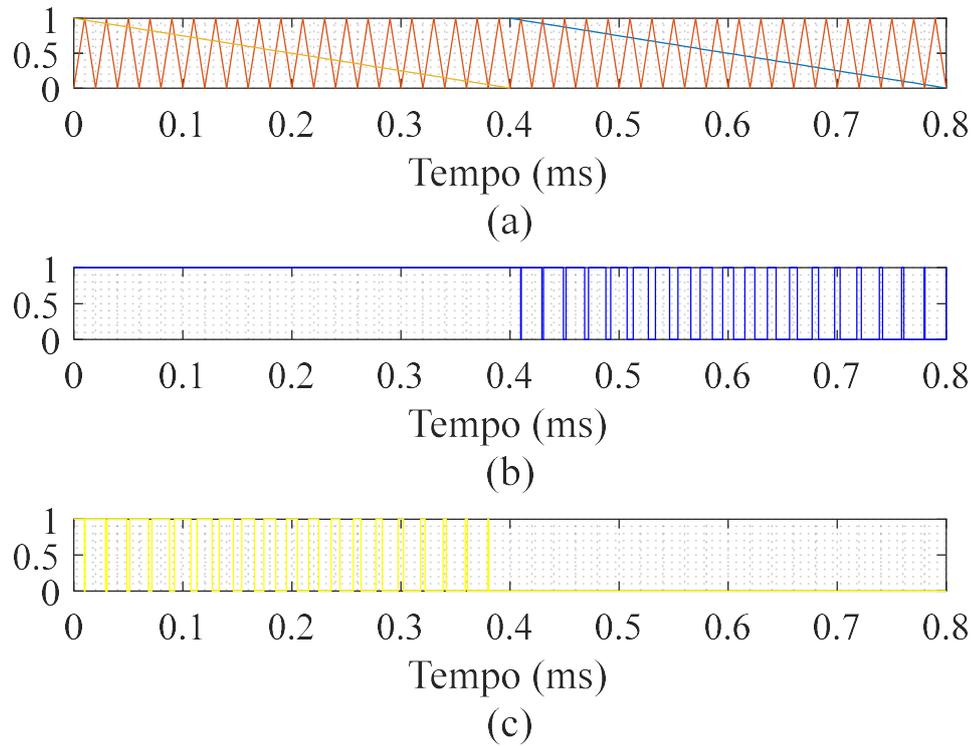


Figura 12: (a) Triangular (b) Chave S_1 (c) Chave S_4

No modo de operação *buck-boost* o conversor opera tanto no modo abaixador como elevador de tensão, isto é, a tensão de saída do conversor poderá tanto ser superior ou inferior à tensão de entrada. Neste modo, os interruptores S_1 , S_2 , S_3 e S_4 são comutados de acordo com o valor das razões cíclicas d_1 e d_2 .

As equações de estado médio do ciclo de comutação para o estágio de potência do conversor são dadas por:

$$d_1 v_b - L \frac{di_L}{dt} - R_L i_L = (1 - d_2) v_o, \quad (1)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = i_L (1 - d_2) - i. \quad (2)$$

Rearranjando as equações acima e fazendo as devidas manipulações tem-se que:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{(1 - d_2)}{L} v_o - \frac{R_L}{L} i_L + \frac{d_1}{L} v_b, \quad (3)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{(1 - d_2)}{C} i_L - \frac{1}{C} i, \quad (4)$$

onde v_o é a tensão no capacitor de saída do conversor a ser controlada e i_L é a corrente no indutor, ambas são variáveis de estado do conversor. Note que a tensão da bateria (v_b) e a fonte de corrente (i) são entradas do sistema.

3.3 Modelo de pequenos sinais

Tem-se que o modelo do conversor obtido anteriormente é dito ser não-linear visto que nas equações aparece de forma explícita o produto da tensão do capacitor, bem como da corrente de saída com as razões cíclicas d_1 e d_2 . O objetivo dessa seção é linearizar este modelo em torno de um ponto de operação especificado como sendo a corrente nominal do sistema.

Considerando pequenas variações ao redor do ponto a ser linearizado a corrente no indutor e a tensão de saída podem ser então definidas pelas expressões:

$$i_L = I_L + \tilde{i}_L, \quad (5)$$

$$v_o = V_o + \tilde{v}_o. \quad (6)$$

Pode-se afirmar que as pequenas variações causadas em ambas as variáveis citadas anteriormente, de certa forma, afetam outras variáveis do conversor. Considerando então que essas pequenas variações ocorrem em d_1 , d_2 , v_b e i temos:

$$d_1 = D_1 + \tilde{d}_1, \quad (7)$$

$$d_2 = D_2 + \tilde{d}_2, \quad (8)$$

$$v_b = V_b + \tilde{v}_b, \quad (9)$$

$$i = I + \tilde{i}. \quad (10)$$

onde \tilde{d}_1 , \tilde{d}_2 e \tilde{v}_b ocorrem em torno do ponto de linearização do conversor e \tilde{i} se caracteriza por ser uma perturbação externa do sistema. As variáveis D_1 , D_2 , V_b , I_L , V_o e I são referentes ao ponto linearizado. Dessa forma, o modelo de pequenos sinais obtém-se substituindo as equações (7) – (10) nas equações do modelo médio em (3) e (4).

Sendo assim, as equações de estado do modelo linear de pequenos sinais são dadas por:

$$\frac{d\tilde{i}_L}{dt} = -\frac{(1-D_2)}{L}\tilde{v}_o - \frac{R_L}{L}\tilde{i}_L + \frac{V_b}{L}\tilde{d}_1 + \frac{V_o}{L}\tilde{d}_2 + \frac{D_1}{L}\tilde{v}_b, \quad (11)$$

$$\frac{d\tilde{v}_o}{dt} = \frac{(1-D_2)}{C}\tilde{i}_L - \frac{I_L}{C}\tilde{d}_2 - \frac{1}{C}\tilde{i}. \quad (12)$$

Na forma matricial temos que:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\tilde{v}_o}{dt} \\ \frac{d\tilde{i}_L}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-D_2}{C} \\ -\frac{1-D_2}{L} & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{v}_o \\ \tilde{i}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{I_L}{C} & 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{V_b}{L} & \frac{V_o}{L} & \frac{D_1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{d}_1 \\ \tilde{d}_2 \\ \tilde{v}_b \\ \tilde{i} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Genericamente, as equações de espaço de estado são representadas conforme apresentado na equação (14):

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{u}, \quad (14)$$

Onde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-D_2}{C} \\ -\frac{1-D_2}{L} & -\frac{R_L}{L} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{I_L}{C} & 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{V_b}{L} & \frac{V_o}{L} & \frac{D_1}{L} & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação representada em (14) tem-se que:

$$\tilde{x}(s) = (sI - A)^{-1}B\tilde{u}(s). \quad (17)$$

O formato matricial mostrado em (13) pode ser então reescrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \tilde{v}_o \\ \tilde{i}_L \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} s & -\frac{1-D_2}{C} \\ \frac{1-D_2}{L} & s + \frac{R_L}{L} \end{bmatrix}^{-1}}_{\text{(a)}} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{I_L}{C} & 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{V_b}{L} & \frac{V_o}{L} & \frac{D_1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{d}_1 \\ \tilde{d}_2 \\ \tilde{v}_b \\ \tilde{i} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

A obtenção da matriz inversa assinalada por (a) na equação acima pode ser obtida considerando que:

$$(M)^{-1} = \frac{1}{\det(M)} \text{adj}(M). \quad (19)$$

Onde M é uma matriz genérica qualquer e $\text{adj}(M) = (M^{cof})^T$, ou seja, é caracterizada como sendo a transposta da matriz de cofatores.

Dessa forma obtêm-se que:

$$\det(a) = (s) \left(s + \frac{R_L}{L} \right) - \left[-\frac{(1 - D_2)^2}{LC} \right]. \quad (20)$$

Fazendo as devidas manipulações algébricas tem-se que:

$$\det(a) = s^2 + \left(\frac{R_L}{L} \right) s + \frac{(1 - D_2)^2}{LC}, \quad (21)$$

$$\det(a) = \frac{LCs^2 + (CR_L)s + (1 - D_2)^2}{LC}, \quad (22)$$

$$k = \frac{1}{\det(a)} = \frac{LC}{LCs^2 + (CR_L)s + (1 - D_2)^2}. \quad (23)$$

Portanto:

$$k = \frac{1}{\det(a)} = \frac{\frac{LC}{(1 - D_2)^2}}{\frac{LC}{(1 - D_2)^2} s^2 + \frac{(CR_L)}{(1 - D_2)^2} s + 1}. \quad (24)$$

Voltando em (18):

$$\begin{bmatrix} \widetilde{v}_o \\ \widetilde{i}_L \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} s + \frac{R_L}{L} & \frac{1 - D_2}{C} \\ -\frac{1 - D_2}{L} & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{I_L}{C} & 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{V_b}{L} & \frac{V_o}{L} & \frac{D_1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{d}_1 \\ \widetilde{d}_2 \\ \widetilde{v}_b \\ \widetilde{i} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \widetilde{v}_o \\ \widetilde{i}_L \end{bmatrix} = k[N] \begin{bmatrix} \widetilde{d}_1 \\ \widetilde{d}_2 \\ \widetilde{v}_b \\ \widetilde{i} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Sendo:

$$[N] = \begin{bmatrix} \left(\frac{1 - D_2}{LC} \right) V_b & (-1) \left(s + \frac{R_L}{L} \right) \left(\frac{I_L}{C} \right) + \frac{(1 - D_2)}{LC} V_o & \frac{(1 - D_2) D_1}{LC} & \left(-\frac{1}{C} \right) \left(s + \frac{R_L}{L} \right) \\ (s) \frac{V_b}{L} & (s) \left(\frac{V_o}{L} \right) + \left(\frac{1 - D_2}{L} \right) \left(\frac{I_L}{C} \right) & (s) \frac{D_1}{L} & \frac{1 - D_2}{LC} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Portanto, as seguintes funções de transferência são obtidas:

$$\frac{\widetilde{v}_o}{\widetilde{d}_1} = \frac{\left(\frac{V_b}{(1-D_2)}\right)}{\frac{LC}{(1-D_2)^2}s^2 + \frac{(CR_L)}{(1-D_2)^2}s + 1}, \quad (28)$$

$$\frac{\widetilde{v}_o}{\widetilde{d}_2} = -\frac{\left(\frac{R_L I_L - (1-D_2)V_o}{(1-D_2)^2}\right) \left(s \frac{I_L L}{R_L I_L - (1-D_2)V_o} + 1\right)}{\frac{LC}{(1-D_2)^2}s^2 + \frac{(CR_L)}{(1-D_2)^2}s + 1}, \quad (29)$$

$$\frac{\widetilde{i}_L}{\widetilde{d}_1} = \frac{\left(\frac{CV_b}{(1-D_2)^2}\right)s}{\frac{LC}{(1-D_2)^2}s^2 + \frac{(CR_L)}{(1-D_2)^2}s + 1}, \quad (30)$$

$$\frac{\widetilde{i}_L}{\widetilde{d}_2} = \frac{\left(\frac{I_L}{(1-D_2)}\right) \left(s \frac{CV_o}{(1-D_2)I_L} + 1\right)}{\frac{LC}{(1-D_2)^2}s^2 + \frac{(CR_L)}{(1-D_2)^2}s + 1}. \quad (31)$$

Por fim, a obtenção de $G_{v_i} = \frac{v_o(s)}{i_L(s)}$ é feita para cada um dos modos de operação do conversor. Para o modo *buck* tem-se que:

$$\frac{\widetilde{V}_{o1}}{\widetilde{I}_{L1}} = \frac{1-D_2}{Cs}. \quad (32)$$

Analogamente, para o modo *boost* tem-se que:

$$\frac{\widetilde{V}_{o2}}{\widetilde{I}_{L2}} = -\frac{\left(\frac{R_L I_L - (1-D_2)V_o}{(1-D_2)}\right) \left(s \frac{I_L L}{R_L I_L - (1-D_2)V_o} + 1\right)}{I_L \left(s \frac{CV_o}{(1-D_2)I_L} + 1\right)}. \quad (33)$$

3.4 Ajustes dos controladores

O controle local do sistema de baterias inteligentes é baseado na regulação da tensão de saída do conversor. Neste caso, baterias que necessitem fornecer mais potência aumentam sua tensão de saída enquanto baterias que fornecem menos potência reduzem sua tensão de saída. A malha de controle da tensão no capacitor de saída do conversor é dada conforme a Figura 13 a seguir, que é um controle em modo corrente clássico.

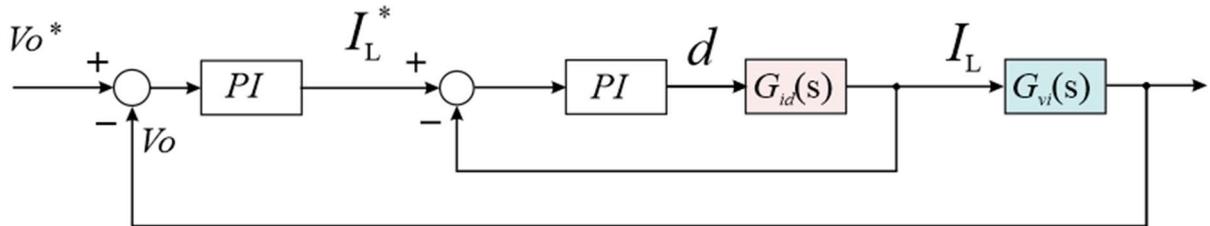


Figura 13: Malha de controle da tensão de saída do conversor *buck-boost* não inversor.

Devido à complexidade das equações obtidas anteriormente, a análise de qualquer técnica para projetar o controlador PI (Proporcional, Integral) pode ser facilitada levando em consideração a modelagem simplificada para as equações. De acordo com (Rech, 2018) o sistema de controle irá variar a razão cíclica de tal forma a manter uma tensão de saída constante mesmo estando com uma tensão de entrada variável. A presença do parâmetro razão cíclica nas equações completas faz-se necessário verificar em que ponto de operação o modelo é mais próximo do real uma vez que a razão cíclica é um parâmetro não linear.

Nesse contexto, a partir de uma determinada frequência, suficientemente alta, o efeito da mudança da razão cíclica torna-se desprezível. Dessa forma, é possível fazer uso de um modelo simplificado que considera o capacitor de saída e a carga como sendo uma fonte de tensão.

Sendo assim, para a obtenção das funções simplificadas, inicialmente, pode ser feita a análise tendo como base o circuito do conversor no modo de operação *boost* apresentado na Figura 14 abaixo:

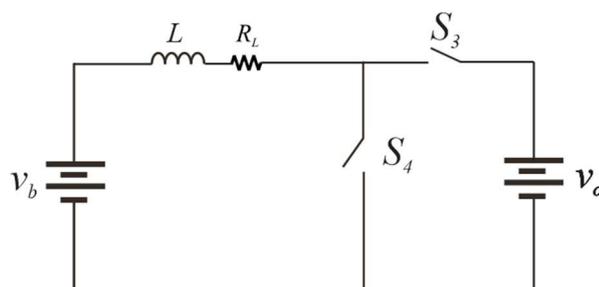


Figura 14: Representação do circuito do conversor.

Considerando a hipótese de que a tensão no capacitor de saída do conversor está controlada em V_o tem-se o circuito representado na Figura 15 a seguir. Sendo aplicada a Lei de *Kirchhoff* das tensões (LKT) em seguida.

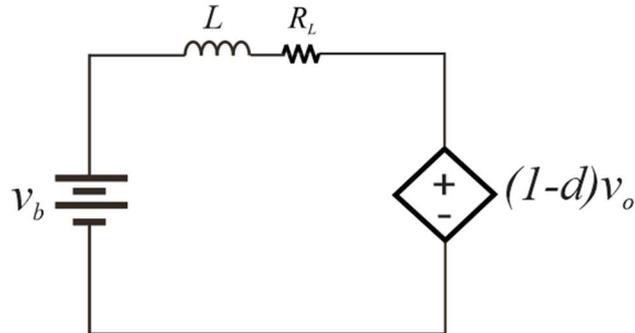


Figura 15: Simplificação do circuito do conversor.

$$V_b - (Ls + R_L)I = D_{medio}V_o, \quad (34)$$

$$V_b - (Ls + R_L)I = (1 - d)V_o, \quad (35)$$

$$-(V_b - V_o) + (Ls + R_L)I = dV_o, \quad (36)$$

$$G_{id} = \frac{V_o}{Ls + R_L}. \quad (37)$$

De forma análoga, considerando também o modo de operação *boost* e, agora, a hipótese de que a corrente presente no indutor é controlada em I_L tem-se a seguinte representação simplificada mostrada na Figura 16 adiante. Sendo aplicado a Lei de *Kirchhoff* das correntes (LKC) em seguida.

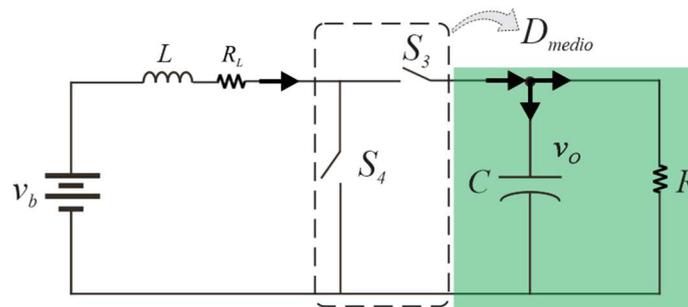


Figura 16: Representação do circuito do conversor e aplicação da LKC

$$D_{medio}I_L - C \frac{dv_o}{dt} - \frac{v_o}{R} = 0, \quad (38)$$

$$D_{medio}I_L = \left(Cs + \frac{1}{R} \right) v_o, \quad (39)$$

$$G_{vi} = \frac{D_{medio}}{Cs + \frac{1}{R}}. \quad (40)$$

3.4.1 Equação dos controladores por alocação de polos

De acordo com (Michel, 2010) muitas das propriedades dos sistemas de controle estão diretamente relacionadas com a localização dos polos. O método de alocação de polos consiste em modelar um controlador, alocando o zero do mesmo, que possua uma resposta em malha fechada e que atenda aos requisitos de determinada planta. Ou seja, através de simplificações no modelo devem-se se posicionar os polos do sistema em locais do plano s que atendam a diversos requisitos e parâmetros como, por exemplo, critérios de sobressinal e tempo de acomodação.

- **Malha de corrente:** O objetivo da malha de corrente do controlador é fazer com que a corrente de saída siga os valores estimados na corrente de referência. A representação do diagrama da malha de corrente no *software* PLECS está apresentada na Figura 17 e o subsistema com o controlador PI na Figura 18. O *output* mostrado é um sinal de tensão que quando normalizado obtêm-se a razão cíclica.

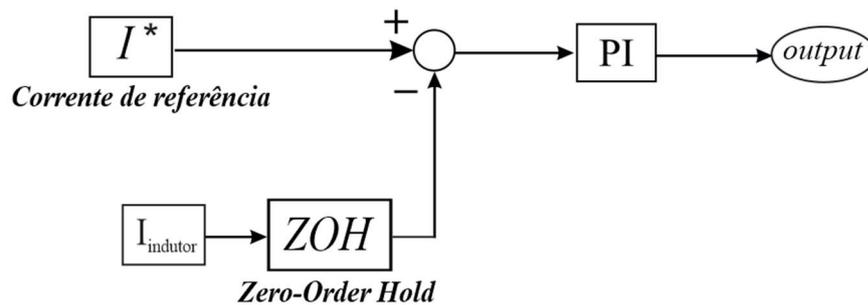


Figura 17: Diagrama da malha de corrente do conversor no PLECS

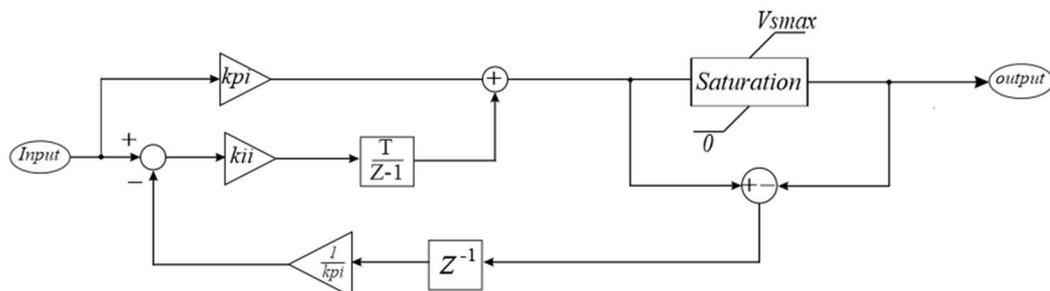


Figura 18: Subsistema com o controlador PI na malha de corrente

Dessa forma, considerando a faixa definida para a malha de corrente descrita na equação (41) o ganho do controlador obtido com base na alocação de polos é dado por:

$$f_i = \frac{f_s}{20}, \quad (41)$$

$$k_{pi} = 2\pi f_i L, \quad (42)$$

$$k_{ii} = k_{pi} R_L, \quad (43)$$

onde f_s a frequência de comutação do conversor associado e f_i a faixa de passagem para a malha de corrente conforme citado. Na Figura 18 foi adicionado um bloco de saturação com o objetivo de impedir que valores acima da tensão ideal influenciam na razão cíclica dos interruptores. Além disso, a implementação de um *anti-windup* zera o que está na entrada do integrador em uma situação em que o sistema está saturado, para que assim o bloco de integração não integre o erro associado. Por fim, o bloco de *delay* inserido faz com que o valor adquirido vá para próxima iteração possuindo atraso de 1 amostra.

- **Malha de tensão:** Já a malha de tensão tem como objetivo entregar uma corrente de referência para efetuar o controle de corrente a partir de uma tensão de referência. A representação do diagrama da malha de tensão está esboçada na Figura 19 e o subsistema com o controlador PI na Figura 20.

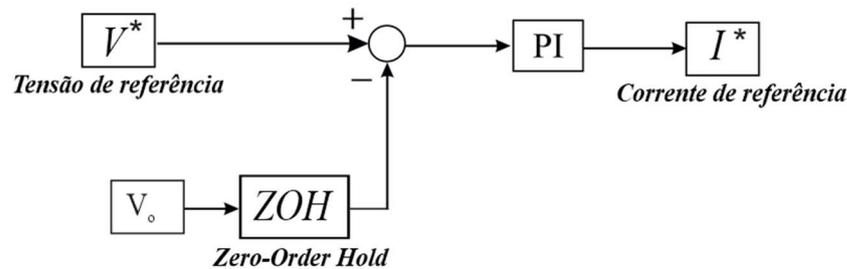


Figura 19: Diagrama da malha de tensão do conversor no PLECS

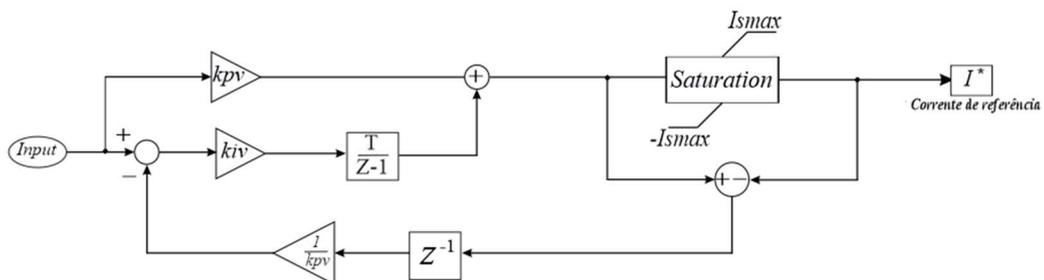


Figura 20: Subsistema com o controlador PI na malha de tensão

Nesse caso, a faixa de frequência definida para a malha de tensão é dada conforme equação (44). Comparativamente, a malha de corrente é mais rápida do que a malha de tensão

e como as faixas de passagem são diferentes não há sobreposição de atuação do controle nesse caso. O ganho do controlador para a malha de tensão é dado por:

$$f_v = \frac{f_i}{20}, \quad (44)$$

$$k_{pv} = \frac{2\pi f_v C}{D_{medio}}, \quad (45)$$

$$k_{iv} = \frac{k_{pv}}{RC}. \quad (46)$$

Sendo f_v a faixa de passagem para a malha de tensão. Para a malha de tensão tem-se também que na Figura 20 foi adicionado um bloco de saturação com o objetivo de limitar os valores da corrente de referência a um limite mínimo e máximo. Na referida simulação utilizou-se como base o valor de $\pm 20\%$. Por fim, para a malha de corrente houve a implementação de um *Anti-WindUp* desempenhando as mesmas funções apresentadas anteriormente. Além disso, a discretização adotada nos integradores para as malhas foi baseada no método *Forward Euler*.

3.5 Componentes do conversor

Os parâmetros do conversor *buck-boost* não inversor usados no modelo de bateria inteligente está descrito na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Parâmetros do conversor

Parâmetro	Variável	Valor
Frequência de comutação	f_s	50 kHz
Tensão saída mínima	V_{smin}	8 V
Tensão saída do conversor	V_o	14 V
Tensão saída máxima	V_{smax}	20 V
Potência	P_s	350 W
Indutância	L	16,8 μ H
Capacitância	C	6562,5 μ F
Resistência do indutor	R_L	1 m Ω

O dimensionamento dos componentes passivos do referido conversor é realizado considerando o modo de operação *buck*. As equações tanto para o projeto do indutor e capacitor são as mesmas apresentadas em (Moraes, 2018) onde é feita uma análise detalhada do conversor *buck* em condução contínua. Em suma, com base na topologia apresentada na Figura 11, foi levado em consideração o valor de $v_b = 12$ V e demais parâmetros apresentados na Tabela 2. Além disso, considerou-se uma ondulação de tensão de 2% e uma ondulação de corrente de 20%.

Sendo assim, considerando as condições de operação extremas do conversor foi possível obter os maiores valores para indutância e capacitância descritos na Tabela 2. Adiante, através da utilização de tal conversor, o intuito desse trabalho em questão é projetar um controlador para a malha de tensão externa e um controlador para a malha de corrente interna.

Os cálculos dos ganhos mostrados nas equações (42),(43),(45) e (46) são realizados utilizando-se dos parâmetros do conversor da Tabela 2, na qual se obtém a resistência do conversor $R = 1,14 \Omega$ e a razão cíclica média como sendo $D_{medio} = 65,42\%$.

É válido ressaltar que foi feito o projeto do controlador apenas para o conversor operando no modo *boost*. Por conseguinte, será feita uma análise para avaliar a utilização do mesmo controlador para ambos os modos de operação. A escolha do modo *boost* é justificável pelo fato de que a tensão apresenta uma característica de fase não mínima conforme apresentado em (Erickson et al, 2004).

Sendo assim, para o projeto dos controladores de ambas as malhas citadas, os valores dos respectivos ganhos calculados estão descritos na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Projeto dos controladores

	Faixa de passagem	Ganho K_p	Ganho K_i
Malha de corrente	2500 Hz	0,2639	7,8792
Malha de tensão	125 Hz	15,7080	$1,0506 \times 10^3$

3.6 Testes das malhas de controle

A validação do uso do modelo simplificado na simulação pode ser feita com base na plotagem dos diagramas de bode das respectivas funções de transferências das plantas deduzidas tanto para o modelo de pequenos sinais quanto para as funções simplificadas. O diagrama de bode das respectivas plantas para ambos os modos de funcionamento está representado na Figura 21 abaixo.

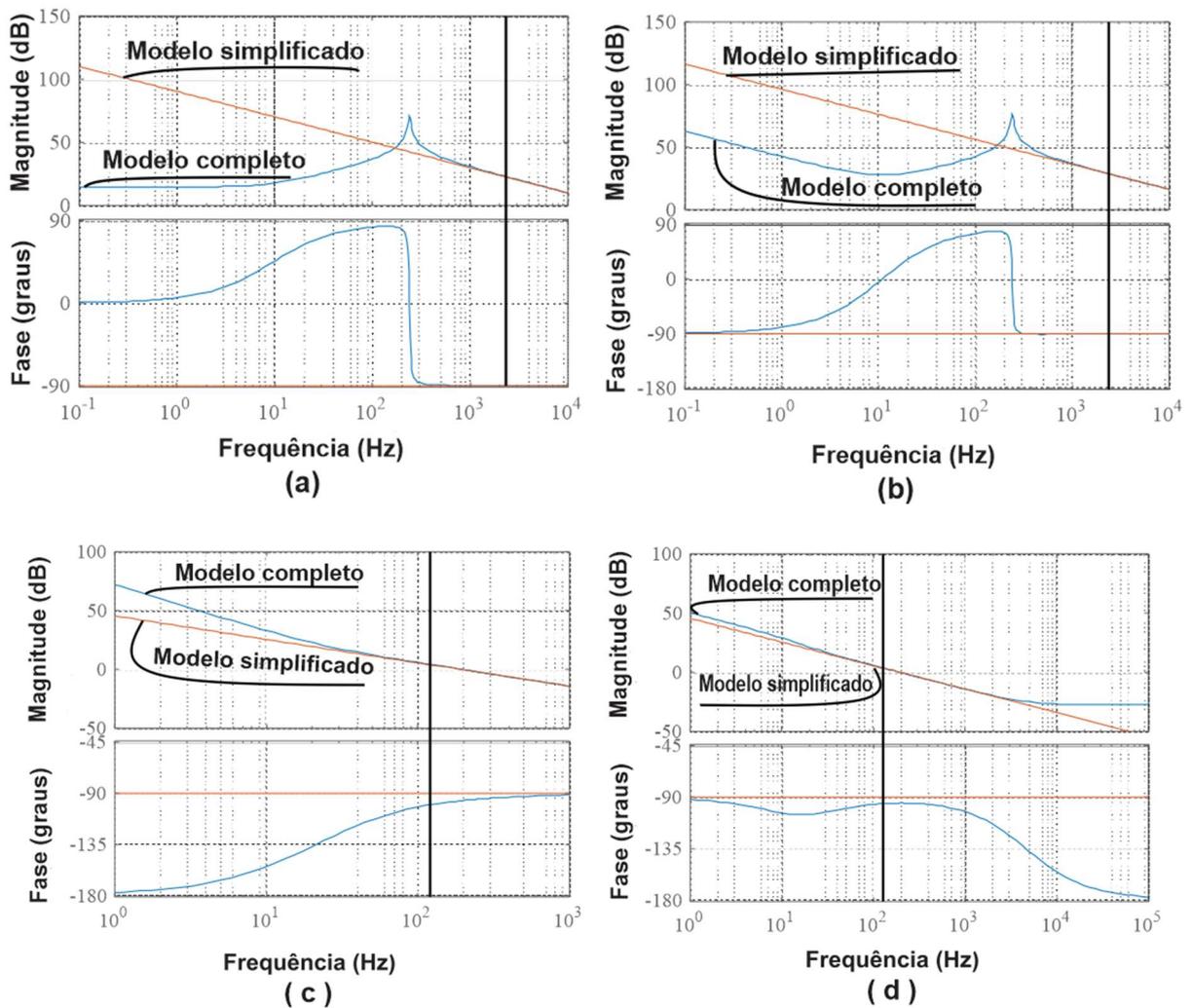


Figura 21: Gráfico de bode das funções de transferência obtidas. (a) Malha de corrente modo *buck*. (b) Malha de corrente modo *boost*. (c) Malha de tensão modo *buck*. (d) Malha de tensão modo *boost*.

A frequência de comutação do conversor em estudo conforme a Tabela 2 é de 50 kHz. Pela análise da Figura 21 tem-se que na faixa de passagem da malha de corrente, cerca de 2500 Hz, as funções de transferência são equivalentes. A mesma situação ocorre na faixa de passagem da malha de tensão, cujo valor é 125 Hz. Além disso, na frequência de cruzamento, quando o ganho equivale a 0 dB, é possível observar uma proximidade entre ambas as respostas em frequência em todas as situações ilustradas. Dessa forma, o modelo simplificado, de fato, pode ser utilizado.

Foi implementada uma simulação no *software* PLECS considerando os ganhos dos controladores apresentados na Tabela 3. Nesse caso, na referida simulação foi levado em consideração o uso de apenas um único conversor com a finalidade de demonstrar o desempenho do controle de tensão de saída.

Nesse contexto, para validação do controle da tensão de saída considerou-se também a existência de uma perturbação externa, representada pela corrente i na Figura 11, em dois instantes de tempo conforme mostra a Figura 22. Com essas perturbações espera-se validar a atuação do controle no sentido de rejeitá-las em um tempo hábil.

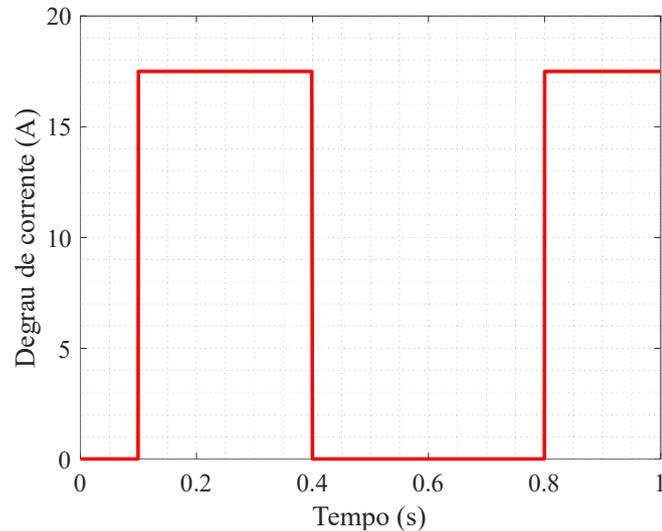


Figura 22: Comportamento da corrente na saída de cada conversor

A Tabela 4 detalha a dinâmica de atuação dessa perturbação, considerando a variação da corrente quando a tensão na saída é máxima. Da Tabela 2 tem-se então que o valor da corrente para esse caso é dado pela equação (47) a seguir:

$$I_{min} = \frac{350}{20} = 17,5 \text{ A.} \quad (47)$$

Tabela 4 – Valores das perturbações visualizadas na Figura 22

Instante de tempo	Varição de corrente
400 ms	De 17,5 A para 0 A
800 ms	De 0 A para 17,5 A

Sendo assim, com base na Figura 23, primeiramente, nota-se que o controle é capaz de seguir a referência de tensão tanto quando o conversor opera no modo *buck* quanto no modo *boost*. No instante 400 ms é possível notar o desempenho do controle no sentido de rejeitar tal perturbação, com um sobressinal de 14,05% durante 45 ms. Já no instante 800 ms é simulado

o processo de carga, e também foi possível mostrar o pleno funcionamento do controle da tensão de saída com um sobressinal de 10,6% com duração aproximada de 45 ms.

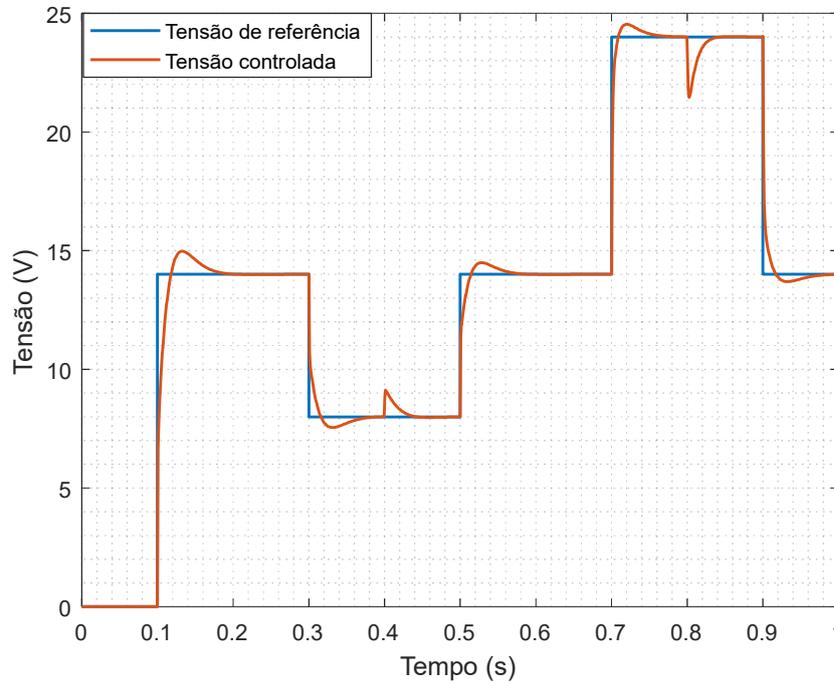


Figura 23: Simulação do controle de tensão de saída com degrau de carga

4 Arranjo de baterias inteligentes

4.1 Modelo da bateria

Como uma extensão da implementação do controle local obtido anteriormente, tem-se agora um arranjo de baterias inteligentes. Tais baterias possuem tensão nominal de 12 V, resistência interna de $R_o = 1 \text{ m}\Omega$ e com capacidade inicial de 10 Ah. Os parâmetros de tensão de circuito aberto (V_{ocv} , do inglês, *Open Circuit Voltage*) e estado de carga (SOC, do inglês, *State of Charge*) usados nesse projeto foram baseados na bateria de fosfato de lítio ferro (LiFePO_4) empregada em (Meng et al, 2018). A Figura 24 ilustra a curva de pontos adquiridos de forma experimental citada no referido artigo.

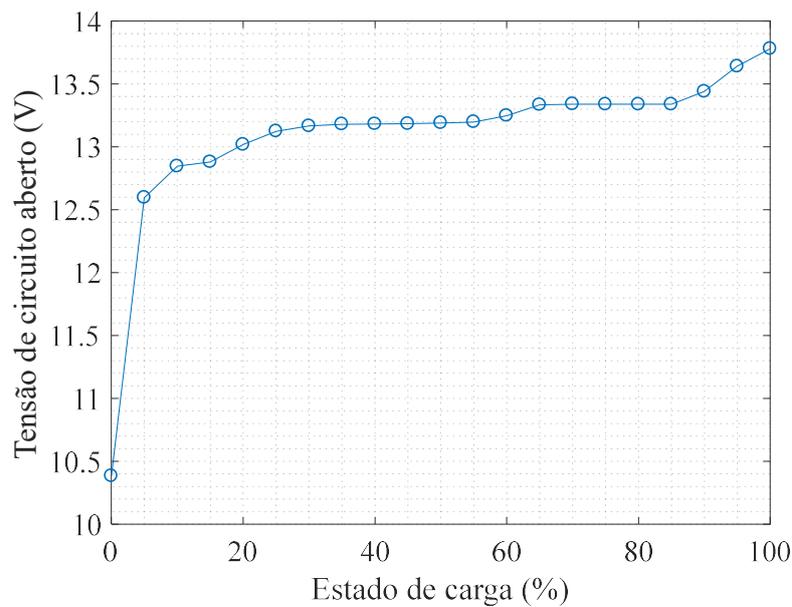


Figura 24: Relação SOC [%] x OCV [V] da bateria LiFePO_4

Em suma, o modelo proposto então será representado por uma fonte tensão controlada com uma pequena resistência na bateria associada. O processo de obtenção desse parâmetro é feito a partir da medição da corrente no terminal positivo conforme apresentado no diagrama da bateria no *software* PLECS na Figura 25 a seguir.

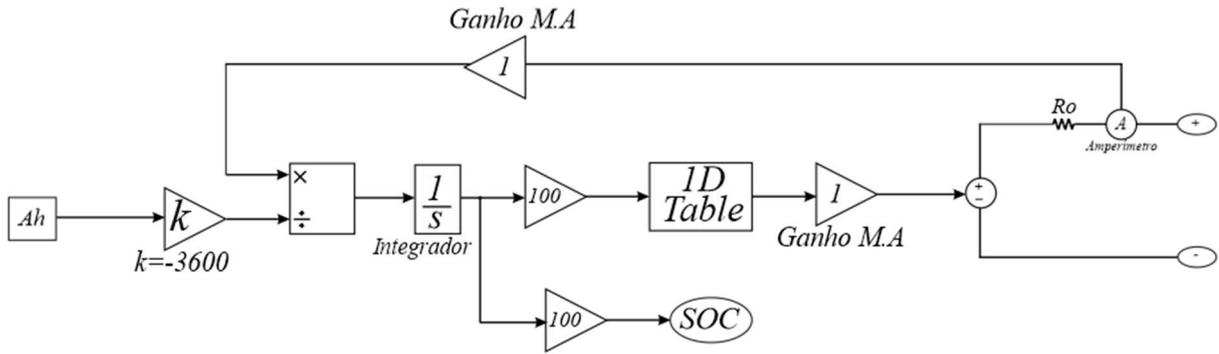


Figura 25: Diagrama da bateria no PLECS

É realizada então a integração da corrente, sendo a condição inicial equivalente ao estado de carga inicial da bateria. Esse valor é dividido pela capacidade da bateria com um ganho de 3600, com o intuito de fazer a conversão da unidade horas para segundos que, por sua vez, é usada na simulação.

Em seguida este valor é inserido no bloco *Look-Up-Table* que possui a relação $SOC[\%] \times OCV[V]$ citada em (Meng et al, 2018), que retorna o valor da tensão de circuito aberto da bateria.

4.2 Vetorização do modelo

A proposta de bateria inteligente abordada nesse trabalho tem como diferencial o uso da topologia *buck-boost* não inversora integrado individualmente com cada conjunto de baterias conforme mostrado na Figura 5. As saídas de cada bateria são conectadas em série para construir o barramento de corrente contínua. Foram utilizadas ao todo 34 baterias conectadas em cascata.

Para implementação da simulação de todo esse montante de baterias no software PLECS foi necessário a criação de uma modelagem vetorizada. Nessa situação, cada conjunto “bateria + conversor” é conectado a um multiplexador de fios cuja largura é de $N - 1$, o que possibilita a existência de multiníveis. O diagrama de vetorização é mostrado na Figura 26 a seguir.

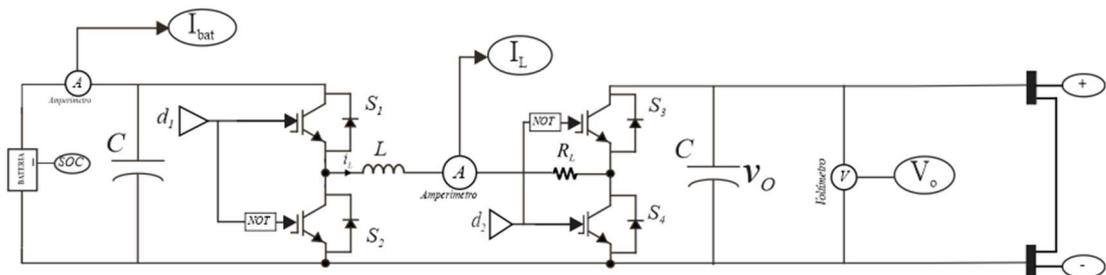


Figura 26: Diagrama de vetorização

4.3 Balanceamento do estado de carga

O processo de balanceamento do estado de carga é realizado através do chamado controlador mestre, cujo esquemático está ilustrado na Figura 27. Esse controlador tem por objetivo fornecer para a malha de tensão uma referência de tensão a ser seguida pelo controle. É válido ressaltar que tal controlador precisa do sinal de referência de potência que vem do PCS, podendo tornar essa estrutura comercialmente menos atrativa.

Primeiramente é realizado o cálculo da média do estado de carga das baterias operacionais para comparação individual com o estado de carga de cada uma, visto que elas possuem características diferentes. Conseqüentemente, além do balanceamento dos estados de carga é possível saber o sentido de transferência de potência de cada bateria, ou seja, se está havendo a carga ou a descarga da mesma. Este controle foi proposto em (Ye Li & Yehui Han, 2016).

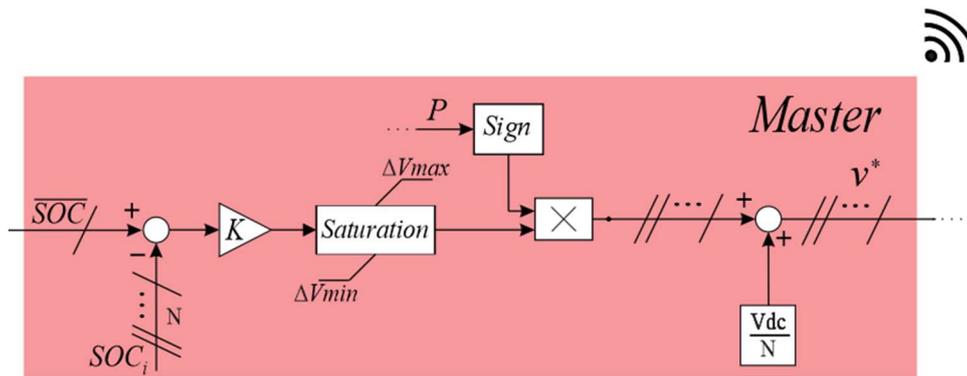


Figura 27: Representação do controlador mestre nas simulações

A tensão de referência citada pode ser representada pela seguinte equação:

$$V_{out_i} = \bar{V}_l + \Delta V_i; \bar{V}_l = \frac{V_{dc}}{N}. \quad (48)$$

Tem-se que N é o número de elementos em série no sistema, \bar{V}_l é a tensão média de saída de cada bateria inteligente e ΔV_i é uma correção de tensão utilizada para realizar o balanceamento de estado de carga das baterias. Isto é possível visto que, as saídas dos conversores estão ligadas em série, sendo assim a potência transferida por cada bateria depende exclusivamente da tensão de saída da mesma uma vez que a corrente que passa por todo o conjunto de baterias é a mesma.

Vale ressaltar que a transformação dos dados obtidos de porcentagem para tensão e assim ter como resultante a variação de tensão entre as baterias é feita utilizando da função do SOC_{gain} apresentada na equação (49). Tal equação fornece o quanto o controle deve atuar em função do erro obtido.

$$SOC_{gain} = \frac{\Delta V_{max}}{\Delta SOC_{max}}. \quad (49)$$

Para este estudo, assumiu-se que os conversores fornecerão um desvio de tensão máximo (6 Volts) quando a diferença de estado de carga para a média, ΔSOC_{max} , for superior a 1%. Neste caso, adotou-se $SOC_{gain} = 6$.

5 Resultados

5.1 Balanceamento de SOC – capacidades iguais

As simulações do referido projeto foram implementadas no *software* PLECS com base em dois cenários.

No cenário 1, a hipótese levada em consideração é de que todas as 34 baterias usadas possuem a mesma capacidade, o equivalente a 10 Ah. Além disso, tem-se que os estados de carga das mesmas eram distintos entre si conforme mostra a Figura 28 abaixo. A diferenciação dos estados de carga foi feita com base em uma distribuição normal que possui dois parâmetros: a média e o desvio padrão, sendo que esse representa a dispersão em termos de unidades padrão. A equação (50) descreve esse processo de diferenciação dos estados de carga, sendo que $SOC_{init} = 50\%$ e $Tol_{soc} = 10\%$, que representam o estado de carga nominal e a tolerância levada em consideração para o estado de carga, respectivamente.

$$SOC = SOC_{init} \left(1 + \frac{Tol_{soc}}{100} \cdot rand \right) \quad (50)$$

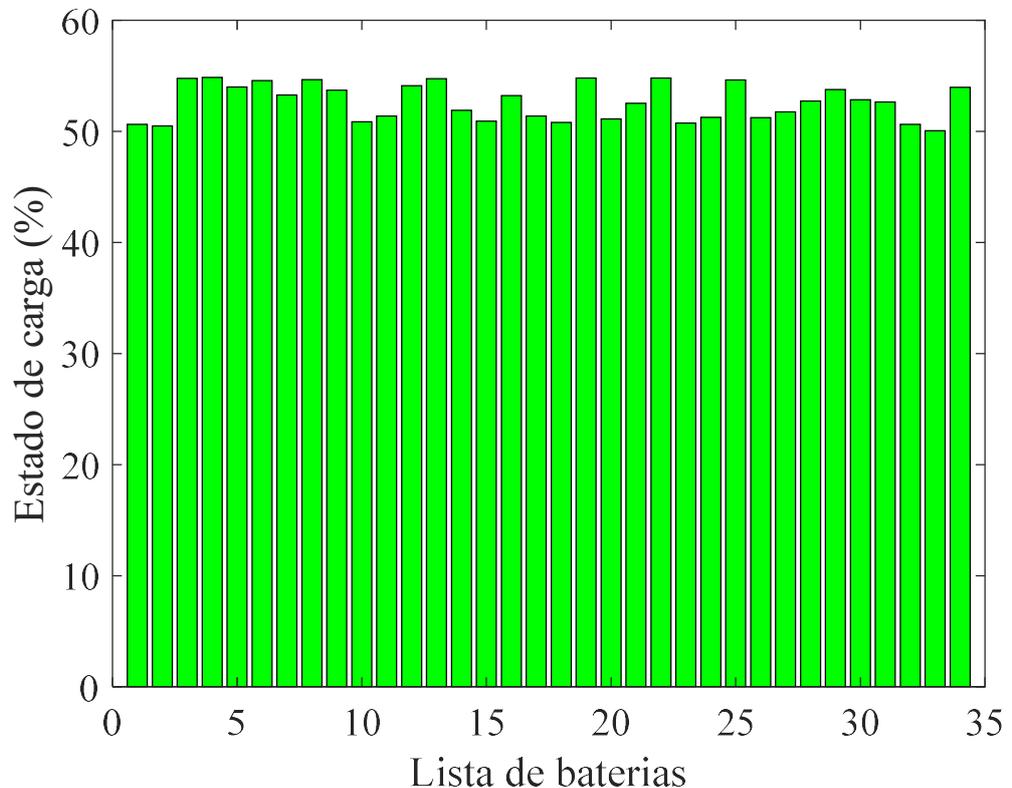


Figura 28: Estado de carga das baterias utilizadas

É válido ressaltar que para viabilizar as simulações em um tempo hábil foi efetuada a redução por um fator de 1000 nas capacidades das baterias, uma vez que esse parâmetro está diretamente relacionado com o tempo que a mesma demora para ser completamente descarregada. A implementação desse artifício nas simulações está representada nas equações a seguir.

$$rdct = 1000 \quad \longrightarrow \quad (\text{Redução do tempo de simulação}) \quad (51)$$

$$Cr = C_r rdct \quad \longrightarrow \quad (\text{Taxa de carga} = 1) \quad (52)$$

$$Ah_{nom} = \frac{10}{rdct} \quad \longrightarrow \quad (\text{Capacidade nominal}) \quad (53)$$

Todos os resultados encontrados podem ser considerados fidedignos se comparado a uma simulação real uma vez que a corrente que flui pelo conjunto é a mesma. O que está havendo, de fato, é uma evolução do estado de carga de forma mais rápida e com isso tendo um ganho de tempo na simulação, o que facilita a validação dos cenários avaliados. Isto permitiu viabilizar a simulação dos cenários 1 e 2 que demoraram, em média, 5 horas de simulação.

A Figura 29 ilustra o processo de carga e descarga das baterias aqui evidenciado, tendo como base o modelo simplificado do PCS, que tem o princípio de funcionamento de uma fonte de corrente em grande parte da sua operação, conforme abordado anteriormente na Figura 10. Os degraus de potência foram aplicados em 4 instantes de tempo, impondo perturbações no controle de tensão e balanceamento do estado de carga de todas as baterias.

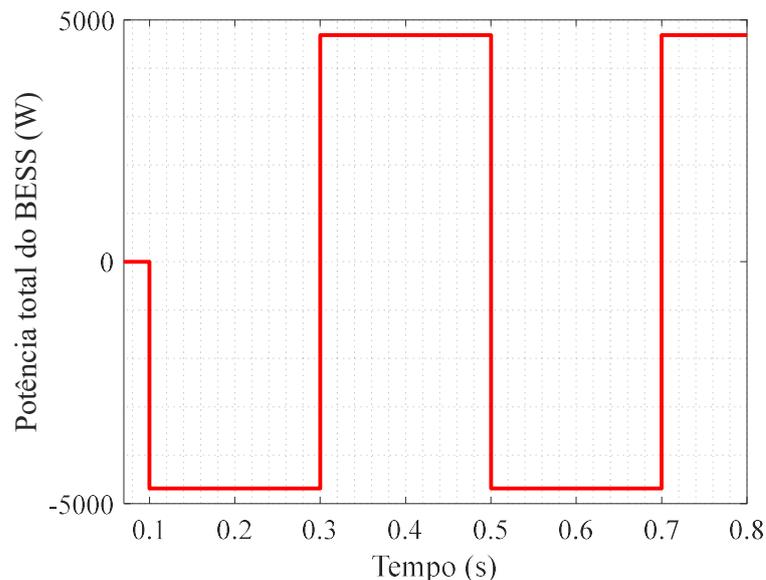


Figura 29: Potência processada pelo arranjo de baterias inteligentes

A Tabela 5 detalha a dinâmica desse processo de atuação do modelo simplificado do PCS citado, considerando variações até a potência total do BESS. Essa potência total é calculada conforme as equações a seguir, sendo que cada conversor processa, aproximadamente, 137,8 W considerando a taxa de descarga para os testes descrita na equação (52).

$$Pot_{TBESS} = Cr \cdot Ah_{nom} \cdot [max(OCV)] \cdot N \quad (54)$$

$$Pot_{TBESS} = (1 \cdot 1000) \cdot \left(\frac{10}{1000}\right) \cdot 3,445 \cdot 34 = 4685,2 \text{ W} \quad (55)$$

Tabela 5 – Valores das perturbações visualizadas na Figura 29

Instante de tempo	Varição de potência	Processo de carga ou descarga
100 ms	De 0 W para -4685,2 W	Baterias descarregando
300 ms	De -4685,20 W para 4685,20 W	Baterias carregando
500 ms	De 4685,20 W para -4685,20 W	Baterias descarregando
700 ms	De -4685,20 W para 4685,20 W	Baterias carregando

A Figura 30 mostra o balanceamento do estado de carga e a variação na tensão de saída de cada bateria inteligente. Como a capacidade das baterias neste cenário são iguais, espera-se que, em regime permanente, os estados de carga e as tensões de saída alcancem os mesmos valores.

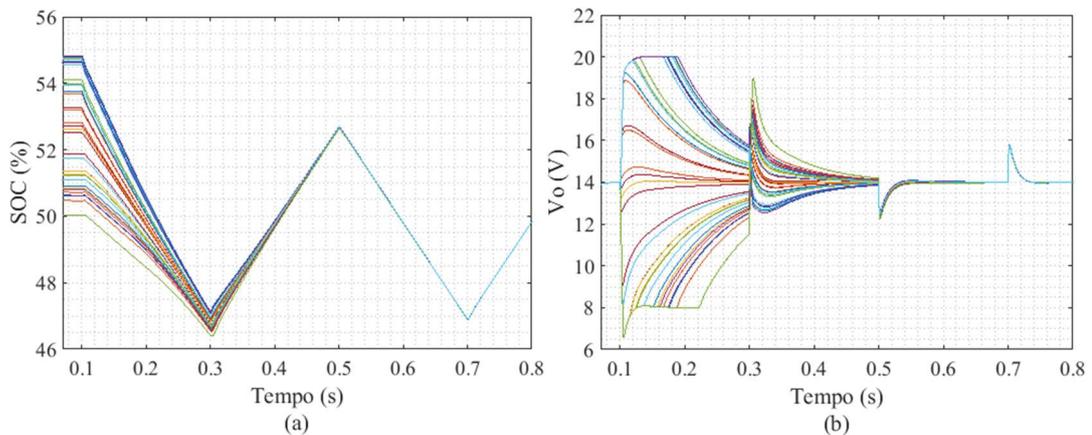


Figura 30: (a) Estado de carga de cada bateria inteligente (b) Tensão de saída em cada bateria inteligente

Isso se confirma com base na Figura 30 e pode ser justificado de acordo com o seguinte aspecto: no processo de descarga, baterias com valores menores de estado de carga devem processar menos potência para alcançar o balanceamento e por isso apresentam menor tensão de saída. Por outro lado, baterias com maior valor no estado de carga devem processar mais potência e por isso possuem maior valor de tensão de saída. Esta situação se inverte quando o arranjo de baterias estiver sendo carregado. Por fim, é possível notar também um erro nulo no gráfico de estado de carga quando a ação de controle também é nula (ação proporcional).

As saídas de cada bateria inteligente são conectadas em série para compor o barramento de corrente contínua c.c. do PCS. Como a tensão de saída nominal do conversor de acordo com a Tabela 2 é de 14 V, a tensão do barramento levando em consideração as 34 baterias ativas é de 476 V. As perturbações presentes surgem nos instantes de tempo em que o conversor está sendo submetido a degraus de potência conforme Figura 29 e Tabela 5. A Figura 31 mostra tal gráfico. Observa-se que apesar deste barramento não ser controlado diretamente, o controle mestre resulta no compartilhamento da tensão de barramento c.c. entre as baterias inteligentes. Além disso, durante o regime transitório observa-se sobressinais de até 12% em relação ao valor de referência.

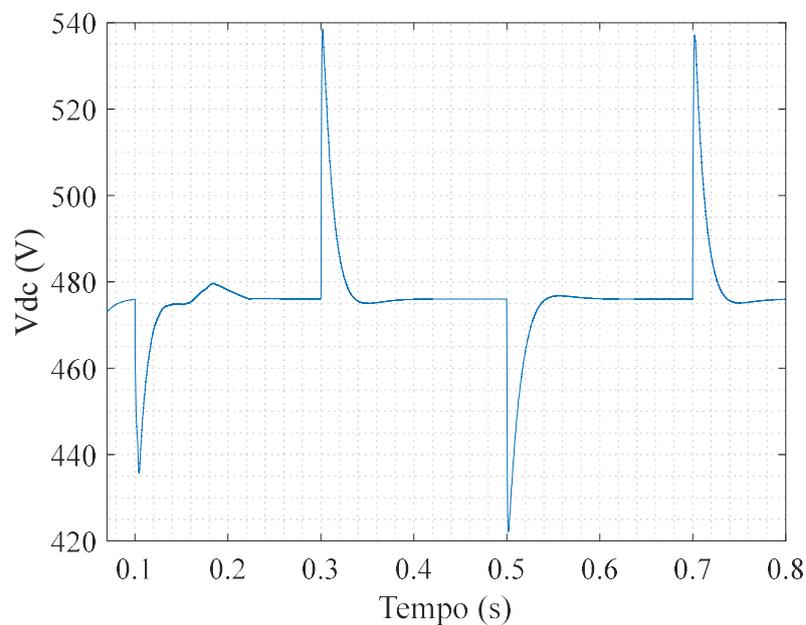


Figura 31: Tensão no barramento c.c.

Por fim, a Figura 32 ilustra a corrente que passa por cada bateria, bem como a corrente que passa pelo indutor do conversor. É possível observar que baterias que necessitam de menos potência apresentam menores valores de corrente. Vale ressaltar que ambos os gráficos tendem

a apresentar características similares durante o modo de operação *boost*, em regime permanente, visto que o interruptor S_1 estará sempre ativo para esse modo.

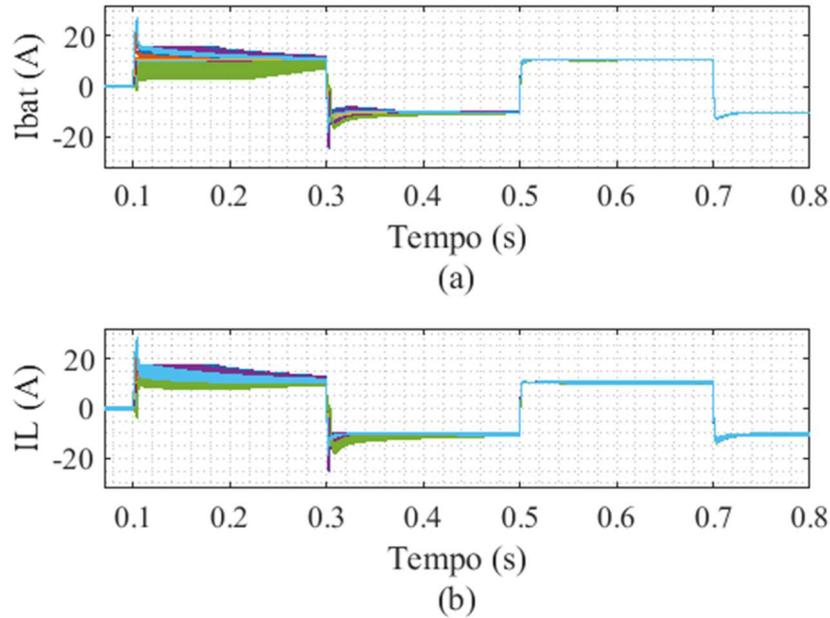


Figura 32: (a) Corrente em cada bateria (b) Corrente que passa pelo indutor do conversor

5.2 Balanceamento de SOC – capacidades distintas

Para o cenário 2, a hipótese considerada é de que todas as baterias envolvidas apresentavam capacidade e estado de carga diferentes. A Figura 33 esboça essa situação. É válido ressaltar que a dinâmica de utilização do modelo simplificado do PCS é idêntica ao que fora apresentado para o cenário 1.

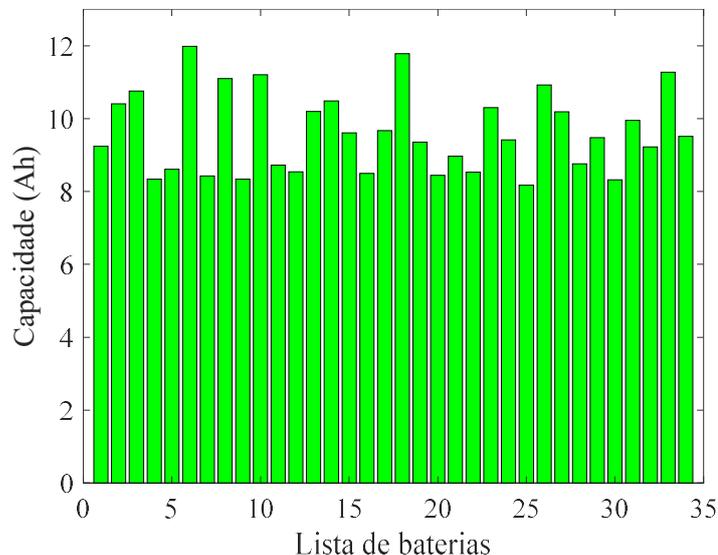


Figura 33: Baterias com capacidades diferentes

A Figura 34 mostra o balanceamento do estado de carga para este caso bem como a tensão de saída de cada bateria inteligente. O processo de tal balanceamento do estado de carga nesse cenário pode ser explicado de forma similar ao que fora descrito no cenário 1. O diferencial entre as duas abordagens está no fato de que, em regime permanente, os estados de carga alcançam os mesmos valores. Apesar disso, é possível observar que o erro em regime permanente para o gráfico de SOC é não nulo visto que se tem ação proporcional nesse caso.

Com relação às tensões de saída observa-se diferentes valores nessa condição de regime permanente, pois, como as baterias possuem capacidades distintas, nas situações em que se tem o referido balanceamento do estado de carga cada bateria processou uma quantidade diferente de potência, consequentemente, as tensões de saída são distintas.

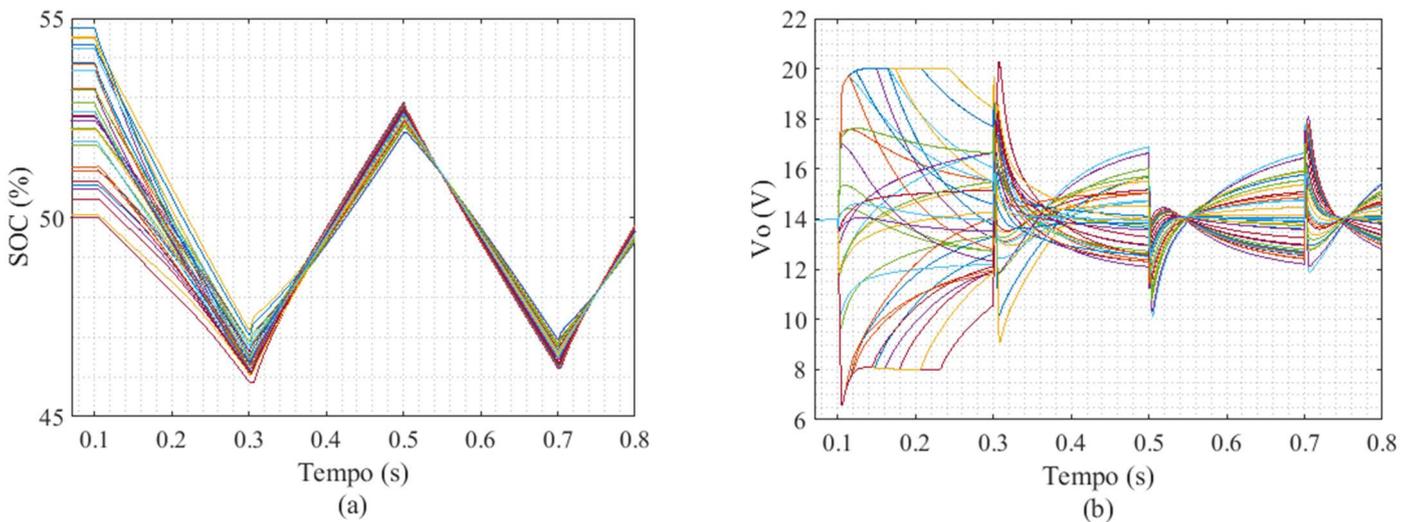


Figura 34: (a) Estado de carga de cada bateria inteligente (b) Tensão de saída em cada bateria inteligente

O barramento c.c. para esse segundo caso é mostrado na Figura 35. Assim como no caso anterior espera-se também um valor de 476 V que está relacionado com as somas das tensões de saída totais de cada bateria inteligente. É válido ressaltar também que as perturbações existentes ocorrem nos degraus de potência sendo essas ligeiramente maiores, com sobressinais de até 15% em relação ao valor de referência durante o transitório. Isso pode ser explicado pelo fato de que as baterias envolvidas são diferentes construtivamente.

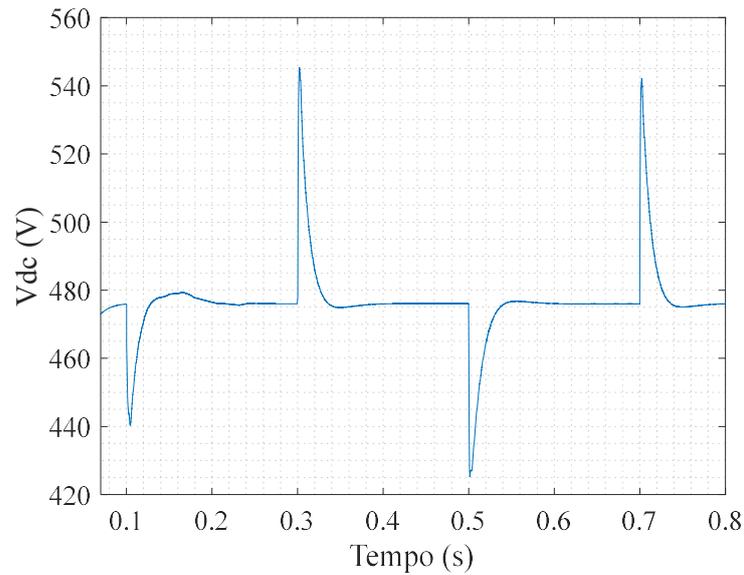


Figura 35: Tensão no barramento c.c.

Com relação a análise comparativa entre as correntes, a Figura 36 esboça tanto a corrente que passa por cada bateria quanto a corrente que passa pelo indutor presente no conversor. O diferencial dessa abordagem está no fato de que a corrente apresenta uma similaridade dos gráficos obtidos pela tensão justamente pelas diferenças das características construtivas baterias em questão.

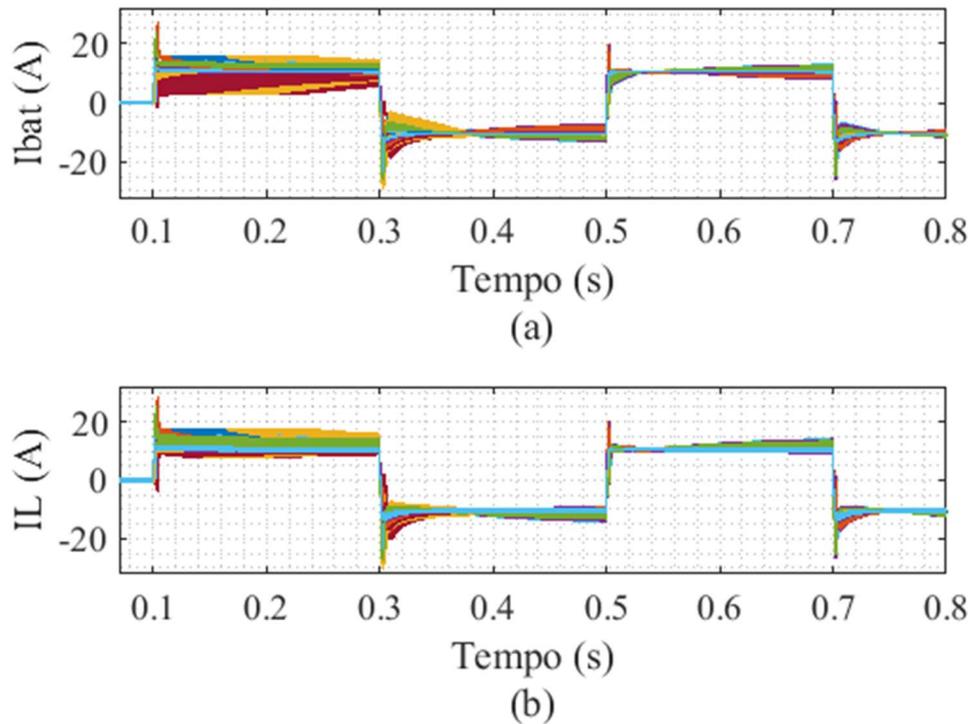


Figura 36: (a) Corrente em cada bateria (b) Corrente que passa pelo indutor do conversor

6 Conclusões

Nessa monografia foi abordado o conceito de bateria inteligente utilizando-se de um conversor *buck-boost* não inversor, aplicados para o sistema de armazenamento de energia. Além disso foi desenvolvido uma estratégia de controle local para o BESS usando-se um controlador PI cujos parâmetros foram encontrados com base no método de alocação de polos.

Nesse sentido utilizando-se tanto da modelagem de pequenos sinais quanto da modelagem simplificada foram obtidos resultados satisfatórios em relação a capacidade de seguimento de referência e rejeição de perturbação nos modos de operação *buck* e *boost*. Como vantagem, pôde-se utilizar o mesmo controlador para os dois modos de operação simplificando a estrutura. Por fim, com a estratégia do controlador mestre permitiu-se alcançar o balanceamento do estado de carga das baterias para dois cenários.

No primeiro cenário as baterias apresentavam capacidades idênticas, na qual os gráficos de estado de carga e tensão de saída em cada conversor alcançaram os mesmos valores em regime permanente. Além disso, foi possível notar um erro nulo no gráfico de SOC quando a ação de controle também é nula nessa condição de regime permanente. Além do mais, o sistema conseguiu manter a tensão do barramento c.c. no valor requerido com variações máximas em torno de 10%.

No segundo cenário as baterias possuíam capacidades diferentes. Os gráficos de tensão de saída apresentavam valores distintos em regime permanente. Além disso, nessa condição os gráficos de estado de carga alcançaram os mesmos valores com um pequeno erro associado com a atuação da ação proporcional. Por fim, o sistema também conseguiu manter a tensão de barramento c.c. no valor desejado com variações máximas da ordem de 15%.

Como proposta de melhoria para esse trabalho podem ser citadas a implementação de um controlador baseado no parâmetro tensão de tal forma que não seja necessário a utilização da corrente advinda do PCS. Isso se justifica até mesmo por ser uma solução comercialmente mais viável

E, por fim, o desenvolvimento de uma proposta na qual os conversores c.c. /c.c. utilizados se comunicam com o controlador mestre por meio de uma rede de comunicação, incluindo a avaliação de atrasos e perdas de pacotes de dados no desempenho da estrutura de controle investigada.

Referências Bibliográficas

- Andrea, D. (2010). Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Artech house.
- BNEF. (2017). Lithium ion battery costs and market. Disponível em: <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>.
- Callegaro et al, L. (march de 2019). Control Design for Photovoltaic Power Optimizers Using Bootstrap Circuit. IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL. 34, NO. 1.
- CEMIG & ANEEL. (2021). Arranjos Técnicos e Comerciais para inserção de sistemas de armazenamento de energia em combinação com sistemas de geração distribuída nas redes de distribuição brasileiras.
- Chatzakis et al, J. (2003). *Designing a New Generalized Battery Management System*. IEEE Transactions on Industrial Electronics VOL. 50, no. 5, pp. 990-999, outubro de 2003.
- EPE. (2021). Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>.
- Erickson et al, W. R. (2004). Fundamentals of Power Electronics. 2º edição. Nova Iorque, Estados Unidos da América.
- Eurostat. (2021). *Renewable energy statistics—statistics explained*. [S.l.], 2021. Fonte: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics#Share_of_renewable_energy_more_than_doubled_between_2004_and_2019.
- Filho, G. J. (2017). Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia utilizando o método KiBaM. Recife: /Gustavo José Luna Filho. - 2017. Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica. UFPE.
- Hesse et al, H. C. (2017). *Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids*. Fonte: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2107/htm>.
- Hohmann et al, M. (2022). Análise da viabilidade técnica da utilização de baterias de segunda vida retiradas de veículos elétricos. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1195/1195>.
- Hu, C. Z. (2017). Technological developments in batteries: A survey of principal roles, types, and management needs. IEEE Power and Energy Magazine.

- Khanaki et al, R. (2019). Integration of non-isolated DC–DC converters in battery storage systems – a topological exploration. *The Journal of Engineering*, 2019: 4185-4189.
- Kim, J. (2012). Stable Configuration of a Li-Ion Series Battery Pack Based on a Screening Process for Improved Voltage/SOC Balancing. In *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 1, pp. 411-424, Jan. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2158553.
- Komarnicki, P., Lombardi, P., & Styczynski, Z. (2017). *Electric energy storage systems: flexibility*. Springer.
- Maia et al, T. A. (2022). Battery energy management proposition for energy storage using active dc–dc converter. *Int J Circ Theor Appl*. 2022;1-17. doi:10.1002/cta.3397.
- Mandal et al, S. K. (2008). *IntellBatt: Towards smarter battery design*.
- MassCEC, M. C. (2016). *State of Charge*. Fonte: Massachusetts Energy Storage Initiative Study: <https://www.mass.gov/service-details/energy-storage-study>.
- Meng et al, J. (2018). An Overview and Comparison of Online Implementable SOC Estimation Methods for Lithium-Ion Battery. In *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 2, pp. 1583-1591, March-April 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2775179.
- Michel, H. C. (2010). *Implementação de uma Ferramenta para Auxílio à Sintonia de Controladores PID*. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte-MG. 2010.
- Ministério de Minas e Energia. (2022). *Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico*. Fonte: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico/2022>.
- Moraes, C. (2018). *Análise do conversor buck em condução contínua*. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/analise-do-conversor-buck-em-mcc/>.
- Pinto, J. H. (2022). *Modeling, Design and Performance Evaluation of Battery Energy Storage Systems based on Modular Multilevel Converter*. *Tese de Doutorado*. Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFMG.
- RAISA. (2022). *Vantagens e desvantagens da bateria de íon de lítio*. Fonte: Raísa Produtos Eletrônicos: <https://www.raisa.com.br/vantagens-e-desvantagens-da-bateria-de-ion-de-litio>.
- Rech, C. (2018). *Controle de Conversores Estáticos Controle de um conversor boost CCM para correção do FP*. Fonte: <https://docplayer.com.br/6162203-Controle-de-conversores-estaticos-controle-de-um-conversor-boost-ccm-para-correcao-do-fp-prof-cassiano-rech-cassiano-ieee-org.html>.
- REID, G. J. (2016). Fonte: *Second Life-Batterien als flexible Speicher für Erneuerbare Energien*: <https://speicherinitiative.at/wp-content/uploads/sites/8/2020/11/05-SecondLife-Batterienflexible-EE-Speicher.pdf>.

- Taesic Kim et al, W. Q. (2010). Series-Connected Reconfigurable Multicell Battery: A Novel Design Towards Smart Batteries. ,2010 IEEE International Conference in Power Engineering Application (ICPEA).
- Teodorescu et al, R. (27 de setembro de 2021). Smart Battery Concept: A Battery that can Breathe. Berlim, Germany: 5th E-Mobility Power System Integration Symposium.
- Ye Li, & Yehui Han. (2016). A Module-Integrated Distributed Battery Energy Storage and Management System. In IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 12, pp. 8260-8270, Dec. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2016.2517150.