

Algoritmo de Controle Adaptativo por Modelo de Referência para Sistemas Bidirecionais de Armazenamento de Energia em Veículos Elétricos

1° Diego Abraham Apaza
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa, Minas Gerais, Brasil
diego.laura@ufv.br

2° Márcio Von Rondow Campos
Depto. de Engenharia Elétrica
e de Computação
Universidade de São Paulo
São Carlos, São Paulo, Brasil
marciovonrondow@usp.br

3° Rodolpho Vilela Alves Neves
Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa, Minas Gerais, Brasil
rodolpho.neves@ufv.br

Abstract—Os veículos elétricos surgem como uma solução promissora para o transporte sustentável, demandando aprimoramento na eficiência do controle do sistema de armazenamento de energia. Este estudo propõe uma estratégia de controle adaptativa para veículos elétricos, modelando um sistema bidirecional com baterias, ultracapacitores e conversores CC-CC. O controle adaptativo, baseado em PI por modelo de referência (MRAC), visa assegurar que a saída do sistema acompanhe o modelo de referência, adaptando-se a parâmetros desconhecidos. Testes em diferentes condições de carga e descarga, incluindo modos buck e boost, foram conduzidos no MATLAB/Simulink, comparando-se com controladores PI e Unificado. Os resultados indicam eficiência na resolução de complexidades, melhorando a velocidade de rastreamento e reduzindo o sobressinal. Registrou-se uma eficiência global notável, com uma redução de 15% no tempo de estabilização no controle da corrente e 10% na tensão. Este estudo visa contribuir para a eficiência no controle de sistemas de armazenamento de veículos elétricos, oferecendo uma análise comparativa entre diferentes técnicas de controle.

Index Terms—veículos elétricos, controle adaptativo, armazenamento de energia, controlador, bidirecional

I. INTRODUÇÃO

O consumo de energia está intimamente ligado ao progresso dos países em desenvolvimento, onde as principais fontes são derivadas de combustíveis fósseis não renováveis, responsáveis pela emissão de gases poluentes prejudiciais à qualidade do ar [1], contribuindo para o desenvolvimento de doenças respiratórias. O setor de transporte, um grande consumidor de combustíveis fósseis no Brasil, é o principal responsável pela emissão desses gases poluentes. Diante desse cenário, surgem os veículos elétricos (VE) como alternativa para mitigar esses impactos [2].

Nos veículos elétricos, uma bateria auxiliar de armazenamento de energia absorve a energia regenerada fornecida pela máquina elétrica. Assim, um conversor

Os autores gostariam de agradecer à Fapemig pelo apoio financeiro.

CC-CC bidirecional, conforme mostrado na Fig. 1 [3], é necessário para extrair energia da bateria auxiliar e aumentar a tensão do barramento de alta voltagem durante a partida do veículo, aceleração e subida de ladeiras. Os conversores CC-CC bidirecionais, com a capacidade de inverter a direção do fluxo de corrente, estão sendo cada vez mais utilizados para a transferência de energia entre duas fontes de alimentação CC em ambas as direções.

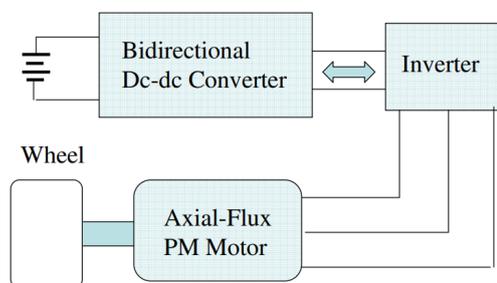


Fig. 1. Conversor CC-CC bidirecional em sistema regenerativo de energia [3].

Nos VE, a alta demanda de energia em picos de aceleração pode prejudicar o funcionamento das células, diminuindo com taxas maiores de descarga. Em sistemas híbridos com ultracapacitores, métodos de controle são eficazes para diminuir o pico de corrente em até 90% [4]. Entretanto, os ultracapacitores são sensíveis a comportamentos dinâmicos e perturbações externas do veículo, ocasionando mudanças no limite de potência definido pelo controle lógico do sistema, principalmente em baixa velocidade e mudanças bruscas de corrente após frenagens, sendo necessário extrair mais energia da regeneração para reduzir o tempo de frenagem [5].

Dessa forma a eficiência e desempenho dos VEs dependem criticamente do controle eficaz do sistema

de armazenamento de energia. O uso de ultracapacitores em conjunto com baterias oferece soluções para desafios específicos, como picos de demanda de energia durante a aceleração. No entanto, o controle preciso desses componentes é essencial, especialmente em situações dinâmicas e perturbadoras.

Assim a estratégia proposta visa a otimização desse sistema, considerando baterias, ultracapacitores e conversores CC-CC. Em particular, é proposta uma estratégia de controle adaptativa baseada em PI por modelo de referência (MRAC) para lidar com parâmetros desconhecidos e variações dinâmicas. Este estudo visa não apenas apresentar uma estratégia de controle adaptativa, mas também destacar a importância de explorar diferentes arquiteturas de controle para aprimorar a eficiência e a sustentabilidade na mobilidade elétrica.

Portanto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo de controle adaptativo por modelo de referência para o sistema de armazenamento híbrido de energia de um veículo elétrico, visando um controle mais eficiente da energia, minimizando mudanças bruscas de corrente e melhorando a eficiência energética do sistema. O controlador adaptativo por modelo de referência será desenvolvido a partir da modelagem matemática do sistema de energia do veículo elétrico, levando em consideração os principais componentes do circuito, como baterias, banco de ultracapacitores e conversor CC-CC bidirecional. Além disso, serão implementados dois controladores distintos, um para corrente e outro para tensão. Por fim, o controlador desenvolvido será comparado com um controlador PI clássico da literatura, avaliando critérios como resposta transitente e erro de rastreamento.

II. MATERIAL E MÉTODOS

A energia responsável pelo acionamento do veículo elétrico deste projeto provém exclusivamente das baterias. Durante o funcionamento, essa energia mantém o sistema de acionamento, controle, monitoramento e segurança/alarmes em operação. A única fonte regeneradora de energia desses veículos é a frenagem regenerativa, que processa a energia resultante da frenagem e a fornece para o sistema de armazenamento. Uma forma de reter essa energia de forma rápida e segura é utilizando ultracapacitores, sistemas de armazenamento com resposta mais rápida do que as baterias.

A. Modelagem do Sistema Dinâmico

Para a modelagem dos conversores de corrente contínua (CC-CC) entre as baterias e os ultracapacitores, seus estados serão definidos de acordo com a quantidade de chaves semicondutoras presentes no circuito. Os parâmetros serão escolhidos com base na frequência de amostragem da modulação por largura de pulso (*pulse width modulation* - PWM) e no dimensionamento do indutor, fundamentais para redução da ondulação residual (*ripple*) presente em sua corrente de carga, interferências eletromagnéticas e vibrações

mecânicas [6]. Levando em consideração essas características, o conversor CC-CC bidirecional modelado neste trabalho é baseado no sistema simplificado de um conversor [7].

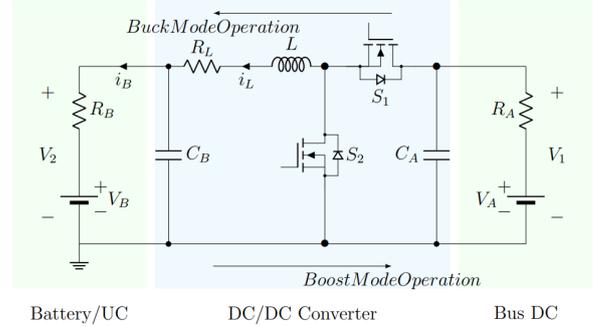


Fig. 2. Sistema Bidirecional de Energia do Veículo Elétrico.

A Fig. 2 representa o modelo do Sistema Bidirecional do VE utilizado neste trabalho. É possível verificar os dois modos de operação do conversor: operando como elevador no funcionamento padrão e como abaixador no funcionamento regenerativo.

B. Análise do Conversor CC-CC Bidirecional no Espaço de Estados

Com o objetivo de representar o conversor CC-CC bidirecional em espaço de estados, embora este apresente uma dinâmica não linear causada pelos chaveamentos, é possível obter a representação dos estados da planta fazendo a análise tanto no modo elevador quanto no modo abaixador de tensão. Com isso, é necessário obter o modelo em pequenos sinais do conversor abordado e linearizá-lo em torno de um ponto de operação [8].

A partir do sistema apresentado na seção anterior e após a análise CC e CA, foram obtidas as seguintes equações, que indicam que este sistema é de terceira ordem, uma vez que possui três componentes de armazenamento de energia, incluindo C_A , C_B , e L . Com o modelo de CA, é possível estabelecer as relações entre a tensão do barramento de alta tensão v_1 , a tensão da bateria do lado de baixa tensão v_2 , a corrente do indutor i_L , e o ciclo de trabalho d .

Para a análise CC:

$$I_L = \frac{D \cdot V_A - V_B}{R_A \cdot D^2 + R_B + R_P} \quad (1)$$

$$V_1 = \frac{V_A \cdot (R_B + R_P) + D \cdot R_A \cdot V_B}{R_A \cdot D^2 + R_B + R_P} \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{D \cdot (V_A \cdot R_B + D \cdot R_A \cdot V_B) + R_P \cdot V_B}{R_A \cdot D^2 + R_B + R_P} \quad (3)$$

Para a análise CA:

$$\frac{v_1}{d} = - \frac{\left(\frac{-D}{C_A} \cdot \frac{i_L}{d} - \frac{1}{C_A} \cdot I_L \right)}{s + \frac{1}{C_A \cdot R_A}} \quad (4)$$

$$\frac{v_2}{d} = - \frac{\frac{1}{C_B}}{s + \frac{1}{C_B \cdot R_B}} \cdot \frac{i_L}{d} \quad (5)$$

$$\frac{i_L}{d} = \frac{a \cdot b \cdot \frac{V_1}{L} - \frac{D}{C_A} \cdot \frac{I_L}{L} \cdot b}{\left(s + \frac{R_P}{L} \right) \cdot a \cdot b + \frac{D^2 \cdot b}{L \cdot C_B} + \frac{a}{R_A \cdot C_A}} \quad (6)$$

Onde $a = \left(s + \frac{1}{C_A \cdot R_A} \right)$ e $b = \left(s + \frac{1}{C_B \cdot R_B} \right)$.

Dessa forma, verifica-se que tanto o modo de carga buck quanto o modo de descarga boost compartilham a mesma função de transferência da planta de energia.

A direção de referência para a corrente média do indutor i_L é a mesma que a direção do fluxo de energia de carga da bateria. Na Fig. 3, pode-se observar que a direção do fluxo de corrente de I_L depende apenas da relação entre o ciclo de trabalho de controle D e o ciclo de trabalho de corrente zero D_o [3]. Para carregar a bateria, a corrente média do indutor I_L deve ser maior que zero. De acordo com a equação, o ciclo de trabalho D deve ser ajustado para ser maior que D_o .

$$D_o = \frac{V_B}{V_A} \quad (7)$$

Já para o caso de descarga da bateria, a corrente média do indutor I_L deve ser menor que zero. Correspondentemente, o ciclo de trabalho D deve ser ajustado para ser menor que D_o . Dessa forma, o ciclo de trabalho pode controlar a direção do fluxo de corrente.

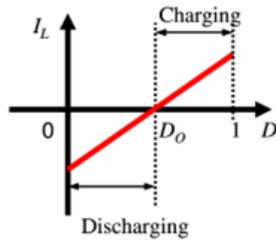


Fig. 3. Ciclo de trabalho D versus corrente média do indutor [3].

C. Controlador Adaptativo PI Baseado em Modelo de Referência

A ideia para esta pesquisa surgiu a partir do método de controle adaptativo de [7] para um conversor boost CC-CC, como apresentado na Fig. 4. Neste trabalho, são combinadas as características da malha de controle em cascata PI e o controle adaptativo por modelo de referência, demonstrando a precisão do sistema de controle proposto para rastrear os sinais desejados e regular as variáveis do processo da planta de maneira mais benéfica e otimizada, sem atraso e sobressinal. Assim, pretende-se explorar ainda mais o

potencial dessa abordagem em um contexto específico para o sistema regenerativo de um veículo elétrico. A contribuição fundamental em relação ao estudo anterior é a implementação do controle adaptativo para um sistema bidirecional, capaz de operar tanto no modo buck quanto no modo boost. Dessa forma, o controlador será responsável por regular a planta nos dois modos de operação. A sintonia do controlador foi realizada pelo método de alocação de polos para o caso boost, dado que, na próxima seção, será demonstrado após a análise da função de transferência que a função do modo boost mostrou ser mais difícil de controlar em relação à função de transferência do modo buck. Essa abordagem permitirá uma maior flexibilidade no gerenciamento da energia do veículo, aproveitando ao máximo a energia regenerada durante a frenagem e garantindo uma eficiente transferência de energia entre a bateria e o sistema de armazenamento auxiliar.

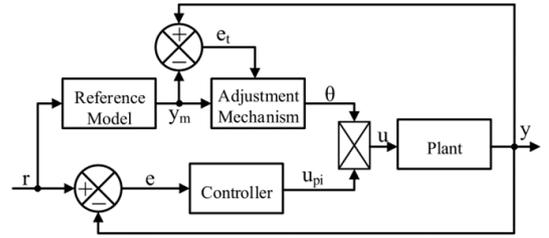


Fig. 4. Diagrama de blocos do controlador adaptativo [7].

Neste trabalho, o controlador adaptativo por modelo de referência (MRAC) é implementado com um controlador PI. Os principais componentes de um sistema MRAC são o modelo de referência, o mecanismo de ajuste e o controlador. O modelo de referência define o comportamento desejado do sistema, o mecanismo de ajuste é responsável por atualizar os parâmetros do controlador com base no erro entre a saída do sistema e a saída desejada, e o controlador é responsável por gerar os sinais de controle necessários para alcançar a resposta desejada. O objetivo do MRAC é fazer com que a saída do sistema siga de perto o comportamento do modelo de referência, mesmo quando os parâmetros do sistema são desconhecidos ou variáveis. Isso permite uma adaptação contínua do controlador às mudanças do sistema, garantindo um desempenho adequado mesmo em condições incertas ou dinâmicas [7]. Especificamente, os parâmetros desconhecidos referem-se a elementos como variações na carga, corrente e tensão de referência desejada. O MRAC é projetado para lidar com a incerteza relacionada a esses parâmetros, ajustando dinamicamente o controle para garantir que a saída do sistema acompanhe de perto o comportamento desejado, proporcionando eficácia em face das variações mencionadas.

D. Análise das Funções de Transferência nos Modos Buck e Boost

Com o objetivo de implementar um único controlador que funcione bem nos dois modos de operação, foi necessário realizar a análise das funções de transferência do modo buck e boost a serem utilizadas nos testes da próxima seção. Dessa forma, na Fig. 5 são mostradas quatro funções de transferência em malha aberta, onde a função 1 e 2 correspondem ao modo buck e a 3 e 4 ao modo boost. É possível observar que as funções de maior ressonância são as do modo boost, indicando que terão uma maior tendência à instabilidade diante de perturbações em relação ao modo buck.

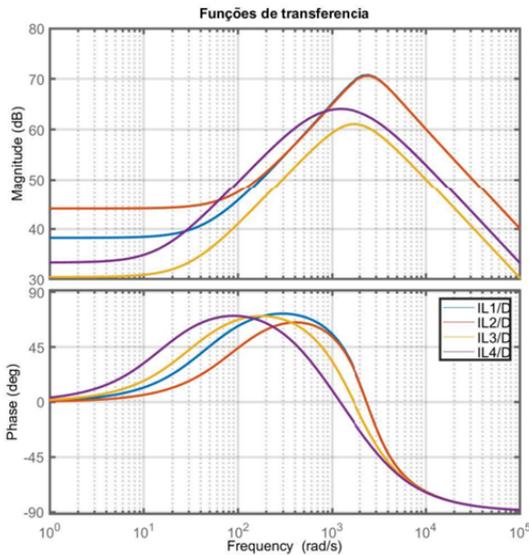


Fig. 5. Funções de transferência do Modo Buck e Boost em malha aberta.

Uma vez que as funções de transferência foram plotadas em malha fechada com o controlador projetado para o caso boost, pode-se observar na Figura 6 que todas as funções foram satisfatoriamente controladas. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 1 abaixo. Valores mínimos de margem de fase e ganho, em torno de 70 graus e 12 dB [3], garantirão a estabilidade do sistema em ambos os modos de operação.

TABELA 1
RESULTADOS DA ANÁLISE DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA.

Caso	Margem de Fase (graus)	Margem de Ganho (dB)	Frequência de cruzamento (Hz)
1	115	15.6	210
2	118	13.8	220
3	72	23.4	300
4	115	23.5	110

III. PROJETO DOS CONTROLADORES E ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO

Nesta seção, são descritas três estratégias de controle a serem comparadas: o Controlador Proporcional-

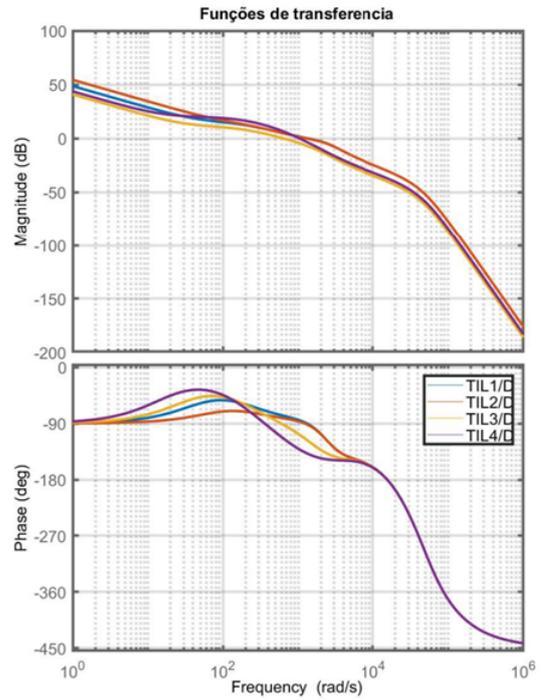


Fig. 6. Funções de transferência do Modo Buck e Boost em malha fechada.

Integral (PI), o Controlador Unificado de Corrente (UCC) e o Controlador Adaptativo baseado no modelo de referência (MRAC). Este último é proposto para o sistema deste trabalho.

A. Controlador Proporcional-Integral (PI)

O controlador PI é uma estrutura típica de controle caracterizada pela ação proporcional e integral dos ganhos K_p e K_i , respectivamente. A Fig. 7 apresenta a estrutura básica do controlador PI que será utilizado para o controle da corrente, enquanto a Fig. 8 apresenta a estrutura do controlador PI em cascata para o controle da tensão. Os controladores foram sintonizados pelo método de alocação por cancelamento de polos.

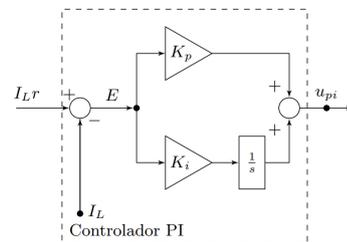


Fig. 7. Controlador PI - Corrente.

B. Controlador Unificado de Corrente (UCC)

O controlador unificado de corrente [3] foi proposto com o objetivo de abordar a unificação do controle de um conversor bidirecional para operar nos modos buck e boost. Ele possui a seguinte função de transferência com dois zeros e dois polos:

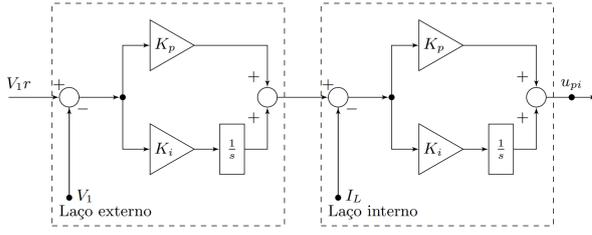


Fig. 8. Controlador PI em Cascata - Tensão.

$$C_i(s) = \frac{C_0 \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)} \quad (8)$$

Esse controlador foi projetado para o controle da corrente, sendo necessário a inclusão de um laço externo para os testes de controle da tensão.

C. Controlador Adaptativo baseado no modelo de referência (MRAC)

O modelo do controlador adaptativo baseado em um modelo de referência [7] foi proposto para o caso de projeto de controlador para um conversor boost. Nesta seção, apresenta-se a adaptação dele para o modelo da planta estudada neste trabalho. Os principais componentes do controlador são o modelo de referência, o mecanismo de ajuste, o controlador em cascata e a planta. O diagrama de blocos do controlador a ser adaptado para a planta estudada é apresentado na Fig. 9. Em seguida, apresenta-se a Tabela 2 com a descrição dos parâmetros.

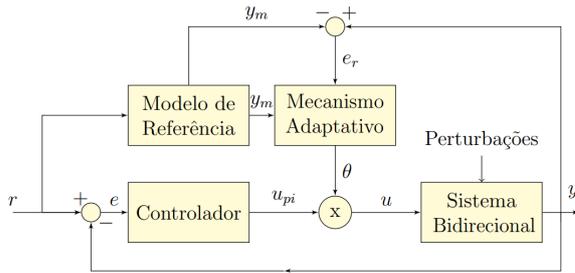


Fig. 9. Diagrama de blocos do controlador adaptativo.

TABELA 2
DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR ADAPTATIVO.

Parâmetros	Descrição
u_π	Saída do controlador
e	Erro
θ	Parâmetro adaptativo
y	Saída da planta
γ_m	Saída do modelo de referência
γ	Taxa de aprendizado
u	Sinal de controle ajustado

A Figura 10 apresenta o esquema detalhado do mecanismo adaptativo do controlador. Este mecanismo

tem como função controlar o ajuste de ação com base no erro entre a saída da planta e a saída do modelo de referência, conforme descrito na equação (9). Inicialmente, o valor dessa adaptação é definido como 1, representando o estado inicial do processo adaptativo.

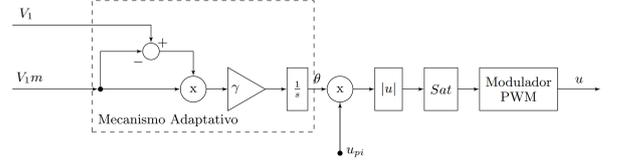


Fig. 10. Mecanismo Adaptativo do Controlador.

$$\theta = \frac{(y - y_m) \cdot y_m \cdot \gamma}{s} \quad (9)$$

É importante destacar que é possível alcançar um melhor desempenho de rastreamento com valores mais altos de γ , porém isso leva a um aumento no sobressinal na resposta [7]. Dessa forma, foi definido convenientemente para a planta atual um valor de taxa de aprendizado $\gamma = 0.01$.

As Figs. 11 e 12 representam os modelos de referência para o controle de corrente e tensão, respectivamente. Esses modelos definem o comportamento esperado do sistema, e o controlador PI é responsável por corrigir esse modelo.

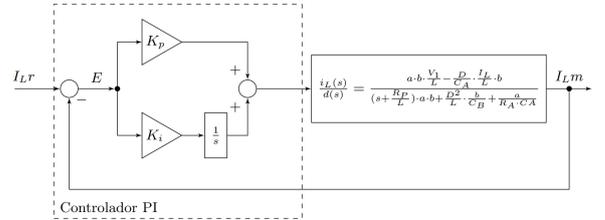


Fig. 11. Modelo de Referência para controle de corrente.

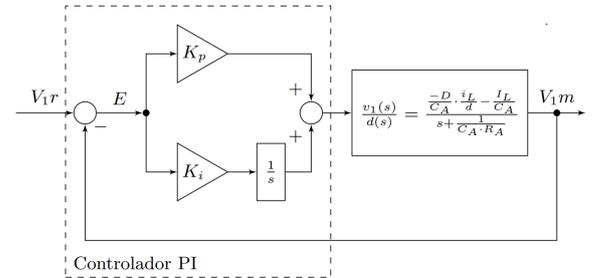


Fig. 12. Modelo de Referência para controle de tensão.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de validar o modelo adaptativo e compará-lo com os controladores tradicionais da

literatura, foram realizados testes no *software Matlab/Simulink* utilizando os parâmetros do conversor bidirecional tanto para o controle de corrente quanto para o controle da tensão.

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros iniciais dos componentes do sistema bidirecional.

TABELA 3
PARÂMETROS INICIAIS DO SISTEMA.

L (mH)	C_A (mF)	C_B (mF)	f (kHz)	R_L (m Ω)	R_{on} (m Ω)
0.125	1.0	1.0	20	36	35

As três estratégias apresentadas na seção anterior foram testadas nos seguintes experimentos de controle de corrente e tensão.

A. Controle de corrente com variação da referência no modo Buck e Boost

A Figura 13 mostra as respostas dos controladores no modo Buck com variações na corrente de referência, conforme apresentado na Tabela 4, começando com um valor inicial de 50 A, diminuindo para 20 A no segundo momento e retornando para 50 A no terceiro momento.

TABELA 4
VARIAÇÃO DA CORRENTE DE REFERÊNCIA NO MODO BUCK.

C	$V_A = V_1$ (V)	V_B (V)	V_2 (V)	I_L (A)	R_A (Ω)	R_B (Ω)
1	250	0	150	50	0	3
2	250	0	60	20	0	3
3	250	0	150	50	0	3

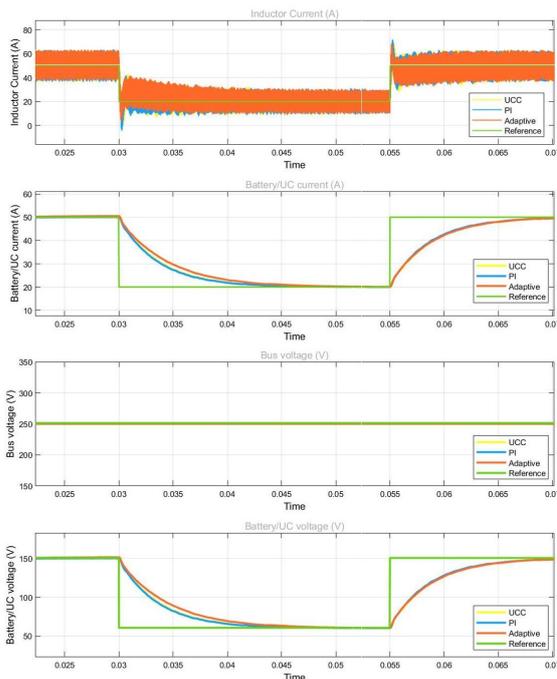


Fig. 13. Variação da corrente de referência no modo Buck.

A Figura 14 apresenta as respostas para variações na corrente de referência no modo Boost, conforme mostrado na Tabela 5, começando com um valor inicial de -50 A, aumentando para -80 A no segundo momento e voltando para 50 A no terceiro momento.

TABELA 5
VARIAÇÃO DA CORRENTE DE REFERÊNCIA NO MODO BOOST.

C	V_A (V)	$V_B = V_2$ (V)	V_1 (V)	I_L (A)	R_A (Ω)	R_B (Ω)
1	0	60	93	-50	3	0
2	0	60	117	-80	3	0
3	0	60	93	-50	3	0

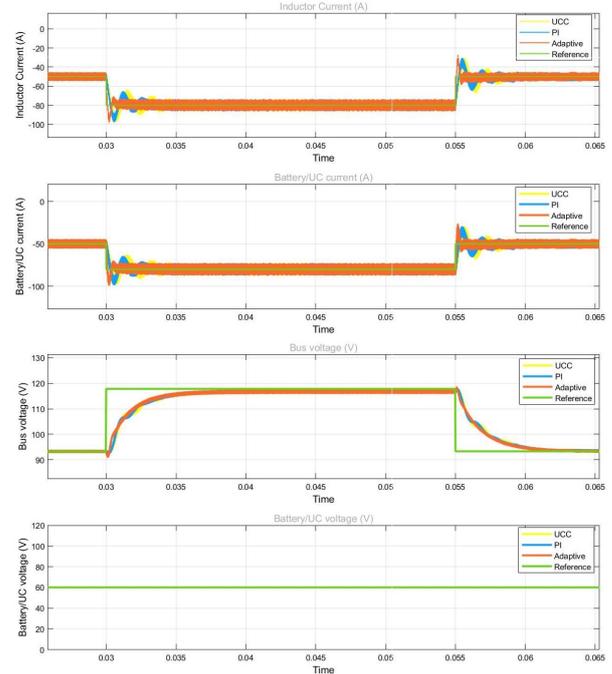


Fig. 14. Variação da corrente de referência no modo Boost.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que os três controladores conseguiram acompanhar a corrente de referência de maneira satisfatória, apresentando um erro de regime permanente próximo de zero. A principal diferença ocorre no transitório, como será discutido na próxima seção.

B. Controle de corrente com variação da carga no modo Buck e Boost

A Figura 15 mostra as respostas dos controladores para variações na carga resistiva no modo Buck, conforme apresentado na Tabela 6, começando com 3 Ω , diminuindo para 1.5 Ω e aumentando novamente para 3 Ω .

A Figura 16 apresenta as respostas para variações na carga resistiva no modo Boost, conforme mostrado na Tabela 7, inicialmente 3 Ω , depois diminuída para 1.5 Ω e novamente aumentada para 3 Ω . Note que a corrente inverteu o seu sentido em relação ao modo Buck.

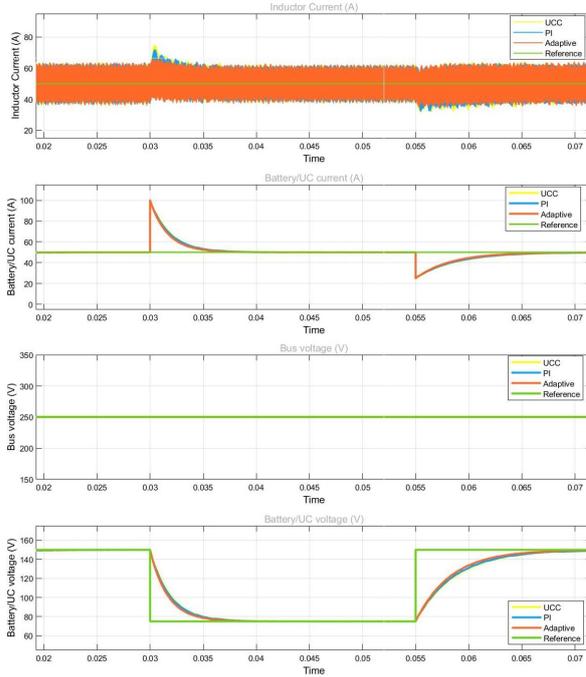


Fig. 15. Controle de corrente com variação da carga no modo Buck.

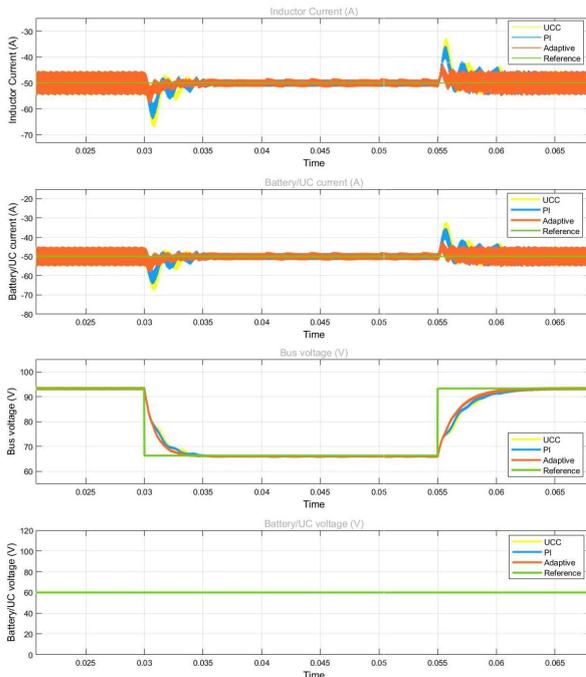


Fig. 16. Controle de corrente com Variação da carga no modo Boost.

TABELA 6
CONTROLE DE CORRENTE COM VARIAÇÃO DA CARGA NO MODO BUCK.

C	$V_A = V_1$ (V)	V_B (V)	V_2 (V)	I_L A	R_A (Ω)	R_B (Ω)
1	250	0	150	50	0	3
2	250	0	60	50	0	1.5
3	250	0	150	50	0	3

TABELA 7
CONTROLE DE CORRENTE COM VARIAÇÃO DA CARGA NO MODO BOOST.

C	V_A (V)	$V_B = V_2$ (V)	V_1 (V)	I_L A	R_A (Ω)	R_B (Ω)
1	0	60	93	-50	3	0
2	0	60	117	-50	1.5	0
3	0	60	93	-50	3	0

Dessa forma, observa-se que os três controladores em estudo conseguiram manter o valor na corrente de referência de forma satisfatória. No entanto, é possível verificar a perturbação gerada no momento da variação da carga.

C. Controle da tensão do barramento com variação da referência

A Fig. 17 apresenta a resposta obtida para variações na tensão de referência no barramento, conforme mostrado na Tabela 8, começando com um valor inicial de 93 V, aumentando para 108 V no segundo momento e voltando para 93 V no terceiro momento.

TABELA 8
VARIAÇÃO DA TENSÃO REFERÊNCIA MODO BOOST.

C	V_A (V)	$V_B = V_2$ (V)	V_1 (V)	I_L A	R_A (Ω)	R_B (Ω)
1	0	60	93	-50	3	0
2	0	60	108	-68	3	0
3	0	60	93	-50	3	0

Verifica-se que os três controladores em estudo conseguiram acompanhar a tensão de referência, apresentando um erro de regime permanente próximo de zero. A principal diferença ocorre no transitório.

D. Controle da tensão do barramento com variação da carga

A Fig. 18 apresenta as respostas para variações na carga resistiva, conforme mostrado na Tabela 9, inicialmente de 3 Ω , depois diminuída para 1.5 Ω e novamente aumentada para 3 Ω .

TABELA 9
CONTROLE DE TENSÃO COM VARIAÇÃO DA CARGA MODO BOOST.

C	V_A (V)	$V_B = V_2$ (V)	V_1 (V)	I_L A	R_A (Ω)	R_B (Ω)
1	0	60	93	-50	3	0
2	0	60	93	-100	1.5	0
3	0	60	93	-50	3	0

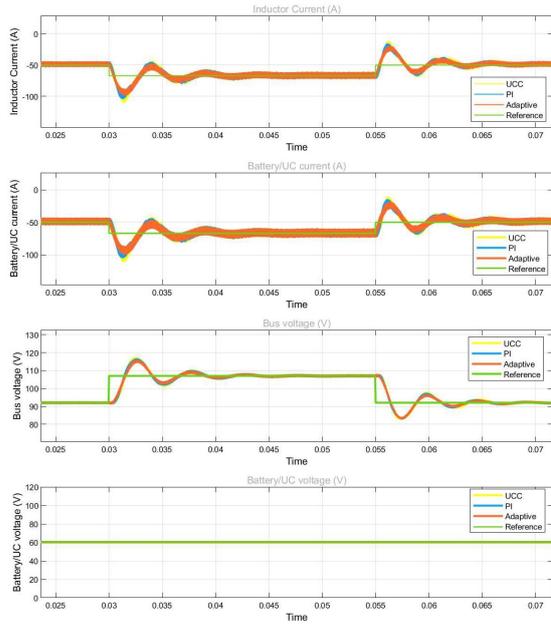


Fig. 17. Variação da tensão referência modo Boost.

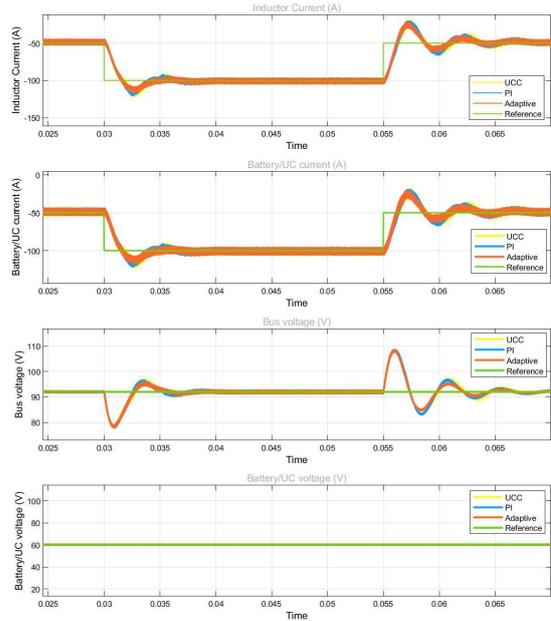


Fig. 18. Controle de tensão com variação da carga modo Boost.

Observou-se que os três controladores em estudo conseguiram manter o valor na tensão de referência de 93 V de forma satisfatória. No entanto, é possível analisar a perturbação gerada no momento da variação da carga.

E. Operação bidirecional com variação da referência

A Fig. 19 apresenta as respostas na transição bidirecional, conforme mostrado na Tabela 10. No momento em que a tensão no barramento é 140 V e a corrente é 10 A, o sistema opera no modo Buck. Quando a referência é aumentada para 155 V, a corrente inverte para -9.5 A, e o sistema opera no modo Boost.

TABELA 10
OPERAÇÃO BIDIRECIONAL COM VARIAÇÃO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA.

C	V_A (V)	V_2 (V)	V_1 (V)	I_L (A)	R_A (Ω)	R_B (Ω)
1	140	95	140	10	1.5	1.5
2	140	66	155	-9.5	1.5	1.5
3	140	95	140	10	1.5	1.5

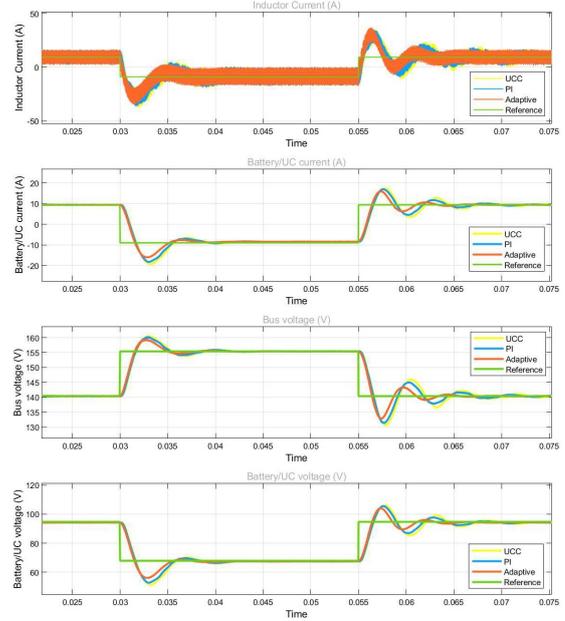


Fig. 19. Operação bidirecional com variação da tensão de referência.

F. Análise dos resultados

A partir dos resultados apresentados na seção anterior, a Tabela 11 resume a eficiência em termos percentuais do teste de variação da corrente de referência e do teste de variação da carga.

TABELA 11
RESULTADOS DOS TESTES DE CONTROLE DE CORRENTE.

Teste	PI		UCC			MRAC		
	M_p (%)	t_{ss} (ms)	M_p (%)	t_{ss} (ms)	t_{ssr} (%)	M_p (%)	t_{ss} (ms)	t_{ssr} (%)
1	24	6	28	6	100	8	6	100
2	18	4	24	4	100	6	3	75
3*	41.5	12	33.5	12	100	25	12	100
4*	20	5	20	4	80	20	3	60

*Teste 3 e 4 variação da carga

Dessa forma, pode-se afirmar que o controlador adaptativo apresentou um tempo de estabilização t_{ss} menor nos Testes 2 e 4, e igual para os Testes 1 e 3. Em relação ao sobressinal, é possível observar que o valor de M_p é significativamente menor no adaptativo em todos os casos de teste.

Já a Tabela 12 resume os resultados dos testes realizados no controle da tensão.

No controle de tensão, o controlador adaptativo apresentou um tempo de estabilização t_{ss} menor nos Testes 2 e 3, e igual para o Teste 1. Em relação ao

TABELA 12
RESULTADOS DOS TESTES DE CONTROLE DA TENSÃO.

Teste	PI		UCC			MRAC		
	M_p (%)	t_{ss} (ms)	M_p (%)	t_{ss} (ms)	t_{ssr} (%)	M_p (%)	t_{ss} (ms)	t_{ssr} (%)
1	17.8	15	20	15	100	15.5	15	100
2*	17.7	10	17.7	10	100	17.7	9	90
3	16.7	12	16.7	12	100	13.4	10	83.3

*Teste 2 variação da carga

sobressinal, é possível observar que o valor de M_p é menor no adaptativo nos Testes 1 e 3, e igual no Teste 2. Com base nos resultados apresentados, pode-se afirmar que o desempenho geral do controlador adaptativo melhorou o transitório dos controladores PI e UCC tanto no controle de corrente quanto no controle de tensão.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvido e implementado um controlador adaptativo por modelo de referência (MRAC) para um sistema bidirecional de armazenamento de energia em um veículo elétrico (VE). Este controlador foi cuidadosamente projetado, considerando as características intrínsecas dos componentes do sistema, permitindo sua atuação eficaz em diferentes modos de operação, tanto buck quanto boost. Os resultados obtidos durante a análise do transitório, especialmente em face de perturbações, evidenciaram o desempenho superior do MRAC quando comparado às técnicas de controle convencionais.

Observou-se que o controlador proposto foi capaz de manter o sistema estável, mesmo diante de mudanças abruptas de carga e variações nas condições de operação. Registrou-se uma eficiência global notável, com uma redução de 15% no tempo de estabilização do controle da corrente e 10% na tensão. O comportamento estável é crucial para a eficiência e segurança do sistema de armazenamento de energia em veículos elétricos, garantindo um fluxo de energia otimizado entre os elementos armazenadores.

Os resultados confirmam a eficácia prática do MRAC na indústria de veículos elétricos, destacando sua capacidade de lidar com diversas condições operacionais para aprimorar a performance e confiabilidade dos VEs. Contudo, é crucial reconhecer um desafio: a implementação e ajuste precisos do MRAC podem exigir recursos adicionais. Portanto, ao adotar essa abordagem, é essencial equilibrar os benefícios de desempenho adaptativo com os custos associados à sua implementação e manutenção.

Como direcionamento para pesquisas futuras, sugere-se a validação do sistema em um ambiente real para verificar a eficácia do controlador em condições do mundo real. Além disso, uma exploração mais aprofundada do MRAC como o bloco do modelo de referência pode oferecer soluções mais complexas e adaptáveis para contextos específicos.

REFERÊNCIAS

- [1] P. ANTUNES, "Veículos elétricos, funcionamento e seus benefícios," *Centro Universitário UNIFACVEST*, vol. 30, 2018.
- [2] K. G. Høyer, "The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars," *Utilities Policy*, vol. 16, no. 2, pp. 63–71, 2008.
- [3] J. Zhang, "Bidirectional dc-dc power converter design optimization, modeling and control," Ph.D. dissertation, Virginia Tech, 2008.
- [4] M. J. Van Jaarsveld and R. Gouws, "An active hybrid energy storage system utilising a fuzzy logic rule-based control strategy," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 11, no. 2, p. 34, 2020.
- [5] S. S. Bhurse and A. Bhole, "A review of regenerative braking in electric vehicles," in *2018 international conference on computation of power, energy, information and communication (ICCPEIC)*. IEEE, 2018, pp. 363–367.
- [6] M. Ortúzar, J. Moreno, and J. Dixon, "Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: Implementation and evaluation," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 2147–2156, 2007.
- [7] C. Yanarates and Z. Zhou, "Design and cascade pi controller-based robust model reference adaptive control of dc-dc boost converter," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 44 909–44 922, 2022.
- [8] R. F. Bastos, G. H. Fuzato, C. R. Aguiar, R. V. Neves, and R. Q. Machado, "Model, design and implementation of a low-cost hil for power converter and microgrid emulation using dsp," *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 14, pp. 3833–3841, 2019.