



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos

Átila Montine Fernandes de Lelis

João Monlevade, MG
2018

Átila Montine Fernandes de Lelis

Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2018

L541s Lelis, Átila Montine Fernandes de.
 Sistema de armazenamento híbrido para veículos elétricos [manuscrito] /
 Átila Montine Fernandes de Lelis. - 2018.

 66f.: il.: color; grafs; tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos Bastos.

 Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de
 Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

 1. Engenharia elétrica. 2. Eletrônica de potência. 3. Máquinas elétricas. 4.
 Veículos elétricos. I. Bastos, Renan Fernandes Bastos. II. Universidade Federal
 de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.313



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 29 dias do mês de Junho de 2018, às 9 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Átilla Montine Fernandes de Lelis, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Renan F. Bastos, Gabriel A. Fogli e Igor D. Neto de Souza

O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: Sistema de armazenamento híbrido para veículos elétricos. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela Aprovação do(a) candidato(a), com a nota média 8.1, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Renan Fernandes Bastos	8.0
Gabriel A. Fogli	8.3
Igor Dias Neto de Souza	8.0
Média	8.1

João Monlevade, 29 de junho de 2018.

Renan F. Bastos

Professor(a) Orientador(a)

Átilla Lelis

Aluno (a)

[Assinatura]

Professor(a) Convidado(a)

Gabriel A. Fogli

Professor(a) Convidado(a)



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 17 de julho de 2018

Ágila Montine Fernandes de Brito
Nome completo do(a) aluno(a)

Agradecimentos

A Deus e toda minha família, por acreditarem sempre.

Ao meu amigo, sociólogo e mestre Mattheus Vinicius Rosa, por sempre torcer por mim.

A Sâmela, pelo carinho e apoio.

A Wendel Moraes, pelos estudos e debates no âmbito da engenharia elétrica.

A toda turma do carro, pelos momentos, descontrações e desesperos. Não poderia deixar de citar os senhores: Paulo Mata, Diogo Matos, Rondinelly Gualberto e o Bruno Ribeiro.

Ao ano de 2013, e todos aqueles que com emoção alvinegra, pronunciaram a frase: "Eu acredito!".

A todos amigos que fiz durante a graduação, principalmente a turma da escada, em especial os senhores: Carlos Victor Bragatto Prates (Carioca), José André Tebar Faria (Huck), Wagner Coelho Leal (Guinê), Mateus Oliveira, Willian Viana (GPS), William Maia (Boi) e ao excelentíssimo Senhor Helvécio Caldeira Júnior.

As senhoritas: Amanda Alves, Bianca Xavier e a excelentíssima Senhorita Natália Augusto Keles.

A instituição Universidade Federal de Ouro Preto (pela excelente graduação) e todos os seus funcionários, mesmo aqueles que apenas com um "bom dia" faziam do meu dia melhor.

Aos excelentes professores que tive durante a minha graduação, em especial: Prof. Dr. Carlos Renato Pontes, Prof. Dr. Juan Carlos Galvis Manso, Prof^a. Dr^a. Shirley da Silva Macedo e meu orientador Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos.

A instituição Universidade Federal de Itajubá e ao docente desta mesma instituição Prof. Dr. Clodualdo Venício de Souza, pela oportunidade de estágio no LGEE (laboratório de geração de energia elétrica), campus Itabira.

E a todos aqueles que não citei, mas contribuíram diretamente ou indiretamente desta conquista.

Agradeço de forma especial a toda população brasileira que indiretamente custeou toda minha graduação e fez por mim a realidade, que infelizmente para muitos é um sonho. Uma questão injusta de oportunidades, disfarçada por meritocracia.

*"Os cientistas de hoje pensam profundamente ao invés de claramente. Você tem que ser
são para pensar claramente, mas pode pensar profundamente e ser insano".*

Nikola Tesla

Resumo

O presente trabalho visa analisar um sistema de híbrido armazenamento para veículos elétricos. Basicamente, o sistema é composto por um conversor de corrente contínua buck-boost bidirecional, baterias e ultracapacitores. A proposta deste trabalho sugere que o conversor sirva de intermédio para que as baterias e os ultracapacitores possam trabalhar de forma complementar quando conectados a um barramento de corrente contínua. Isto é, as baterias por serem elementos de dinâmica lenta devido à suas elevadas densidades de energia deverão suprir uma demanda de carga em regime permanente. O ultracapacitor por sua vez, devido ao fato de possuir uma alta densidade de potência, possui uma dinâmica rápida e então suprirá demandas transitórias de carga, como por exemplo uma situação de travamento ou frenagem regenerativa. A combinação destes elementos deve maximizar os benefícios de ambos os componentes, e para atender tais condições, faz-se necessário uma estratégia de controle de chaveamento dos semicondutores. Simulações em ambiente computacional serão apresentadas de modo a confirmar tal combinação e analisar uma estratégia de armazenamento híbrido de energia.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência, Baterias, Ultracapacitores, Conversor CC-CC Bidirecional, Armazenamento Híbrido, Veículos Elétricos .

Abstract

The present work aims to analyze a storage hybrid system for electric vehicles. Basically, the system consists of a bi-directional buck-boost direct current converter, batteries and ultracapacitors. The proposal of this work suggests that the converter serves as an intermediate for the batteries and ultracapacitors to work in a complementary way when connected to a DC bus. That is, the batteries, because they are elements of slow dynamics due to their high energy densities, must supply a permanent load demand. The ultracapacitor, on the other hand, due to the fact that it has a high density of power, has a fast dynamics and then will supply transient demands of load, as for example a situation of braking or regenerative braking. The combination of these elements should maximize the benefits of both components, and to meet such conditions, a semiconductor switching control strategy is required. Simulations in a computational environment will be presented in order to confirm such a combination and to analyze a strategy of hybrid energy storage.

Keywords: Power Electronics, Batteries, Ultracapacitors, Bidirectional DC-DC Converter, Hybrid Storage, Electric Vehicles.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Topologia passiva em cascata de bateria, ultracapacitor e conversor de corrente contínua em dois quadrantes.	3
Figura 2 – Topologia ativa em cascata de bateria, ultracapacitor e conversor de corrente contínua em dois quadrantes.	4
Figura 3 – Topologia ativa em paralelo de bateria e ultracapacitor utilizando conversor de corrente contínua em dois quadrantes.	5
Figura 4 – Topologia ativa de entrada múltipla.	6
Figura 5 – Topologia híbrida com UC paralelo ao barramento CC.	6
Figura 6 – Estrutura interna de uma bateria de íons de lítio	12
Figura 7 – Estrutura de um Ultracapacitor.	15
Figura 8 – Modelo funcional de UC utilizado	16
Figura 9 – Diagrama de Ragone.	17
Figura 10 – Conversor buck-boost bidirecional.	18
Figura 11 – Estados de operação do conversor	19
Figura 12 – Modelo simplificado do conversor utilizado.	20
Figura 13 – Operação para chave S1 fechada e S2 aberta	21
Figura 14 – Operação para chave S2 fechada e S1 aberta	22
Figura 15 – Conversores CC-CC empregados na integração dos armazenadores	25
Figura 16 – Interface de potência para baterias e ultracapacitores	25
Figura 17 – Controlador PI clássico	26
Figura 18 – Estratégia de gestão de energia proposta por (ZHOU et al., 2010)	27
Figura 19 – Estratégia de gestão de energia proposta por (BASTOS, 2016)	28
Figura 20 – Referência em degrau e resposta do controlador para a interface disposta pela Figura 16.	30
Figura 21 – Referência em degraus simultâneos e resposta do controlador para a interface disposta pela Figura 16.	31
Figura 22 – Referência em perfil triangular intermitente e resposta do controlador para a interface disposta pela Figura 16.	32
Figura 23 – Referência em degrau intermitente e resposta do controlador para a interface disposta pela Figura 16.	33
Figura 24 – Adaptação da estrutura de (ZHOU et al., 2010) para fins de simulação.	34
Figura 25 – Interface de potência para bateria e UC de modo separado afim de testar o gerenciamento de energia de (ZHOU et al., 2010) e UC operando com tensão constante em terminais.	35
Figura 26 – Resposta da interface adaptada mostrada pela Figura 25, com parâmetros de entrada ao degrau impostos pela Tabela 12.	36

Figura 27 – Resposta da interface adaptada mostrada pela Figura 25, com parâmetros de entrada ao degrau impostos pela Tabela 13.	37
Figura 28 – Resposta da interface adaptada mostrada pela Figura 25, com parâmetros de entrada ao degrau impostos pela Tabela 14.	38
Figura 29 – Resposta da interface adaptada mostrada pela Figura 25, com parâmetros de entrada ao degrau impostos pela Tabela 15.	39
Figura 30 – Sistema de armazenamento híbrido de energia elétrica, com carga acoplada ao barramento CC e estratégia de gerenciamento e controle de (BASTOS, 2016) adaptada para fins simulacionais.	41
Figura 31 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 16.	42
Figura 32 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 17.	43
Figura 33 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 18.	44
Figura 34 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 19.	45
Figura 35 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 20.	47
Figura 36 – Resposta do sistema para o padrão de carga em degrau intermitente imposto pela Tabela 21.	48
Figura 37 – Resposta do sistema para o padrão de carga em dente de serra intermitente imposto pela Tabela 22.	49
Figura 38 – Resposta do sistema para o padrão de carga em dente de serra intermitente imposto pela Tabela 23.	50
Figura 39 – Complementaridade da bateria e do UC para os parâmetros impostos pela Tabela 24.	51
Figura 40 – Interface de potência utilizada para avaliar a resposta do controlador PI para os testes de desempenho da seção 4.1.	58
Figura 41 – Modulação PWM utilizada para avaliar a resposta do controlador PI para os testes de desempenho da seção 4.1.	59
Figura 42 – Controlador PI utilizado para os testes de desempenho da seção 4.1.	60
Figura 43 – Interface de potência adaptada com UC operando com tensão terminal constante descrita na seção 4.2.	62
Figura 44 – Controladores PI da bateria e do UC descritos na seção 4.2.	63
Figura 45 – Estratégia de gestão de energia descrita na seção 4.2.	64
Figura 46 – Interface de potência utilizada na integração dos elementos armazenadores descrita na seção 4.3.	66
Figura 47 – Controladores PI da bateria e do UC descritos na seção 4.3.	67
Figura 48 – Estratégia de controle e gerenciamento de energia descrita na seção 4.3.	68

Lista de tabelas

Tabela 1 – Evolução do consumo final de energia por setor (em %).	2
Tabela 2 – Características de alguns tipos de baterias.	9
Tabela 3 – Componentes essenciais de uma célula de bateria de lítio íon e suas principais operações.	11
Tabela 4 – Tipos selecionados de baterias de íons de lítio e utilização perante fabricantes atuais e tipos de EV's envolvidos.	13
Tabela 5 – Representação dos parâmetros genéricos do circuito da Figura 12.	21
Tabela 6 – Parâmetros do modelo em pequenos sinais	26
Tabela 7 – Parâmetros do controlador PI	27
Tabela 8 – Parâmetros de entrada ao degrau para a resposta do controlador ilustrada pela Figura 20.	30
Tabela 9 – Parâmetros de entrada a degraus simultâneos para a resposta do controlador ilustrada pela Figura 21.	31
Tabela 10 – Parâmetros de entrada em referência triangular intermitente para a resposta do controlador ilustrada pela Figura 22	32
Tabela 11 – Parâmetros de entrada em referência de degrau intermitente para a resposta do controlador ilustrada pela Figura 23	33
Tabela 12 – Parâmetros de entrada em degrau para a resposta da estratégia de (ZHOU et al., 2010) ilustrada pela Figura 24, com resposta mostrada pela Figura 26.	36
Tabela 13 – Parâmetros de entrada em degrau para a resposta da estratégia de (ZHOU et al., 2010) ilustrada pela Figura 24, com resposta mostrada pela Figura 27.	37
Tabela 14 – Parâmetros de entrada em degrau para a resposta da estratégia de (ZHOU et al., 2010) ilustrada pela Figura 24, com resposta mostrada pela Figura 28.	38
Tabela 15 – Parâmetros de entrada em degrau para a resposta da estratégia de (ZHOU et al., 2010) ilustrada pela Figura 24, com resposta mostrada pela Figura 29.	39
Tabela 16 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 31.	42
Tabela 17 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 32.	43
Tabela 18 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 33.	44

Tabela 19 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 34.	45
Tabela 20 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 35.	46
Tabela 21 – Parâmetros de carga em degrau intermitente para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 36.	48
Tabela 22 – Parâmetros de carga em dente de serra intermitente para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 36.	49
Tabela 23 – Parâmetros de carga em dente de serra intermitente para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 38.	50
Tabela 24 – Parâmetros de carga em degrau intermitente para verificação da complementaridade da bateria e do UC para o sistema proposto ilustrado pela Figura 39.	51

Lista de abreviaturas e siglas

CA Corrente alternada

CC Corrente contínua

EHREL laboratório de energia renovável

EV Veículo elétrico

FPB filtro passa-baixas

HEV Veículo híbrido-elétrico

IIT Instituto de Tecnologia de Illinois

LCO Óxido de cobalto lítio

LFP Fosfato de ferro lítio

Ni-Ca Níquel-cádmio

NimH Níquel metal hidreto

NMC Materiais de óxido de lítio baseados em níquel, manganês e cobalto

PI Proporcional Integrador

UC Ultracapacitor

VSI (Voltage source inverter), Inversor tipo fonte de tensão

Lista de símbolos

C	Capacitor do barramento CC.
C_{in}	Capacitor de entrada do conversor CC-CC.
d	Duty cycle (ciclo de trabalho), instantâneo do conversor CC-CC.
D	Duty cycle (ciclo de trabalho), dos conversores CC-CC em regime permanente.
ϵ	Constante de permissividade do dielétrico.
ϵ_o	Constante de permissividade do vácuo.
i_{bat}	Corrente injetada no barramento CC pela bateria.
i_{bat}^*	Referência de corrente para corrente da bateria.
i_{Cin}	Corrente que circula no capacitor de entrada do conversor CC-CC.
i_l	Corrente que circula no indutor do conversor CC-CC.
i_{pp}	Corrente pico a pico da carga acoplada ao barramento CC.
i_{UC}	Corrente injetada no barramento CC pelo ultracapacitor.
i_{UC}^*	Referência de corrente para corrente do ultracapacitor.
K_i	Constante integral do controlador proporcional integrador.
K_p	Constante proporcional do controlador proporcional integrador.
L_{cc}	Indutor do conversor CC-CC.
R_{eq}	Resistência equivalente parasita das fontes alternativas de energia.
R_l	Resistência parasita do indutor do conversor CC-CC.
R_{UC}	Resistência parasita do modelo de ultracapacitor.
S_1	Chave semicondutora 1 do conversor CC-CC.
S_2	Chave semicondutora 2 do conversor CC-CC.
V_{cc}	Tensão do barramento CC.
V_{cc}	Referência para tensão do barramento CC.

V_{cin}	Tensão no capacitor de entrada do conversor CC-CC.
V_{eq}	Tensão das fontes alternativas de energia.
V_{pp}	Tensão pico a pico da entrada de teste as estratégias de gestão de energia.
V_{UC}	Tensão no ultracapacitor.
V_{UC}^*	Referência para tensão no ultracapacitor.
UC	Capacitância do ultracapacitor.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Estado da arte	3
1.3	Objetivos	7
1.4	Estrutura Textual	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Baterias	9
2.1.1	Baterias de íons de lítio: aspectos gerais	11
2.1.2	Bateria de íons de lítio: aplicações automotivas	12
2.2	Ultracapacitores	14
2.2.1	Princípio de operação do UC	15
2.3	Baterias e UC's: benefícios da operação em conjunto	17
2.4	Conversor buck-boost bidirecional	18
3	METODOLOGIA	20
3.1	Análise do conversor CC-CC bidirecional por meio da abordagem em espaço de estados	20
3.2	Modelo em pequenos sinais	23
3.3	Interface de potência para baterias e ultracapacitores	24
3.3.1	Controle da corrente de carga e descarga dos elementos armazenadores	26
3.3.2	Estratégias de gerenciamento do sistema híbrido	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	Testes de desempenho do controlador PI	29
4.2	Teste da estratégia de gestão de energia de (ZHOU et al., 2010).	34
4.3	Sistema de armazenamento híbrido de energia elétrica com a estratégia de gerenciamento e controle proposta por (BASTOS, 2016).	40
4.3.1	Testes do sistema para degraus de frenagem	42
4.3.2	Testes do sistema para carregamento intermitente	46
5	CONCLUSÃO	53
5.1	Comentários gerais	53
5.2	Conclusões perante aos objetivos listados	53
5.3	Proposta para trabalhos futuros	54

REFERÊNCIAS	55
ANEXOS	57
A1: Cenário de simulação dos testes de desempenho do controlador PI descritos na seção 4.1.	57
A2: Cenário de simulação dos testes da estratégia de gestão de (ZHOU et al., 2010), descritos na seção 4.2.	61
A3: Cenário de simulação do sistema de armazenamento híbrido para veículos elétricos com a estratégia de gerenciamento e controle proposta por (BASTOS, 2016), descrito na seção 4.3.	65

1 Introdução

Ao oposto do que muitos acreditam, a tecnologia dos automóveis elétricos e híbridos não se classifica como hodierna. Mesmo que haja avanços tecnológicos de grande valia nos veículos elétricos (EV's) recentes, como por exemplo as baterias de íons de lítio e a tecnologia digital presente em automóveis de todos os tipos, a natureza dos princípios básicos destes modelos automobilísticos permanece inalterada (BARAN; LEGEY, 2011). Embora os veículos serem em sua grande parcela de natureza elétrica nos primórdios do século passado, na década de 30 estes foram preteridos, participando em um cenário marginal do setor automobilístico. Podemos citar como causas principais para este declínio, o sistema de produção de automóveis criado por Henry Ford, fato que proporcionava aos veículos de combustão interna um preço relativamente menor que os elétricos, a invenção da partida elétrica, em 1912, responsável por eliminar a manivela utilizada para o acionamento de motores a gasolina, a deficiência do automóvel elétrico quanto a sua operação em longas distâncias. E por fim, os avanços na descoberta do petróleo, tornando a gasolina mais atrativa para o setor de transporte (BARAN; LEGEY, 2011).

As preocupações ambientais e outros fatores como a instabilidade do mercado de petróleo (algo que reflete na segurança energética de países muito dependentes deste combustível), o desenvolvimento das baterias e a superação de desafios tecnológicos, permitiu no início deste século que automóveis elétricos voltassem a figurar no mercado como alternativa aos veículos de combustão interna (CASTRO; FERREIRA, 2010).

Atualmente encontra-se no mercado uma modesta gama de carros elétricos. Entretanto, espera-se que este setor ocupe um espaço notável futuramente. Em relação aos veículos elétricos atuais, podemos citar o Tesla Model S, modelo que possui uma bateria excelente e um motor elétrico potente, tornando-o mais reconhecido em relação aos modelos concorrentes devido à sua autonomia (SCHENKEL; KIRSTEN; CAMBRAIA., 2016).

A parte elétrica de um veículo elétrico é formada por elementos armazenadores de energia, como por exemplo baterias e ultracapacitores, bem como conversores utilizados na interface de potência entre estes elementos e o barramento de corrente contínua. É necessário um conversor bidirecional que aumente a tensão da bateria para o fornecimento confiável de energia para o acionamento de um motor (BARROZO, 2010). De fato, elevar a tensão para uma potência constante, requer um nível menor de corrente nos condutores dos equipamentos envolvidos (BARROZO, 2010). Em contrapartida, do barramento para a bateria necessita-se de uma menor tensão, ocasionando uma maior corrente em um processo de recarga.

1.1 Motivação

Um tema bastante pesquisado nas últimas décadas é a poluição do ar. Atualmente é caracterizado como um critério de grande valia na busca pela preservação ambiental e em desenvolvimento sustentável (AZUAGA, 2000).

O início da poluição atmosférica encontra-se na emissão dos poluentes por fontes naturais como os vulcões ou fontes produzidas pelo homem, como a poluição proveniente dos automóveis (AZUAGA, 2000).

A poluição atmosférica quando relacionada com as fontes veiculares, além de serem importantes são de difícil controle uma vez que a dispersão veicular é massiva. Sendo assim, veículos automotores contribuem ativamente no rápido crescimento da poluição (AZUAGA, 2000).

O Brasil, por sua vez, encontra-se refém deste fato uma vez que privilegia o transporte rodoviário. Segundo (ANAFEA, 1996), 96% do transporte de passageiros foi realizado por rodovias, o transporte de carga por sua vez teve abrangência dividida em 64% no setor rodoviário, 21% no setor ferroviário, 12% hidroviário e 3% outros. Conclui-se que o transporte de bens é feito em sua maior fatia via caminhões e o transporte de pessoas por ônibus e carros pequenos. De acordo com a Tabela 1, o consumo final de energia no setor de transportes cresceu de 17,9% em 1985, para 21,1% em 1998.

Tabela 1 – Evolução do consumo final de energia por setor (em %).

Consumo/Ano	1985	1990	1995	1998
Consumo Final(%)	1000	100	100	100
Consumo Final não Energético(%)	5,9	5,7	5,3	5,6
Consumo Final Energético(%)	94,1	94,3	94,7	94,4
Setor de Transportes no Consumo Final Energético (%)	17,9	19,1	20,4	21,1

Fonte: Adaptada de (AZUAGA, 2000)

Com o setor automobilístico em crescimento e sendo este em sua grande parte utilizador de fontes não renováveis de energia, é de grande importância o estudo de formas alternativas de locomoção não nocivas ao ambiente.

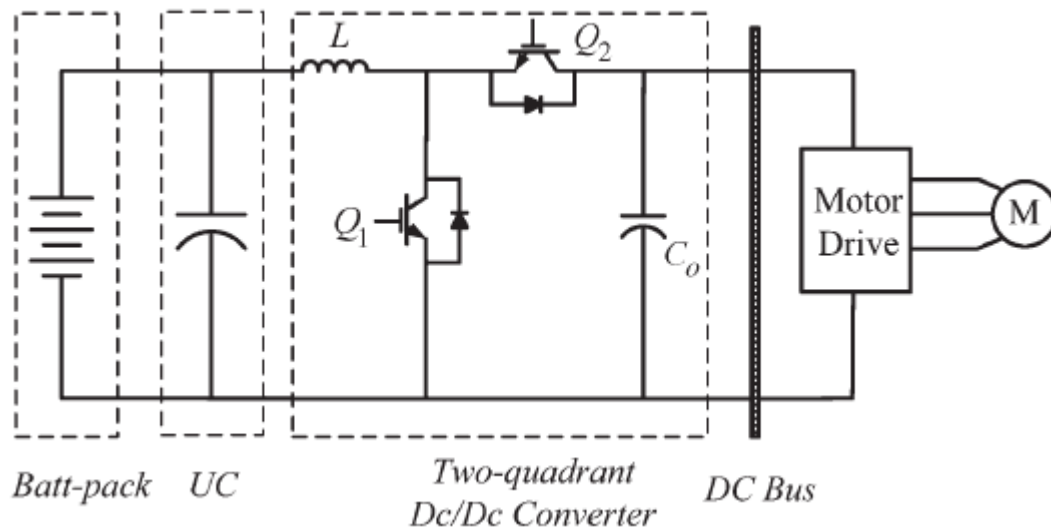
Os carros elétricos enquadram-se neste quesito, por não serem movidos por combustível interna, pode-se afirmar que é uma boa aposta para a redução de poluentes que circulam nas massas de ar.

1.2 Estado da arte

A maioria dos sistemas híbridos para veículos elétricos (EV's), disponíveis na atualidade são compostos por baterias conectadas à um barramento comum de alta tensão por meio de conversores eletrônicos chaveados bidirecionais. O Toyota Prius, assim como o Honda Insight e o Ford Escape são tecnologias que partiram deste princípio. Contudo, demais topologias foram criadas com o intuito da melhoria de eficiência do sistema. A maioria destas topologias possuem uma característica comum, o controle de baterias e ultracapacitores (UC's) (KHALIGH; LI, 2010).

A Figura 1, ilustra a topologia passiva em cascata, que utiliza um conversor eletrônico em dois quadrantes em série com o paralelismo da bateria com o banco de UC's.

Figura 1 – Topologia passiva em cascata de bateria, ultracapacitor e conversor de corrente contínua em dois quadrantes.



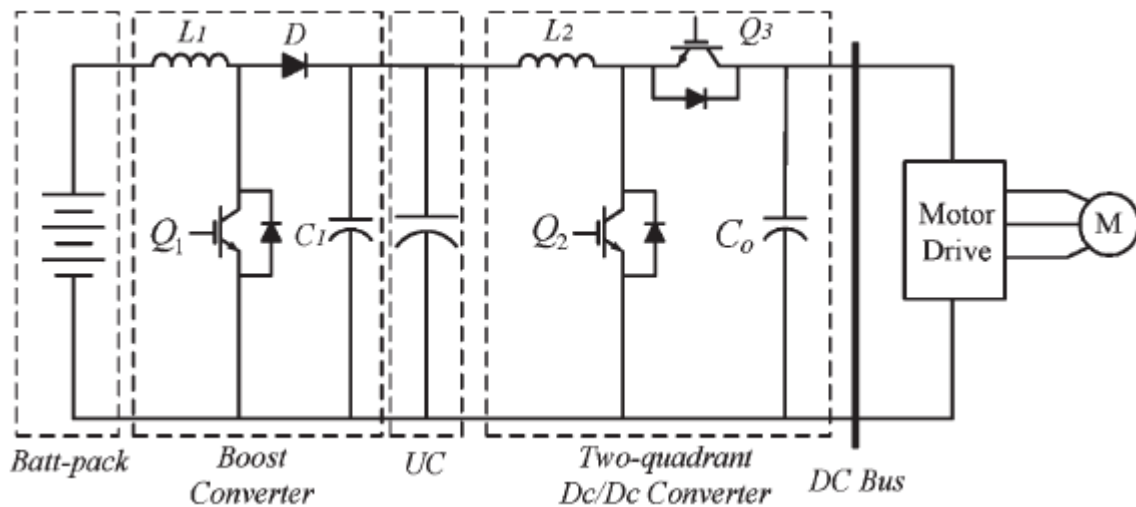
Fonte: Adaptada de (KHALIGH; LI, 2010).

Nesta configuração a corrente da bateria deve carregar o ultracapacitor e fornecer energia ao lado da carga. Entretanto, tal sistema pode ser melhorado com a inclusão de um conversor de corrente contínua (CC) de modo elevador (do inglês, boost) situado entre a bateria e o UC, de modo que este conversor seja adequado para aumentar a tensão da bateria nos terminais do ultracapacitor. Este fato é proveniente do intuito de utilizar uma bateria de tamanho menor e conseqüentemente menor custo. Além disso, a corrente da bateria pode ser controlada em comparação com o sistema passivo (KHALIGH; LI, 2010).

A Figura 2, mostra tal topologia com a inclusão do conversor entre a bateria e o UC. Este sistema recebe o nome de sistema ativo em cascata de baterias e ultracapacitores (KHALIGH; LI, 2010).

Uma desvantagem desta topologia é que a bateria não pode ser carregada nem por uma situação de travamento ou frenagem regenerativa e nem pelo ultracapacitor, devido a natureza unidirecional do conversor elevador (KHALIGH; LI, 2010).

Figura 2 – Topologia ativa em cascata de bateria, ultracapacitor e conversor de corrente contínua em dois quadrantes.



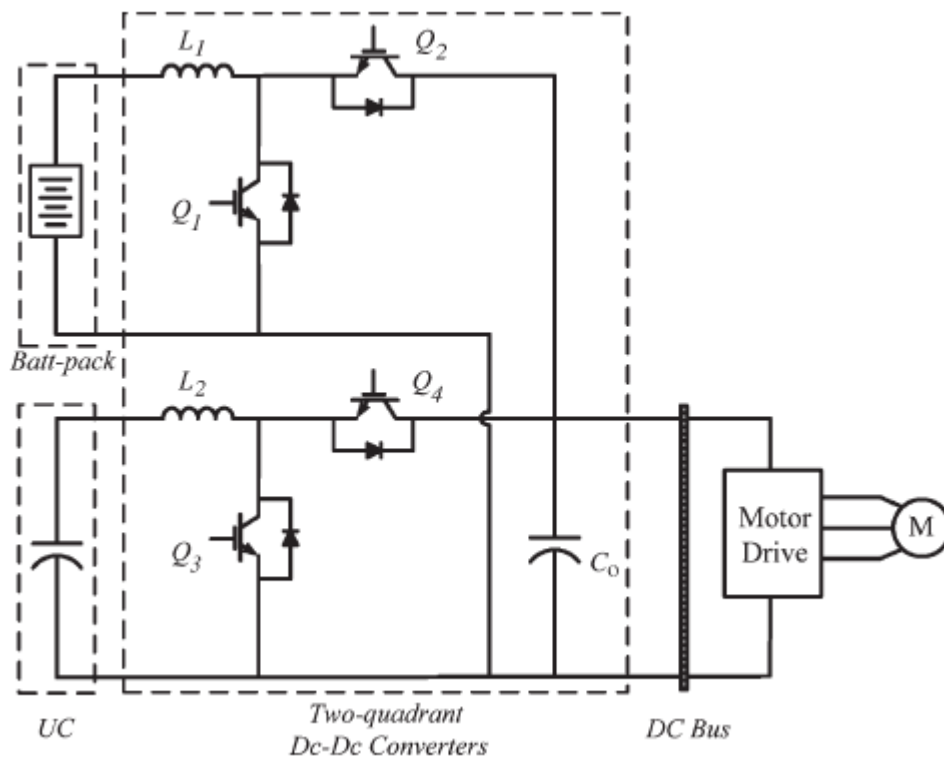
Fonte: Adaptada de (KHALIGH; LI, 2010).

A necessidade de suprir a deficiência do sistema da Figura 2, impulsionou pesquisadores Energy Harvesting e o Laboratório de energia renovável (EHREL) , o Instituto de tecnologia de Illinois (IIT) e Solero na Universidade de Roma, para que propusessem um sistema em que a bateria e o ultracapacitor pudessem agir em conjunto nas ocasiões de frenagem e travagem. Tais pesquisadores desenvolveram a topologia ilustrada pela Figura 3.

Neste sistema, a bateria e o UC apresentam uma tensão menor que a do barramento CC, permitindo que no sentido direto (sentido da bateria ou UC para o barramento) haja elevação de tensão e no sentido reverso (do barramento para a bateria ou UC), haja redução de tensão (KHALIGH; LI, 2010).

A natureza bidirecional dos conversores permite que a bateria seja carregada em situações transitórias pelo ultracapacitor, bem como em situações de frenagem ou travamento. Além do mais as direções do fluxo de energia da bateria e do UC podem ser controladas separadamente, o que é uma melhoria no gerenciamento do sistema (KHALIGH; LI, 2010).

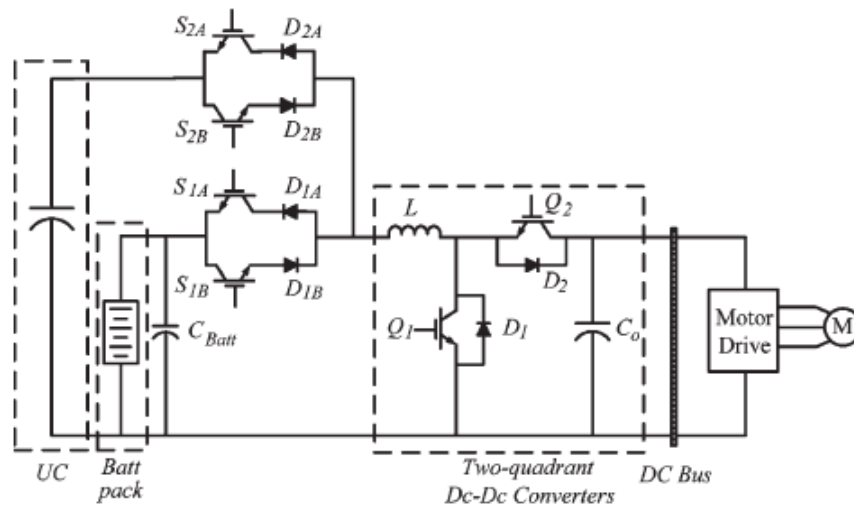
Figura 3 – Topologia ativa em paralelo de bateria e ultracapacitor utilizando conversor de corrente contínua em dois quadrantes.



Fonte: Adaptada de (KHALIGH; LI, 2010).

Apesar das topologias das Figuras 1, 2 e 3 serem de certa forma evolutivas entre si, demais tecnologias também foram desenvolvidas para atender a natureza híbrida de armazenamento de energia. Este é o caso da Figura 4, que apresenta um conversor de entrada múltipla, capaz de acionar a bateria e o ultracapacitor de forma paralela através das chaves eletrônicas. Nesta ocasião, diodos em antiparalelo são necessários para evitar o curto-circuito entre a bateria e o UC. O fluxo da energia, como nas demais topologias, é gerenciado por um conversor de dois quadrantes. A bateria e o ultracapacitor possuem um nível de tensão menor do que a do barramento CC, assim como nos sistemas anteriores. Neste sistema, apenas um indutor é necessário e a natureza bidirecional de armazenamento e descarga é obedecida. Uma desvantagem de tal topologia é a estratégia de gerenciamento e controle do conversor em operação com os elementos armazenadores, que mostra-se bem mais complicada (KHALIGH; LI, 2010).

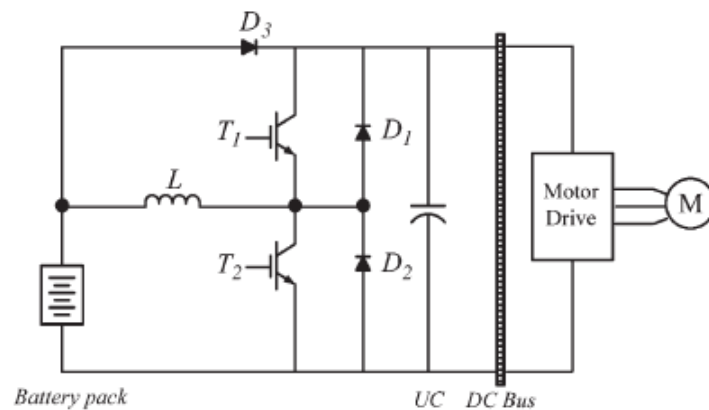
Figura 4 – Topologia ativa de entrada múltipla.



Fonte: Adaptada de (KHALIGH; LI, 2010).

A Figura 5, mostra uma topologia onde um UC de maior tensão é conectado diretamente ao barramento CC com o intuito de fornecer a demanda máxima de energia. Neste sistema, uma bateria de baixa tensão está conectada por um diodo de potência ou um interruptor controlado com o barramento. Esta estrutura permite operação em quatro modos, são eles: de baixa potência, alta potência, travamento e aceleração (KHALIGH; LI, 2010).

Figura 5 – Topologia híbrida com UC paralelo ao barramento CC.



Fonte: Adaptada de (KHALIGH; LI, 2010).

Os sistemas mostrados pelas Figuras 1, 2, 3, 4 e 5 podem se enquadrar como o estado da arte no quesito de armazenamento híbrido de energia para veículos elétricos (KHALIGH; LI, 2010).

1.3 Objetivos

Os objetivos gerais desta monografia se enquadram no gerenciamento e controle de um sistema de armazenamento híbrido de energia composto por baterias, ultracapacitores e da estrutura que intermedeia tais elementos e o barramento comum de corrente contínua (CC). Para tanto, tal estrutura é composta por um conversor CC-CC bidirecional na topologia buck-boost bem como malhas de controle empregadas com finalidade de regular a corrente de carga e descarga dos dispositivos.

O sistema deve garantir que a bateria atue majoritariamente no regime de permanência e a mesma afirmação deve ser imposta ao ultracapacitor no regime transitório. Os pacotes de energia bem como o sentido da mesma devem ser controlados por meio do chaveamento do conversor que deve obedecer estados complementares do ciclo de trabalho, aproveitando todo o intervalo de chaveamento.

Para o bom funcionamento do sistema, também faz-se necessário o controle da tensão terminal do barramento CC, por meio de uma malha de controle que servirá de apoio para geração da referência do controle de corrente para os estados de carga e descarga dos elementos armazenadores.

Com base nos aspectos citados acima podemos enquadrar como objetivos os seguintes tópicos listados abaixo:

- **Modelagem de um conversor CC-CC bidirecional:** Consiste em modelar o conversor CC-CC abaixador-elevador de tensão por meio da análise em pequenos sinais linearizada em torno do ponto de operação do dispositivo.
- **Projeto de controlador:** Consiste em obter os parâmetros K_p e K_i do controlador PI utilizado nas malhas de controle, pelo critério da margem de fase e frequência de corte.
- **Estabelecer um fluxo bidirecional de energia:** Consiste no estabelecimento do fluxo de energia nos dois modos de operação do conversor eletrônico, entregando energia para a carga em situações de aceleração e recebendo energia da carga em condições de frenagem.
- **Gerenciamento das correntes de carga e descarga dos elementos armazenadores:** Consiste na utilização de estratégias de gestão de energia de modo a direcionar as referências de corrente em regime permanente para a bateria e as correntes em regime transitório para o UC. Obtendo desta forma um arranjo no qual aproveita-se as características de cada elemento citado, de modo a maximizar os benefícios oferecidos por cada um deles.

1.4 Estrutura Textual

O texto desta monografia encontra-se estruturado em cinco capítulos principais, dentre suas subseções. O primeiro capítulo relatou a introdução do trabalho, a motivação e o estado da arte para sistemas de armazenamento híbrido de energia utilizados em veículos elétricos.

No prosseguimento deste trabalho, em todo início de capítulo será apresentado um breve resumo sobre seu conteúdo, afim de preparar o leitor para a temática da qual trata-se o capítulo. Desta forma, a organização do texto é disposta do seguinte modo:

- **Capítulo dois (revisão bibliográfica):** A revisão bibliográfica, apresenta as principais características dos componentes utilizados nesta monografia. Isto é, peculiaridades das baterias e dos ultracapacitores serão apresentadas, assim como peculiaridades do conversor eletrônico utilizado. o objetivo deste capítulo é situar melhor o leitor no escopo deste trabalho, mais precisamente na função de cada elemento no sistema abordado.
- **Capítulo três (metodologia):** A metodologia, apresenta de fato a abordagem do trabalho. Isto é, a combinação dos elementos armazenadores de energia para que atuem de forma complementar, bem como a interface de potência utilizada e as técnicas de gerenciamento e controle para a gestão de energia dos elementos armazenadores e chaveamento dos conversores. Neste capítulo apresenta-se o embasamento matemático utilizado para a modelagem do conversor CC-CC em pequenos sinais em torno do seu ponto de operação.
- **Capítulo quatro (resultados):** Este capítulo é responsável por apresentar os resultados obtidos e a relevância do trabalho, ou seja, se os objetivos propostos foram cumpridos adequadamente em concordância com o rigor técnico no âmbito da engenharia elétrica, em especial no quesito de sistemas de controle e eletrônica de potência.
- **Capítulo cinco (conclusão):** O capítulo cinco envolve os aspectos conclusivos bem como sugestões para trabalhos futuros que partem deste princípio.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são descritos os detalhamentos dos principais dispositivos utilizados na composição do sistema de armazenamento de energia. Isto é, características das baterias e dos ultracapacitores são esclarecidas quanto ao princípio de funcionamento e quanto aos benefícios de combinar-se tais unidades armazenadoras. Também é descrito o conversor CC-CC utilizado no âmbito de seu funcionamento em modo elevador ou abaixador de tensão, bem como os critérios estabelecidos para definir o seu estado de operação.

2.1 Baterias

Segundo (BARROZO, 2010) podemos definir quatro tipos principais de baterias para EV: baterias de chumbo-ácido, baterias de níquel-cádmio, baterias de níquel metal hidrídico e baterias de lítio-íon. A Tabela 2 informa alguns parâmetros de tais tipos presentes no mercado atual.

Tabela 2 – Características de alguns tipos de baterias.

Parâmetros	Chumbo-ácido	Ni-cad	NiMh	Lítio-íon
Custo inicial	Baixo	Médio	Médio	Baixo
Custo a longo prazo	Alto	Médio	Médio	Baixo
Segurança	Boa	Boa	Boa	Boa
Impacto ambiental	Alto	Alto	Médio-Alto	Médio-Baixo
Ciclos	200	250	400-500	400-600
Tensão nominal	2	1.2	1.2	3.4
Densidade de energia	35	41	80	120
Densidade de energia volumétrica	80	120	200	280
Autodescarga mensal(%)	<5	<10	<20	<5
Efeito memória	Não	Sim	Pouco	Não
Temperatura de operação (°C)	-15 a 50	-20 a 50	-20 a 60	-20 a 60
Peso	Pesada	Leve	Leve	Muito leve
Tempo de carga	Longo	Médio	Médio	Curto

Fonte: Adaptada de (BASTOS, 2013)

Baterias de chumbo-ácido se classificam como uma alternativa de larga disponibilidade e baixo custo, uma vez que os componentes principais para sua fabricação são baratos (chumbo e ácido sulfúrico) (COELHO, 2001). Além disso, sua técnica de fabricação avançou muito nas últimas décadas devido ao surgimento de novas tecnologias, fato que mudou o foco dos fabricantes que atualmente são atraídos a produzir baterias de profundo ciclo ao invés de produzir somente baterias de chumbo-ácido comum, utilizadas em sistemas como partida e ignição de automóveis (COELHO, 2001),(BASTOS, 2013).

As baterias de Níquel-Cádmio são mais caras que as de chumbo-ácido devido ao preço do cádmio. Em contrapartida, estas baterias apresentam maior energia e densidade de potência, sendo esta apenas uma de suas duas principais vantagens(BARROZO, 2010). Apesar disso, sua nocividade ao meio ambiente tornou-a uma alternativa questionável, reduzindo seu uso (COELHO, 2001).

Baterias de Níquel metal hidreto (NimH) apresentam densidades de energia da ordem do dobro quando relacionadas as baterias de chumbo-ácido. Além do mais, estas baterias se mostram atraentes nos quesitos armazenamento volumétrico, vida útil, temperatura de operação e robustez as descargas e sobrecargas (KHALIGH; LI, 2010), (COELHO, 2001). Todavia, se repetidamente descarregadas em altas correntes, sua vida útil é reduzida para cerca de 200-300 ciclos. O melhor desempenho para baterias de NiMH é alcançado quando descarregado 20% a 50% da capacidade nominal (KHALIGH; LI, 2010).

As baterias de íons de lítio mostram-se eficientes em equipamentos médicos e dispositivos eletrônicos portáteis. Ainda com respeito a estas baterias, mais precisamente em sua densidade de energia, podemos classificá-la como de alta densidade. Quanto ao seu desempenho, em temperaturas elevadas este é considerável, além do mais estas baterias são recicláveis como a de NimH (KHALIGH; LI, 2010). Porém, possuem vida útil curta, pois a disposição de detritos no eletrodo causa um curto-circuito interno. Também precisam de um controle de carga, uma vez que não suportam sobrecargas. (COELHO, 2001).

Entre os tipos principais de baterias existentes aplicáveis aos EV, a candidata mais promissora é a bateria de íons de lítio, sendo considerada nos últimos anos como a escolha mais adequada para EV de última geração. Em comparação com as demais tecnologias de baterias, estas são superiores em várias características, entre elas, podemos citar sua alta eficiência e densidade de energia, permitindo que estas sejam projetadas com menor peso e tamanho. Ainda com respeito as suas vantagens também podemos citar sua longa vida de ciclos de carga e descarga e sua baixa taxa de auto-descarga, bem como sua nocividade ao meio ambiente, que mostrou-se ser a mais conveniente dentre as demais baterias cabíveis para sistemas de EV(CHEN et al., 2012).

2.1.1 Baterias de íons de lítio: aspectos gerais

As baterias de íons de lítio são uma das mais populares nos dias atuais devido ao uso mundial de equipamentos eletrônicos portáteis (celulares, notebooks, dentre outros), sua comercialização iniciou-se nos primórdios da década de 90 caracterizando um curto histórico de utilização quando comparadas as baterias convencionais, como a de chumbo-ácido que possui mais de um século de existência (HORIBA, 2014).

A razão pela qual tais dispositivos dominaram o mercado atual tornando-se baterias pioneiras em um curto período de tempo se dá pela sua excelente performance e adiantamento oportuno para atender o vasto comércio de produtos eletrônicos (HORIBA, 2014).

Este tipo de baterias com relação aos componentes de sua construção e seu princípio de funcionamento, apresentam similaridades aos demais tipos de baterias. Isto é, os componentes primários (básicos) de operação são mantidos de maneira análoga e enquadram-se em cátodo, anodo, eletrólito e camada separadora. De modo que a singularidade destas unidades estão difundidas no material utilizado nos componentes primários de operação (CHEN et al., 2012).

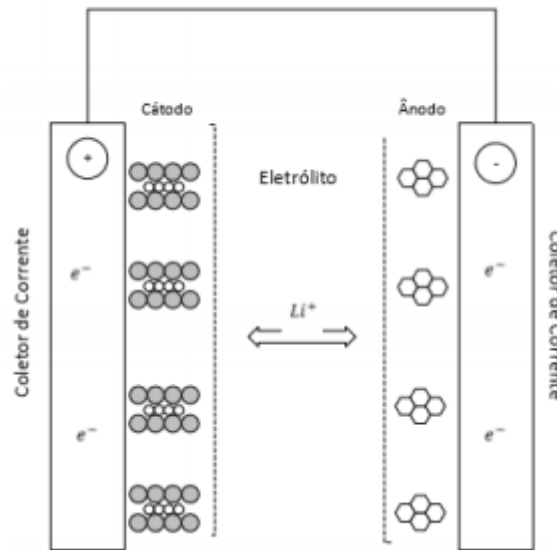
A Tabela 3, representa os componentes, seus princípios de funcionamento bem como o material utilizado em cada um dos componentes básicos. A Figura 6 ilustra tais componentes em uma estrutura interna de uma célula de bateria de íon de lítio.

Tabela 3 – Componentes essenciais de uma célula de bateria de lítio íon e suas principais operações.

Componente	Operação	Material
Cátodo	Íons de lítio entram no cátodo em um processo de carga e saem do cátodo em um processo de descarga	Óxido de lítio metal
Anodo	Íons de lítio entram no anodo em um processo de descarga e saem do anodo em um processo de carga	Grafite litiçado
Eletrólito	Canal de transporte dos íons entre anodo e cátodo	Sais de lítio e solventes orgânicos
Separador	Previne curto circuito entre os eletrodos, permitindo a passagem de íons pela sua camada porosa	Membranas micro-porosas

Fonte: Adaptada de (CHEN et al., 2012)

Figura 6 – Estrutura interna de uma bateria de íons de lítio



Fonte: Adaptada de (MARTINS, 2016).

2.1.2 Bateria de íons de lítio: aplicações automotivas

Diferente das baterias de chumbo-ácido que são utilizadas para funções como arranque, iluminação e ignição, as baterias de íons de lítio são utilizadas como fontes de energia e tração em veículos híbrido-elétricos (HEV's), e também em EV's (HORIBA, 2014).

Tal aplicação ainda encontra-se em uma fase embrionária, portanto existe uma vasta gama de tecnologia veicular baseada nos demais tipos de baterias. No entanto, existem diferenças específicas das baterias de íons de lítio com relação a sua aplicação, ou seja, se esta está disposta em um aparelho eletrônico portátil em EV's ou em HEV's (HORIBA, 2014).

Comparando as aplicações veiculares com as simples aplicações de consumo eletrônico, as baterias de íons de lítio diferem-se apenas na estrutura de controle, uma vez que para aplicações veiculares, necessita-se de um controle mais robusto. Porém, o mesmo não pode-se afirmar para baterias utilizadas em HEV's e EV's, muito embora, haja muitas semelhanças (HORIBA, 2014).

A razão pela qual as características das baterias de íons de lítio para HEV's e EV's diferem, se dá ao fato que veículos que utilizam a tecnologia híbrida provém uma menor demanda de energia elétrica, visto que parte significativa de energia encontra-se disposta no tanque de combustível. Não obstante, tal unidade deve suprir rápidas descargas em algumas ocasiões. No entanto, os EV's não possuem outra forma de armazenar energia além da proveniência elétrica. Portanto, o tamanho destas baterias nestas ocasiões diferem-se das baterias utilizadas em HEV's, ao passo que características como vida útil, segurança,

confiabilidade e custo mostram-se severamente semelhantes (HORIBA, 2014).

Com relação as baterias utilizadas em aplicações deste tipo, mais precisamente nos seus aspectos construtivos, podemos dizer que a principal fonte dos íons ativos encontra-se no cátodo. Sendo assim, para um alto fornecimento energético, o material utilizado deve ser capaz de incorporar uma vasta quantidade de lítio. Os materiais catódicos devem permutar o lítio de forma reversível e com poucas mudanças estruturais, a finalidade é prolongar a vida útil do dispositivo, bem como sua alta eficiência energética (CHEN et al., 2012).

O óxido de cobalto lítio (LCO), é o material catódico mais comumente utilizado, oferecendo uma capacidade de 155mAh/g e uma tensão nominal de 3,9V. No entanto, existe uma barreira quanto a disponibilidade do cobalto, o que reflete-se em seu custo. Como alternativa à este ponto, materiais de óxido de lítio baseados em níquel, manganês e cobalto (NMC) , apresentam desempenhos semelhantes, com baixo custo em relação à suas materias primas (pois o cobalto é misturado), e possuem também o benefício de estabilidade térmica. Materiais catódicos que utilizam fosfato de ferro lítio (LFP) são os mais promissores para aplicações em EV's, pois tratam-se de estruturas robustas e seguras, com capacidade de 160mAh/g e tensão nominal de 3,9V. E por último, mas não menos importante, materiais que utilizam óxido de lítio manganês possuem capacidade de 120mAh/g, porém são sensíveis a altas temperaturas.

Comercialmente, a dopagem catódica é baseada em óxido de metal litiado ou em fosfato de metal litiado. A Tabela 4 mostra a utilização de variados materiais catódicos, os fabricantes e desenvolvedores de algumas baterias e também alguns EV's que utilizam baterias deste princípio e a capacidade de tais baterias (CHEN et al., 2012).

Tabela 4 – Tipos selecionados de baterias de íons de lítio e utilização perante fabricantes atuais e tipos de EV's envolvidos.

Material catódico	Fabricantes	Modelo do EV (Capacidade da bateria)
Óxido de cobalto de lítio	Panasonic, Tesla	Tesla-Roadster (56Kwh)
Óxido de lítio manganês	Hitachi, Toshiba	Nissan-Leaf EV (24Kwh)
Fosfato de ferro lítio	GS Yuasa, Lichen	Mitsubishi imiEV (16Kwh)
Óxido de lítio NMC	Hitachi, Samsung	BMW mini-E (35Kwh)

Fonte: Adaptada de (CHEN et al., 2012)

2.2 Ultracapacitores

Os UC's são um tipo especial de capacitores de elevada capacitância. Também são conhecidos como capacitores eletroquímicos de dupla camada. Sendo que quando nomeados assim, seu princípio de funcionamento torna-se mais evidente (JR., 2015).

O UC é um dispositivo de armazenamento de energia com aplicações relativamente novas. Entretanto, em um passado recente suas aplicações limitavam-se em produtos eletrônicos, uma vez que a tensão que o UC suportava era da ordem de menos que 2,5 volts. Com a possibilidade de modularização o emprego destas unidades em aplicações com tensões mais elevadas tornou-se possível e mais precisamente na década de 90, seu uso começou a ser utilizado em HEV's deixando de participar no mercado apenas em um tímido cenário (BASTOS, 2016).

Quanto ao seu desenvolvimento, podemos afirmar que tornou-se frequente nos últimos anos de forma rápida. Empresas conceituadas no ramo de desenvolvimento eletrônico como a Maxwell, NEC e Panasonic lançaram produtos maduros que são aplicados nos campos de HEV's, energia eólica, energia solar rede inteligente dentre outros. Além disso, outros campos de aplicações estão se expandindo como por exemplo, trilhos elétricos, exploração de petróleo e aplicações aeroespaciais (TAO; LI,).

As principais vantagens dos UC's se enquadram em: alta capacidade, alta densidade de potência, longos ciclos de carga e descarga e temperatura de trabalho razoável (TAO; LI,).

Um elemento importante de uma célula ultracapacitiva é o material poroso de carbono, Figura 7. Quanto a este material, existem tecnologias atuais sobre o material utilizado em conjunto deste, com finalidade de melhorar a eficácia de toda célula. Existem cinco principais linhas de pesquisa em relação ao material utilizado em combinação com o carbono. Sobre as quais podemos ter: metal compósitos de fibras, carbono espumado, partículas de carbono com aglutinantes, polímeros em forma de filmes dopados em carbono, e por fim, mistos revestimentos de óxido metálico em uma folha metálica. Quanto a eficiência, as pesquisas atuais revelam que maiores densidades de energia podem ser obtidas com um eletrodo compósito de carbono usando um eletrólito orgânico em vez de um eletrodo composto de fibra de carbono (KHALIGH; LI, 2010).

Com relação a difusão do dispositivo, o seu elevado custo ainda é considerado um empecílio para sua ampla utilização. Embora que, quando combinados com outras fontes alternativas de energia como baterias ou células combustíveis, tal combinação pode resultar em um desfecho não só economicamente, mas tecnicamente viável devido a complementaridade destes dispositivos com relação as suas densidades de energia e potência (BASTOS, 2016).

2.2.1 Princípio de operação do UC

O princípio de funcionamento do UC basea-se na estrutura de um capacitor eletroquímico de dupla camada (TAO; LI,), (KOTZ; M.CARLEN, 2000).

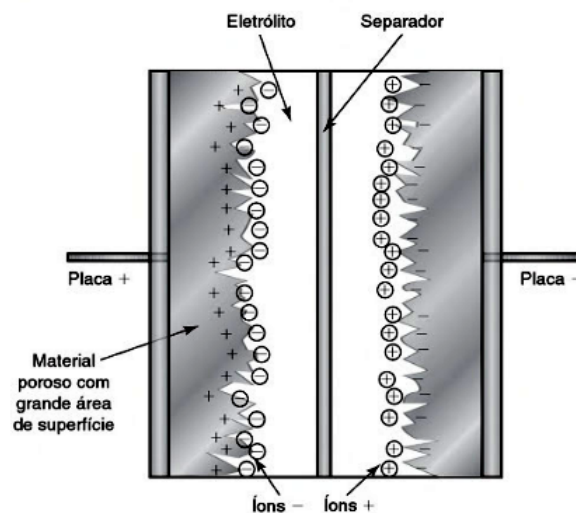
Quando aplica-se tensão nos terminais de uma célula ultracapacitiva, as cargas são excitadas a se movimentar aglutinando-se nos eletrodos, de modo que no eletrodo polarizado positivamente aglutinam-se cargas negativas, e da mesma forma, as cargas positivas são concentradas no eletrodo negativo. Assim forma-se uma camada denominada de camada de Helmholtz, que de certa maneira equilibra o campo elétrico interno no eletrólito (TAO; LI,), (KOTZ; M.CARLEN, 2000).

As cargas polarizadas opostamente se prendem nas diferentes fases da interface e a distância entre elas é extremamente pequena. Logo, pela representação da capacitância descrita pela equação (2.1), é de notável percepção que para distâncias muito próximas a capacitância tende a ser muito alta (TAO; LI,), (KOTZ; M.CARLEN, 2000).

$$UC = \epsilon\epsilon_0 \cdot \left(\frac{A}{d}\right) \quad (2.1)$$

Em que, A é a área do eletrodo, d é a distância entre as interfaces, ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo e ϵ é a constante de permissividade do dielétrico.

Figura 7 – Estrutura de um Ultracapacitor.



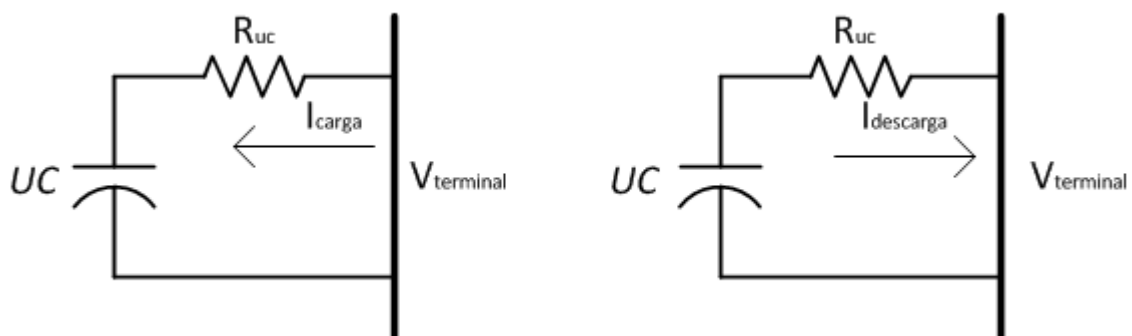
Fonte: Adaptada de (JR, 2015).

Apesar do princípio de funcionamento ser muito semelhante ao dos capacitores convencionais, os UC's apresentam algumas características que não são compartilhadas pelos capacitores comuns. Que em resumo são: uma estrutura de dupla camada, que tem mais área de eletrodo do que um capacitor comum, ocasionando em maiores níveis de capacitâncias. Eletrodos porosos, que fornecem uma maior superfície para aglutinação de cargas, ainda contribuindo para os elevados valores de capacitância. E a pequena distância entre as cargas positivas e negativas, fato que também contribue para o valor da capacitância em exercício (TAO; LI,).

Haja visto as diferenças entre os capacitores convencionais e os UC's, conquanto tratem-se de elementos diferentes, suas semelhanças são inegáveis. Desta forma, o modelo de UC utilizado neste texto é baseado na Figura 8, embora na literatura atual encontram-se várias modelagens deste dispositivo, algumas delas muito complexas por admitir não-linearidades nos processos de carregamento e descarregamento do UC. Como por exemplo, as modelagens descritas em (TAO; LI,).

Entretanto, a modelagem admitida pela Figura 8 caracteriza-se como simples, porém, engloba suas principais peculiaridades.

Figura 8 – Modelo funcional de UC utilizado



Fonte: Do autor

Em que:

- UC : Capacitância do UC.
- $V_{terminal}$: Tensão nos terminais do UC.
- R_{UC} : Resistência parasita do UC.

O modelo descrito se assemelha ao de um capacitor comum. Todavia, ao decorrer do texto tal modelo será admitido com uma resistência parasita muito pequena e uma capacitância muito grande, fato este que difere um UC modelado de tal forma de um capacitor convencional.

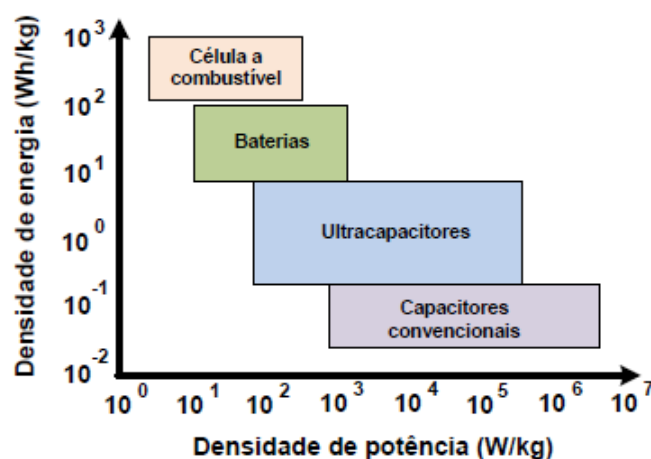
2.3 Baterias e UC's: benefícios da operação em conjunto

Unidades híbridas de armazenamento, geralmente são submetidas a comportamentos intervalados, devido a configuração da aplicação e da carga em questão. Com respeito ao comportamento intermitente de tais fontes de energia e as variações da carga acoplada a tais unidades, faz-se necessário o conhecimento do perfil de potência da fonte e da carga de modo a escolher os elementos armazenadores. De modo que, para amortecer oscilações de baixa frequência, é necessário um dispositivo armazenador de alta densidade de energia. Em contrapartida, para amortecer oscilações de alta frequência e também para suprir o fornecimento ou absorção de um período transiente de alta potência, faz-se necessário o uso de um dispositivo com alta densidade de potência (ZHOU et al., 2011).

Embora possamos nos deparar com sistemas de armazenamento contendo um único elemento de alta densidade de energia ou potência, esta alternativa não mostra-se eficaz ou menos atraente, pois, se utilizarmos um como unidade de armazenamento apenas baterias, estas deverão ser grandes de modo a atender uma máxima demanda de carga. Da mesma forma, Se utilizarmos apenas UC's estes deverão ser grandes de modo a armazenar uma quantidade maior de energia para tratar a intermitência da fonte e os desvios padrão de carga (ZHOU et al., 2011).

Uma alternativa interessante é combinar o UC com outras fontes de energia, agindo de forma complementar, tornando-a viável. Pois cada dispositivo apresenta uma densidade de potência e de energia diferentes, Figura 9. Tal combinação permite ao ultracapacitor

Figura 9 – Diagrama de Ragone.



Fonte: Adaptada de (BASTOS, 2016)

entregar uma quantidade de energia em um tempo reduzido, devido sua elevada densidade de potência (surtos momentâneos de corrente ou armazenamento em uma frenagem regenerativa). A bateria por sua vez, atua no regime permanente, entregando pacotes de

energia por um tempo mais elevado uma vez que possui elevada densidade de energia, Figura 9 ,(BASTOS, 2016) ,(KOTZ; M.CARLEN, 2000), (JR., 2015).

2.4 Conversor buck-boost bidirecional

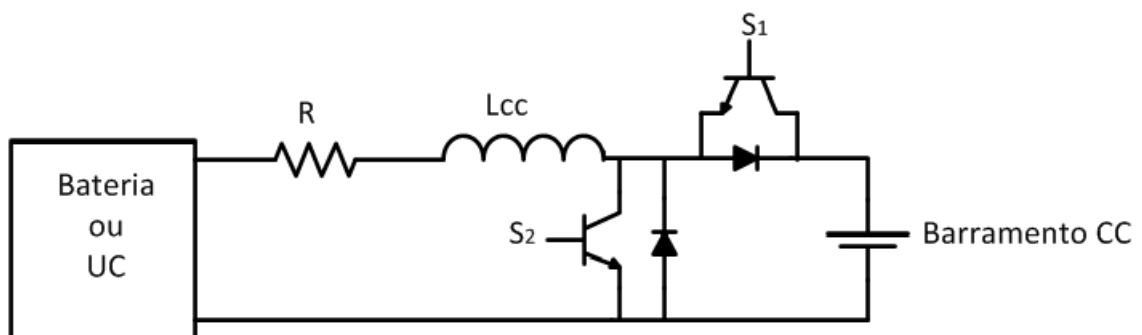
Os conversores CC-CC são circuitos eletrônicos de potência capazes de converter um nível de tensão contínua em outro mais adequado, normalmente de saída regulada. Estes conversores, também podem ser denominados conversores chaveados, uma vez que o princípio básico de funcionamento parte do pressuposto que os níveis de tensão são alcançados com auxílio de uma chave eletrônica semicondutora (HART, 2011).

Normalmente, um conversor CC-CC simples é de sentido único, isto é, um dispositivo que provê apenas um fluxo unidirecional de energia. Embora um fluxo bidirecional possa ser obtido por meio de um arranjo de conversores unidirecionais em paralelo, esta alternativa não mostra-se atraente em termos de volume e custo (YANG; ZHIGANG, 2014).

Dentre os vários tipos de conversores de corrente contínua descritos na literatura, destaca-se o conversor abaixador-elevador (buck-boost) bidirecional. Este, é denominado desta forma pois trata-se de uma topologia que permite ambas operações. Este conversor é uma expansão do conversor CC-CC tradicional e é uma maneira eficiente de prover um fluxo de energia e potência de maneira bidirecional (YANG; ZHIGANG, 2014).

A Figura 12, mostra um conversor buck-boost bidirecional que serve de intermédio de potência para uma bateria de corrente contínua ou um ultracapacitor conectados a um barramento CC (BASTOS, 2016).

Figura 10 – Conversor buck-boost bidirecional.

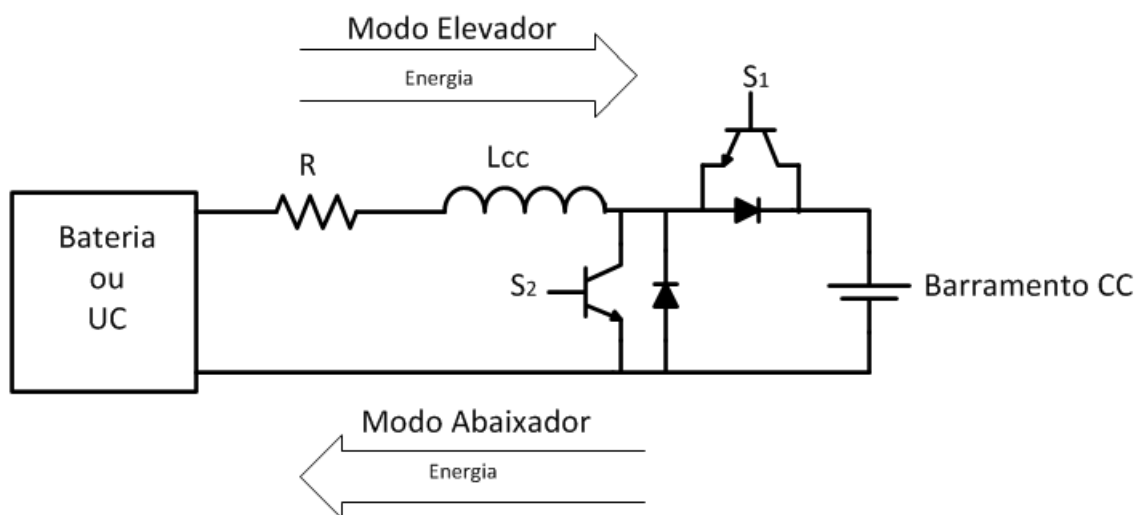


Fonte: Do autor

Considerando o fluxo de energia fluindo da esquerda para a direita, temos um conversor elevador de tensão (modo boost), Figura 11. Neste estágio de operação, a tensão da bateria é elevada nos terminais do barramento CC. Considerando o fluxo de energia fluindo da direita para esquerda, temos um conversor abaixador de tensão (modo buck),

Figura 11. Neste estágio de operação, a tensão do barramento CC é abaixada nos terminais da bateria.

Figura 11 – Estados de operação do conversor



Fonte: Do autor

Desde que o chaveamento dos semicondutores obedeça o estado de comutação complementar o conversor da Figura 11 pode operar em ambos os estados citados acima. Se o ciclo de trabalho D esteja na chave 1 (70% por exemplo), na chave 2 estará o seu estado em complemento (30%). (BASTOS, 2016).

Em conversores eletrônicos para aplicações em veículos elétricos, o requisito de carga varia rapidamente conforme a aplicação veicular. Devido a este fato, o conversor é submetido a condicionar tensão e (ou) corrente para os dispositivos de armazenamento ou para carga dependendo se o processo é de carregamento ou de descarregamento. Deste modo, o conversor deve lidar com variados pontos de operação. Além disso, estes dispositivos eletrônicos apresentam técnicas de controle desafiantes pois envolvem frequentes variações proporcionando uma alta não-linearidade (WANG; QIN; KIM, 2014).

Em projeto de conversores é desejável que a tensão de saída seja imutável independente das mudanças de carga ou da tensão de entrada. Isto é conseguido a partir da construção de uma estrutura de controle que varie o ciclo de trabalho do chaveamento de forma que atenda um valor de referência para a tensão terminal (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007).

Entretanto, para projetarmos um conversor que atenda tais características é preciso um modelo dinâmico de comutação. Tal modelo é conseguido a partir de uma função de transferência da planta. (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007).

Esta técnica é apresentada no capítulo três com mais detalhes.

3 Metodologia

Neste capítulo apresenta-se a dinâmica dos conversores bem como os critérios de sintonia para os controladores do sistema, a partir de um modelo em pequenos sinais linearizado em um ponto de operação. Tal metodologia que é baseada na frequência de corte e margem de fase.

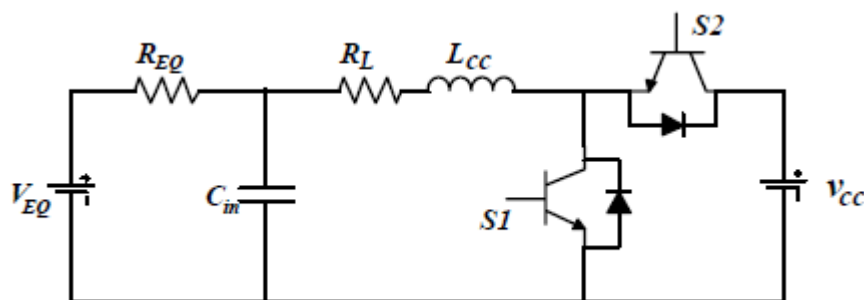
3.1 Análise do conversor CC-CC bidirecional por meio da abordagem em espaço de estados

A análise em espaço de estados consiste em obter uma representação canônica para descrever as equações diferenciais que regem o comportamento do sistema abordado por meio de variáveis que são denominadas "variáveis de estado". Geralmente, as variáveis de estado do sistema são associadas quanto ao armazenamento de energia, de modo que para o circuito conversor elas são representadas pela corrente no indutor (i_l) e pela tensão no capacitor ($v_{C_{in}}$) (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007).

Em uma representação em espaço de estados as derivadas das variáveis de estado são representadas por meio de uma combinação linear das entradas do sistema e também pelas próprias variáveis de estado (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007). Embora o conversor abordado apresente uma dinâmica não-linear devido aos seus estados de chaveamento, podemos obter por partes a representação em espaço de estados da planta, ora como conversor elevador, ora como conversor abaixador de tensão. Sendo esta análise necessária para posteriormente obter o modelo em pequenos sinais do conversor abordado linearizado em torno de um ponto de operação (BASTOS, 2016).

A Figura 12 mostra o tipo do conversor utilizado neste texto, a Tabela 5 apresenta a representação dos parâmetros genéricos utilizados nesta mesma Figura.

Figura 12 – Modelo simplificado do conversor utilizado.



Fonte: Adaptada de (BASTOS,2016).

Tabela 5 – Representação dos parâmetros genéricos do circuito da Figura 12.

Parâmetros	Representação (unidade)
V_{eq}	Tensão do armazenador (V)
V_{cc}	Tensão no barramento CC (V)
R_{eq}	Resistência parasita da fonte alternativa de energia (Ω)
R_l	Resistência parasita do indutor (Ω)
L_{cc}	Indutor (H)
C_{in}	Capacitor (F)
S_1	Representação para IGBT 1 (adimensional)
S_2	Representação para IGBT 2 (adimensional)

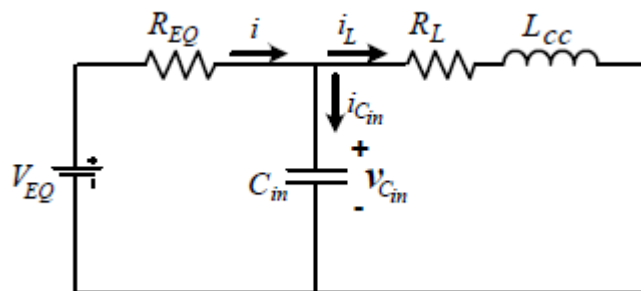
Fonte: Do autor

Para obter a representação em espaço de estados do conversor da Figura 12, faz-se necessário a análise de comutação das chaves. De fato, S_1 e S_2 nunca irão conduzir ao mesmo momento, mas a soma do intervalo de condução destas será de um ciclo completo de trabalho. Ou seja, se S_1 estiver em um ciclo de trabalho de d , S_2 terá um ciclo de trabalho de $d'=(1-d)$. Desta forma, garantimos que o conversor bidirecional atue de forma complementar em relação ao seu chaveamento (BASTOS, 2016).

Modo de operação para chave S_1 fechada e S_2 aberta

A Figura 13 representa a operação do conversor em modo elevador de tensão, situação em que S_1 permanece fechada enquanto S_2 permanece aberta. Nesta ocasião, relaciona-se as equações diferenciais de corrente no capacitor e tensão no indutor.

Figura 13 – Operação para chave S1 fechada e S2 aberta



Fonte: Adaptada de (BASTOS,2016).

$$\frac{dV_{Cin}}{dt} = \frac{V_{eq}}{R_{eq}C_{in}} - \frac{V_{Cin}}{R_{eq}C_{in}} - \frac{i_l}{C_{in}} \quad (3.1)$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{V_{Cin}}{L_{cc}} - \frac{R_l i_l}{L_{cc}} \quad (3.2)$$

No entanto, podemos reescrever as equações anteriores em termos de matrizes de estado da forma $\dot{x} = A_1x + B_1u$ e $y = C_1x$:

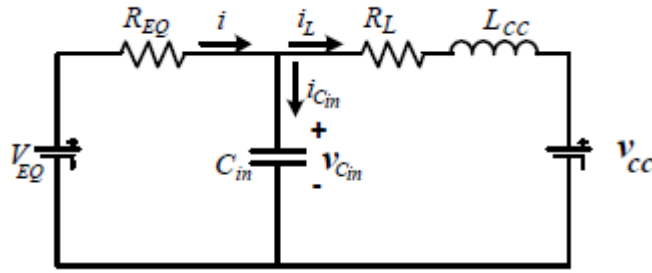
$$\begin{pmatrix} \frac{di_l(t)}{dt} \\ \frac{dV_{Cin}(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R_l}{C_{in}} & \frac{1}{L_c} \\ \frac{-1}{C_{in}} & \frac{-1}{R_{eq}C_{in}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_l \\ V_{Cin} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{R_{eq}C_{in}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{cc} \\ V_{eq} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_l \\ V_{Cin} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Modo de operação para chave S_2 fechada e S_1 aberta

A Figura 14 representa a operação do conversor em modo abaixador de tensão, situação em que S_2 permanece fechada e S_1 permanece aberta. Nesta ocasião, relaciona-se as equações diferenciais de corrente no capacitor e tensão no indutor.

Figura 14 – Operação para chave S2 fechada e S1 aberta



Fonte: Adaptada de (BASTOS,2016).

$$\frac{dV_{Cin}}{dt} = \frac{V_{eq}}{R_{eq}C_{in}} - \frac{V_{Cin}}{R_{eq}C_{in}} - \frac{i_l}{C_{in}} \quad (3.5)$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{V_{Cin}}{L_{cc}} - \frac{R_l i_l}{L_{cc}} - \frac{V_{cc}}{L_{cc}} \quad (3.6)$$

No entanto, podemos reescrever as equações anteriores em termos de matrizes de estado da forma $\dot{x} = A_2x + B_2u$ e $y = C_2x$:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_l(t)}{dt} \\ \frac{dV_{Cin}(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R_l}{L_c} & \frac{1}{L_c} \\ \frac{-1}{C_{in}} & \frac{-1}{R_{eq}C_{in}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_l \\ V_{Cin} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{-1}{L_c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{eq}C_{in}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{cc} \\ V_{eq} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_l \\ V_{Cin} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

3.2 Modelo em pequenos sinais

A linearização dos parâmetros em pequenos sinais, pode ser feita somando o ponto de operação com uma pequena perturbação. Porém, faz-se necessário ponderar as matrizes de estado no tempo (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007):

$$\dot{x} = [A_1d + A_2(d')]x + [B_1d + B_2(d')]U \quad (3.9)$$

$$y = [C_1d + C_2(d')]x \quad (3.10)$$

Em que $d' = (1 - d)$.

Introduzindo uma pequena perturbação nas equações (3.9) e (3.10) para separação das componentes CC e CA (corrente alternada), as variáveis passam a se comportar da seguinte maneira (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007):

$$x = X + \hat{x} \quad (3.11)$$

$$i_L = I_L + \hat{i}_L \quad (3.12)$$

$$d = D + \hat{d} \quad (3.13)$$

Nas equações (3.11), (3.12) e (3.13), os termos em maiúsculo representam a parte contínua do sinal (valor médio) e os termos sobrescritos representam a parte alternada (perturbações). Desconsiderando perturbações nas variáveis de entrada, obtemos uma representação da seguinte forma:

$$\dot{\hat{x}} = AX + BU + A\hat{x} + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U]\hat{d} \quad (3.14)$$

Onde, A é representado por:

$$A = A_1D + A_2(1 - D) \quad (3.15)$$

E B é representado por:

$$B = B_1D + B_2(1 - D) \quad (3.16)$$

Para obter o comportamento em regime permanente, basta fazer nulos os termos não-oscilantes da equação (3.14), uma vez que estes são constantes e sua derivada é zero.

$$AX + BU = 0 \quad (3.17)$$

Logo,

$$X = -A^{-1}BU \quad (3.18)$$

Da mesma forma, para obter o comportamento da parcela oscilante da equação (3.14), estamos analisando a resposta do sistema em torno de um ponto de operação, sendo este ponto o valor médio descrito em (3.18):

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U]\hat{d} \quad (3.19)$$

Da mesma forma, podemos usar tal procedimento também para as variáveis de saída:

$$C = C_1 D + C_1(1 - D) \quad (3.20)$$

$$I_L = CX \quad (3.21)$$

Inserindo as perturbações e analisando a parte alternada:

$$\hat{i}_L = C\hat{x} + [(C_1 - C_2)X]\hat{d} \quad (3.22)$$

Para obtermos a função de transferência é preciso aplicar a transformada de Laplace nas equações (3.19) e (3.22):

$$\hat{i}_L(s) = C\hat{x}(s) + [(C_1 - C_2)X]\hat{d}(s) \quad (3.23)$$

$$\dot{\hat{x}}(s) = A\hat{x}(s) + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U]\hat{d}(s) \quad (3.24)$$

Substituindo (3.24) em (3.23), temos:

$$G(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = C[sI - A]^{-1}[(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U] + (C_1 - C_2)X \quad (3.25)$$

Desta forma, substituindo os parâmetros adequados:

$$G(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_{cc}(C_{in}R_{eq}s + 1)}{s^2 R_{eq}C_{in}L_{cc} + s(L_{cc} + C_{in}R_{eq}R_L) + R_{eq} + R_L} \quad (3.26)$$

É importante observar que a função de transferência no domínio da frequência descrita em (3.26), representa apenas as oscilações em torno de um ponto médio de funcionamento. De fato, com base nessa planta não é possível simular o funcionamento do circuito a não ser em torno do ponto de linearização (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007).

A importância de se obter tal equação se dá na necessidade do projeto de controladores clássicos para atender os critérios de controle do conversor projetado (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007).

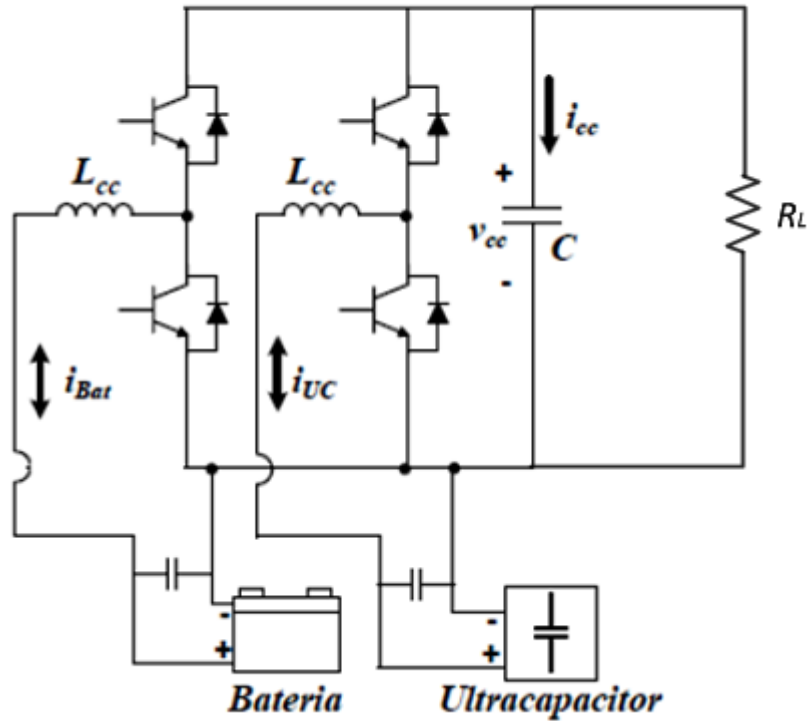
3.3 Interface de potência para baterias e ultracapacitores

A Figura 15 mostra a interface eletrônica responsável pela integração do barramento CC comum aos armazenadores de energia. Esta configuração resume-se em dois conversores buck-boost bidirecionais gerenciando os elementos armazenadores (bateria e ultracapacitor).

A necessidade de utilizar um conversor que opera em dois quadrantes é proveniente da natureza da corrente que circula na interface, hora armazenando energia e hora fornecendo (BASTOS, 2016).

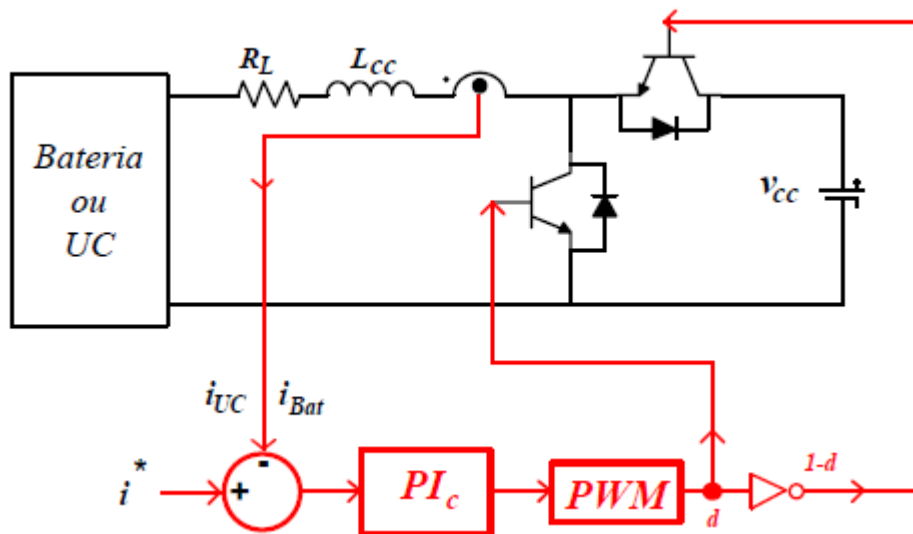
A Figura 16 ilustra a estrutura de controle utilizada para o controle da corrente de carga e descarga através de um controlador proporcional integrador (PI) utilizado para o controle do acionamento das chaves semicondutoras (IGBT's).

Figura 15 – Conversores CC-CC empregados na integração dos armazenadores



Fonte: Adaptada de (BASTOS, 2016).

Figura 16 – Interface de potência para baterias e ultracapacitores



Fonte: Adaptada de (BASTOS,2016).

3.3.1 Controle da corrente de carga e descarga dos elementos armazenadores

A Tabela 6 exemplifica os componentes utilizados no modelo em pequenos sinais do conversor CC-CC.

Tabela 6 – Parâmetros do modelo em pequenos sinais

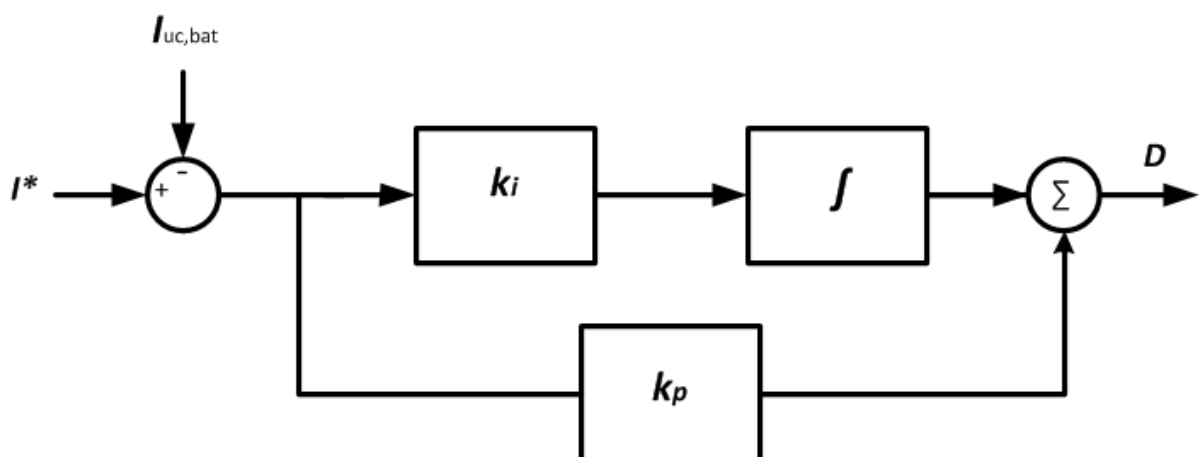
Símbolo (unidade)	Valor
R_L (Ω)	0,01
C_{in} (μF)	400
R_{eq} (Ω)	0,1
V_{eq} (V)	200
V_{cc} (V)	80
L_{cc} (mH)	5
$f_{chaveamento}$ (kHz)	10

Fonte: Do autor

Considerando a estrutura das Figuras 15, 16 e a equação (3.26), para os elementos de projeto considerados na Tabela 6, é possível projetar um controlador PI clássico com base nos critérios de margem de fase e frequência de corte, em que a frequência de corte localiza-se uma década abaixo da frequência de chaveamento e a margem de fase ocupa uma parcela da janela de 50° a 70° (VILLALVA, 2010).

Utilizando a ferramenta de sintonia sisotool do MATLAB, obteve-se um controlador PI clássico conforme a Figura 17 para atuar na modulação por largura de pulso.

Figura 17 – Controlador PI clássico



Fonte: Do autor

Em que os parâmetros da Figura 17 são representados pela Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros do controlador PI

Símbolo	Valor
K_i	300
K_p	$\frac{1}{2}$

Fonte: Do autor

Com base nas Tabelas 6, 7 e a equação (3.26), podemos obter a função de transferência da planta a ser controlada e de seu respectivo controlador.

3.3.2 Estratégias de gerenciamento do sistema híbrido

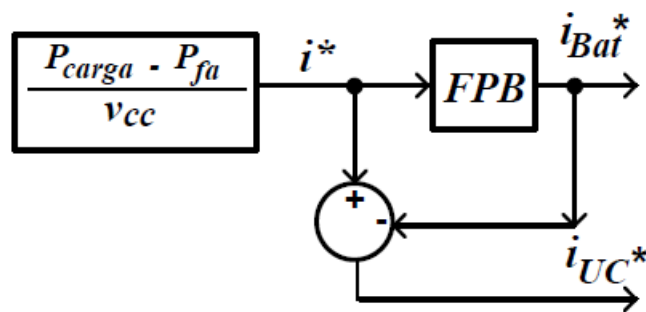
Para gerenciar o sistema híbrido de armazenamento de energia elétrica composto por baterias e UC's, faz-se necessário que os transitórios de potência sejam supridos pelo UC enquanto as operações em regime permanente sejam atendidas pela bateria, devido a natureza de cada elemento armazenador (BASTOS, 2016).

Neste aspecto, a Figura 18, apresenta a estratégia de gestão de energia proposta por (ZHOU et al., 2010) e (ZHOU et al., 2011).

Note que a corrente de referência para o UC é resultado da filtragem da diferença da corrente consumida pela bateria e da corrente gerada pelas fontes armazenadoras de energia.

A necessidade do filtro passa-baixas é proveniente da garantia que a bateria atenda apenas os estados de regime permanente, restando para o UC uma demanda transiente, uma vez que transitórios de carga podem ser compreendidos como altas frequências. Deste modo, a corrente referenciada para o UC é de fato um filtro passa-altas, obtido indiretamente por meio do gerenciamento de energia proposto. Situação em que, após as filtrações, propicia a bateria uma demanda com uma dinâmica lenta e ao UC uma demanda em surtos de corrente (BASTOS, 2016), (ZHOU et al., 2010), (ZHOU et al., 2011).

Figura 18 – Estratégia de gestão de energia proposta por (ZHOU et al., 2010)



Fonte: Adaptada de (BASTOS, 2016).

No entanto, na estratégia de gerenciamento de energia da Figura 18, a tensão do UC é livre para variar desde o estado mínimo ao máximo, como por exemplo o valor de saturação do dispositivo (BASTOS, 2016).

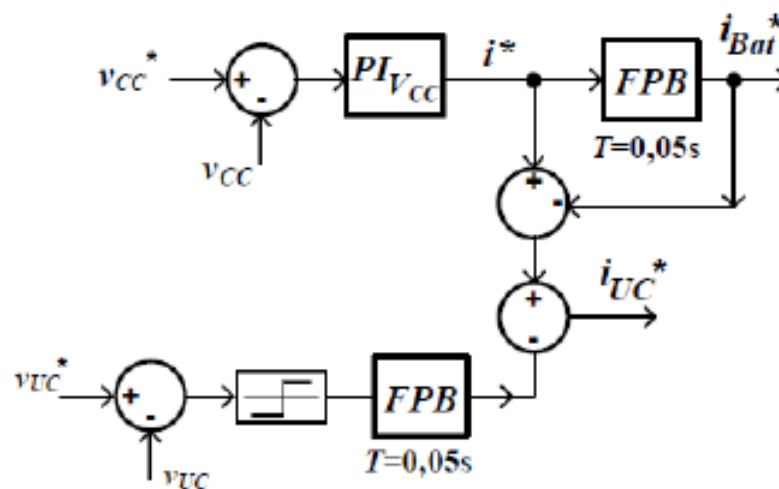
O UC, diante de tais ocasiões ocupa-se de fornecer as correntes necessárias em situações de surto, tornando-se nesta conjuntura vulnerável a surtos posteriores de corrente. Uma vez que, situações em que exijam uma imediata demanda de potência podem acontecer sem que o dispositivo armazenador (UC) esteja preparado para atendê-la, pois um grande desvio de tensão foi preterido ao surto posterior. Como consequência, este tipo de gestão requer um UC com alta densidade de potência e alta capacitância, para atender de forma eficiente e ocasiões desta natureza (BASTOS, 2016).

Como alternativa as deficiências da proposta da Figura 18, (BASTOS, 2016) apresenta uma gestão de energia com melhor funcionalidade com relação a operação do ultracapacitor. O propósito da estrutura é focado na restauração contínua de tensão em terminais do UC.

Trata-se da adição de um termo negativo a corrente do UC, de forma proporcional ao erro da tensão terminal do elemento armazenador. Esse termo, tem como finalidade, a limitação e o atraso do processo de restauração da tensão em terminais. Contudo, isso é possível por meio de um saturador e de um filtro passa baixas de modo que a restauração aconteça de forma suave. Além disso, o processo de restauração somente pode ser iniciado após o transitório de corrente suprido pelo UC. (BASTOS, 2016).

Recomenda-se nesta ocasião que a constante de tempo da estrutura restauradora seja maior ou igual a constante de tempo do filtro da bateria, desta forma a restauração de tensão do UC somente é inicializada após um surto de corrente (BASTOS, 2016).

Figura 19 – Estratégia de gestão de energia proposta por (BASTOS, 2016)



Fonte: Adaptada de (BASTOS, 2016).

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados simulados de todo o sistema proposto com as estruturas descritas pelo capítulo três.

Primeiramente será testado o desempenho do controlador PI para variadas referências de entrada. Em um segundo instante, a estratégia de gerenciamento de energia proposta por (ZHOU et al., 2010) para gerenciamento de fontes alternativas mostrada pela Figura 18, será adaptada e testada para diferentes entradas e dinâmica dos filtros passa-baixas. Por fim, o gerenciamento proposto por (BASTOS, 2016), ilustrado pela Figura 19, foi utilizado para gerar os padrões de referência da interface da Figura 16. Nesta ocasião, para diferentes cargas acopladas ao barramento CC será verificado o comportamento da interface com respeito a restauração de tensão do UC, da dinâmica dos filtros e do comportamento do sistema perante condições de frenagem regenerativa.

Para todos os testes mostrados neste capítulo, adota-se um controlador PI conforme mostrado pela Tabela 7 e os parâmetros do modelo mostrados pela Tabela 6.

Toda a simulação foi executada no software PSIM 9.0.3, de modo que para fins de estética os gráficos mostrados neste capítulo foram gerados por meio do software MATLAB R2013b da Mathworks.

4.1 Testes de desempenho do controlador PI

A fim de testar o desempenho do controlador ilustrado pela Figura 17, com suas características impostas pela Tabela 7, analisa-se o comportamento da interface da Figura 16 para diferentes entradas de controle. Isto é, a dinâmica da interface da Figura 17, para diferentes perfis de referência.

Para tanto, testa-se quatro padrões distintos de entrada ao controlador, são eles: degrau simples, degraus simultâneos, degraus intermitentes e referência triangular intermitente.

As Tabelas 8, 9, 10 e 11 mostram os parâmetros de entrada e as Figuras 20, 21, 22 e 23 mostram a resposta do controlador em tais ocasiões.

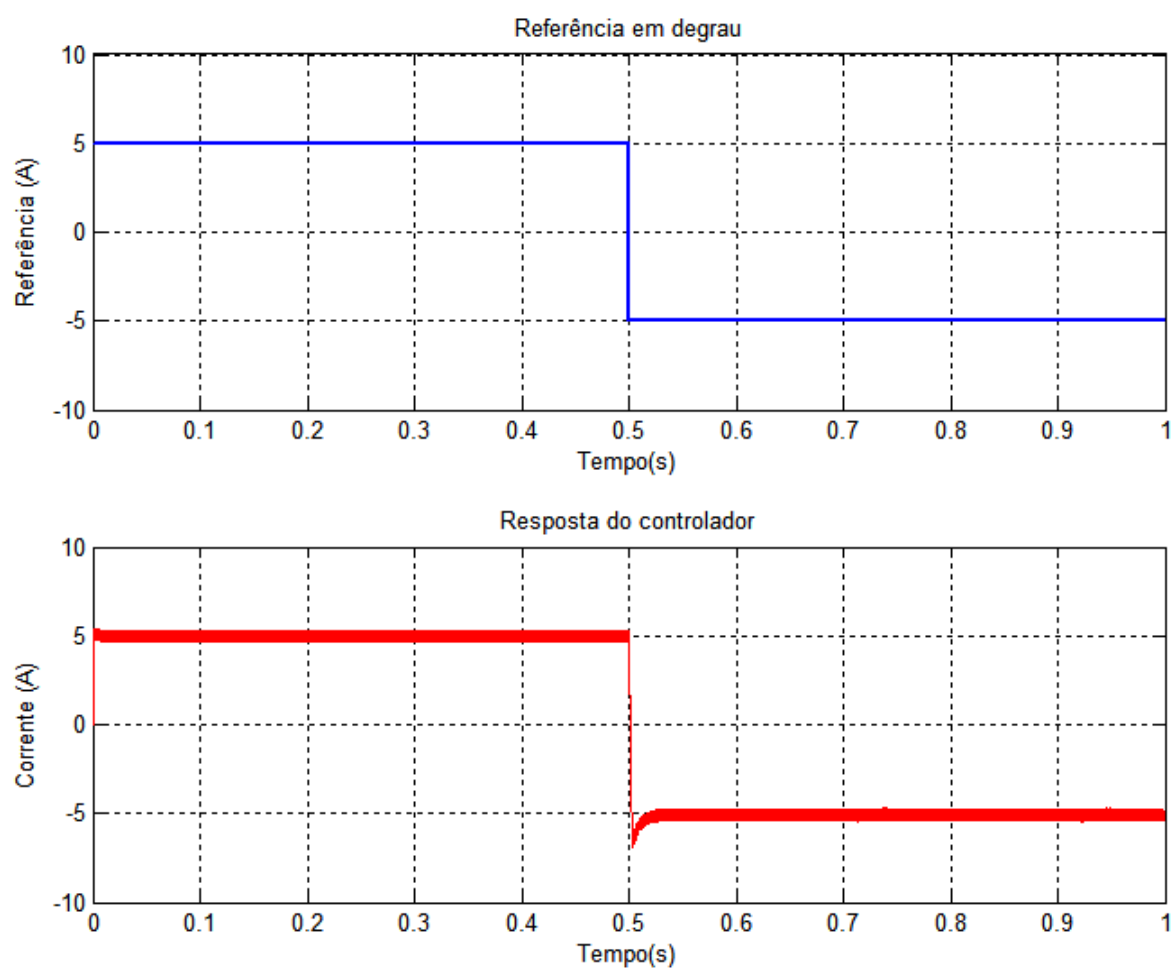
Nota-se que em todas as ocasiões, a corrente na interface, isto é, a resposta do controlador segue de forma fidedigna a referência, confirmando o desempenho aceitável do controlador utilizado no sistema de armazenamento híbrido de energia.

Tabela 8 – Parâmetros de entrada ao degrau para a resposta do controlador ilustrada pela Figura 20.

Parâmetros de entrada	Degrau
V_{pp}	-10(V)
$Offset$	5(V)
Tempo de partida	0.5(s)

Fonte: Do autor

Figura 20 – Referência em degrau e resposta do controlador para a interface disposta pela Figura 16.



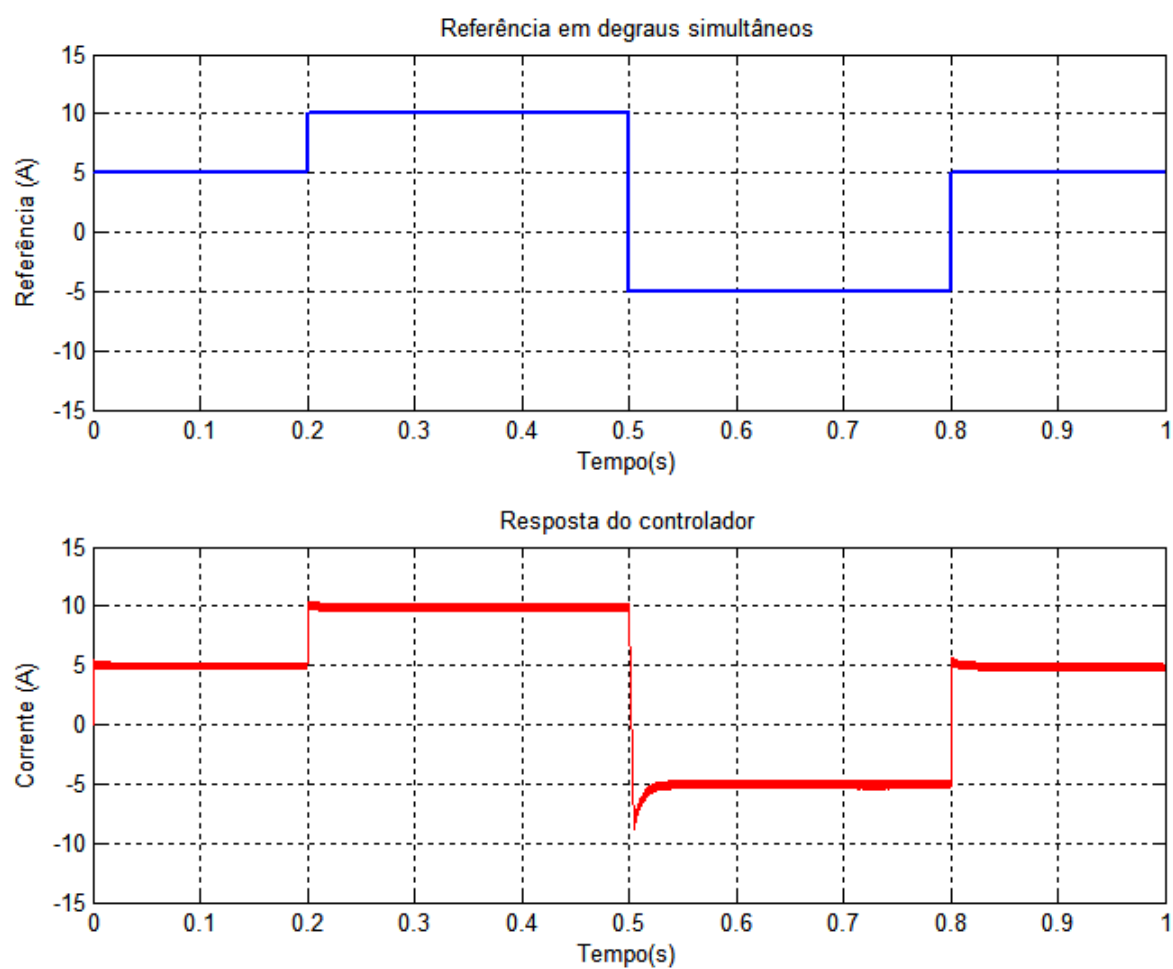
Fonte: Do autor.

Tabela 9 – Parâmetros de entrada a degraus simultâneos para a resposta do controlador ilustrada pela Figura 21.

Parâmetros	1º Degrau	2º Degrau	3º Degrau
V_{pp}	5(V)	-15(V)	10(V)
$Offset$	5(V)	5(V)	5(V)
Tempo de partida	0.2 (s)	0.5(s)	0.8(s)

Fonte: Do autor

Figura 21 – Referência em degraus simultâneos e resposta do controlador para a interface disposta pela Figura 16.



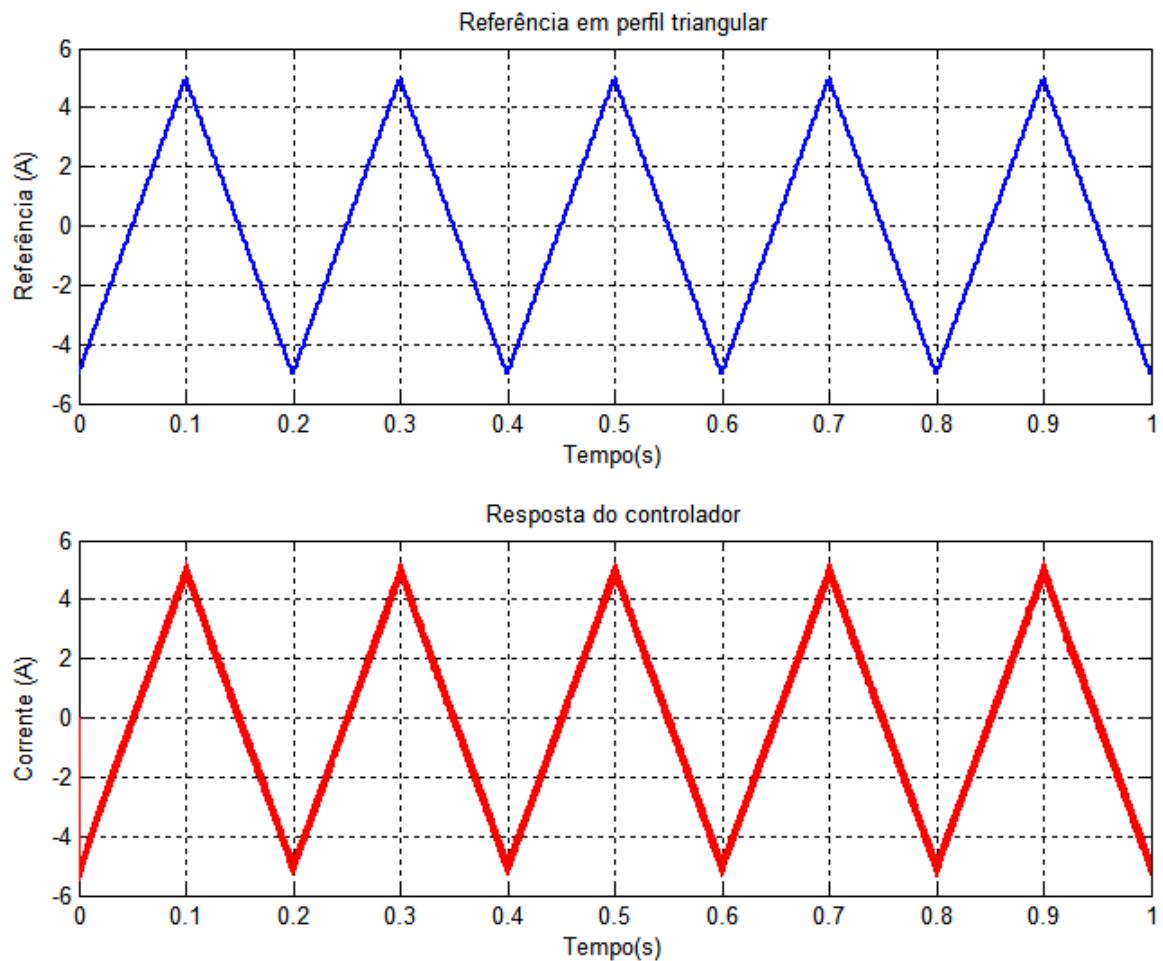
Fonte: Do autor.

Tabela 10 – Parâmetros de entrada em referência triangular intermitente para a resposta do controlador ilustrada pela Figura 22

Parâmetros da entrada	Valor (unidade)
V_{pp}	10(V)
<i>Offset</i>	-5(V)
Duty cycle	0.5
Frequência	5 (Hz)
Tempo de partida	0 (s)

Fonte: Do autor

Figura 22 – Referência em perfil triangular intermitente e resposta do controlador para a interface disposta pela Figura 16.



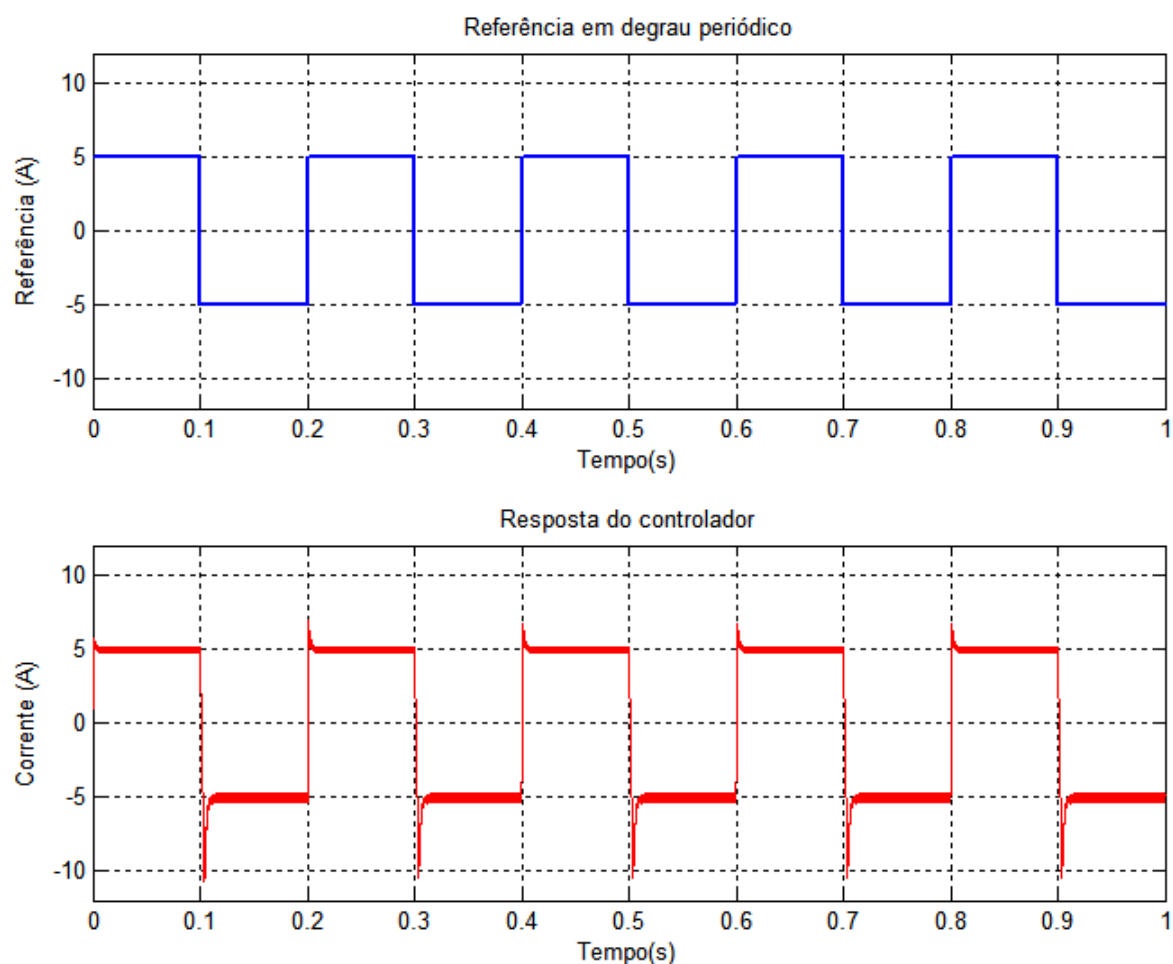
Fonte: Do autor.

Tabela 11 – Parâmetros de entrada em referência de degrau intermitente para a resposta do controlador ilustrada pela Figura 23

Parâmetros da entrada	Valor (unidade)
V_{pp}	10(V)
<i>Offset</i>	-5(V)
Duty cycle	0.5
Frequência	5 (Hz)
Tempo de partida	0 (s)

Fonte: Do autor

Figura 23 – Referência em degrau intermitente e resposta do controlador para a interface disposta pela Figura 16.

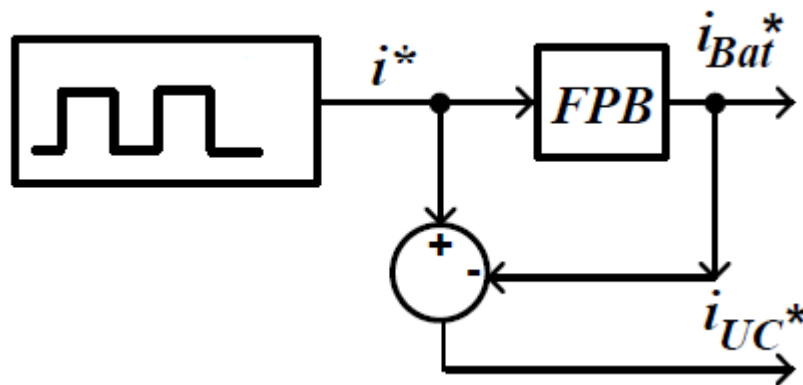


Fonte: Do autor.

4.2 Teste da estratégia de gestão de energia de (ZHOU et al., 2010).

De modo a testar o gerenciamento de energia proposto por (ZHOU et al., 2010), adaptou-se a estrutura de forma que as mudanças de carga sejam referenciadas conforme a Figura 24. Ou seja, as excitações em degrau são impostas como entrada a se filtrar, de maneira que as correntes de referência da bateria e do UC sejam resultados da saída da técnica mostrada pelas Figuras 24 e 18.

Figura 24 – Adaptação da estrutura de (ZHOU et al., 2010) para fins de simulação.



Fonte: Do autor

As correntes de saída da estratégia da Figura 24, servirão de referência para as interfaces mostradas pela Figura 25, de forma que neste teste o UC é modelado como uma fonte de tensão constante, dispensando a necessidade de uma restauração em sua tensão terminal ou mesmo de processos de recarga.

A finalidade de tal teste é a verificação da atuação do filtro passa-baixas. Em outras palavras esta análise é importante para garantia que a bateria atue no regime permanente conquanto o UC atue no período transitório. Desta forma, verifica-se o desempenho da técnica mostrada pela Figura 24, no âmbito de gerir a energia, de modo que em um certo período de tempo a bateria e o UC ajam de maneira complementar.

A influência da constante de tempo do filtro será analisada conforme mudanças na dinâmica das interfaces mostradas pela Figura 25. Para todos os testes adota-se um filtro com função de transferência $H(s)$ descrita pela equação (4.1).

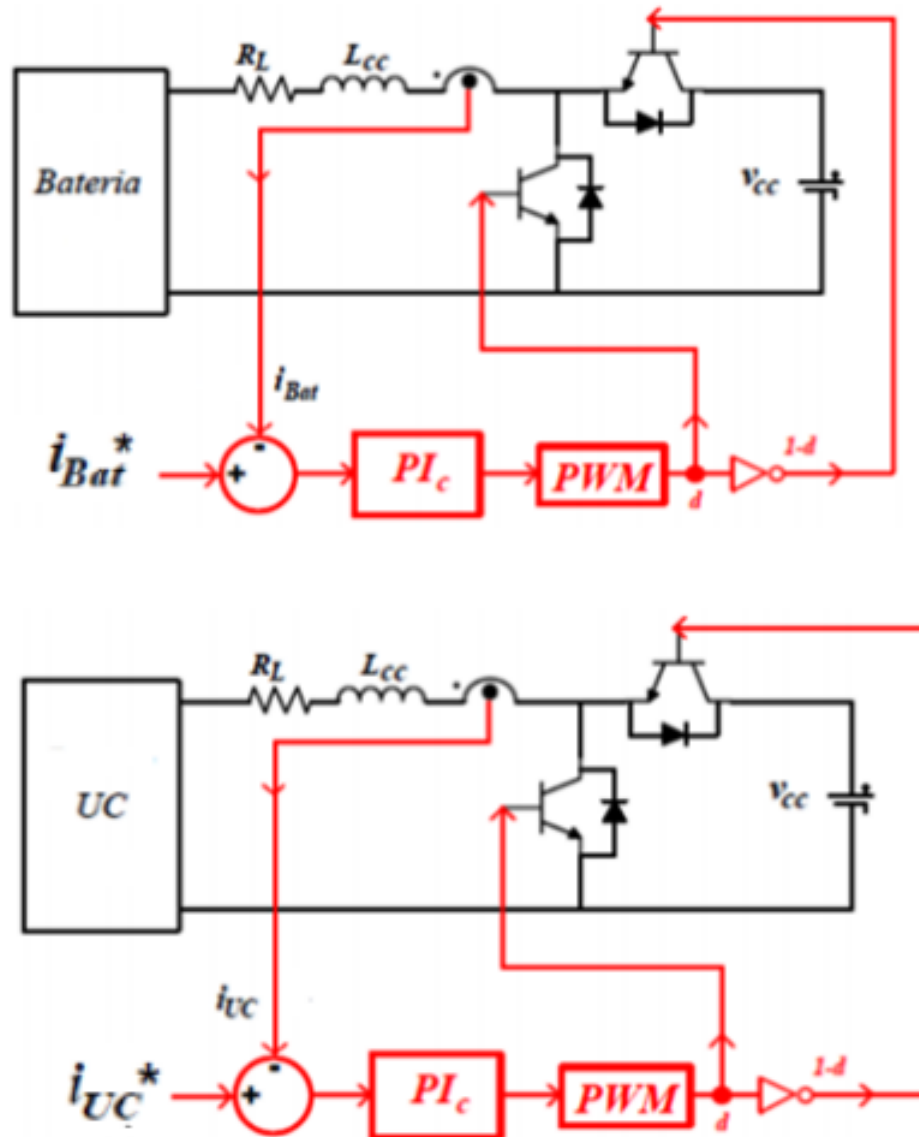
$$H(s) = \frac{1}{Ks + 1} \quad (4.1)$$

Em que K representa as variadas constantes de tempo utilizadas nesta seção.

As mudanças impostas pelo filtro na estrutura proposta por (ZHOU et al., 2010), podem ser avaliadas de forma semelhante em estruturas de gerenciamento de energia afins, como por exemplo a estrutura de gestão de energia proposta por (BASTOS, 2016).

No cenário de teste mostrado pela Figura 25, estabelece-se a tensão no UC como constante em 80V e a tensão da bateria em 80V.

Figura 25 – Interface de potência para bateria e UC de modo separado afim de testar o gerenciamento de energia de (ZHOU et al., 2010) e UC operando com tensão constante em terminais.



Fonte: Adaptada de (BASTOS, 2016)

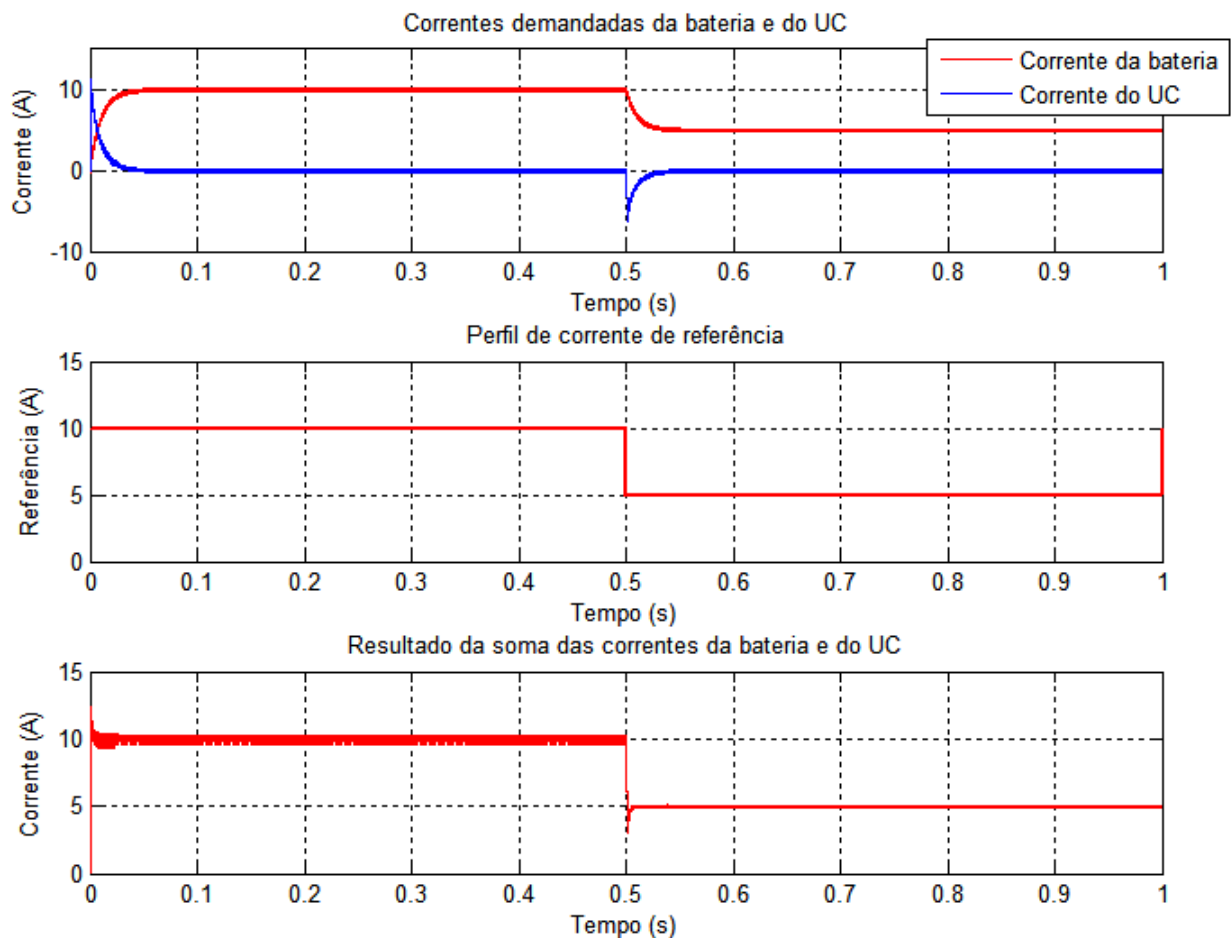
As Figuras 26, 27, 28 e 29 representam a resposta da interface de potência submetida as entradas impostas pelas Tabelas 12, 13, 14 e 15 respectivamente.

Tabela 12 – Parâmetros de entrada em degrau para a resposta da estratégia de (ZHOU et al., 2010) ilustrada pela Figura 24, com resposta mostrada pela Figura 26.

Parâmetros da entrada	Valor (unidade)
V_{pp}	5(V)
$Offset$	5(V)
Duty cycle	0.5
Frequência	1 (Hz)
Tempo de partida	0 (s)
Constante de tempo do filtro	0.01 (s)

Fonte: Do autor

Figura 26 – Resposta da interface adaptada mostrada pela Figura 25, com parâmetros de entrada ao degrau impostos pela Tabela 12.



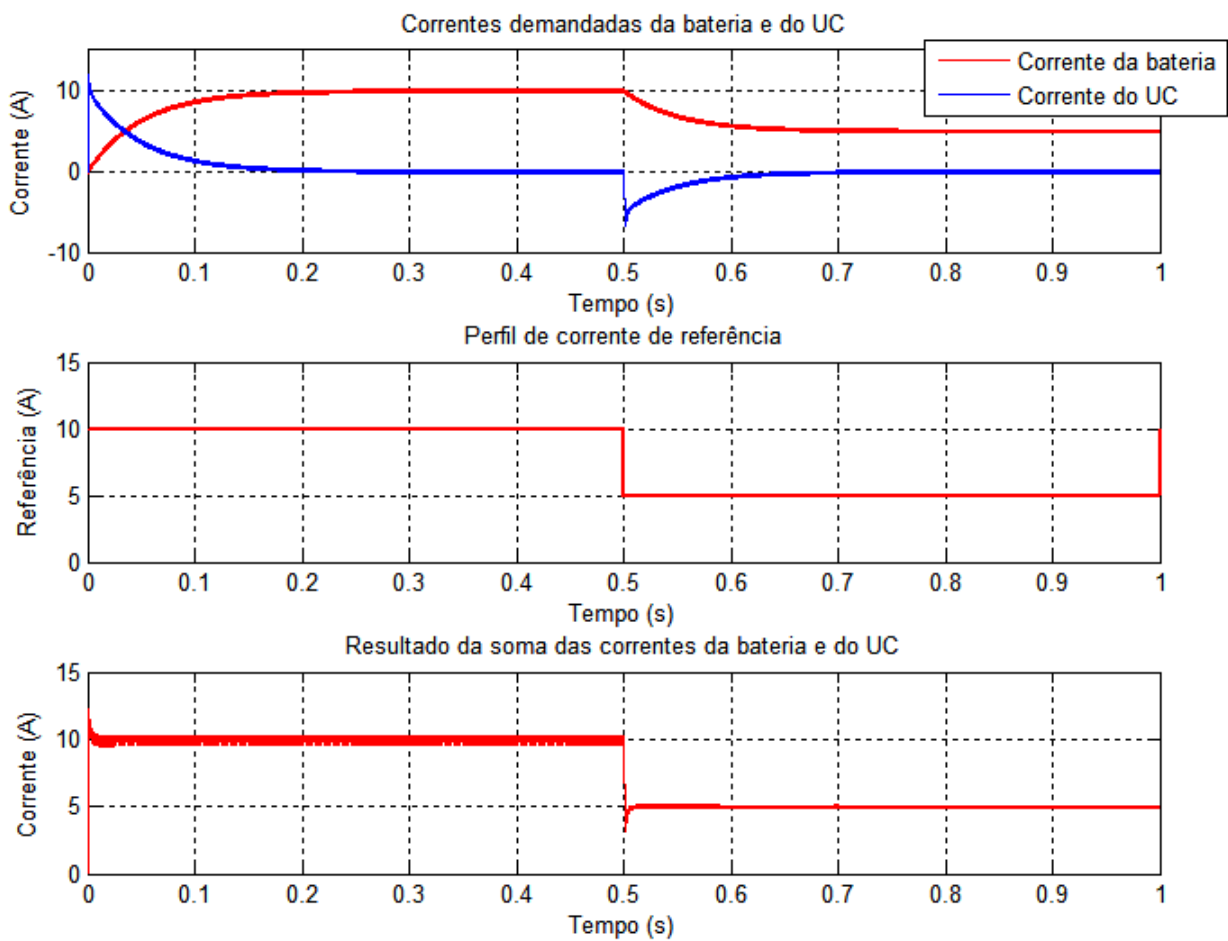
Fonte: Do autor

Tabela 13 – Parâmetros de entrada em degrau para a resposta da estratégia de (ZHOU et al., 2010) ilustrada pela Figura 24, com resposta mostrada pela Figura 27.

Parâmetros da entrada	Valor (unidade)
V_{pp}	5(V)
$Offset$	5(V)
Duty cycle	0.5
Frequência	1 (Hz)
Tempo de partida	0 (s)
Constante de tempo do filtro	0.05 (s)

Fonte: Do autor

Figura 27 – Resposta da interface adaptada mostrada pela Figura 25, com parâmetros de entrada ao degrau impostos pela Tabela 13.



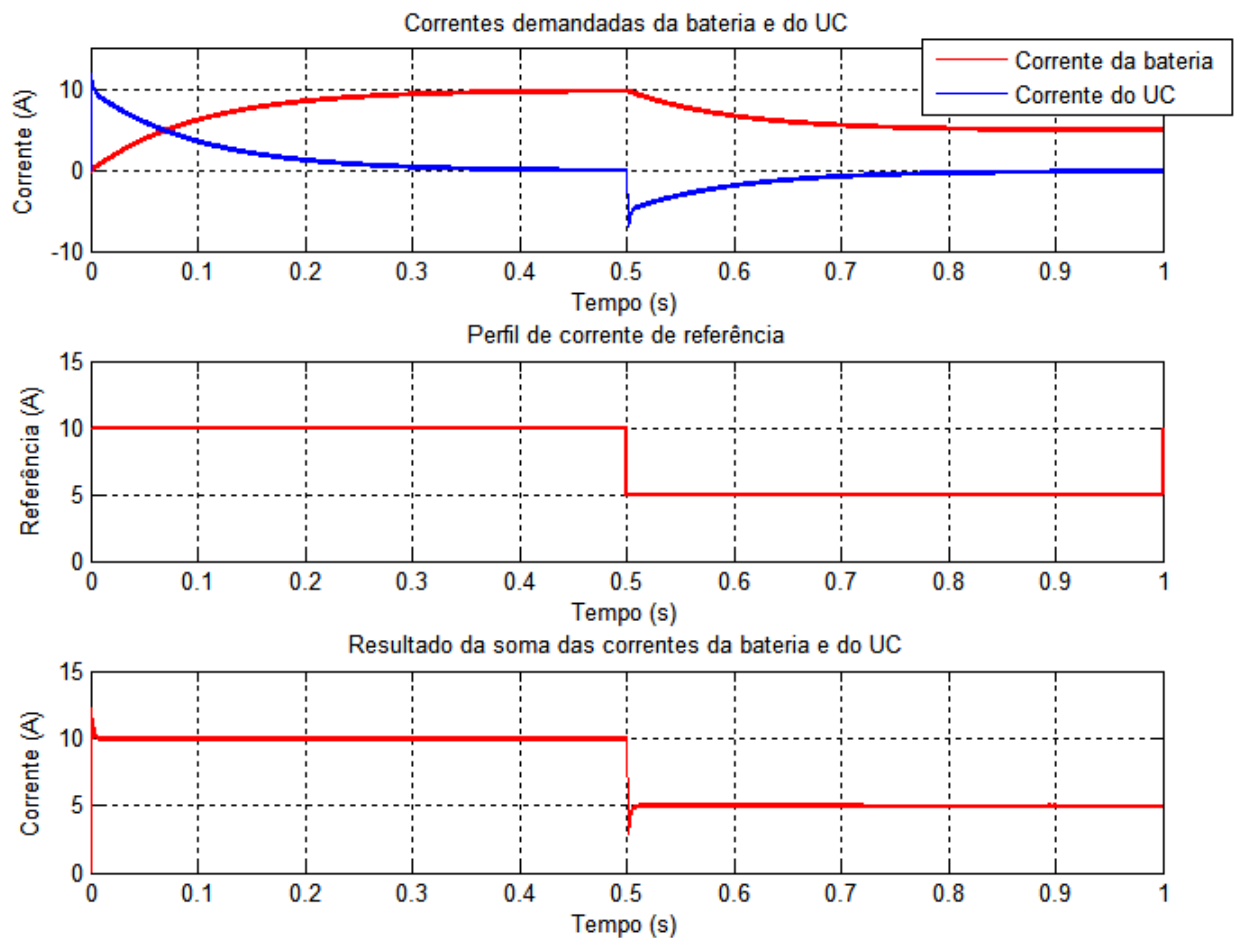
Fonte: Do autor

Tabela 14 – Parâmetros de entrada em degrau para a resposta da estratégia de (ZHOU et al., 2010) ilustrada pela Figura 24, com resposta mostrada pela Figura 28.

Parâmetros da entrada	Valor (unidade)
V_{pp}	5(V)
$Offset$	5(V)
Duty cycle	0.5
Frequência	1 (Hz)
Tempo de partida	0 (s)
Constante de tempo do filtro	0.1 (s)

Fonte: Do autor

Figura 28 – Resposta da interface adaptada mostrada pela Figura 25, com parâmetros de entrada ao degrau impostos pela Tabela 14.



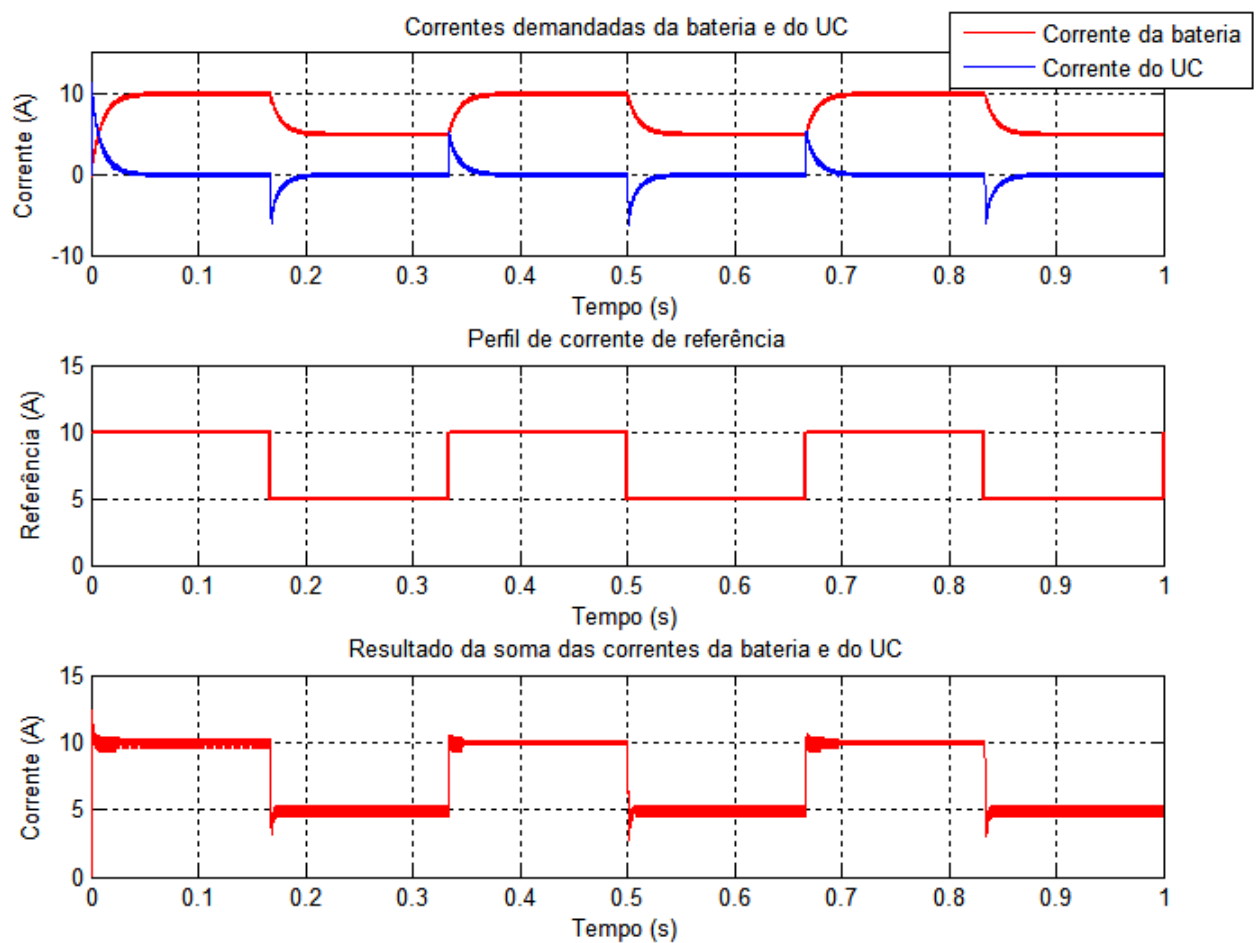
Fonte: Do autor

Tabela 15 – Parâmetros de entrada em degrau para a resposta da estratégia de (ZHOU et al., 2010) ilustrada pela Figura 24, com resposta mostrada pela Figura 29.

Parâmetros da entrada	Valor (unidade)
V_{pp}	5(V)
$Offset$	5(V)
Duty cycle	0.5
Frequência	3 (Hz)
Tempo de partida	0 (s)
Constante de tempo do filtro	0.01 (s)

Fonte: Do autor

Figura 29 – Resposta da interface adaptada mostrada pela Figura 25, com parâmetros de entrada ao degrau impostos pela Tabela 15.



Fonte: Do autor

De acordo com as Figuras 26, 27, 28 e 29 nota-se que conforme a constante de tempo K torna-se maior, configurando desta forma um filtro passa-baixas com uma dinâmica mais lenta, maior é o tempo gasto para a corrente da bateria atingir o regime permanente, fato que também pode ser afirmado para a corrente do UC. Esta imposição permite ciclos de carga e descarga mais suaves para os elementos armazenadores de energia.

Na Figura 26 por exemplo, logo após um surto de corrente o regime permanente é atingido com um tempo inferior a 100 *ms* (milisegundos), enquanto na Figura 27, o tempo de assentamento é da ordem de 200 *ms*. A situação mostra-se ainda melhor na Figura 28, cujo tempo para atingir o estado de permanência é superior a 400 *ms*, ocasião esta em que a bateria e o UC são submetidos a dinâmicas menos abruptas, uma grande vantagem que pode ser refletida na vida útil destes equipamentos.

A complementaridade da bateria e do UC pode ser observada por meio das Figuras 26, 27, 28 e 29, onde a soma das correntes da bateria e do UC formam um resultado bastante semelhante a referência admitida. Entretanto, o fato é melhor observado na Figura 29, em que a soma das correntes dos elementos armazenadores reproduzem de forma fidedigna o perfil de referência, mostrando-se como degraus intermitentes semelhantes.

A razão pela qual a bateria e o UC ajam de forma complementar, se dá na característica da estrutura de gerenciamento de energia da Figura 18, uma vez que para a corrente da bateria é direcionada uma corrente filtrada em baixas frequências, enquanto para o UC configura-se um filtro passa-altas, fato que pode ser observado em seu nível CC, que encontra-se em nível zero após um ciclo de carga ou descarga.

4.3 Sistema de armazenamento híbrido de energia elétrica com a estratégia de gerenciamento e controle proposta por (BASTOS, 2016).

Neste trabalho, propõe-se um sistema de armazenamento híbrido de energia elétrica no qual os elementos armazenadores são constituídos por baterias e UC's.

Neste propósito, faz-se necessário um meio que permita a troca de energia entre fontes renováveis e o barramento CC. Para tanto, toda demanda de potência é de responsabilidade da interface disposta pela Figura 16, na qual configura-se um conversor eletrônico CC-CC, ora elevador, ora abaixador de tensão.

Para o controle dos ciclos de carga e descarga da bateria e do UC, adota-se a estratégia de gerenciamento e controle proposta por (BASTOS, 2016). Contudo, para fins simulacionais, tal proposta foi adaptada conforme ilustra a Figura 30, na qual há disposição tanto da estratégia de gestão de energia quanto da interface de potência. De acordo com esta adaptação, utiliza-se uma bateria ou banco de baterias com tensão de

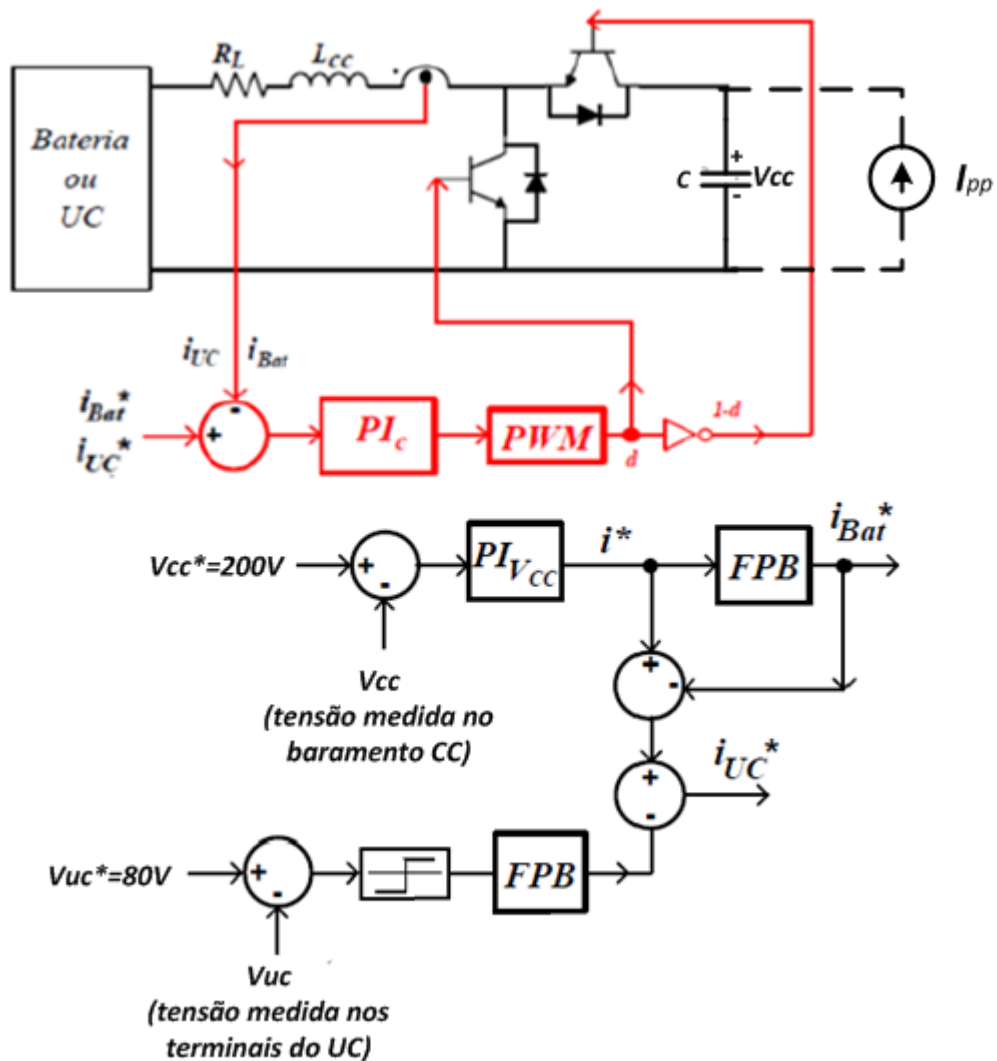
80V e para o UC, configura-se um UC ou banco de UC's com tensão de referência $V_{UC}^* = 80V$ e capacitância de $UC = 100mF$.

Nesta oportunidade, as referências da bateria e do UC são resultados desta mesma malha de gerenciamento de energia. Ainda com respeito à esta técnica, mais precisamente falando sobre os filtros utilizados, ambos filtros passa-baixas correspondem a função de transferência descrita pela equação (4.1).

Para os testes, acopla-se ao barramento CC, cargas de diferentes comportamentos de forma a analisar a resposta de todo o sistema. Deste modo o motor no qual acopla-se fisicamente à interface será modelado por meio de uma fonte de corrente.

Serão avaliados testes com respeito a dinâmica dos filtros e também para diferentes perfis de carregamento do sistema.

Figura 30 – Sistema de armazenamento híbrido de energia elétrica, com carga acoplada ao barramento CC e estratégia de gerenciamento e controle de (BASTOS, 2016) adaptada para fins simulacionais.



Fonte: Adaptada de (BASTOS, 2016)

4.3.1 Testes do sistema para degraus de frenagem

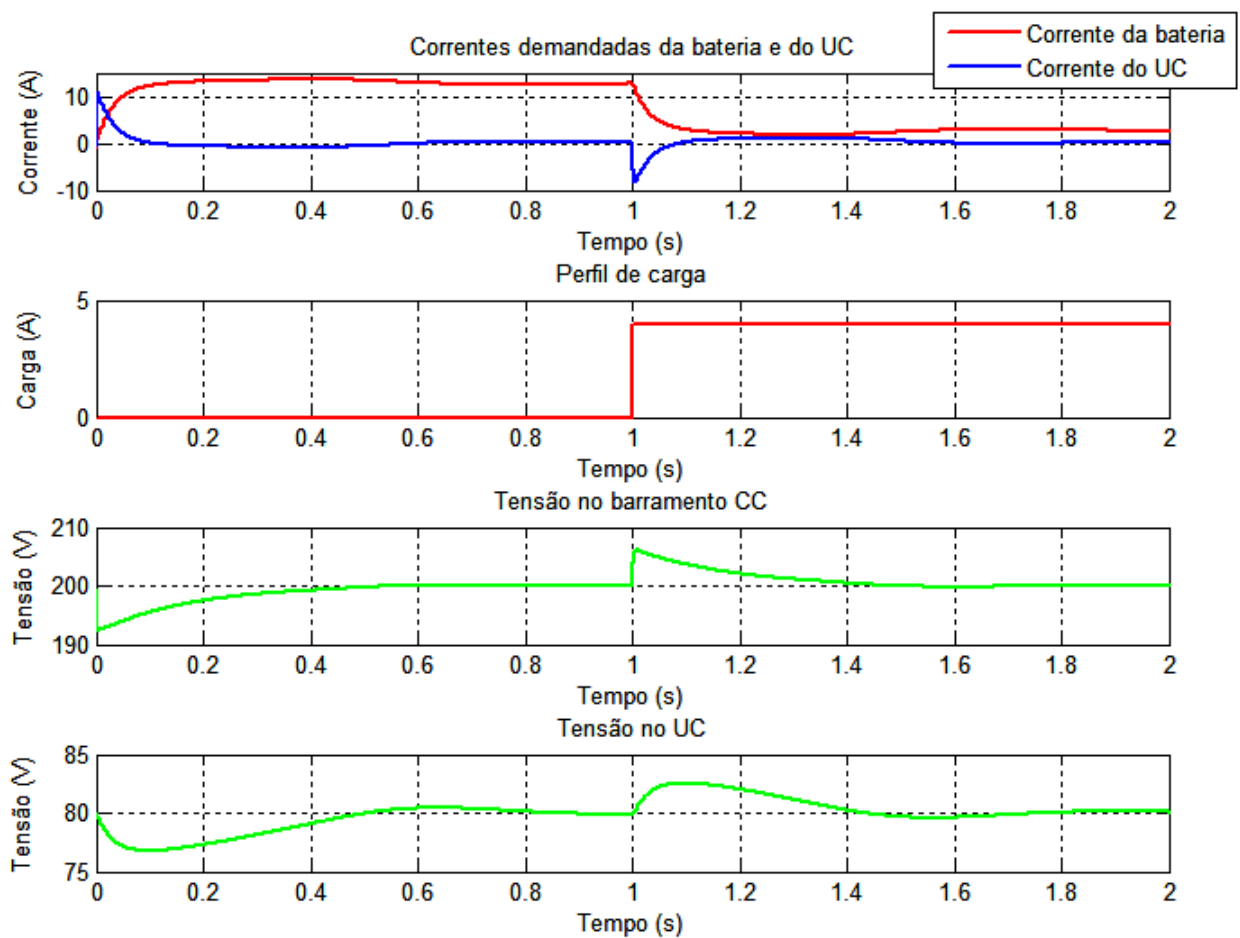
As Figuras 31, 32, 33 e 34 representam a resposta do sistema quando ele é submetido a atender os comportamentos de carga impostos pelas Tabelas 16, 17, 18 e 19, para condições de injeção de corrente da carga para o barramento em forma de degrau.

Tabela 16 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 31.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	4(A)
Tempo de partida	1(s)
Constante de tempo do filtro	0.01(s)

Fonte: Do autor

Figura 31 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 16.



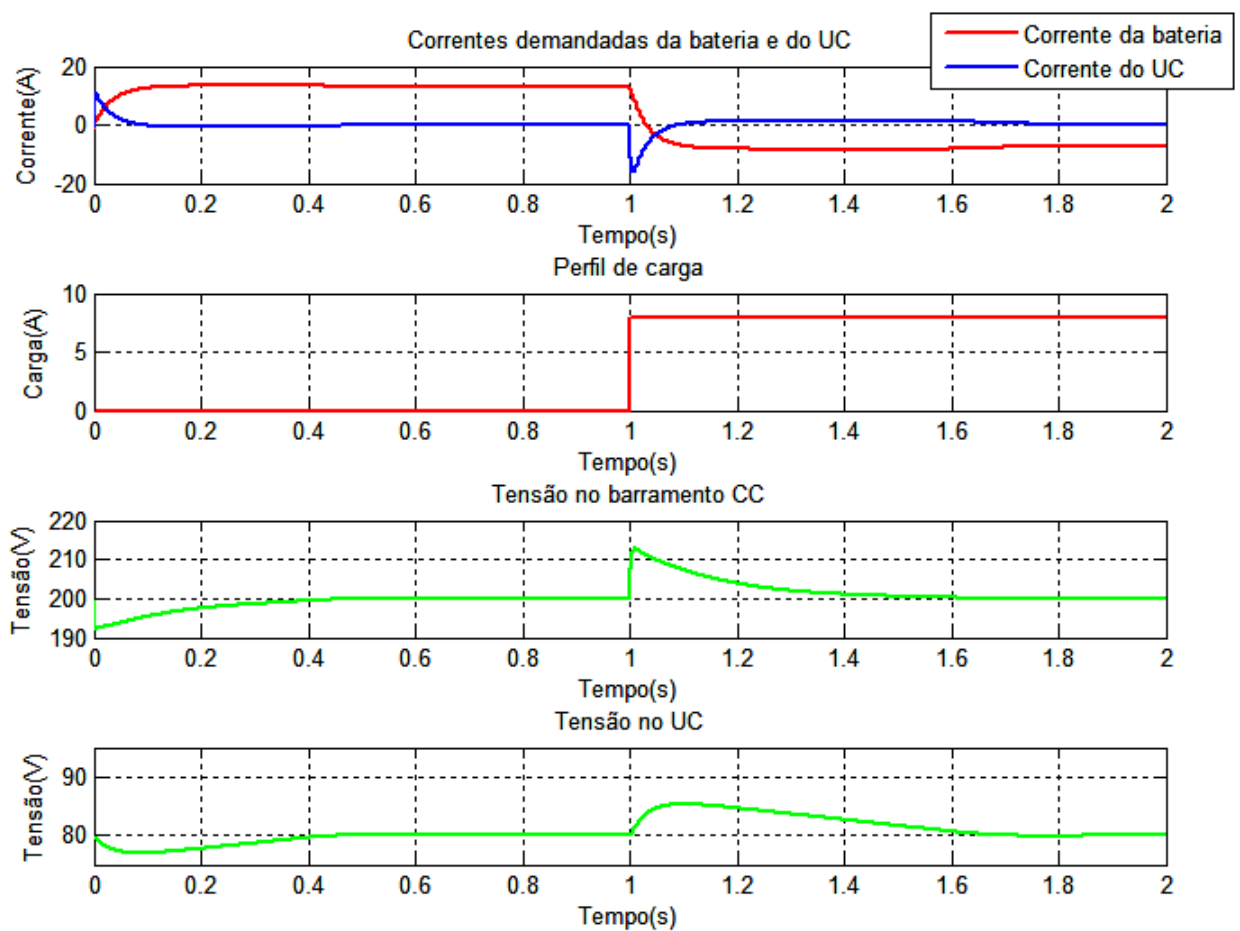
Fonte: Do autor

Tabela 17 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 32.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	8(A)
Tempo de partida	1 (s)
Constante de tempo do filtro	0.01 (s)

Fonte: Do autor

Figura 32 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 17.



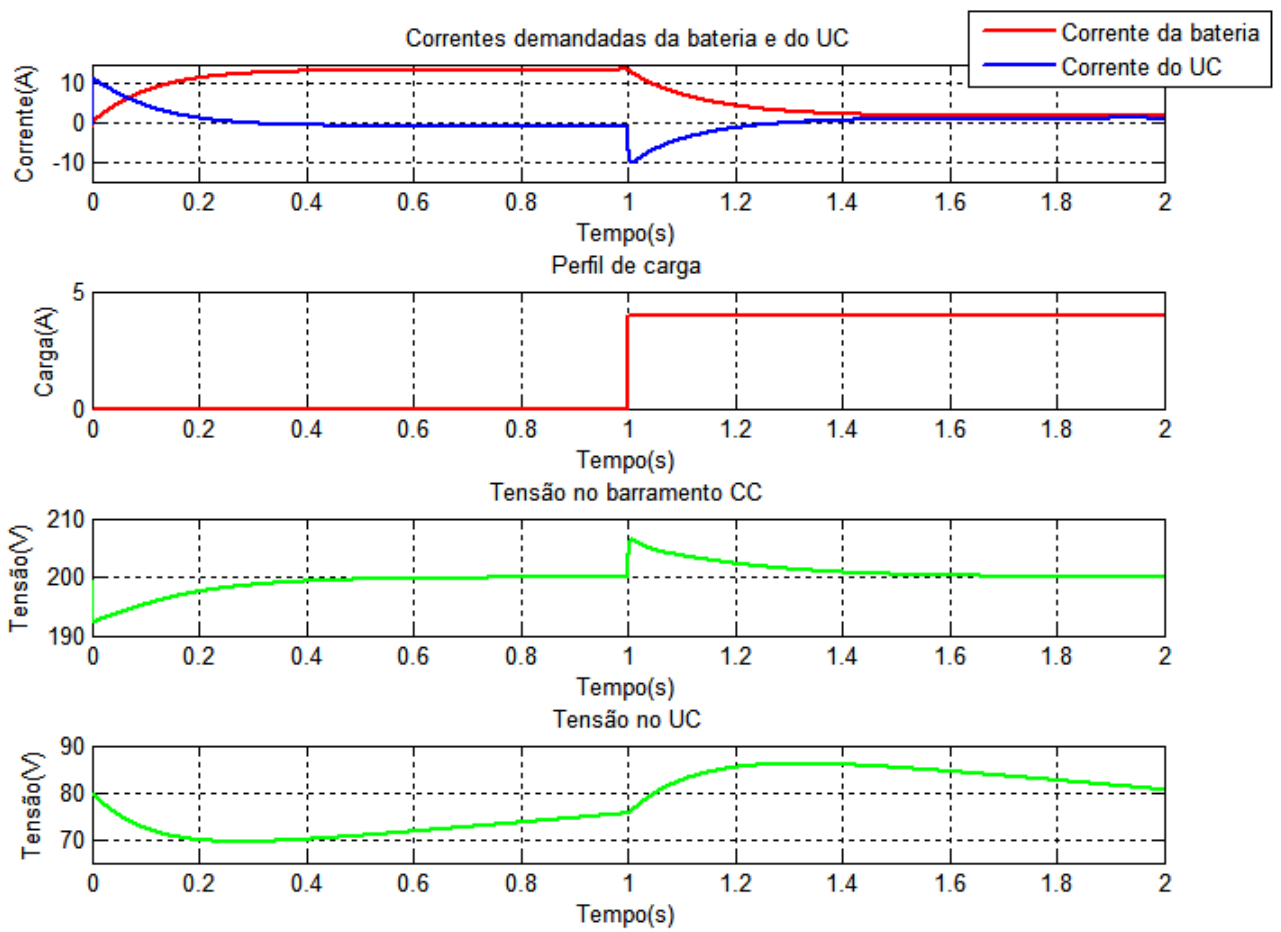
Fonte: Do autor

Tabela 18 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 33.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	4(A)
Tempo de partida	1 (s)
Constante de tempo do filtro	0.1 (s)

Fonte: Do autor

Figura 33 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 18.



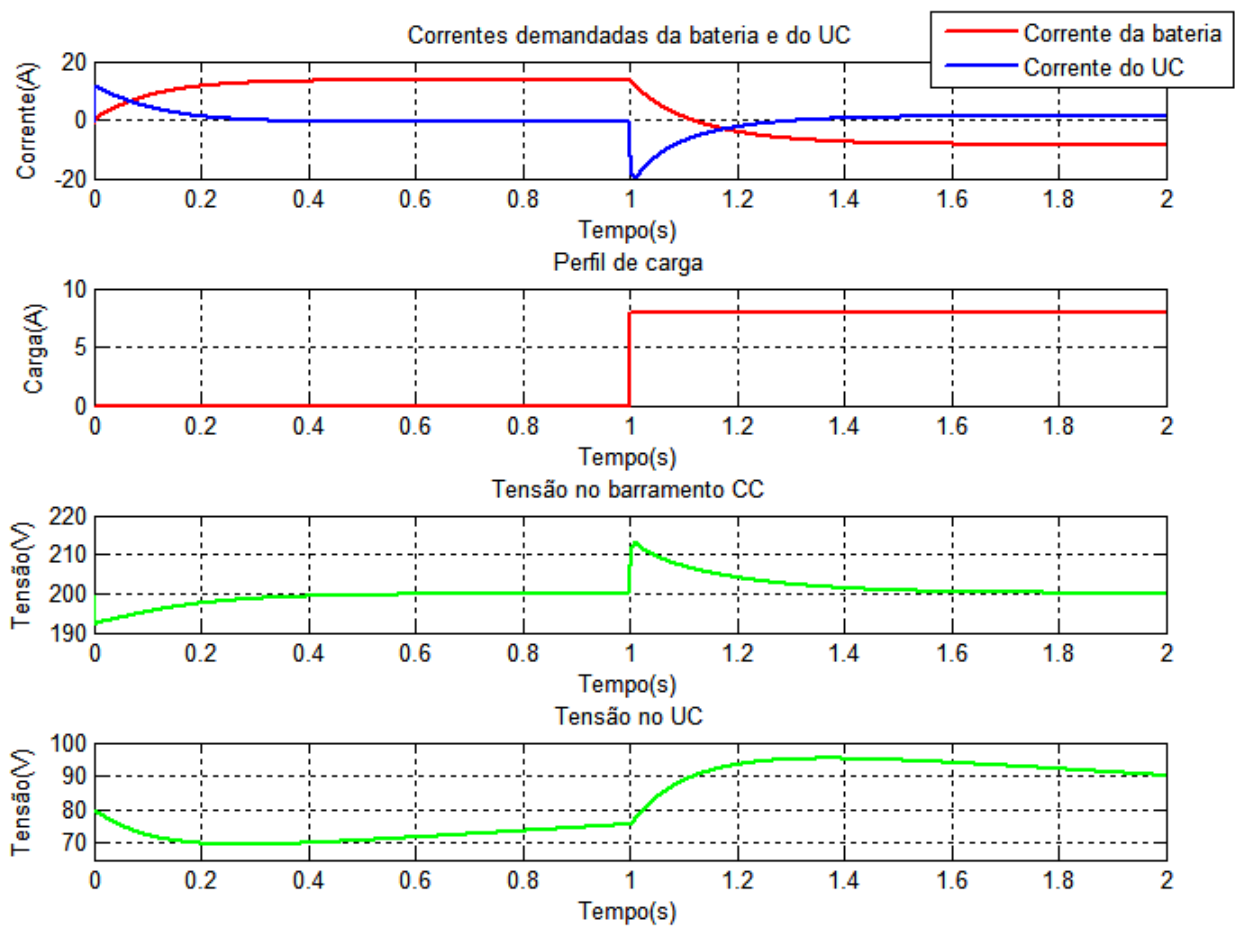
Fonte: Do autor

Tabela 19 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 34.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	8(A)
Tempo de partida	1 (s)
Constante de tempo do filtro	0.1 (s)

Fonte: Do autor

Figura 34 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 19.



Fonte: Do autor

De acordo com as Figuras 31,32, 33 e 34, nota-se que conforme a amplitude da corrente da carga acoplada ao barramento CC torna-se maior, menor é a corrente da bateria. Fato já esperado, uma vez que trata-se de condições de frenagem, isto é, injeção de corrente da carga para o barramento CC. Ainda neste aspecto, com respeito as Figuras 32 e 34, a corrente da bateria muda de polaridade, configurando nesta ocasião uma condição de frenagem regenerativa.

A restauração da tensão terminal do UC é completamente restabelecida após um surto de corrente nas Figuras 31 e 32, fato que não ocorre nas Figuras 33 e 34, uma vez que ambos os filtros passa-baixas encontram-se com uma constante K maior, proporcionando assim uma dinâmica mais lenta para bateria e o UC. No entanto, mesmo não completamente restaurada, a tensão não mostra-se muito distante da sua referência em 80V, fato proveniente da estratégia da Figura 19, que também garante a tentativa de restauração da tensão em estabelecer-se em 80V preterida a um surto de corrente.

A tensão no barramento CC é estabelecida em 200V, exceto em surtos de corrente, ocasiões em que a recomposição da tensão pode ser mais lenta ou mais rápida, dependendo dos filtros passa-baixas utilizados.

4.3.2 Testes do sistema para carregamento intermitente

A fim de testar o comportamento do sistema para cargas que procedem-se de maneira periodicamente interrupta, analisa-se a resposta da interface de modo que no barramento CC sejam acopladas cargas em degrau e dente de serra intermitentes.

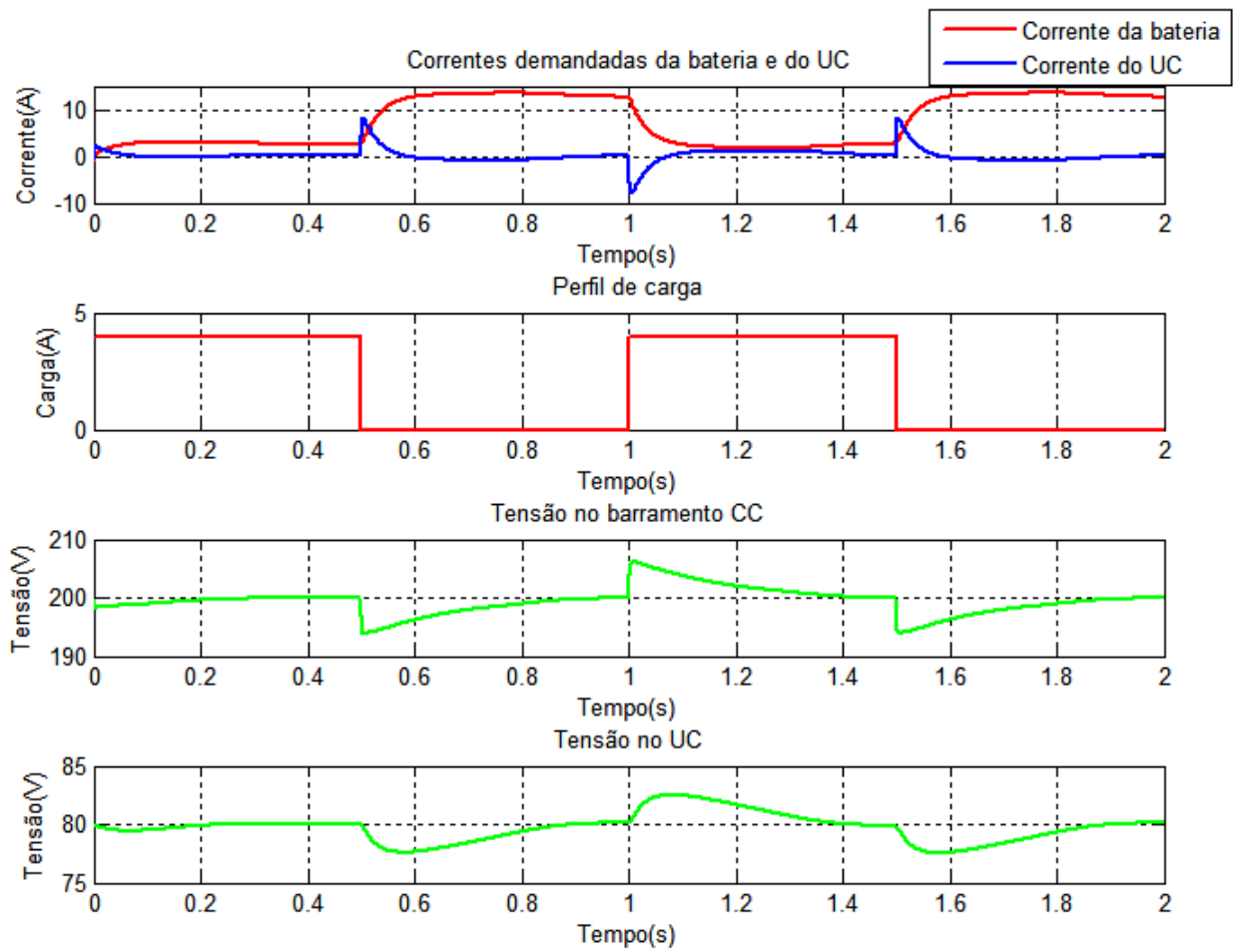
Desta forma, as Figuras 35, 36, 37 e 38 correspondem a resposta do sistema para as entradas dispostas nas Tabelas 20, 21, 22 e 23.

Tabela 20 – Parâmetros de carga em degrau para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 35.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	4(A)
Tempo de partida	0 (s)
Duty cycle	0.5
Frequência	1 (Hz)
Constante de tempo do filtro	0.03 (s)

Fonte: Do autor

Figura 35 – Resposta do sistema para o padrão de carga imposto pela Tabela 20.



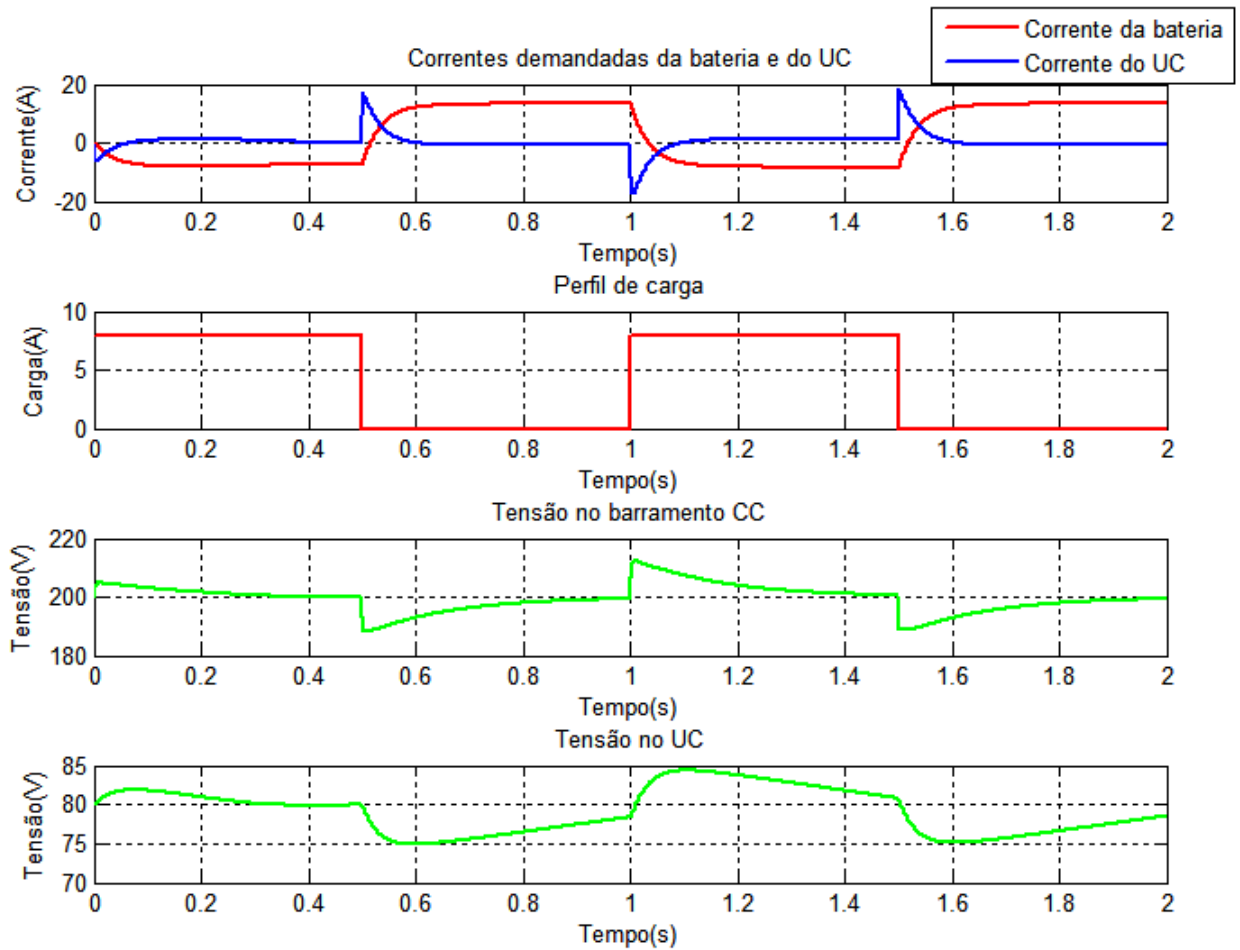
Fonte: Do autor

Tabela 21 – Parâmetros de carga em degrau intermitente para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 36.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	8(A)
Tempo de partida	0 (s)
Duty cycle	0.5
Frequência	1 (Hz)
Constante de tempo do filtro	0.03 (s)

Fonte: Do autor

Figura 36 – Resposta do sistema para o padrão de carga em degrau intermitente imposto pela Tabela 21.



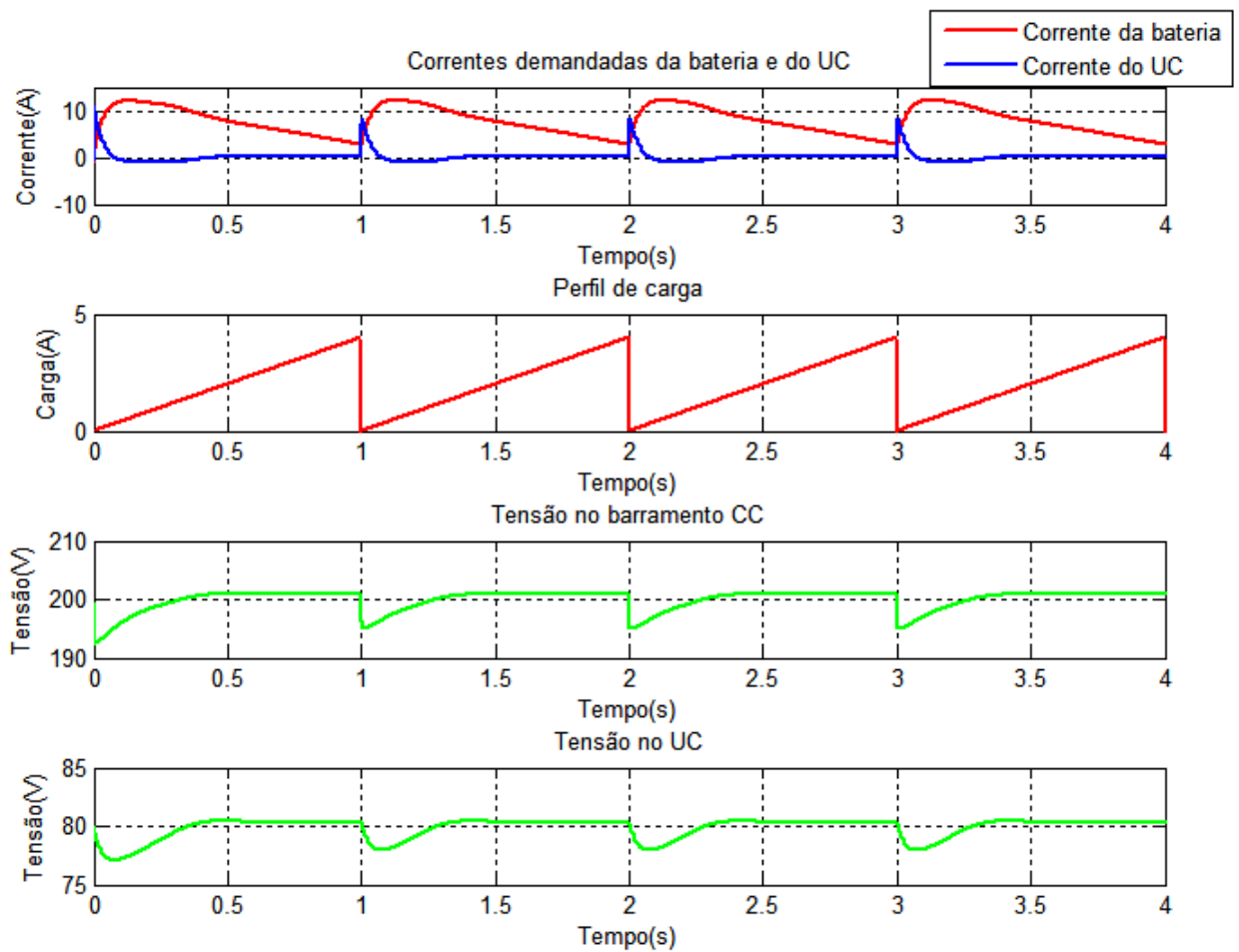
Fonte: Do autor

Tabela 22 – Parâmetros de carga em dente de serra intermitente para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 36.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	4(A)
Tempo de partida	0 (s)
Duty cycle	0.5
Frequência	1 (Hz)
Constante de tempo do filtro	0.03 (s)

Fonte: Do autor

Figura 37 – Resposta do sistema para o padrão de carga em dente de serra intermitente imposto pela Tabela 22.



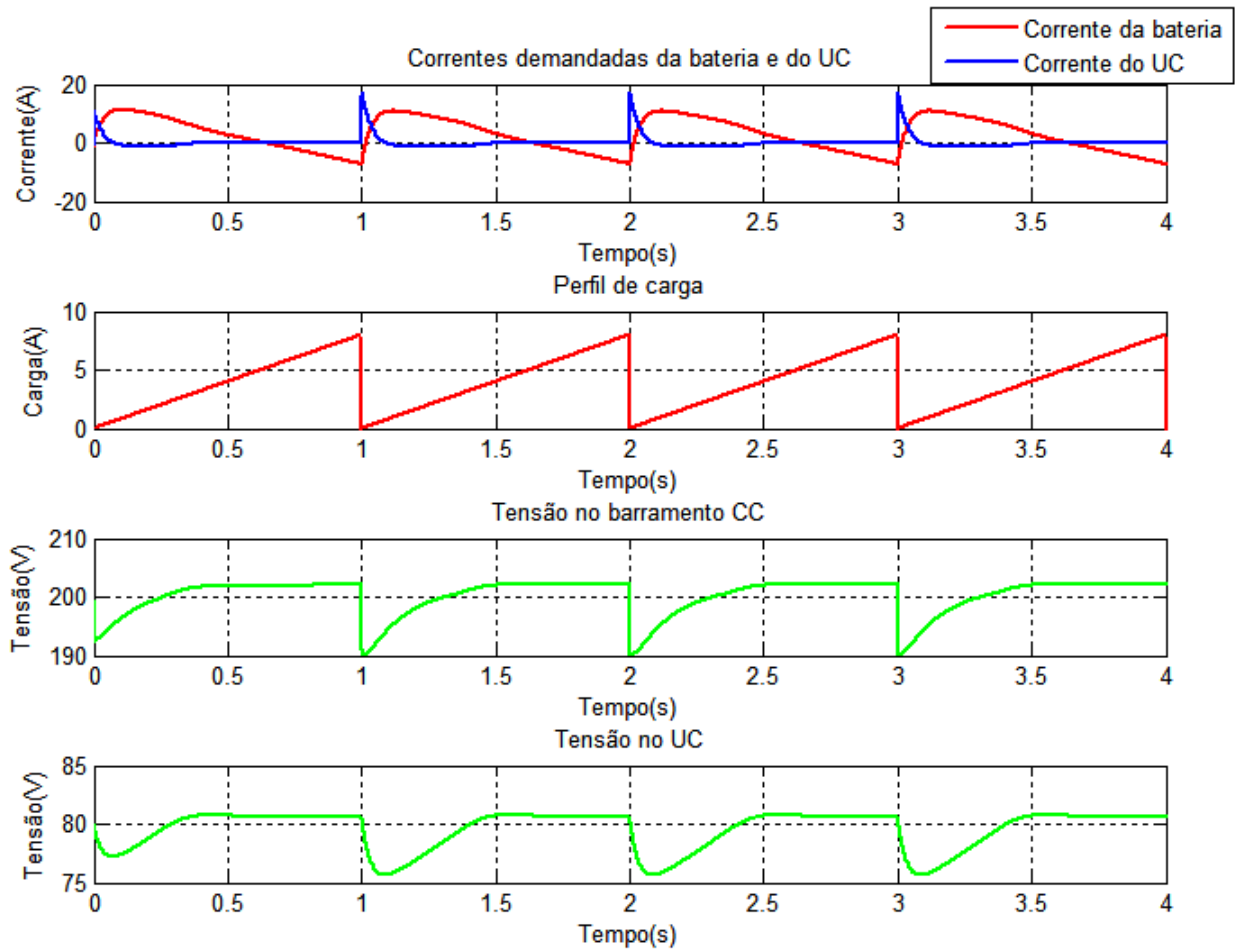
Fonte: Do autor

Tabela 23 – Parâmetros de carga em dente de serra intermitente para resposta do sistema proposto ilustrada pela Figura 38.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	8(A)
Tempo de partida	0 (s)
Duty cycle	0.5
Frequência	1 (Hz)
Constante de tempo do filtro	0.03 (s)

Fonte: Do autor

Figura 38 – Resposta do sistema para o padrão de carga em dente de serra intermitente imposto pela Tabela 23.



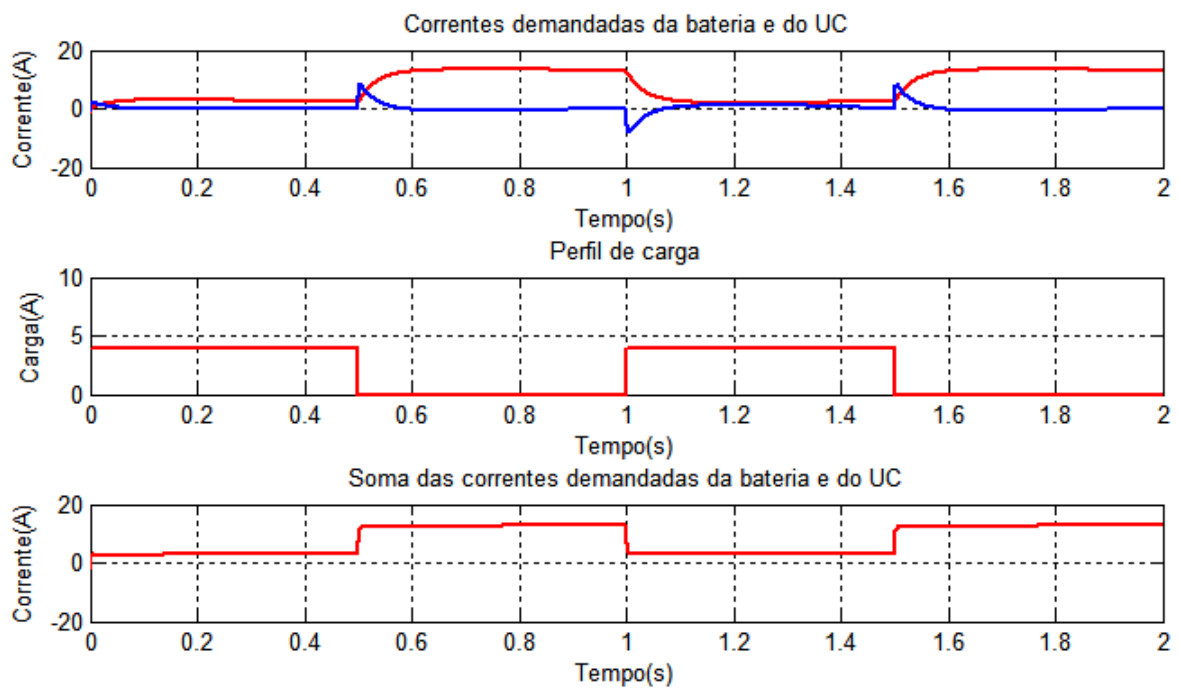
Fonte: Do autor

Tabela 24 – Parâmetros de carga em degrau intermitente para verificação da complementaridade da bateria e do UC para o sistema proposto ilustrado pela Figura 39.

Parâmetros de teste	Valor (unidade)
I_{pp}	4(A)
Tempo de partida	0 (s)
Duty cycle	0.5
Frequência	1 (Hz)
Constante de tempo do filtro	0.03 (s)

Fonte: Do autor

Figura 39 – Complementaridade da bateria e do UC para os parâmetros impostos pela Tabela 24.



Fonte: Do autor

De acordo com as Figuras 35 e 36, nota-se que para degraus intervalados a restauração da tensão do UC ocorre com maiores dificuldades, uma vez que logo após a tensão estabilizar-se em 80V, uma nova intermitência de carga acontece. O fato torna-se mais agravante na Figura 36, pois, por se tratar de uma maior magnitude de corrente de carga, os ciclos de carga e descarga do UC tornam-se mais profundos.

Condições de frenagem regenerativa também são estabelecidas em cargas em que há algum tipo de periodicidade, como pode ser observado pelas Figuras 36 e 38, onde que, mesmo por um curto espaço de tempo a corrente da bateria inverte de polaridade.

Para cargas de comportamento periódico, como a das Figuras 35, 36, 37 e 38, fica mais evidente a operação do UC em condições de intermitência. Isto é, nestas ocasiões a atuação do dispositivo fica restritamente atrelada aos períodos descontínuos do perfil de carga. Fato melhor observado pelas Figuras 37 e 38, na qual frenagens de comportamento em dente de serra são impostas ao sistema e nos períodos de descontinuidade o UC atua com uma descarga. Este comportamento é proveniente da malha de gerenciamento utilizada, uma vez que para o UC configura-se indiretamente um filtro passa-altas e sua banda de aceitação engloba as descontinuidades por se tratarem de altas frequências no domínio frequencial.

A complementaridade do UC e da bateria pode ser observada por meio da Figura 39 uma vez que a soma de suas correntes demandadas, reproduzem de forma fiel o perfil da carga, sendo que tal complementaridade se dá pela atuação dos filtros passa-baixas utilizados na estratégia de controle, que configuram baixas frequências para a bateria e altas frequências para o UC, tornando o sistema completo no âmbito de seus elementos armazenadores, uma vez que os benefícios de cada um são estabelecidos de modo que um dispositivo ajuda o outro (bateria e UC).

5 Conclusão

Neste capítulo, apresenta-se os aspectos conclusivos do trabalho. Comentários gerais sobre este trabalho serão feitos, assim como conclusões serão confrontadas com os objetivos desta monografia. Proposta para trabalhos futuros também serão apresentadas.

5.1 Comentários gerais

Por meio deste trabalho apresentou-se de maneira eficaz um sistema de armazenamento híbrido de energia elétrica para veículos elétricos. Pôde-se perceber que em razão dos parâmetros utilizados, isto é, em função dos componentes utilizados no projeto do conversor CC-CC e da função de transferência que rege o comportamento deste dispositivo, é possível projetar também um controlador que atue de maneira a governar a modulação PWM utilizada no chaveamento dos semicondutores.

Com relação a dinâmica do sistema, percebeu-se que os ciclos de carga e descarga das fontes alternativas de energia pode apresentar-se suave ou de maneira abrupta, razão pela qual a escolha da constante de tempo do filtro passa-baixas utilizados nas estratégias de gestão de energia, são de extrema importância, podendo influir até mesmo na vida útil das fontes alternativas utilizadas.

O sistema apresentou duas partes significantes para o bom funcionamento, são elas: gerenciamento e controle, e a interface de potência. Os pacotes de energia em dois estados foram estabelecidos pela interface de potência de modo que a estrutura responsável pelo gerenciamento e controle além do chaveamento dos IGBT's direcionou por meio de filtros as correntes em períodos transitórios para o UC e em regime permanente para a bateria. A fonte de corrente acoplada ao barramento serviu de modelo para um motor acoplado ao sistema, de modo que em condições de injeção de corrente no barramento configurou-se situações de frenagem e de maneira oposta, situações de aceleração.

5.2 Conclusões perante aos objetivos listados

Com relação aos objetivos listados no capítulo um, para este trabalho pode-se perceber que tais objetivos foram alcançados conforme afirma-se os tópicos abaixo:

- **Modelagem de um conversor CC-CC bidirecional:** Por meio da análise em espaço de estados, obteve-se uma representação canônica que regeu-se o comportamento do sistema de acordo com as equações diferenciais retiradas pela análise do circuito elétrico. A partir de tal representação, ponderou-se as matrizes de estado conforme a natureza da planta, ora buck, ora boost, podendo assim obter o modelo

em pequenos sinais do conversor abordado. A partir de então, de posse deste modelo, representado por uma função de transferência dependente dos componentes utilizados, este objetivo foi alcançado.

- **Projeto de controlador:** De posse do modelo em pequenos sinais foi possível projetar o controlador PI com o auxílio da ferramenta de sintonia sisotool do Matlab. Na seção 4.1 apresentou-se o controlador perante aos testes de desempenho no qual foram aceitáveis, mostrando-se o controlador utilizado eficaz. Deste modo, este objetivo foi alcançado.
- **Estabelecimento do fluxo bidirecional de energia:** A natureza do conversor em dois quadrantes utilizado permitiu o fluxo de energia em ambos estados do conversor, muito embora a natureza da carga influencie diretamente neste aspecto. Na seção 4.3, para diferentes perfis de carga, isto é, diferentes comportamentos do sistema (acelerando ou freando), pode-se perceber que o fluxo de energia em ambos estados foi estabelecido, configurando em algumas frenagens condições de regeneração, podendo a fonte alternativa de energia carregar-se dependendo da intensidade em que o condutor frea o carro. Deste modo, o objetivo foi alcançado.
- **Gerenciamento das correntes de carga e descarga dos elementos armazenadores:** O controle de gerenciamento das correntes de carga e descarga dos elementos armazenadores foi estabelecido por meio da estratégia de gestão de energia proposta por (BASTOS, 2016) na qual permite que o UC opere em condições transitórias e a bateria opere em regime permanente.

Na seção 4.3, para diferentes perfis de carga, testou-se a eficácia da técnica mostrando-se aceitável uma vez que períodos de descontinuidade foram atendidos pelo UC deixando para a bateria a operação no resto do ciclo de carga ou descarga. Deste modo, o objetivo foi alcançado.

5.3 Proposta para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se o uso de drivers acoplados ao barramento CC para acionar os diferentes tipos de motores que possam vir a ser utilizados. De maneira geral, esses drivers devem provir de um fluxo inverso de corrente para que atendam as condições de frenagem regenerativa. Podendo-se a partir disso, acionar por meio de conversores CC-CC bidirecionais, motores CC, ou até mesmo um motor de relutância variável de modo que o chaveamento do driver seja comandado por um encoder, ou então um conversor VSI utilizado no acionamento de um motor de indução.

Referências

- ANAFEA. *ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES*. [S.l.], 1996. 2
- AZUAGA, D. *Danos Ambientais Causados por Veículos Leves no Brasil*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000. 2
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, p. 207–224, 2011. 1
- BARROZO, F. E. O. *Conversor CC-CC Bidirecional em Corrente para Aplicação em Veículos Elétricos*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2010. 1, 9, 10
- BASTOS, R. F. *Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (Chumbo-Ácido) e para Busca do Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — EESC/USP, 2013. 9, 10
- BASTOS, R. F. *Sistema de Gerenciamento para a Integração em CC de Fontes Alternativas de Energia e Armazenadores Híbridos Conectados a Rede de Distribuição via Conversores Eletrônicos*. Tese (Doutorado) — EESC/USP, São Carlos, 2016. 9, 10, 16, 17, 14, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 34, 35, 40, 41, 54, 65
- CASTRO, B. H. R. de; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. *BNDES Setorial*, p. 267–310, 2010. 1
- CHEN, X. et al. An overview of lithium-ion batteries for electric vehicles. *INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE-IPEC*, 2012. 10, 11, 13
- COELHO, K. D. *Estudo de uma Fonte Ininterrupta de Corrente Contínua de Baixa Potência Gerenciada por um Microcontrolador*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. 10
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. *Fundamentals of power electronics*. 2. ed. [S.l.]: Springer Science and Business Media, 2007. 19, 20, 23, 24
- HART, D. W. *Power Electronics*. 1. ed. [S.l.]: Mc Graw-Hill, 2011. 18
- HORIBA, T. Lithium-ion battery systems. *Proceedings of the IEEE*, 2014. 11, 12, 13
- JR., L. E. F. *Eletrônica Moderna: Fundamentos, dispositivos, circuitos e sistemas*. 1. ed. [S.l.]: Bookman, 2015. 14, 18
- KHALIGH, A.; LI, Z. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, v. 59, 2010. 3, 4, 5, 6, 10, 14
- KOTZ, R.; M.CARLEN. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, v. 45, p. 2483–2498, 2000. 15, 18

- MARTINS, R. R. M. *Modelo Eletrotérmico de Baterias de íões de Lítio*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, 2016. 12
- SCHENKEL, A. W.; KIRSTEN, D. S.; CAMBRAIA., A. P. K. *TRABALHO SOBRE CARRO ELÉTRICO TESLA MODEL S REALIZADO JUNTO A UNIVERSIDADE DO PORTO (UP)*. [S.l.], 2016. 1
- TAO, Y.; LI, Z. Study on modeling and application of ultracapacitor. *IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA)*. 14, 15, 16
- VILLALVA, M. G. *Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica*. Tese (Tese de doutorado) — FEEC/UNICAMP, 2010. 26
- WANG, Y.-X.; QIN, F.-F.; KIM, Y.-B. Bidirectional dc-dc converter design and implementation for lithium-ion battery application. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Hong Kong, China, 2014. 19
- YANG, S.; ZHIGANG, Z. Bi-directional dc / dc converter and its practical application. *International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, Shanghai, China, 2014. 18
- ZHOU, H. et al. Composite energy storage system with flexible energy management capability for micro-grid applications. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta,GA,USA, 2010. 9, 11, 16, 17, 27, 29, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 61
- ZHOU, H. et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 2011. 17, 27

Anexos

A1: Cenário de simulação dos testes de desempenho do controlador PI descritos na seção 4.1.

A seguir, o cenário de simulação dos testes de desempenho efetuados na seção 4.1. A ordem dos cenários simulados obedece os seguintes tópicos:

- Figura 40, conversor CC-CC utilizado como interface de potência para as fontes alternativas de energia.
- Figura 41, modulação PWM utilizada para avaliar a resposta do controlador PI para os testes de desempenho da seção 4.1, no ambiente PSIM.
- Figura 42, Controlador PI utilizado para os testes de desempenho da seção 4.1, no ambiente PSIM.

Figura 40 – Interface de potência utilizada para avaliar a resposta do controlador PI para os testes de desempenho da seção 4.1.

INTERFACE DE POTÊNCIA

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Tema: Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos
Aluno: Átala Montine Fernandes de Lelis
Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos

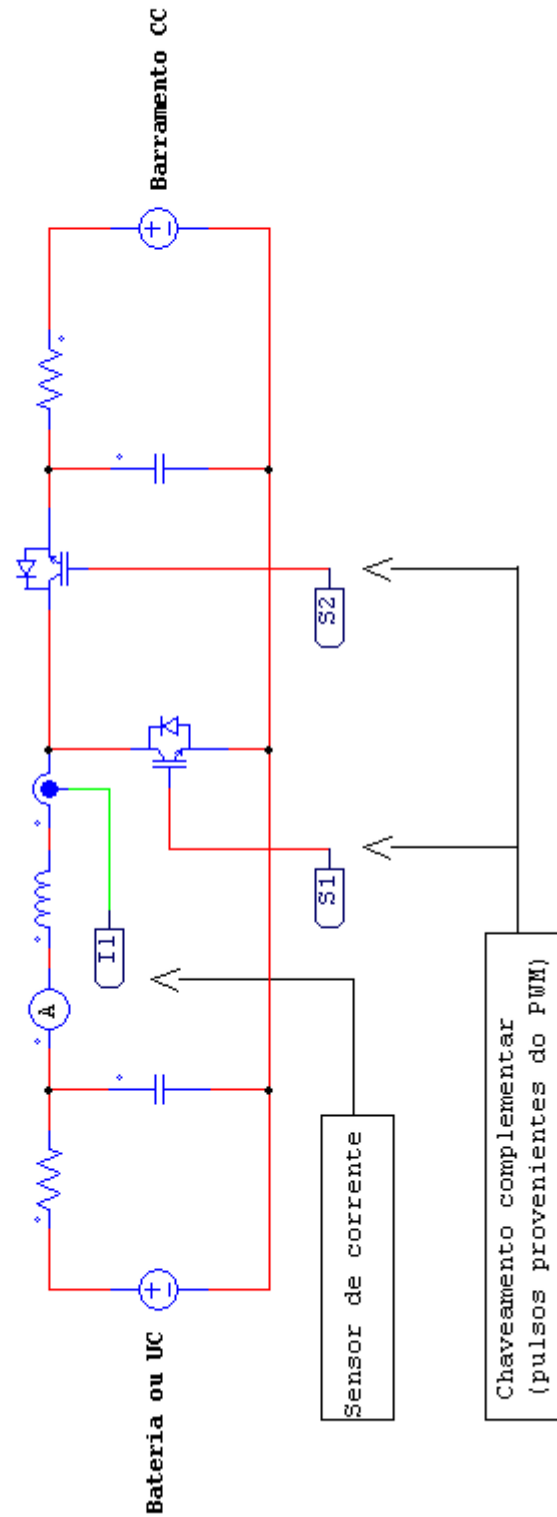
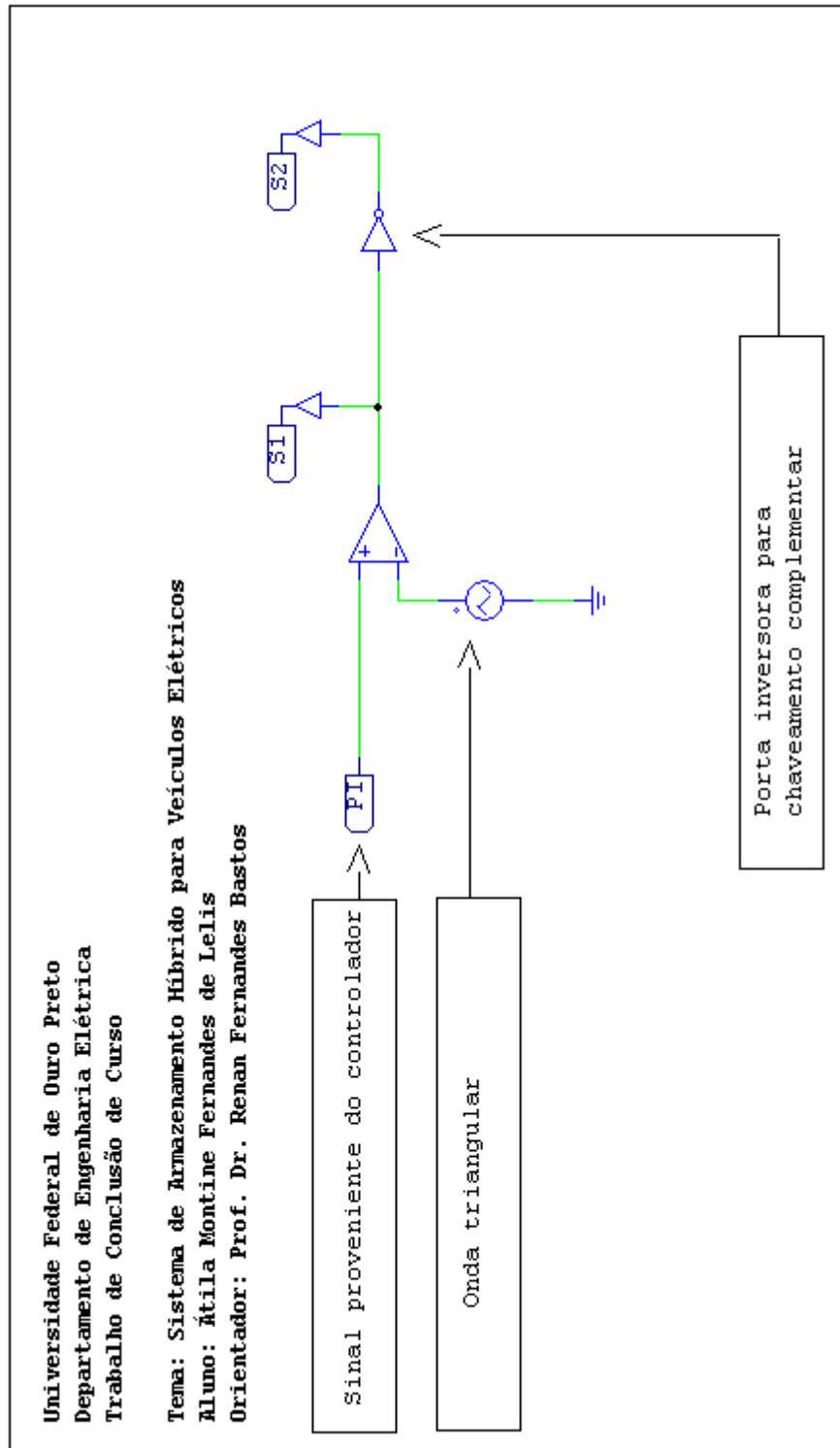


Figura 41 – Modulação PWM utilizada para avaliar a resposta do controlador PI para os testes de desempenho da seção 4.1.

MODULAÇÃO PWM



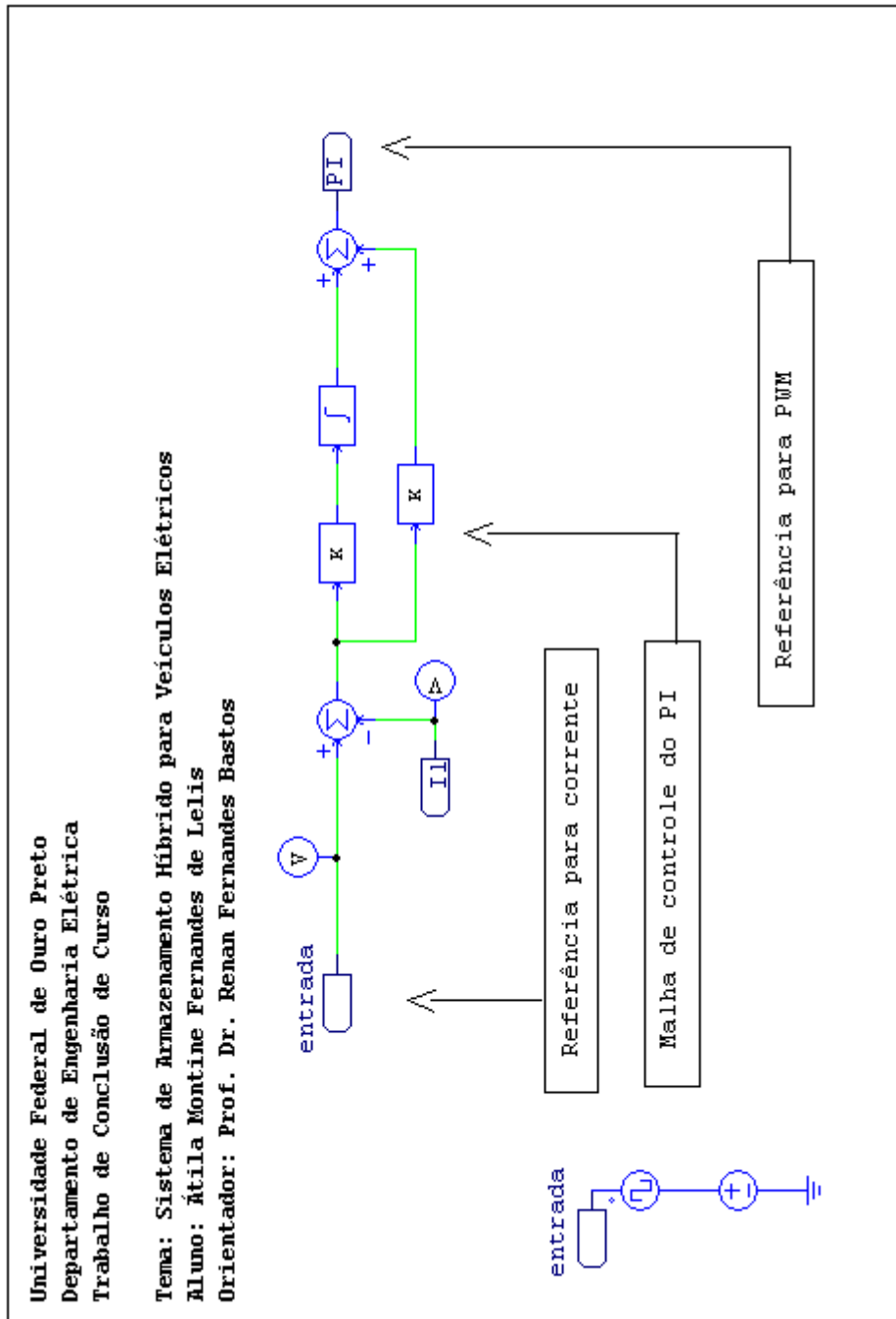
Fonte: Do autor

Figura 42 – Controlador PI utilizado para os testes de desempenho da seção 4.1.

CONTROLADOR PI

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Tema: Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos
Aluno: Átila Montine Fernandes de Lelis
Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos



Fonte: Do autor

A2: Cenário de simulação dos testes da estratégia de gestão de energia proposta por (ZHOU et al., 2010), descritos na seção 4.2.

A seguir, o cenário de simulação dos testes da estratégia de gestão de energia efetuados na seção 4.2.

A ordem dos cenários simulados obedece os seguintes tópicos:

- Obs.: As modulações PWM permanecem da forma descrita no Anexo 1.
- Figura 43, representação da interface de potência adaptada com UC operando com tensão terminal constante no ambiente PSIM.
- Figura 44, controladores PI utilizados nas interfaces de potência da seção 4.2 no ambiente PSIM.
- Figura 45, estratégia de gestão de energia descrita na seção 4.2, em ambiente PSIM.

Figura 43 – Interface de potência adaptada com UC operando com tensão terminal constante descrita na seção 4.2.

**INTERFACE DE POTÊNCIA ADAPTADA COM
UC REPRESENTADO POR UMA FONTE DE
TENSÃO CONSTANTE.**

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Tema: Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos
Aluno: Átala Montine Fernandes de Lelis
Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos

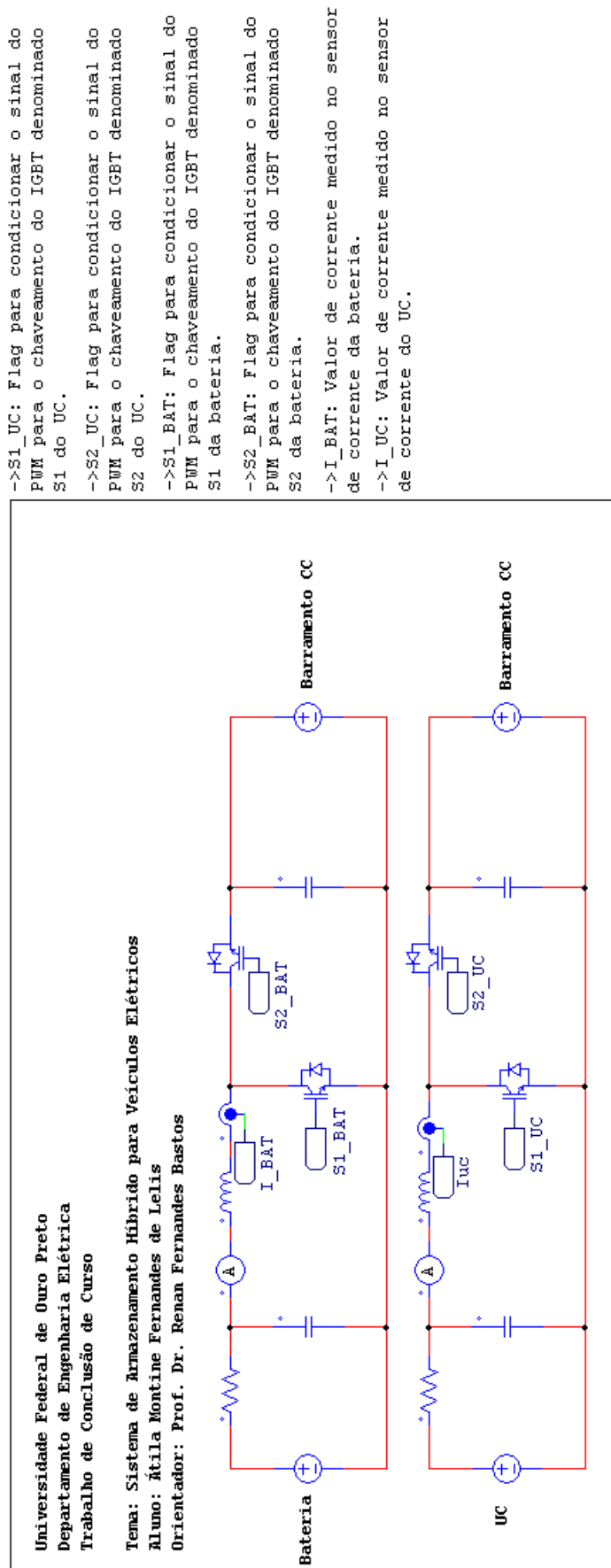
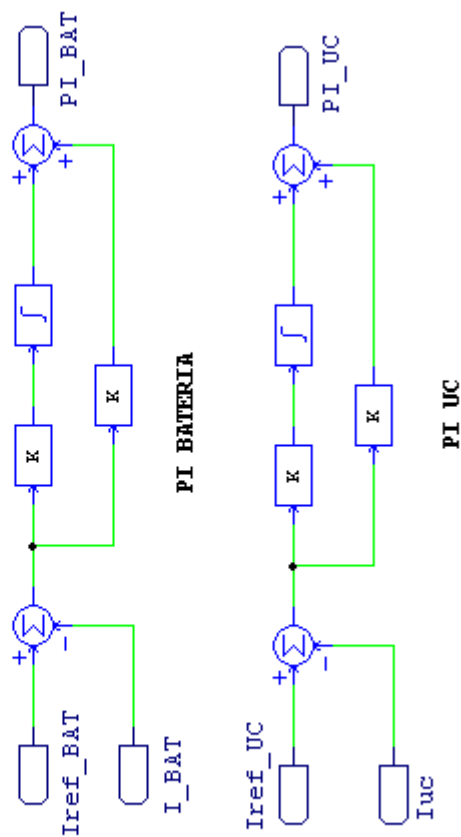


Figura 44 – Controladores PI da bateria e do UC descritos na seção 4.2.

CONTROLADORES PI DA BATERIA E DO UC

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Tema: Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos
Aluno: Átilla Montine Fernandes de Lelis
Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos



->Iref_BAT: Referência gerada para se comparar com o valor medido da corrente da bateria para entrada do controlador PI da bateria.

->I_BAT: Valor de corrente medido na bateria.

->Iref_UC: Referência gerada para se comparar com o valor medido da corrente da bateria para entrada do controlador PI do UC.

->I_UC: Valor de corrente medido no UC.

->PI_BAT: Valor de saída do controlador PI da bateria que servirá de referência na modulação PWM da bateria.

->PI_UC: Valor de saída do controlador PI do UC que servirá de referência na modulação PWM do UC.

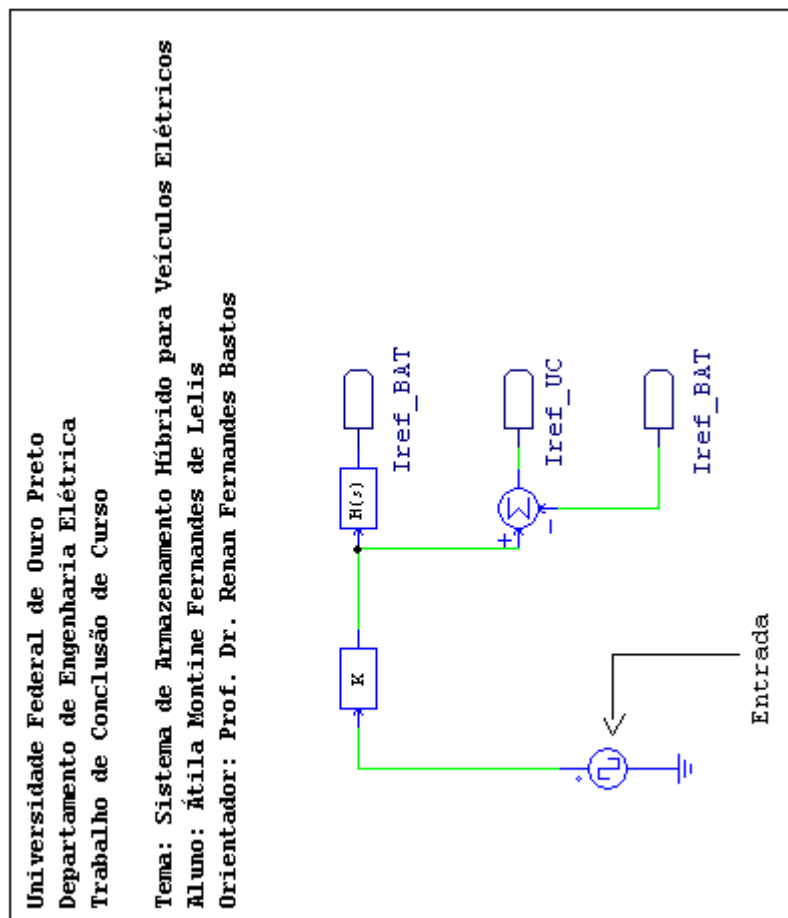
Figura 45 – Estratégia de gestão de energia descrita na seção 4.2.

**ESTRATÉGIA DE GESTÃO DE ENERGIA
DE (ZHOU, 2010)**

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Tema: Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos
Aluno: Átala Montine Fernandes de Lelis
Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos

- >Iref_BAT: Referência gerada para se comparar com o valor medido da corrente da bateria para entrada do controlador PI da bateria.
- >Iref_UC: Referência gerada para se comparar com o valor medido da corrente da bateria para entrada do controlador PI do UC.
- >H(s): Bloco com função de transferência interna do filtro passa baixas.
- >K: Bloco com ganho interno da estrutura.



Fonte: Do autor

A3: Cenário de simulação do sistema de armazenamento híbrido para veículos elétricos com a estratégia de gerenciamento e controle proposta por (BASTOS, 2016), descrito na seção 4.3.

A seguir, o cenário de simulação dos testes do sistema de armazenamento híbrido de energia para veículos elétricos efetuados na seção 4.3.

A ordem dos cenários simulados obedece os seguintes tópicos:

- Obs.: As modulações PWM permanecem da forma descrita no Anexo 1.
- Figura 46, representação da interface de potência com UC operando normalmente em ambiente PSIM.
- Figura 47, Controladores PI da bateria e do UC utilizados na seção 4.3, em ambiente PSIM.
- Figura 48, estratégia de gestão de energia descrita na seção 4.3, em ambiente PSIM.

Figura 46 – Interface de potência utilizada na integração dos elementos armazenadores descrita na seção 4.3.

INTERFACE DE POTÊNCIA UTILIZADA NA INTEGRAÇÃO DOS ELEMENTOS ARMAZENADORES (BATERIA E UC)

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Tema: Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos
Aluno: Áttila Montine Fernandes de Lelis
Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos

Fonte de corrente para
simular um motor acoplado ao
barramento CC.

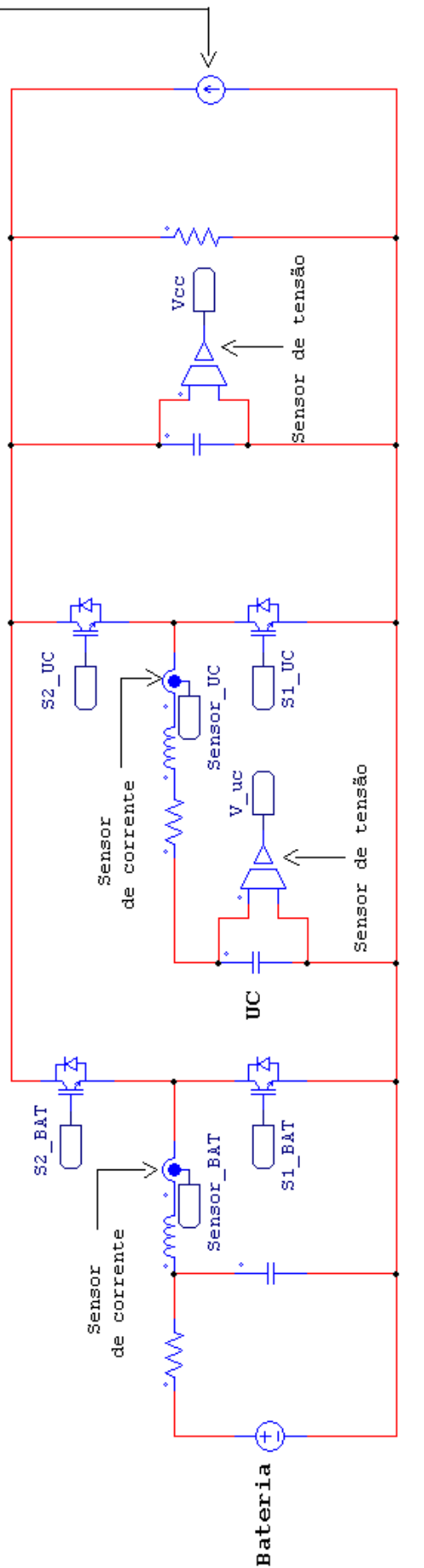


Figura 47 – Controladores PI da bateria e do UC descritos na seção 4.3.

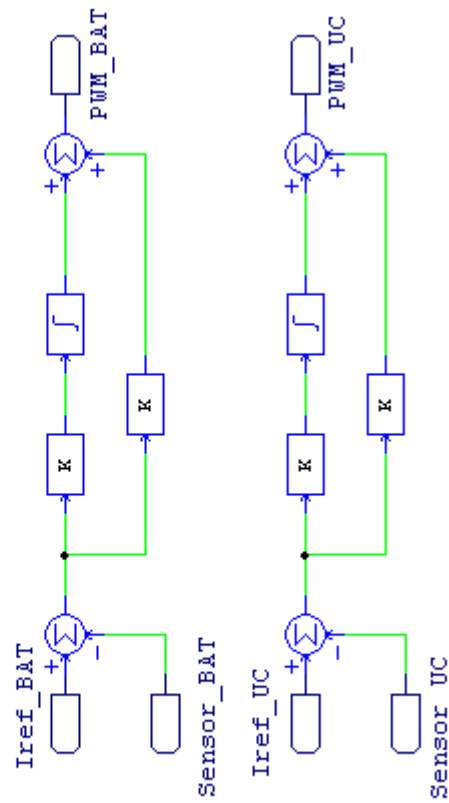
CONTROLADORES PI

Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso

Tema: Sistema de Armazenamento Híbrido para Veículos Elétricos

Aluno: Átilla Montine Fernandes de Lelis

Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos



->Iref_UC: Flag para corrente de referência do UC.
->Iref_BAT: Flag para corrente de referência da bateria.
->Sensor_BAT: Sinal proveniente do sensor de corrente da bateria.
->Sensor_UC: Sinal proveniente do sensor de corrente do UC.
->PWM_BAT: Saída para modulação PWM utilizada para chavear os IGBT's conectados a bateria.
->PWM_UC: Saída para modulação PWM utilizada para chavear os IGBT's conectados ao UC.
->f: Bloco integrador.
->K: Bloco com ganho interno da estrutura.

Figura 48 – Estratégia de controle e gerenciamento de energia descrita na seção 4.3.

ESTRATÉGIA DE GESTÃO DE ENERGIA DE (BASTOS, 2016)

