



**LEONARDO LÚCIO DA SILVA**

**CONTROLE LQG DE UM CONVERSOR CC-CC DE TRÊS  
PORTAS (VR-BESS).**

**LAVRAS - MG**

**2023**

**LEONARDO LÚCIO DA SILVA**

**CONTROLE LQG DE UM CONVERSOR CC-CC DE TRÊS PORTAS (VR-BESS).**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação para obtenção do título de Bacharel.

Prof. DSc. Daniel Augusto Pereira  
Orientador

**LAVRAS - MG**

**2023**

**Ficha Catalográfica preparada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Leonardo Lucio

Controle LQG de um conversor CC-CC de três portas  
(VR-BESS). / Leonardo Lúcio da Silva. – Lavras : UFLA,  
2023.

52 p. :

Monografia(graduação)–Universidade Federal de Lavras,  
2023.

Orientador: Prof. DSc. Daniel Augusto Pereira.

Bibliografia.

1. Energia Fotovoltaica. 2. CONversor VR-BESS. 3.  
Controle LQG. I. Pereira, Daniel Augusto. II. Título.

**LEONARDO LÚCIO DA SILVA**

**CONTROLE LQG DE UM CONVERSOR CC-CC DE TRÊS PORTAS (VR-BESS).**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 28 de Julho de 2023.

Prof. DSc. Daniel Augusto Pereira    UFLA  
Profª. DSc. Silvia Costa Ferreira    UFLA  
Prof. DSc. Vinivius Miranda Pacheco    UFLA

Prof. DSc. Daniel Augusto Pereira  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2023**

*Dedico este trabalho a meus pais, minha noiva e minha irmã, por me manterem motivado,  
incentivado e apoiado durante todos esses anos.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Santíssima Trindade por me dar força, sabedoria e resiliência para concluir essa etapa tão importante de minha vida.

Agradeço aos meus pais, Luciana e Adriano, por todo apoio, por caminharem ao meu lado durante todas as tribulações, todas dificuldades, me fortalecendo nos momentos mais difíceis sempre com otimismo, perseverança e coragem, sem vocês eu não seria nada.

Agradeço a minha noiva, Caroline, por toda cumplicidade, companheirismo, carinho e amor.

Agradeço a minha irmã, Ana Mara, por todo apoio, incentivo e vivência.

Agradeço ao restante de minha imensa família pela torcida e oração.

Agradeço a Universidade Federal de Lavras pelos programas de Assisistência Estudantil, principalmente o Moradia Estudantil (Famoso Brejão), sem ele possivelmente não chegaria tão longe.

Agradeço ao meu orientador Daniel Augusto Pereira, por compartilhar o seu grande conhecimento, sempre receptível, paciente e disposto a ajudar, foi um privilégio trabalhar com o Sr.

Agradeço a todos os professores com quem tive a oportunidade de conviver, seja durante as aulas ou em qualquer conversa informal.

Agradeço a todos amigos que fiz durante todos esses anos, vocês com certeza estavam em meus pensamentos até o fim.

Agradeço ao carinhoso "Grupo Borracha", formado além de mim por Vítor Cardoso e Pedro Henrique, por toda parceria, cumplicidade, apoio e dedicação durante essa caminhada.

Concluo agradecendo todos os demais servidores da universidade, que fazem essa instituição acontecer.

Serei grato eternamente por tudo isso.

*A forma como você faz qualquer coisa é a forma como você faz tudo.  
(Harv Eker)*

## RESUMO

Vive-se atualmente um momento de emergência climática, a crescente demanda energética, grande parte devido ao aumento populacional e aos desperdícios ao redor do mundo estão impulsionando a busca por alternativas em energia renováveis. Porém, devido a instabilidade e irregularidade desses sistemas, a busca por sistemas de controle capazes de otimizar, garantir confiabilidade e segurança aos sistemas de geração está cada vez maior. Este trabalho apresenta uma técnica de controle baseada em um modelo em espaço de estados médios, de um conversor CC-CC de três portas aplicado a geração fotovoltaica *off grid*, denominado VR-BESS (*Voltage Regulator - Battery Energy Storage System*). Esse conversor é responsável por captar a energia oriunda do painéis fotovoltaicos, adequa-la para alimentação de uma carga, armazenar o excedente em baterias e em momentos de baixa energia da entrada, utilizar a armazenada para regular e suprir a demanda. Este sistema será o elemento integrador entre os painéis, banco de baterias e carga. O sistema de controle é denominado LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) que é composto por um sistema de cálculo dos ganhos e um estimador de estados. O cálculo dos ganhos é realizado por meio da técnica de controle ótimo LQR (*Linear Quadratic Gaussian*) e os estados do sistema são estimados pelo estimador estocástico Filtro de Kalman. As simulações da modelagem matemática e modelo de controle serão realizadas no *software* MATLAB/Simulink e os resultados apresentados em forma de gráficos das simulações para validação do modelo e sistemas de controle.

**Palavras-chave:** Controle LQG, Controle LQR, Conversor CC – CC, Energia fotovoltaica, Filtro de Kalman.

## ABSTRACT

We are currently living in a moment of climate emergency, the growing demand for energy, largely due to population growth and waste around the world, are driving the search for alternatives in renewable energy. However, due to the instability and irregularity of these systems, the search for control systems capable of optimizing, guaranteeing reliability and security to the generation systems is increasing. This work presents a control technique based on an average state space model of a three-port DC-DC converter applied to *off grid* photovoltaic generation, called VR-BESS (*Voltage Regulator - Battery Energy Storage System*). This converter is responsible for capturing the energy coming from the photovoltaic panels, adapting it to power a load, storing the surplus in batteries and in times of low input energy, using the stored energy to regulate and supply the demand. This system will be the integrating element between the panels, battery bank and load. The control system is called LQG (Linear Quadratic Gaussian) which is composed of a gain calculation system and a state estimator. The calculation of gains is performed using the optimal control technique LQR (Linear Quadratic Gaussian) and the system states are estimated using the stochastic estimator Kalman filter. Simulations of mathematical modeling and control model will be performed in MATLAB/Simulink software and the results will be presented in the form of simulation graphs for validation of the model and control systems.

**Keywords:** *DC – DC* Converter, Kalman Filter, LQG Control, LQR Control, Photovoltaic energy

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Cenário de evolução 2010-2030 . . . . .	12
Figura 2.1 – Comparação no uso de energias renováveis 2010-2026 . . . . .	16
Figura 2.2 – Esquema elétrico do conversor Buck . . . . .	17
Figura 2.3 – Esquema elétrico do conversor Boost . . . . .	18
Figura 2.4 – Diagrama de blocos conversor VR-BESS . . . . .	19
Figura 2.5 – Diagrama elétrico do conversor VR-BESS . . . . .	20
Figura 2.6 – Circuito equivalente da Etapa 1 . . . . .	20
Figura 2.7 – Circuito equivalente da Etapa 2 . . . . .	21
Figura 2.8 – Circuito equivalente da Etapa 3 . . . . .	21
Figura 2.9 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada . . . . .	23
Figura 2.10 – Diagrama de blocos para controle em malha fechada . . . . .	25
Figura 2.11 – Algoritmo recursivo do filtro de Kalman . . . . .	27
Figura 2.12 – Diagrama de Blocos do sistema com o Filtro de Kalman . . . . .	28
Figura 2.13 – Diagrama de Blocos do controlador LQG . . . . .	29
Figura 3.1 – Configuração do Modo 1 . . . . .	31
Figura 3.2 – Circuito equivalente da etapa 1 . . . . .	32
Figura 3.3 – Circuito equivalente da etapa 2 . . . . .	32
Figura 3.4 – Circuito equivalente da etapa 3 . . . . .	33
Figura 4.1 – Circuito equivalente da etapa 2 . . . . .	38
Figura 4.2 – Bloco Kalman filter implementado . . . . .	40
Figura 4.3 – Diagrama de blocos para controle LQG . . . . .	41
Figura 4.4 – Funcionamento do conversor no modo 1 . . . . .	42
Figura 4.5 – Comparação entre estados estimados e reais para $V_0$ e $V_{bat}$ . . . . .	42
Figura 4.6 – Comparação entre estados estimados e reais para $i_{Ls}$ e $i_{Lbat}$ . . . . .	43
Figura 4.7 – Diagrama de blocos com perturbações aplicadas . . . . .	44
Figura 4.8 – Respostas das saídas do sistema à perturbações . . . . .	44
Figura 4.9 – Respostas dos estados estimados do sistema à perturbações . . . . .	45
Figura 4.10 – Respostas dos estados estimados do sistema à perturbações . . . . .	46
Figura 4.11 – Respostas dos estados estimados do sistema à perturbações . . . . .	46
Figura 1 – Dados e Modelagem em espaço de estados . . . . .	51
Figura 2 – Definição dos ganhos "K" . . . . .	51

Figura 3 –	Obtenção dos parametros do Simulink (TOWORKSPACE) . . . . .	52
Figura 4 –	Plotagem dos gráficos . . . . .	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros para simulação. . . . .	37
---	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Energia Fotovoltaica</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Tipos de Sistemas Fotovoltaicos</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>Conversores CC-CC</b>	<b>16</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Conversor Buck</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Conversor Boost</b>	<b>18</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Conversor de três Portas VR-BESS</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>Modelagem</b>	<b>21</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Modelagem em Espaço de estados médios</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Projeto de Controle</b>	<b>23</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Controle LQR</b>	<b>24</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Filtro de Kalman</b>	<b>25</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Ação Integral</b>	<b>28</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Controle LQG (Linear Quadratic Gaussian)</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodologias</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Obtenção do Modelo</b>	<b>30</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Modo 1</b>	<b>30</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Projeto do Controlador LQR (Linear Quadratic Regulator)</b>	<b>34</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Projeto do Controlador LQI (Linear Quadratic with Integral)</b>	<b>35</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Projeto do Filtro de Kalman</b>	<b>35</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Projeto do Controlador LQG (Linear Quadratic Gaussiano)</b>	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Controle LQR</b>	<b>37</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Escolha das Matizes Q e R</b>	<b>37</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Ganho K</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Filtro de Kalman</b>	<b>39</b>
<b>4.3</b>	<b>Controle LQG</b>	<b>40</b>

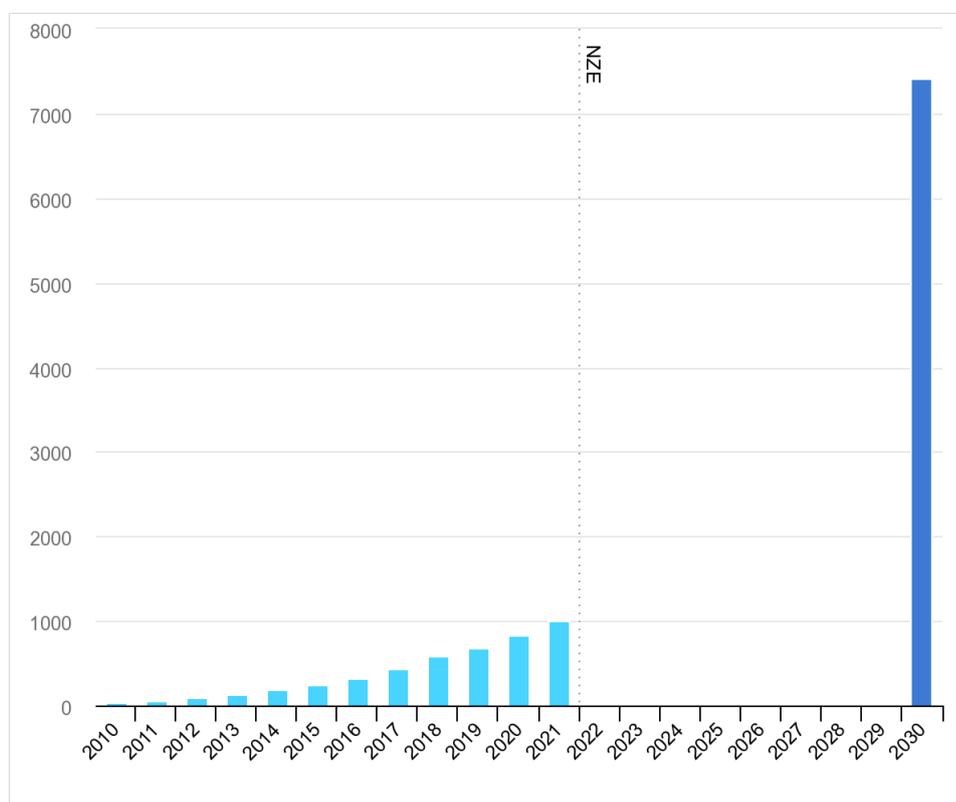
<b>4.3.1</b>	<b>Aplicação de perturbações</b>	<b>43</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Duty Cycle</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>47</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>
	<b>APENDICE A – Códigos implementados no MATLAB</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente emergência climática, gerada principalmente pelo uso desenfreado de recursos não renováveis, muito incentivado pelo aumento populacional e a exigência de satisfazer todas as necessidades básicas humanas, a preocupação com o meio ambiente principalmente quanto a exploração e danos ambientais dos recursos finitos, está cada vez mais presente em discussões globais de desenvolvimento sustentável e busca por formas alternativas de obtenção desses recursos. Além disso, o crescente desenvolvimento tecnológico impulsionou a demanda energética em todo mundo, intensificando pesquisas, projetos e esforços individuais para reduzir a utilização desse tipo de energia.

Sistemas de geração de energias renováveis vem sendo aperfeiçoados na busca de minimizar os impactos da utilização de recursos não renováveis e futura substituição completa deste tipo de geração. Destacam-se dentre elas a geração eólica, geração fotovoltaica e hidroelétricas que utilizam basicamente recursos mais limpos, demandam pouca manutenção e geram quase nenhuma poluição. A Figura 1.1 mostra o avanço na utilização de energia solar fotovoltaica de 2010-2021 e uma previsão para 2030 em GWh.

Figura 1.1 – Cenário de evolução 2010-2030



Fonte: IEA (Agencia internacional de energia).

No Brasil alguns quesitos favorecem a exploração, principalmente da energia solar fotovoltaica, o posicionamento geográfico próximo a linha do Equador e as baixas variações de intensidade de radiação solar durante o ano, convergem para um ótimo cenário de exploração e geração de energia limpa.

Segundo *IEA (Agencia Internacional de Energia)* em 2021 foram gerados globalmente cerca de 179TWh, com um aumento percentual de 22% em relação a 2020. Destes 3,6% foram gerados por sistemas de geração fotovoltaicas, se mantendo como a terceira maior tecnologia em eletricidade renovável. China e EUA se destacam com os maiores crescimentos 38 e 17%, consecutivamente. A previsão para 2030 é que 7400TWh. No Brasil atualmente segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (*Absolar*) há capacidade instalada de 23,9 GW, com previsão de 4,5TW até o final de 2024.

Porém, para aproveitamento de forma eficiente, devido a suscetibilidade a condições ambientais durante a captação e conversão em energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos faz-se necessário a utilização de conversores eletrônicos integrados aos sistemas fotovoltaicos. Estes por sua vez, são responsáveis por regular a energia entregue as cargas, otimizar desempenho, eficiência e tornar o sistema seguro e confiável. O conversor VR-BESS (*Voltage Regulator – Battery Energy Storage System*) é um conversor CC-CC não isolado formado por um regulador de tensão e uma central de armazenamento de energia em baterias para aplicação em sistemas fotovoltaicos. Esse conversor é construído a partir da combinação de dois conversores chamados conversor *BUCK* e conversor *BOOST*. A partir da combinação é possível controlar a tensão entregue a carga e armazenar a energia excedente.

Nesse momento, entram em cena técnicas de controle que permitem otimizar e aumentar o desempenho do sistema, Alocação de pólos, LQR, Filtro de Kalman e LQG são algumas dessas técnicas que trabalham na melhoria de eficiência e robustez contra agentes externos.

Com isso, o objetivo do presente trabalho é aplicar uma técnica de controle ótimo, esta por sua vez, reduz os impactos de oscilações de potência, que são característica de sistemas dependentes de condições ambientais, como a geração fotovoltaica.

## **1.1 Organização do trabalho**

No capítulo dois será apresentado um referencial teórico com conceitos importantes para melhor entendimento, destacando pontos importantes para o desenvolvimento do trabalho.

Um breve resumo sobre energia fotovoltaica e os tipos de geração, uma abordagem dos dois principais conversores que compoem o VR-BSS, duas estratégias de controle para comparação e também uma breve introdução sobre Filtro de Kalman.

No capítulo três será tratado o desenvolvimento do trabalho, a metodologia utilizada e implementação dos sistemas de controle, a partir das ferramentas utilizadas.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos e no 5 as conclusões acerca dos resultados.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 Energia Fotovoltaica

Energia fotovoltaica nada mais é do que um fenômeno caracterizado pela conversão da luz solar em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos. Esse fenômeno foi observado pela primeira vez por (BECQUEREL, 1839), em sua pesquisa, ele notou que quando combinados placas metálicas mergulhadas em um eletrólito e a exposição deste conjunto a luz, uma diferença de potencial era gerada.

Algumas décadas mais tardes, impulsionados por Albert Einstein e sua explicação do fenômeno fotoelétrico, no início do século XX, em 1954 a primeira célula fotovoltaica foi apresentada na National Academy of sciences, EUA, com capacidade de conversão de apenas 11% e aplicada a uma residência rural para alimentar uma rede telefônica.

As primeiras aplicações, devido ao alto custo e necessidade de pesquisas de desenvolvimento na busca por melhorias, principalmente de eficiência, foram concentradas no setor espacial, como forma alternativa de energia em estações espaciais. A Figura 2.1 mostra um comparativo evolutivo na utilização dos tipos de energias renováveis entre 2010 e 2026.

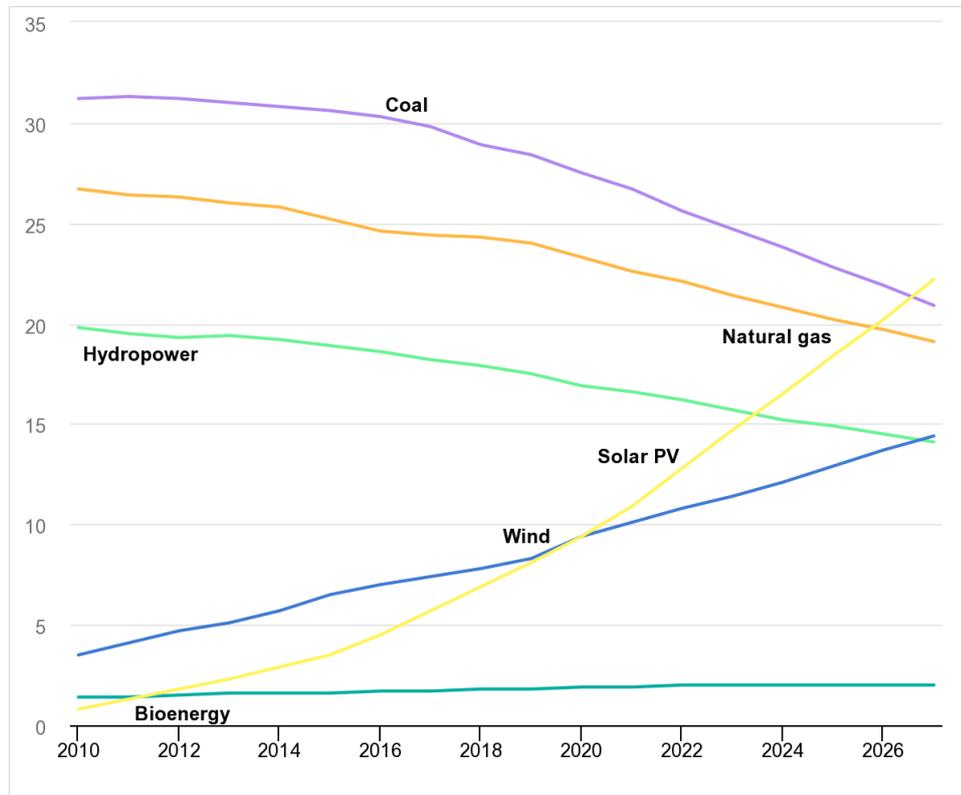
Atualmente com o grande avanço das pesquisas, impulsionadas pela necessidade de fontes alternativas e renováveis, o uso de energia fotovoltaica expandiu de uma forma incrível, com previsão para o Brasil de capacidade acumulada no final de 2024 de 4.5TW (tera watts). Um crescimento de 440GW (giga watts) gerados a partir de energias renováveis é esperado em todo o mundo para 2023, sendo 65% deste aumento oriundo de instalações de geração fotovoltaica, aponta estudo da *Agencia internacional de energia* (AEI).

### 2.2 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas de geração de energia fotovoltaica podem ser classificados de três formas diferentes: Sistemas *on-grid* (conectados a rede), *off-grid* (isolados da rede) e híbridos. Os três sistemas geram energia da mesma forma, painéis solares interconectados de forma a atingir as especificações de projeto.

De acordo com (PACHECO, 2003), sistemas *on-grid* são sistemas conectados a rede, nesses sistemas, quando a energia gerada não é suficiente para alimentar a carga, utiliza-se energia da rede distribuidora para suprir a energia faltante e quando a energia gerada é maior que a

Figura 2.1 – Comparação no uso de energias renováveis 2010-2026



Fonte: IEA (Agencia internacional de energia)

consumida pela carga ela é distribuída para rede, gerando o chamado "crédito" de energia com a concessionária (TORRES, 2012).

Sistemas *off-grid* ou sistemas isolados, são sistemas que possuem baterias para armazenamento da energia gerada, excedente ou não. Esses sistemas são mais utilizados em ambientes isolados, onde a rede elétrica é de difícil acesso ou ambientes rurais, são bastante utilizados em sistemas de bombeamento de água, radares e etc. Compõem as chamadas *UPS (Uninterruptible Power Supply)*, que armazenam o excedente e utilizam em futuras compensações (RÜTHER, 2004).

Já os sistemas híbridos podem operar nos dois modos de funcionamento, precisam de sistema de armazenamento e que não necessariamente sejam baterias.

### 2.3 Conversores CC-CC

A unidade de geração não é capaz de adequar a tensão gerada, seja para alimentação da carga, armazenamento em baterias ou entrega a rede elétrica, é nesse momento que entram em cena os conversores CC-CC que regulam a tensão de entrada do conversor e entregam um

sinal de saída estável e controlado. Esses conversores partem do princípio do chaveamento, e controlam a saída de acordo com o tempo em que estas chaves permanecem abertas ( $t_{off}$ ) e fechadas ( $t_{on}$ ) durante um período  $T_s$  (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.1)$$

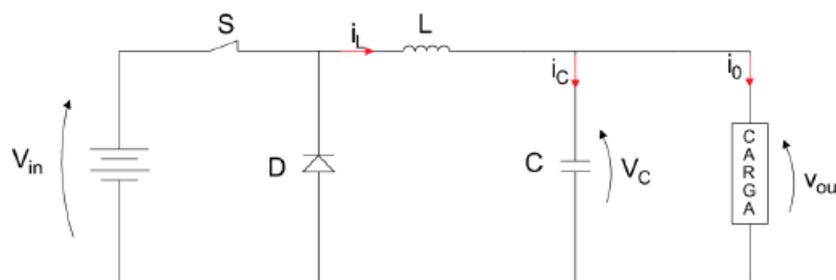
Onde "D" é definido como "Duty cycle" ou razão cíclica, e demonstra a relação entre o período total de funcionamento e o tempo em que as chaves do circuito de chaveamento estão em nível lógico 1, fechadas ou em curto (BROWN, 2012).

Podem ser classificados em isolados e não isolados, devido a presença de um componente com isolamento galvânica (por exemplo, transformadores). Nesse trabalho serão tratados os dois conversores não isolados mais utilizados na eletrônica de potência e que compõem o conversor VR-BESS, conversores *buck* e *boost*.

### 2.3.1 Conversor Buck

Também conhecido como conversor abaixador, este sistema tem por característica reduzir uma tensão de entrada  $V_{in}$  para uma tensão que varia de 0 até  $V_{in}$  de acordo com o tempo de ativação da chave (0 a 100%) (RASHID, 2017).

Figura 2.2 – Esquema elétrico do conversor Buck



Fonte: (BRAGA, 2022)

Com o ganho determinado pela equação:

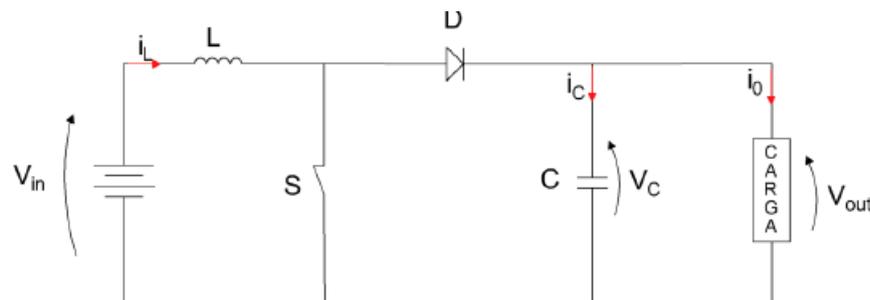
$$V_{out} = V_{in}D \quad (2.2)$$

Onde  $V_{in}$  é definida como a tensão disponível na fonte de alimentação e  $V_{out}$  a tensão sobre a carga.

### 2.3.2 Conversor Boost

Também conhecido como conversor elevador, este sistema é caracterizado por aumentar a tensão de saída de acordo com o período de tempo em que a chave fica ligada (0 a 100%), variando de  $V_{in}$  até um valor de tensão maior que  $V_{in}$  com saturação definida pelos componentes do circuito. (RASHID, 2017).

Figura 2.3 – Esquema elétrico do conversor Boost



Fonte: (BRAGA, 2022)

Com ganho determinado pela equação:

$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{D - 1} \quad (2.3)$$

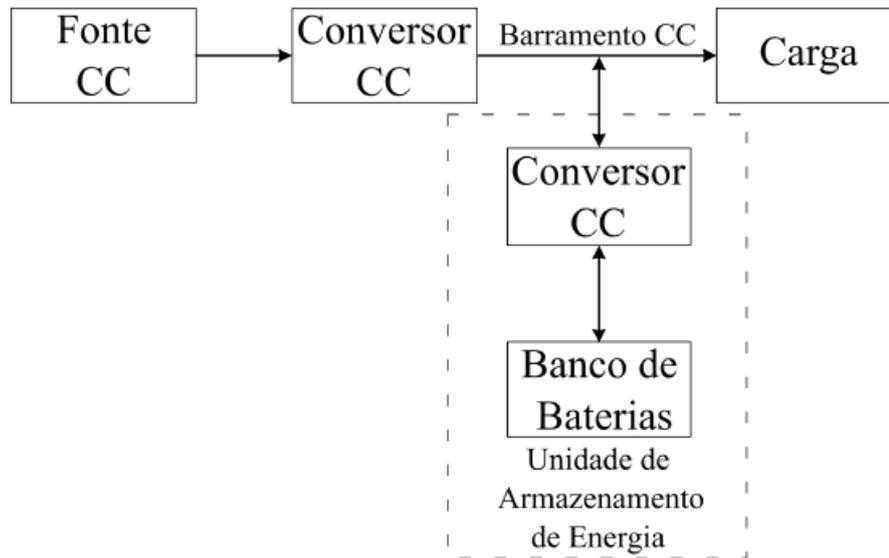
As demonstrações podem ser encontradas em (BRAGA, 2022) e (MARCELLO, 2018).

### 2.3.3 Conversor de três Portas VR-BESS

Nascendo com a intenção de regular as variações em sistemas de energias ininterruptas e atender as exigências de dispositivos sensíveis as variações, esse conversor é composto por um circuito de regulação de tensão de entrada (boost) e um circuito de armazenamento da energia excedente em baterias (*buck e boost*). A regulação é feita por um conversor elevador (*boost*) adequando a tensão de entrada a uma tensão regulada no barramento. Como a tensão da bateria que compoe o circuito de armazenamento é menor que a tensão do barramento, um conversor *buck* é utilizado para reduzir a tensão excedente e adequa-lá para o armazenamento no banco de baterias. Quando a tensão do barramento não é suficiente para alimentar a carga, o segundo conversor *boost* entra em cena para elevar a tensão proveniente do banco de bateria que será

entregue ao barramento. Por fim, pode ser ligado diretamente aos painéis fotovoltaicos. O diagrama da figura 2.4 reproduz o sistema.

Figura 2.4 – Diagrama de blocos conversor VR-BESS



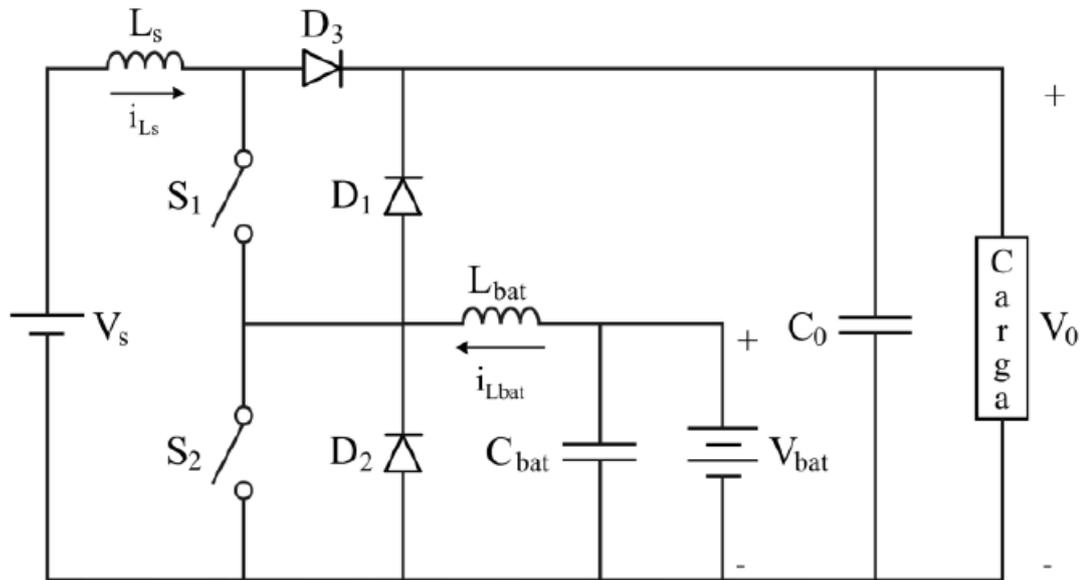
Fonte: (PACHECO, 2003)

O conversor é composto por três diodos, dois indutores, dois capacitores, duas chaves e uma bateria, demonstrado na Figura 2.5. E possui dois modos principais de funcionamento, que são:

- MODO 1 - Regulação de tensão e alimentação do banco de baterias: Energia disponível na entrada é maior que a consumida pela carga. Com isso, o excedente deve ser armazenado pelas baterias. Portanto, nesse modo temos uma entrada, tensão disponível gerada pelos painéis fotovoltaicos ( $V_s$ ) e duas saídas, tensão da bateria ( $V_{bat}$ ) e tensão na carga ( $V_0$ )
- MODO 2 -Regulação de tensão e compensação de potência: Energia disponível na entrada é menor que a energia consumida pela carga. Com isso, o banco de bateria deve fornecer a energia complementar. Portanto, nesse modo temos duas entradas tensão disponível gerada pelos painéis fotovoltaicos ( $V_s$ ) e tensão disponível no banco de baterias ( $V_{bat}$ ) e uma saída, tensão sobre a carga ( $V_0$ ).

Este trabalho dará ênfase ao Modo 1 de funcionamento do conversor e todo sistema de controle será desenvolvido para esta etapa, com isso, uma explicação mais detalhada deste modo de funcionamento será apresentada a seguir.

Figura 2.5 – Diagrama elétrico do conversor VR-BESS

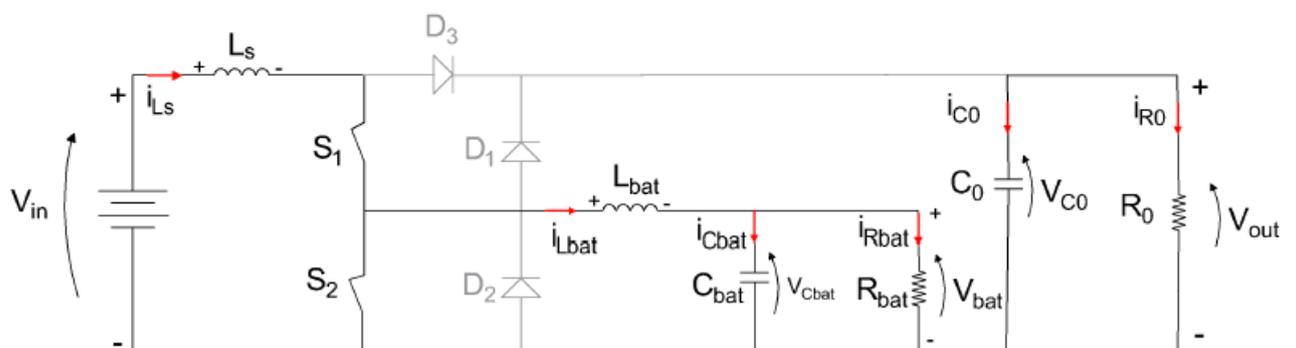


Fonte:(PACHECO, 2003)

Para o Modo 1, regula-se a tensão de saída (*boost*), carrega-se as baterias (*buck*), com isso, o sistema apresenta três etapas de funcionamento, definidas pelo estados das chaves  $S_1$  e  $S_2$ . Nas Figuras 2.6, 2.7 e 2.8 o banco de bateria e a carga são representadas por cargas resistivas  $R_{bat}$  e  $R_0$ .

Na etapa 1,  $S_1$  e  $S_2$  estão conduzindo, a bateria é carregada e a energia armazenada no capacitor  $C_0$  alimenta a carga.

Figura 2.6 – Circuito equivalente da Etapa 1

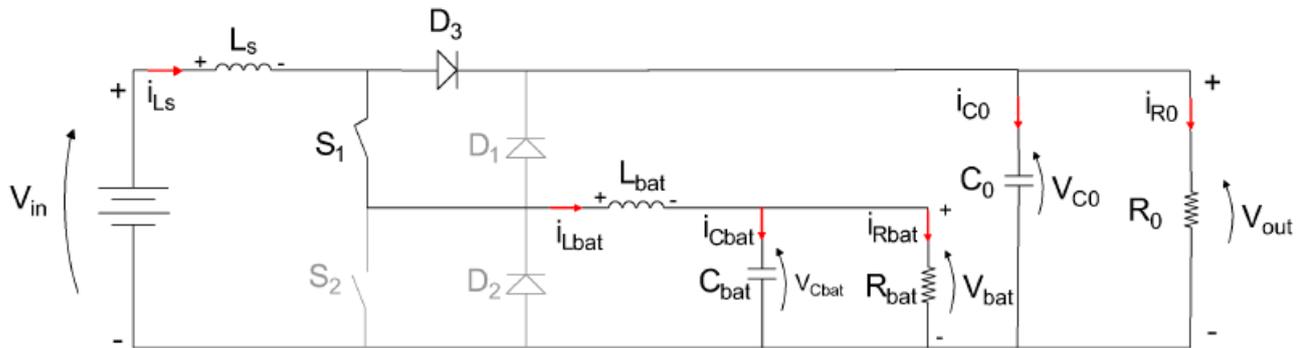


Fonte: (BRAGA, 2022)

Na etapa 2,  $S_1$  está conduzindo e  $S_2$  está aberta, a carga é alimentada pela energia da entrada, o indutor  $L_{bat}$  e capacitor  $C_{bat}$  carregam a bateria com a energia que sobra.

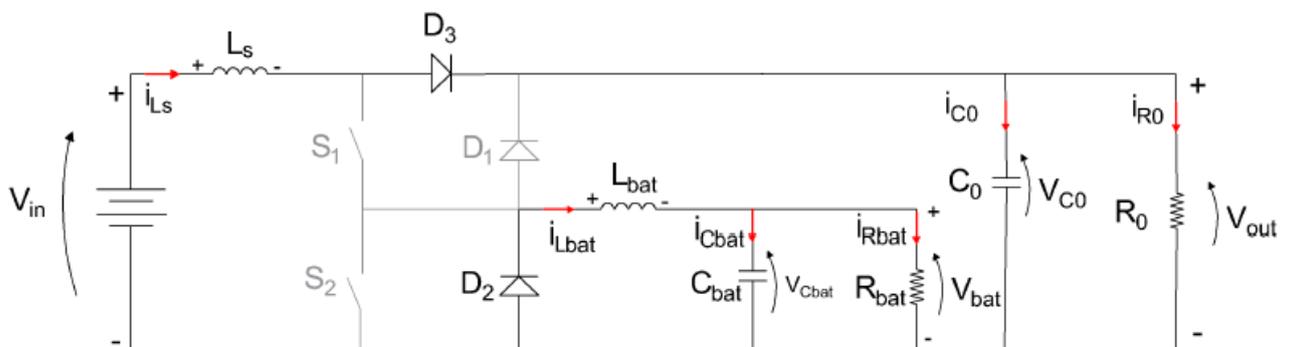
Na etapa 3,  $S_1$  e  $S_2$  estão abertas, a energia da fonte alimenta a carga e carrega o capacitor  $C_0$ , a corrente armazenada no indutor  $L_{bat}$  flui por  $D_2$ .

Figura 2.7 – Circuito equivalente da Etapa 2



Fonte: (BRAGA, 2022)

Figura 2.8 – Circuito equivalente da Etapa 3



Fonte: (BRAGA, 2022)

## 2.4 Modelagem

Para implementação de um sistema de controle eficiente é necessário, primeiramente, desenvolver um modelo matemático fiel que consiga representar o comportamento físico, com o intuito de conhecer o comportamento dos parâmetros de entrada e dos componentes e identificar como estes interferem na saída. Com isso, o conversor será capaz de receber uma tensão  $V_s$  e manter uma tensão de saída  $V_0$  constantes, mesmo com flutuações na alimentação (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007).

Entende-se como modelo o desenvolvimento de um projeto sintetizado, que busque converter um sistema complexo em um sistema palpável de entendimento, exprimindo essencialmente seu comportamento a partir de generalizações do contexto estudado e que reproduza as características comuns (SAIPET; NUCHPRAYOON, 2019).

Duas técnicas se testam e são amplamente utilizadas para conversores CC-CC: Modelagem por chave PWM e Espaço de estados Média. A primeira trabalha na busca por um modelo

simplificado equivalente para todos os modos de operação a partir da análise das combinações de estado (*On* ou *Off*) das chaves presente no sistema.(VORPÉRIAN, 1990). A segunda consiste na representação do modelo por equações matemáticas obtidas pela análise dos circuitos equivalentes, definindo equações dinâmicas, a fim de, representar o sistema com a média ponderada das equações dos estados das chaves do conversor CC-CC. Neste trabalho será abordada a segunda técnica. A seguir algumas considerações importante para a modelagem são descritas.

1. Chaves comutadoras ideais. Resistência zero em condução e infinita em aberto.
2. Tempo de comutação infinitamente pequeno.
3. Fontes ideais, com energia infinita.
4. Elementos passivos lineares e invariantes.

Essas considerações não diminuem a efetividade do sistema modelado.

#### **2.4.1 Modelagem em Espaço de estados médios**

Este modelo robusto de modelagem pode ser aplicado a sistemas lineares ou não, variantes ou não variantes no tempo, com  $n$  equações de primeira ordem, combinadas em uma equação matricial de primeira ordem. De acordo com (BARBI, 2015), este método pode ser aplicado a qualquer conversor CC-CC chaveado, definindo equações para cada estado das chaves a partir de suas médias ponderadas.

Devido a sua capacidade de unificar uma grande quantidade de etapas de funcionamento em espaço de estados e emprego do circuito linear equivalente, considerando análises sintetizadas para o regime permanente (CC) e dinâmico (CA). Como o comportamento predominando do conversor é caracterizado como linear, esse modelo ignora a presença das componentes não lineares e facilita assim o estudo (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007). O modelo linearizado em regime permanente também é conhecido como análise de pequenos sinais ou análise CC-CC.

Toda análise pode ser realizada no domínio do tempo ou domínio da frequência, utilizando variáveis de estado e variáveis de controle presentes no modelo, isso simplifica a análise do sistema de controle. A equação 2.4 representa a média dos estados e 2.5 a média das saídas:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.4)$$

$$y = Cx \quad (2.5)$$

Onde:

$x$  = vetor de estados, (nx1)

$y$  = sinal de saída, (px1)

$u$  = sinal de controle, (mx1)

$A$  = Matriz média de estado, (nxn)

$B$  = Matriz média de entrada, (nxm)

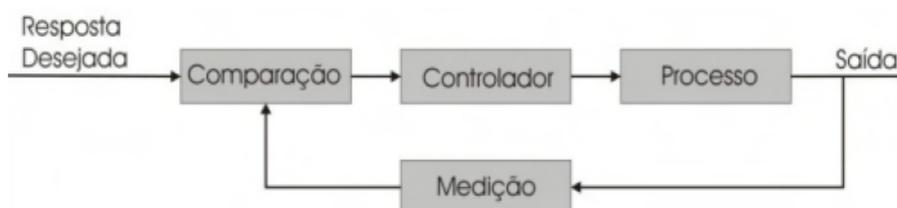
$C$  = Matriz média de saída, (pxn)

$n$  = ordem do sistema,  $m$  = número de entradas e  $p$  = número de saídas.

## 2.5 Projeto de Controle

A partir da modelagem do sistema passa-se para o ponto de controle. Para um resultado que consiga atender as necessidades reais do nosso sistema, surge o controle moderno. De uma forma geral simplificada, tem como definição a característica de: a partir de um determinado valor de uma variável controlada, aplicar um sinal de controle com o intuito de suavizar ou eliminar as variações entre o valor desejado, ou esperado e o real valor medido, ou seja, monitorar uma variável do sistema a partir da comparação entre referência e saída, esse tipo de controle é denominado como Sistemas de controle por realimentação ou Sistemas de controle em malha fechada (OGATA, 2010).

Figura 2.9 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada



Fonte: (KOROISHI, 2009)

Diferentes métodos de controle foram desenvolvidos ao longo do tempo, impulsionados pelo surgimento de sistemas cada vez mais complexos. O controle em espaço de estados possui

alguns importantes métodos utilizados, como Alocação de pólos, observadores, LQR (*Linear Quadratic Regulator*) e robusto. A combinação entre esses métodos de controle e estimadores de estado, como por exemplo, o Filtro de Kalman, dão origem a sistemas de controle cada vez mais dominantes, como exemplo o controle LQG (*Linear Quadratic Gaussian*)

Nesse trabalho será utilizada a técnica de Controle LQR (*Linear Quadratic Regulator*) em conjunto com a estimação dos estados a partir do *Filtro de Kalman*, dando origem ao controle LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) este foi escolhido pela robustez contra variações externas, podendo elas, serem oriundas de ruídos de medições ou variações de tensão fornecidas pela fonte geradora, e estimativas precisas, gerando um sistema de controle ótimo.

### 2.5.1 Controle LQR

O controle LQR (*Linear Quadratic Regulator*) é uma técnica de controle que visa minimizar uma função custo quadrática a partir de equações diferenciais lineares em um controlador de realimentação de estados. O método foi idealizado por Rudolf Kalman em 1960 e busca combinar as saídas do sistema com um vetor de ponderação definido pelo projetista de acordo com necessidades do sistema controlado. O objetivo é calcular um vetor  $K$  de ganho de realimentação de estados visando minimizar o custo de desempenho e energia, principalmente para a rejeição de distúrbios e obtenção de sinais fisicamente palpáveis, e a partir dele determinar a Lei de controle que será aplicada ao sistema.

Para um sistema baseado na equação (2.4), é necessário de determinar um ganho  $k$  de modo que, para qualquer estado inicial  $x(0)$  a lei de controle:

$$u(t) = -Kx(T), \quad (2.6)$$

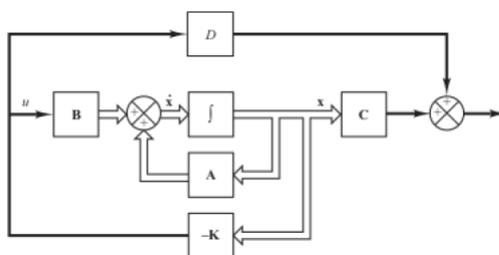
Onde  $u$  é o sinal de controle,  $K$  os ganhos de realimentação e  $x$  o vetor de estados, e minimize a performance da função custo  $J$ , determinada como:

$$J = \int_0^{\infty} (x * \mathbf{Q}x + u * \mathbf{R}u) dt \quad (2.7)$$

Onde a matriz  $Q$  definida como a matriz de peso dos estados, simétrica semi-positiva e indica a relevância ou importância dos estados entre si, ou seja, atribui pesos diferentes dependendo da importância ou criticidade do estado. Já  $R$  é uma matriz estritamente positiva que

tem relação com a importância de cada entrada de controle do sistema e também atribui pesos diferentes como a matriz  $Q$  porém, para as entradas do sistema, ponderando a ação de controle aplicada. Por fim, determina-se o vetor  $K$  ótimo levando em consideração as variáveis de estado e os sinais de controle e o modelo geral é representado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Diagrama de blocos para controle em malha fechada



Fonte: (OGATA, 2010)

### 2.5.2 Filtro de Kalman

O Filtro de Kalman é um tipo de observador de estado, ele estima os valores dos parâmetros de um sistema linear a partir de medições indiretas ou podendo também estimar parâmetros futuros com base nas últimas medições do sistema.

O uso do Filtro de Kalman é muito empregado em situações onde a instalação de sensores para monitoramento de variáveis é muito complexo, por exemplo, a temperatura de uma turbina de foguete na hora de seu lançamento ou durante o voo, isso auxilia na definição de quais os tipos de materiais e constantes devem ser levadas em consideração para construção do foguete. Também pode ser utilizado no sentido contrário, substituindo sensores para redução de custos e viabilização de projetos.

Para aplicação faz-se necessário o conhecimento da dinâmica do modelo em espaço de estados, e o projeto depende necessariamente do entendimento das duas etapas de funcionamento do filtro, predição e correção, ou seja, continuamente o filtro está trabalhando na previsão do estado e a partir da comparação, aplica uma correção. O filtro utiliza das informações de entrada da planta e saída, com o intuito de realizar a reconstrução dos estados do sistema. Para o Filtro de Kalman as matrizes  $Q$  e  $R$  terão notação  $Q_k$  e  $R_k$ , para diferenciar das matrizes presentes no controle LQR.

- Estimação: nessa etapa a filtro estima o próximo estado do sistema com base no estado atual e na dinâmica do sistema:

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_{k-1} \quad (2.8)$$

$$P_{k|k-1} = AP_{k-1|k-1}A^T + Q_k \quad (2.9)$$

Onde  $P$  é a matriz de covariância e  $Q_k$  a matriz de covariância do ruído do sistema. Com estas é possível determinar a predição da estimativa do estado e da covariância do erro e predição do erro de covariância.

- Correção: nessa etapa é estabelecida a comparação entre os erros de predição dos estados estimados e as medidas oriundas do sistema, com intuito de, se necessário, ajustar os parâmetros e obter o resultado final, também chamadas de equação de atualização.

$$\hat{y}_k = z_k - H\hat{x}_{k|k-1} \quad (2.10)$$

$$S_k = HP_{k|k-1}H^T + R_k \quad (2.11)$$

Onde  $R_k$  estabelece a covariância do ruído de medida.

$$\hat{K}_k = HP_{k|k-1}H^T S_k^{-1} \quad (2.12)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + \hat{K}_k \hat{y}_k \quad (2.13)$$

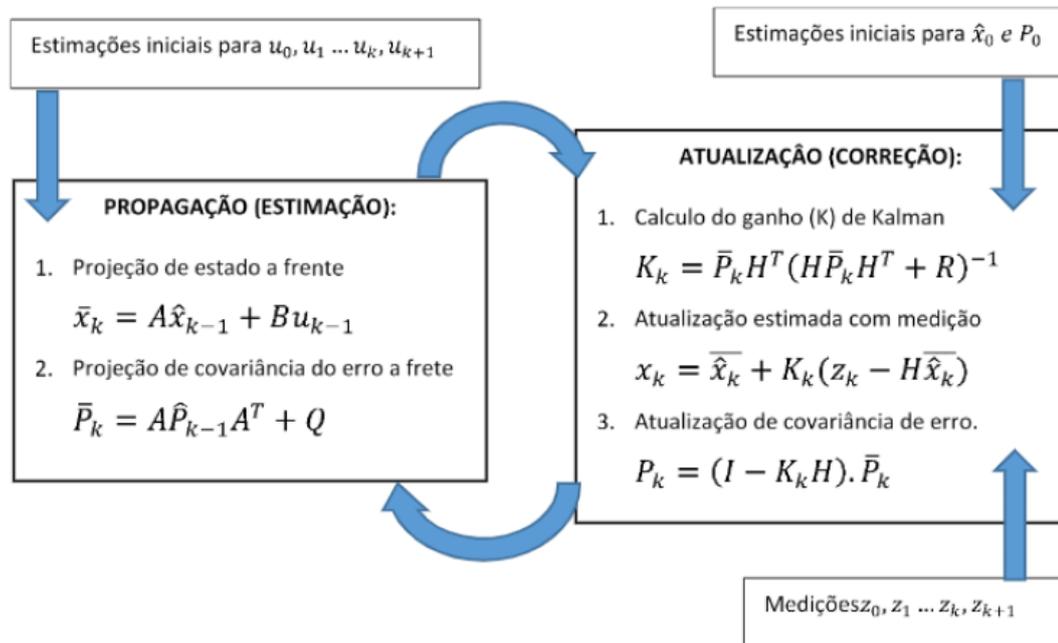
$$P_{k|k} = (I - \hat{K}_k H)P_{k|k-1} \quad (2.14)$$

A equação 2.10 estabelece o cálculo da nova medida, a equação 2.11 pré-ajusta a covariância, a equação 2.12 realiza o cálculo do ganho ótimo e, por fim, a equação 2.13 é responsável por atualizar a estimativa de dados.

$\hat{x}_{k|k-1}$  são variáveis de estado a priori, e apresentam estados no instante  $k$  baseado no prévio  $k-1$ .  $\hat{x}_{k-1|k-1}$  são variáveis que denotam instantes de tempo  $k-1$  com estados estimados previamente.  $P_{k|k-1}$  é o erro de covariância a priori, durante a estimação.  $P_{k|k}$  é o erro de covariância corrigido

ou posteriori, durante a atualização e  $H$  é o modelo observado. A figura abaixo trás uma noção de como é o trabalho recursivo do filtro de Kalman.

Figura 2.11 – Algoritmo recursivo do filtro de Kalman



Fonte: (OLIVEIRA; GONÇALVES, 2017)

As variáveis  $Q_k$  e  $R_k$  são definidas pelo projetista com base nas necessidades do sistema estudado. Onde a qualidade da medição é definida em  $Q_k$  e a qualidade do modelo em  $R_k$ . O filtro de kalman gera resíduos que podem ser comparados aos estados reais do sistema, gerando uma forma de avaliar o quanto seus estados estimados estão se aproximando dos estados reais e assim avaliar as necessidades de melhorias no filtro.

Em teoria, o Filtro de Kalman tem a forma de um observador linear:

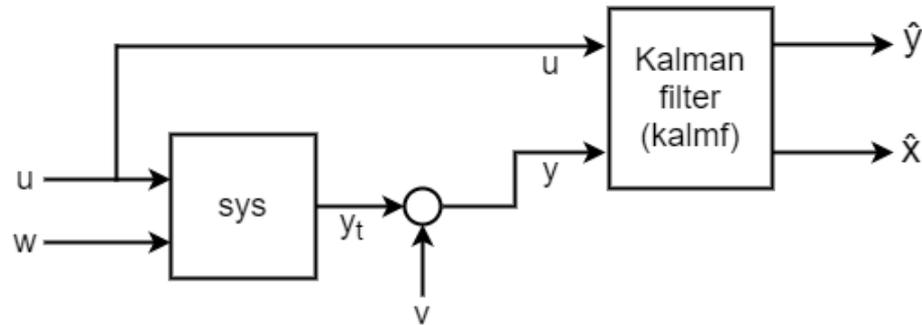
$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x}_n + Bu - L(C\hat{x} - y) \quad (2.15)$$

Onde o ganho do observador é determinado por:

$$L = PC^T Q_k^{-1} \quad (2.16)$$

A Figura 2.12 apresenta um exemplo de implementação em diagrama de blocos.

Figura 2.12 – Diagrama de Blocos do sistema com o Filtro de Kalman



Fonte: (OLIVEIRA; GONÇALVES, 2017)

### 2.5.3 Ação Integral

A abordagem da ação integral para realimentação é baseada na introdução de estados  $z$  no controlador para cálculo da integral do erro do sinal realimentado, aumentando assim, o número de estados do sistema. A adição é proporcional ao número de saídas controladas do sistema que serão corrigidas. Esses novos estados são a integral da diferença entre a saída do sistema e saída desejada (ÅSTRÖM; MURRAY, 2021). Com isso, as equações tornam-se da forma:

$$\begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax + Bu \\ y - r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax + Bu \\ Cx - r \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

E a nova lei de controle se torna:

$$u = -Kx - k_i z + k_f r \quad (2.18)$$

Onde  $k_i$  representa o termo integral e  $k_f$  o termo relacionado aos estados estacionários desejados.

### 2.5.4 Controle LQG (Linear Quadratic Gaussian)

O controle LQG asceu com a intenção de controlar sistemas de alta precisão, a partir de uma combinação entre o controle LQR e o estimador de estados Filtro de Kalman. O modelo minimiza a soma dos erros quadráticos em comparação ao comportamento desejado e real

do sistema, porém considerando as incertezas atreladas ao modelo e as medições do sistema (HESPANHA, 2018).

Para aplicação desse modelo é obrigatório que o sistema satisfassa a condição de observabilidade (OGATA, 2010), onde para todo estado  $x(t_0)$  pela observação de  $y(t)$ , é possível determinar o estado atual. Para verificação de observabilidade utiliza-se o modelo dinâmico do sistema formado pelas equações de estado 2.4 e 2.5 analisando as matrizes  $A$  e  $C$ , onde a matriz de observabilidade  $Mo$  é definida:

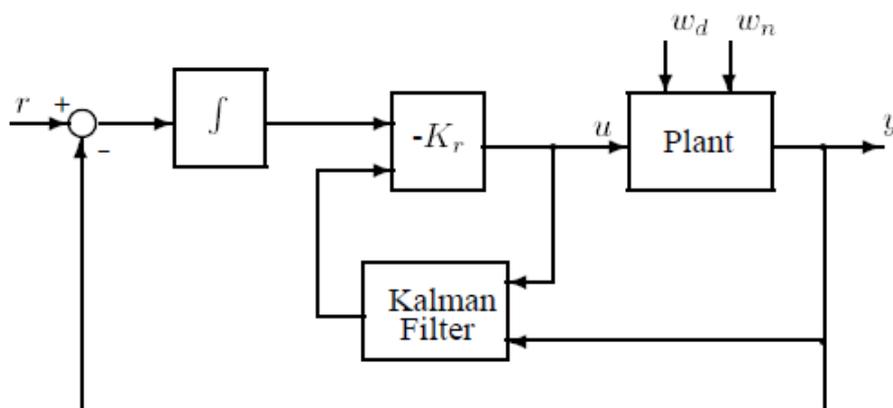
$$Mo = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

E o sistema é definido como observável se o posto da matriz  $Mo$  for igual a  $n$ .

Essa técnica apesar de mais complexa que o modelo LQR torna o sistema mais robusto do ponto de vista de ruídos e perturbações externas, também melhora o desempenho e a estabilidade do sistema como um todo.

No contexto LQG, os ganhos do sistemas serão calculados a partir do modelo LQR e os estados serão estimados a partir do filtro de Kalman. Um exemplo do diagrama de blocos final para o controle LQG com ação integral é mostrado na Figura 2.13

Figura 2.13 – Diagrama de Blocos do controlador LQG



Fonte: (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Para execução deste trabalho, foi usado como base o software MATLAB e a ferramenta Simulink (Versão R2022a), programas próprios para o desenvolvimento de cálculos, algoritmos, circuitos, sistemas de controle e simulações do conversor VR-BESS.

#### 3.2 Metodologias

O desenvolvimnteo deste trabalho tem como objetivo realizar o controle LQG do Modo 1 de funcionamento do conversor VR-BESS, a partir da construção do controlador LQR (definição dos ganhos  $K$ ) e do estimador de estados Filtro de Kalman. A modelagem do conversor VR-BESS foi proposta por (MARCELLO, 2018).

#### 3.3 Obtenção do Modelo

##### 3.3.1 Modo 1

Primeiramente deve-se estabelecer as três etapas de funcionamento mencionadas na seção 2.3.3, para a partir disso, determinar as equações lineares diferenciais de primeiro grau para cada uma dessas etapas.

Para o Conversor VR-BESS, em regime estacionário e modo de condução contínua, considera-se que cada modo tenha um período de funcionamento determinado por  $T_s$ , assim para a primeira etapa temos um periodo de funcionamento de 0 a  $t_1$ , a segunda  $t_1$  a  $t_2$  e a terceira de  $t_2$  até  $3_3$ , que é igual a  $T_s$ . Para as análises (MARCELLO; PACHECO; FERREIRA, 2019) consideraram algumas definições:

$$D_1 = \frac{t_1}{T_s} \quad (3.1)$$

$$D_2 = \frac{t_2}{T_s} \quad (3.2)$$

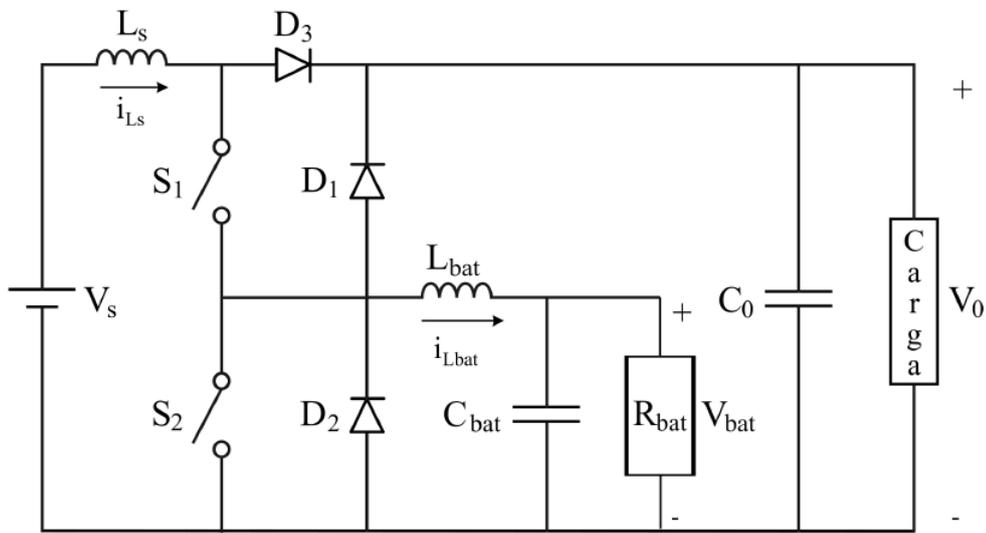
$$\Delta D = \frac{t_2 - t_1}{T_s} = D_2 - D_1 \quad (3.3)$$

$$D'_1 = 1 - D_1 \quad (3.4)$$

$$D'_2 = 1 - D_2 \quad (3.5)$$

Outra importante consideração é a substituição da bateria por uma resistência equivalente ( $R_{bat}$ ), com a resistência torna-se possível variar a tensão de bateria ( $V_{bat}$ ), isso se dá pois, como a bateria tem uma tensão fixa, não é possível variá-la com o chaveamento do conversor (PACHECO, 2003), mostrado na Figura 3.1:

Figura 3.1 – Configuração do Modo 1



Fonte: (PACHECO, 2003)

Na primeira etapa as chaves  $S_1$  e  $S_2$  estão em curto, com isso o diodo  $D_3$  é bloqueado. A tensão no indutor  $L_s$  é  $V_s$  e a corrente do indutor  $i_{L_s}$  aumenta linearmente com o tempo. A tensão no indutor  $L_{bat}$  é  $-V_{bat}$  e a corrente  $i_{L_{bat}}$  diminui linearmente com o tempo. O sistema equivalente é demonstrado na Figura 3.2:

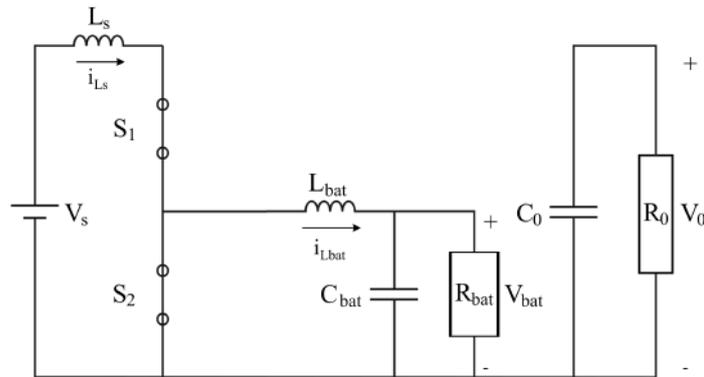
E as equações lineares para esta etapa são:

$$L_{bat} \dot{i}_{L_{bat}} = -v_{bat} \quad (3.6)$$

$$C_{bat} \dot{v}_{C_{bat}} = i_{L_{bat}} - \frac{v_{C_{bat}}}{R_{bat}} \quad (3.7)$$

$$L_s \dot{i}_{L_s} = V_s \quad (3.8)$$

Figura 3.2 – Circuito equivalente da etapa 1

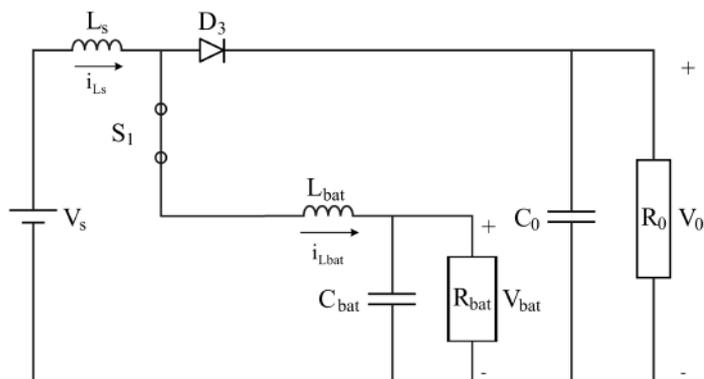


Fonte: (PACHECO, 2003)

$$C_0 \dot{v}_{C0} = \frac{-V_{C0}}{R_0} \quad (3.9)$$

Para a segunda etapa,  $S_2$  é aberta, o diodo  $D_3$  é desbloqueado e passa a conduzir a diferença de corrente entre  $i_{L_s} - i_{L_{bat}}$ . A tensão no indutor  $L_s$  é negativa ( $V_s - v_0$ ) e positiva no indutor  $L_{bat}$  ( $V_0 - V_{bat}$ ) e a corrente  $i_{L_{bat}}$  diminui linearmente com o tempo. O circuito equivalente é mostrado na Figura 3.3:

Figura 3.3 – Circuito equivalente da etapa 2



Fonte: (PACHECO, 2003)

E as equações lineares para esta etapa são:

$$L_{bat} \dot{i}_{L_{bat}} = -V_{bat} + v_{C0} \quad (3.10)$$

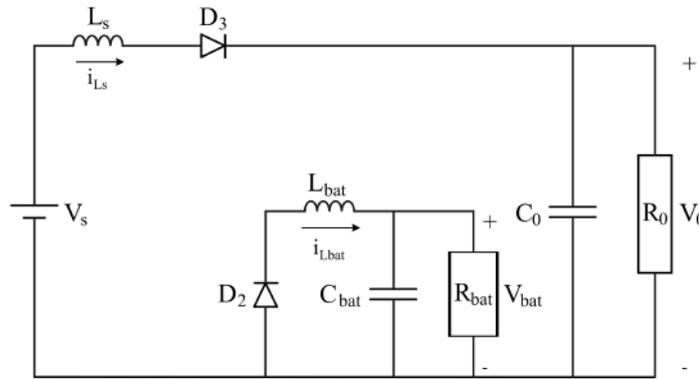
$$C_{bat} \dot{v}_{C_{bat}} = i_{L_{bat}} - \frac{V_{C_{bat}}}{R_{bat}} \quad (3.11)$$

$$L_s \dot{i}_{L_s} = -v_{C_0} + v_{C_0} + V_s \quad (3.12)$$

$$C_0 \dot{v}_{C_0} = (i_{L_s} - i_{L_{bat}}) - \frac{V_{C_0}}{R_0} \quad (3.13)$$

Na terceira etapa,  $S_1$  e  $S_2$  estão abertas, a carga recebe a energia armazenada no indutor  $L_s$ . A corrente armazenada no indutor  $L_{bat}$  ( $i_{L_{bat}}$ ), flui pelo diodo  $D_2$  e a tensão sobre ele é  $-V_{bat}$ . O circuito equivalente é mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Circuito equivalente da etapa 3



Fonte: (PACHECO, 2003)

E as equações lineares para esta etapa são:

$$L_{bat} \dot{i}_{L_{bat}} = -v_{C_{bat}} \quad (3.14)$$

$$C_{bat} \dot{v}_{C_{bat}} = i_{L_{bat}} - \frac{V_{C_{bat}}}{R_{bat}} \quad (3.15)$$

$$L_s \dot{i}_{L_s} = -v_{C_0} + V_s \quad (3.16)$$

$$C_0 \dot{v}_{C_0} = i_{L_s} - \frac{V_{C_0}}{R_0} \quad (3.17)$$

Todas as três etapas de funcionamento do conversor podem ser descritas no modelo em espaço de estados. A equação 3.18, mostra representação final para obtenção da média ponderada das equações em espaço de estados de cada etapa de funcionamento. Com isso, o modelo final para o modo 1 é definido na equação 3.20.

$$\hat{\dot{x}}_n = A_n \hat{x}_n + B_n \hat{u}_n \quad (3.18)$$

Onde  $n$  define o numero de etapas do sistema. E o cálculo dos vetores se dá a partir de:

$$\dot{x}_1 = D_1 \dot{x}_{11} + (D_2 - D_1) \dot{x}_{12} + (1 - D_2) \dot{x}_{13} \quad (3.19)$$

$\dot{x}_{11}$ ,  $\dot{x}_{12}$  e  $\dot{x}_{13}$ , representam as equações em espaço de estados do Modo 1, para cada uma das três etapas do sistema. (MARCELLO, 2018), com isso, tem-se:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L_{bat}} & 0 & \frac{\Delta D}{L_{bat}} \\ \frac{1}{C_{bat}} & \frac{-1}{C_{bat} R_{bat}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-D'_1}{L_s} \\ \frac{\Delta D}{C_0} & 0 & \frac{-D'_1}{C_0} & \frac{-1}{C_0 R_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lbat} \\ v_{Cbat} \\ i_{Ls} \\ V_{C0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{Ls} \\ 0 \end{bmatrix} V_s \quad (3.20)$$

Como mencionado na seção 2.3.3 para o Modo 1 de funcionamento, o conversor possui duas saída, tensão de carga  $V_0$  que é igual a tensão sobre o capacitor  $C_0$  ( $v_{C0}$ ) e tensão sobre o banco de baterias, que é igual a tensão no capacitor  $C_{bat}$  ( $v_{Cbat}$ ), com isso, o cálculo as equações médias para a saída, seguindo a mesma metodologia para os estados, são:

$$y_1 = D_1 \dot{y}_{11} + (D_2 - D_1) \dot{y}_{12} + (1 - D_2) \dot{y}_{13} \quad (3.21)$$

$\dot{y}_{11}$ ,  $\dot{y}_{12}$  e  $\dot{y}_{13}$  representam as equações em espaço de estado da saída (MARCELLO, 2018), com isso, tem-se:

$$\begin{bmatrix} v_{bat} \\ V_0 \end{bmatrix} = C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Lbat} \\ v_{Cbat} \\ i_{Ls} \\ V_{C0} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Mais detalhes sobre a elaboração do modelo, com demonstrações passo a passo e eplicações são encontradas em (MARCELLO; PACHECO; FERREIRA, 2019).

### 3.3.2 Projeto do Controlador LQR (Linear Quadratic Regulator)

O projeto do controlador *LQR* consiste primeiramente na definição das matrizes de ponderação de covariância  $Q$  e  $R$ , a função custo quadrática mencionada na equação 2.7 é minimizada de acordo com a escolha adequada dessas Matrizes, pois  $Q$  atua diretamente na importância correspondente a cada estado do sistema e  $R$  que atua diretamente na importância correspon-

dente de cada entrada de controle. Para a lei de controle dada pela equação 2.6, o ganho  $K$  pode ser definido como:

$$K = -R^{-1}B^T P \quad (3.23)$$

Logo, substituindo o  $K$  na equação 2.6, tem-se:

$$u = -R^{-1}B^T P x \quad (3.24)$$

$P$  é definida como uma matriz hermitiana ou real simétrica definida positiva, se o sistema é estável, existe sempre uma matriz  $P$  hermitiana ou real simétrica definida positiva que satisfaz a equação 3.23, definida como Equação de Riccati:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3.25)$$

E  $P$  descreve como a energia do sistema é distribuída em um espaço estacionário.

A função *lqr* do MATLAB calcula os ganhos  $K$  com base nas demonstrações anteriores e retorna os valores ótimos para cada peso do sistema, essa função recebe como parâmetro as matrizes de entrada, estado,  $Q$  e  $R$ .

### 3.3.3 Projeto do Controle LQI (Linear Quadratic with Integral)

O Projeto de controle com ação integral foi desenvolvido via *software* MATLAB, para inclusão desta ação faz-se necessário adicionar novas linhas e colunas as matrizes de estados  $A$  e entrada  $E$  de acordo com o número de saídas controladas do sistema. Para o projeto, no modo 1 de funcionamento, tem-se duas saídas controladas  $v_{bat}$  e  $V_0$ , com isso a ação integral deve ser de segunda ordem.

### 3.3.4 Projeto do Filtro de Kalman

O projeto do Filtro de Kalman foi desenvolvido completamente utilizando a ferramenta Simulink do MATLAB. Diversas formas são observadas para desenvolvimento desse filtro via Matlab, seja por código ou utilizando o Bloco Filtro de Kalman do Simulink. O sinal controlado  $u$  que alimenta a planta também alimenta o Filtro de Kalman estimador. As saídas do bloco denominadas  $\hat{x}$  e  $\hat{y}$  retornam os estados e saídas estimadas a partir dos parâmetros imputados

para o filtro. Para configuração do bloco definiu-se tempo contínuo, matrizes individuais em espaço de estados e matrizes de ponderação de covariância de medição e modelo.

### **3.3.5 Projeto do Controlador LQG (Linear Quadratic Gaussian)**

O projeto do controlador LQG como parte de sua solução é definido a partir do uso dos ganhos determinados via LQR e realimentação de estados que são estimados pelo observador Filtro de Kalman. Os dois foram combinados via Simulink.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados foi baseada nos parâmetros da Tabela 4.1, estes foram utilizados para validar o modelo e analisar o comportamento dos controladores durante o funcionamento do conversor VR-BESS. Esses valores foram determinados no trabalho de (PACHECO, 2003).

Tabela 4.1 – Parâmetros para simulação.

Tensão de entrada ( $V_s$ )	300V
Tensão da bateria ( $V_{bat}$ )	120V
Tensão de Carga ( $v_0$ )	400V
Indutor ( $L_s$ )	1mH
Indutor ( $L_{bat}$ )	1.1mH
Capacitor ( $C_0$ )	220 $\mu F$
Capacitor ( $C_{bat}$ )	30 $\mu F$
Resistor ( $R_0$ )	80 $\Omega$
Resistor ( $R_{bat}$ )	29 $\Omega$
Duty Cycle $D_1$ Modo 1	0.25
Duty Cycle $D_2$ Modo 1	0.55
Máximo de sobressinal ( $M_p$ )	20%
Tempo de estabilização ( $t_s$ )	10 ms

Fonte: (PACHECO, 2003)

Inicializa-se os *Duty Cycles* para analisar variações em relação a esse parâmetro, quando o sistema sofre perturbações em regime permanente.

### 4.1 Controle LQR

Para implementação do controle LQR foi utilizado a ferramenta Simulink do Matlab, em conjunto com o editor de códigos. O diagrama da Figura 4.1 foi desenvolvido utilizando as matrizes médias em espaço estados para a entrada, saída e estados  $E$ ,  $C$  e  $A$  Seção 2.4. Os estados são realimentados e os ganhos são aplicados.

#### 4.1.1 Escolha das Matizes Q e R

Para o presente trabalho, as matrizes  $Q$  e  $R$ , definidas na seção 2.5.1 foram estimadas heurísticamente. Espera-se que o ganho em regime permanente apresente um erro para o Controle LQR. Para solucionar este problema o controle LQR foi modificado para LQI com o intuito de eliminar o erro em regime permanente, para isso faz-se necessário adicionar mais linhas e



### 4.1.2 Ganho K

Após a definição das matrizes "Q e R" expandidas para ação integral, foi utilizada a função *lqr* do MATLAB, essa função calcula os ganhos com base no algoritmo LQR e retorna os valores de k ótimo para a solução do problema. A função retorna uma matriz 2x6, onde cada linha representa os ganhos relacionados às entradas do sistema, sendo as quatro primeiras colunas relacionadas ao ganho proporcional (2x4) e as duas finais ao ganho integral (2x2). Após a execução da função e utilização da lei de controle definida em 2.18, tem-se:

$$k = \begin{bmatrix} -0.0577 & -0.3876 & -1.0685 & -0.7399 & 865.0545 & 501.6779 \\ 0.9959 & 1.1676 & -0.6111 & -0.771 & 1586.44 & -2735.54 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Divididos em  $k_f$ , ganhos relacionados aos estados do sistema e  $k_i$  ganhos da ação integral.

$$k_p = \begin{bmatrix} -0.0577 & -0.3876 & -1.0685 & -0.7399 \\ 0.9959 & 1.1676 & -0.6111 & -0.771 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$k_i = \begin{bmatrix} 865.0545 & 501.6779 \\ 1586.44 & -2735.54 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

### 4.2 Filtro de Kalman

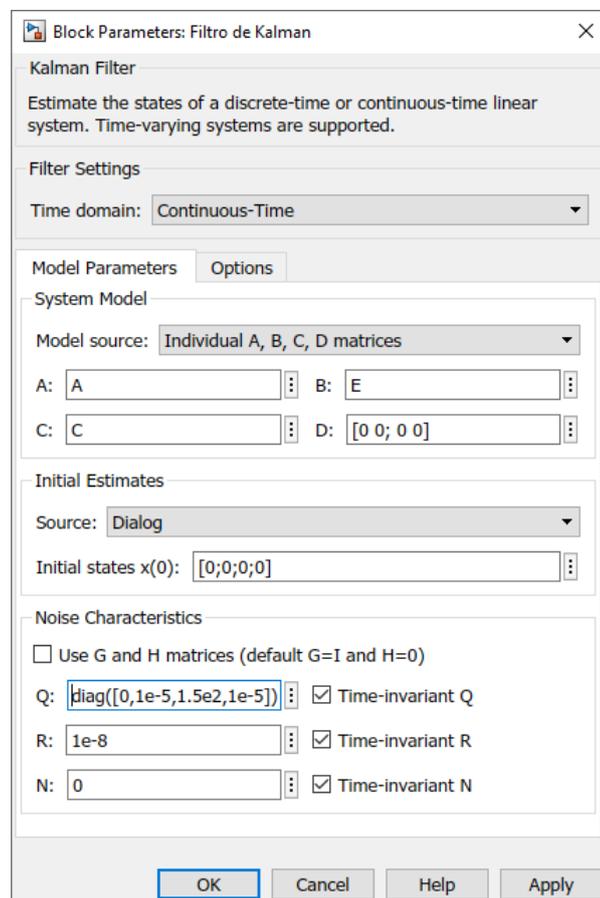
O filtro de Kalman foi obtido através do Bloco "Kalman Filter do Simulink". Esse bloco modela o estimador a partir das matrizes de estado, entrada e saída (A,E,C) do sistema. Os valores iniciais dos estados do sistema, para esse caso, foram considerados zero. Por fim, devemos definir as matrizes  $Q_k$ ,  $R_k$  e  $N_k$  que tratam da covariância do ruído, covariância de medição e covariância cruzada. As duas condições impostas na seção 4.1.1 foram empregadas para definição das matrizes  $Q_k$  e  $R_k$  do filtro de Kalman. A dimensão da matriz  $Q_k$  deve ser igual ao número de estados do sistema (4x4), com isso os pesos atrelados a essa matriz impactam diretamente no quanto a estimativa se aproxima da medida. A matriz N de covariância cruzada foi considerada como nula. Sendo assim, tem-se:

$$Q_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$R_k = [10^{-8}] \quad (4.7)$$

$$N_k = [0] \quad (4.8)$$

Figura 4.2 – Bloco Kalman filter implementado



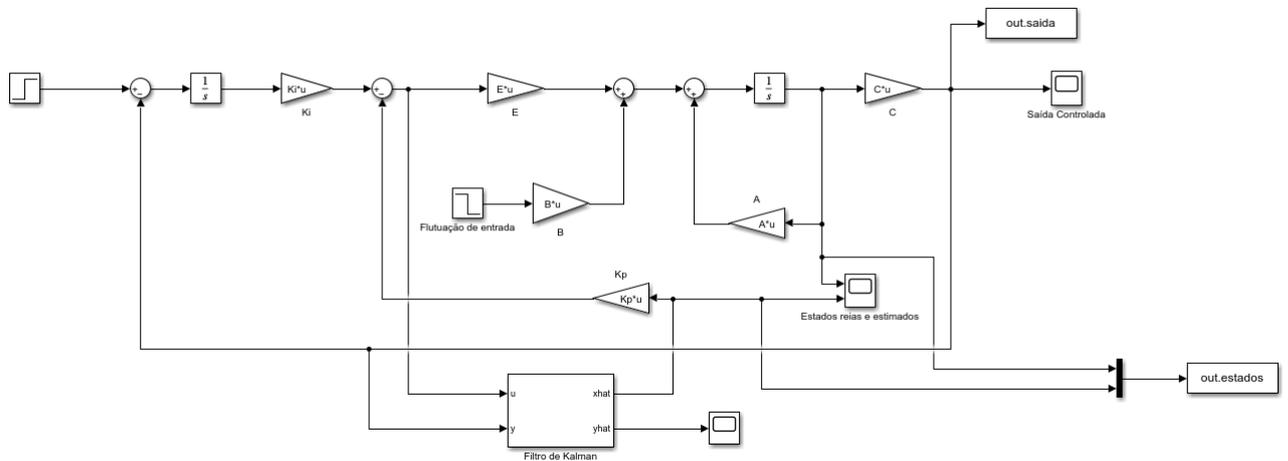
Fonte: (Do Autor (2023))

### 4.3 Controle LQG

O problema *LQG* tem como parte de sua solução a definição dos ganhos  $K$  pelo método de controle *LQR* e adição do estimador de estados estocásticos, Filtro de Kalman para reali-

mentação dos estados. Com isso o modelo final em diagrama de bloco do Simulink é exibido na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Diagrama de blocos para controle LQG



Fonte: (Do Autor (2023))

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados para as tensões  $V_0$  e  $V_{bat}$ . Nota-se que o sistema comportou de modo a atender o requisitos de sobressinal ( $M_p$  máximo de 20%) e tempo de estabilização ( $t_s$  máximo de 10ms) definidos por (PACHECO, 2003).

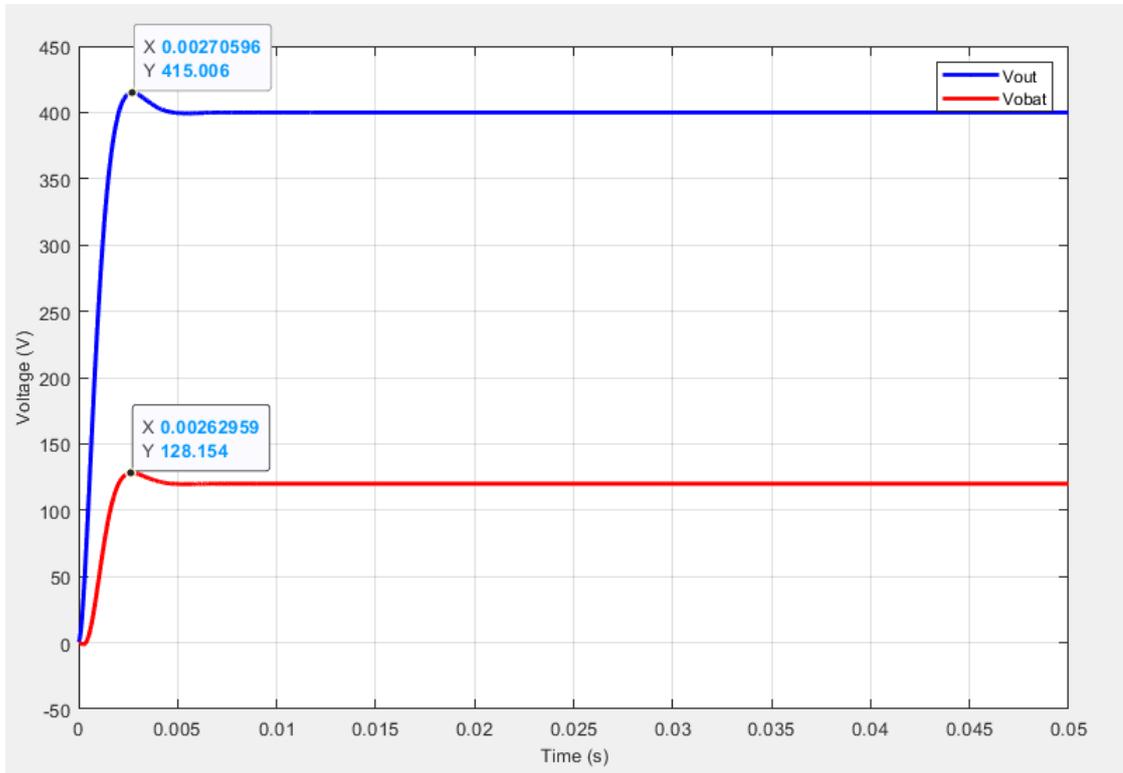
Nota-se que o sistema atingiu uma ultrapassagem de 3.6% e um tempo de estabilização de aproximadamente 4ms, bem abaixo dos limites estipulados na Tabela 4.1.

Para análise dos estados, plotou-se os gráficos com a comparação entre os estados reais e os estados estimados pelo Filtro de Kalman. A Figura 4.5 mostra o comportamento das duas formas de obtenção dos estados. A análise dos estados foi dividida entre os relacionados a corrente e os relacionados a tensão. As linhas tracejadas referem-se as estados estimados pelo filtro de Kalman.

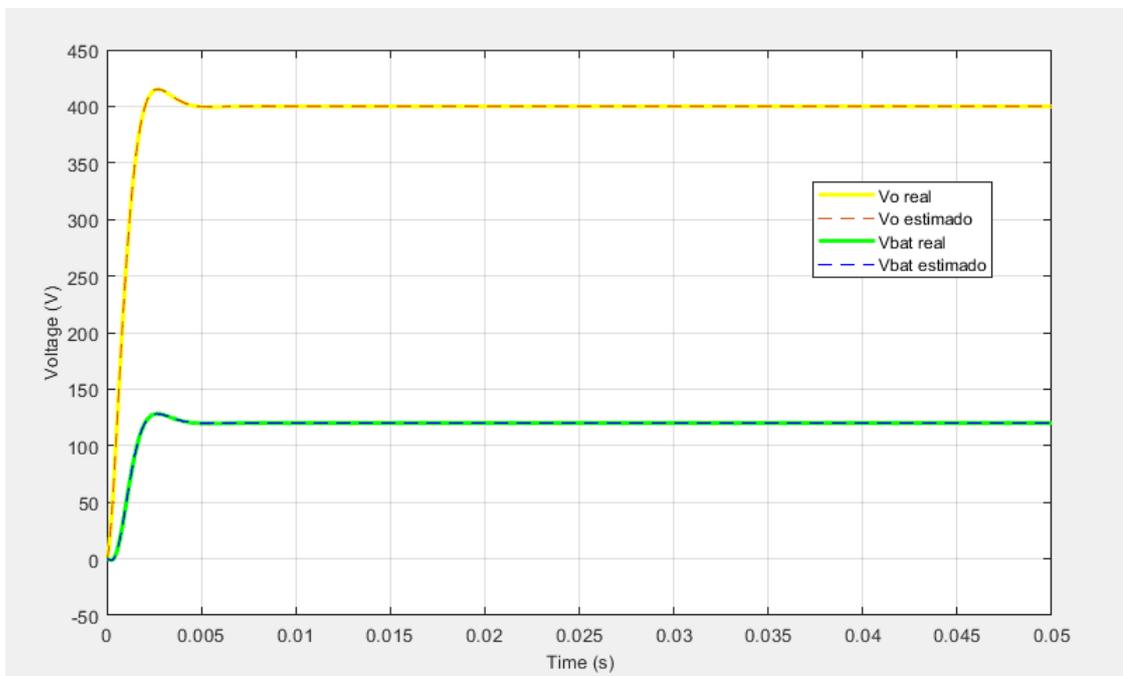
Nota-se que os estados relacionados a Tensão de saída ( $V_0$ ) e tensão do banco de baterias ( $V_{bat}$ ) reproduzem fielmente os estados reais. Isso demonstra a correta adequação dos pesos de estimação filtro de kalman para as matrizes de covariância.

Para os estados relacionados a corrente da bateria  $i_{Lbat}$  e corrente do indutor  $i_{Ls}$ , Figura 4.6, nota-se que o filtro foi capaz de estimar corretamente a corrente da bateria e corrente de indutor  $i_{Ls}$ . Isso demonstra a correta adequação dos pesos de estimação do filtro de kalman também para esses dois estados.

Figura 4.4 – Funcionamento do conversor no modo 1

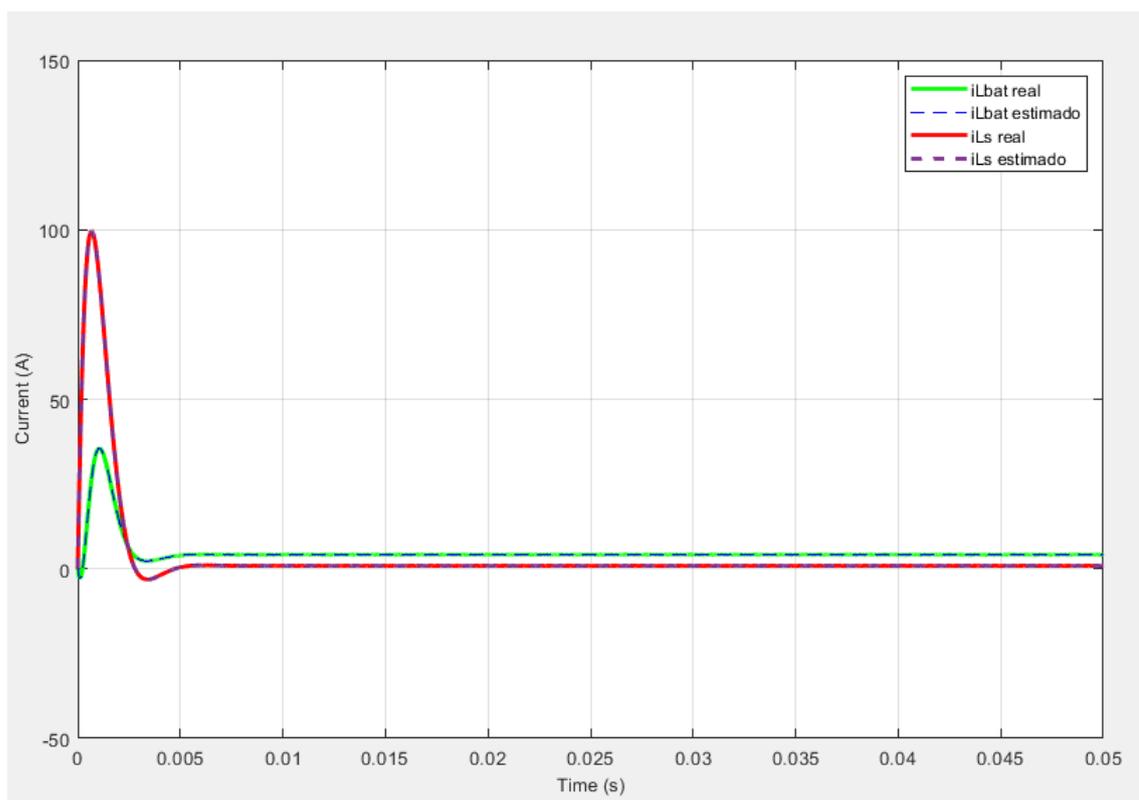


Fonte: (Do Autor (2023))

Figura 4.5 – Comparação entre estados estimados e reais para  $V_0$  e  $V_{bat}$ 

Fonte: (Do Autor (2023))

Figura 4.6 – Comparação entre estados estimados e reais para  $i_{Ls}$  e  $i_{Lbat}$



Fonte: (Do Autor (2023))

#### 4.3.1 Aplicação de perturbações

Afim de validar a suscetibilidade do modelo a interferências externas e por em questão a principal diferença entre o controle LQR e LQG, que consiste na resistência a ruídos e variações externas, dois tipos de perturbações foram aplicadas ao sistemas:

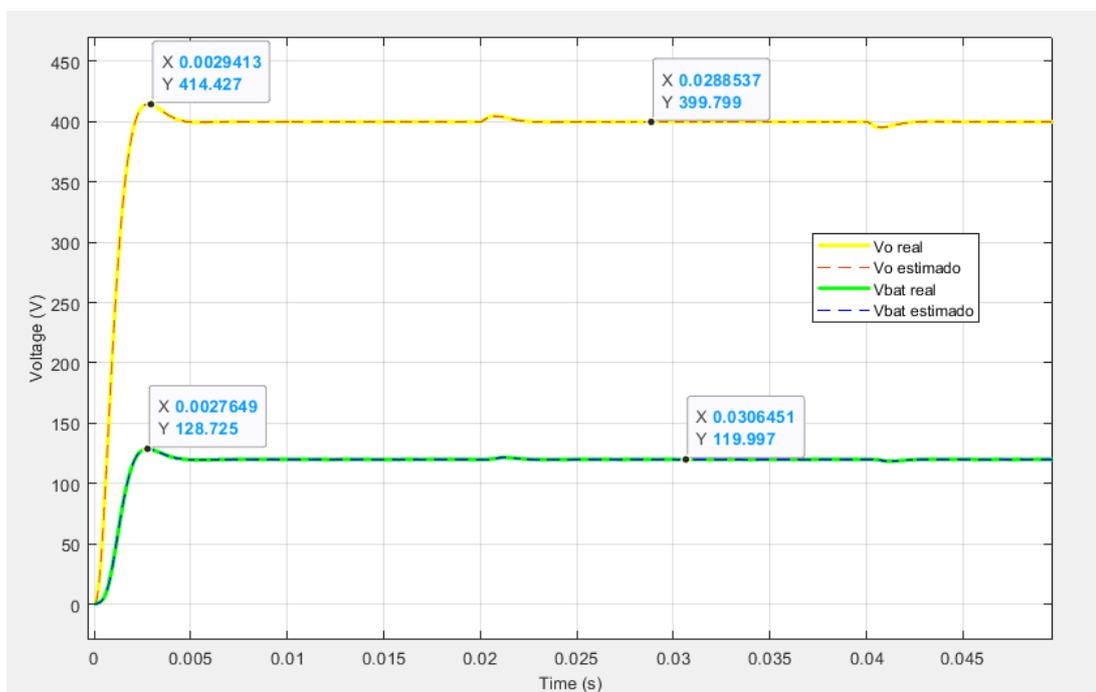
- Perturbações de entrada ( $V_s$ ). Degrau de mais  $0.1xV_s$  em  $0.02s$ ; Degrau de menos  $0.1xV_s$  em  $0.04s$ . A primeira perturbação reproduz uma elevação de 10% na energia fornecida e a segunda uma redução de 10% na energia fornecida pelo painel, podendo ser oriundas de altas ou baixas taxas de irradiação sobre o painel fotovoltaico.
- Ruído de medição Gaussiano, com média 0 e variância 1, com tempo de amostragem de  $10^{-7}$ . Relacionados a interferências externas durante a aquisição dos parâmetros de medição.

A Figura 4.7 mostra o diagrama de blocos após as modificações, nela é possível observar a adição do ruído de medição e flutuações da entrada.



LQR penalizou menos essa variável, contudo a conclui-se que resposta foi bastante satisfatória, o sistema se mostrou robusto quanto as interferências externas e manteve os valores em regime estacionário como definido.

Figura 4.9 – Respostas dos estados estimados do sistema à perturbações



Fonte: (Do Autor (2023))

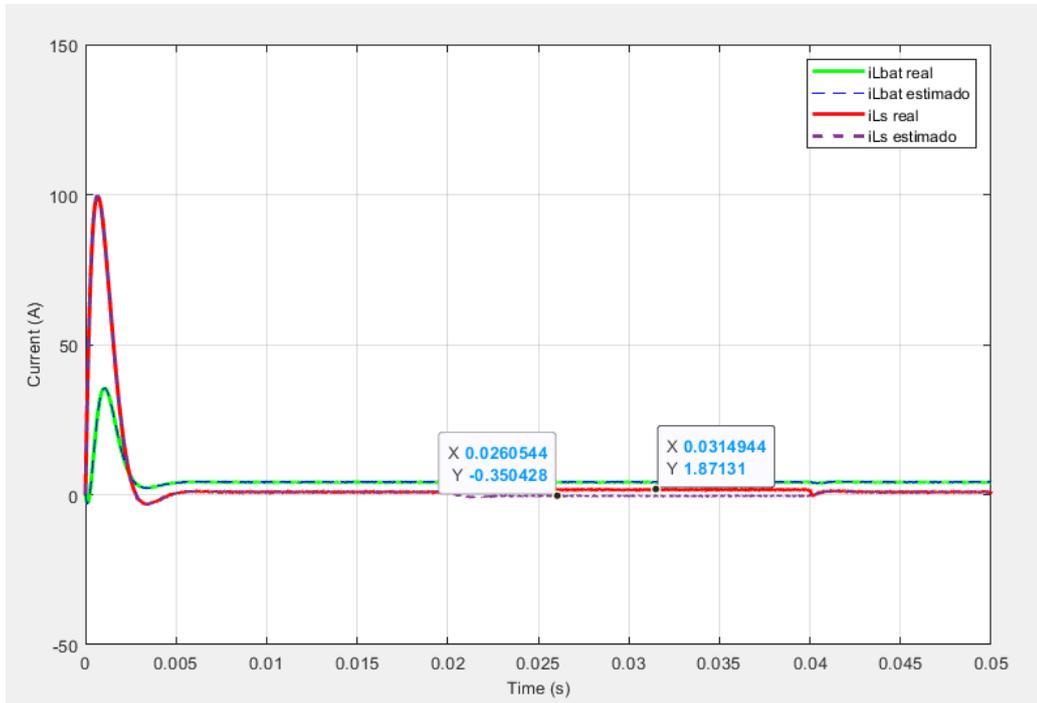
Os estados estimados via Filtro de Kalman para tensão de saída ( $V_0$ ) e tensão do banco de bateria ( $V_{bat}$ ), mesmo após perturbações, conseguiram continuar fiéis ao modelo, respondendo de maneira ótima e reproduzindo igualmente os estados reais.

Comportamento parecido pode ser considerado os estados estimados para a corrente de bateria ( $i_{Lbat}$ ). Para corrente do indutor ( $i_{Ls}$ ), percebe-se uma diferença nos valores de corrente entre os intervalos de perturbações de entrada, no modelo real a corrente fica próxima a dois amperes e no modelo estimado aproximadamente zero. Nota-se então, que o estado estimado pelo filtro para essa variável não foi suficiente par corrigir o erro nessa situação de trabalho.

### 4.3.2 Duty Cicle

Para o presente trabalho notou-se que após as modificações nas matrizes do controle LQR e estimador Filtro de Kalman, esses valores de duty cycle estavam em uma faixa irreal do ponto de vista fisico. Algumas literaturas consideram esse duty cycle com a diferença entre 1 e o valor medido naquele ponto. A definição de duty cycle exige um valor de 0 a 1, para

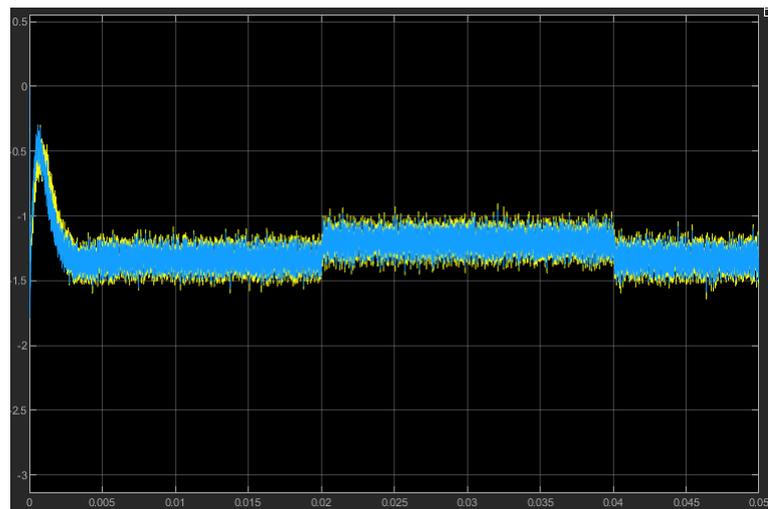
Figura 4.10 – Respostas dos estados estimados do sistema à perturbações



Fonte: (Do Autor (2023))

reprodução física do modelo, porém para o trabalho esse ponto precisará ser estudado mais a fundo e melhorado em trabalhos próximos. A Figura 4.11 representa o duty cycle encontrado.

Figura 4.11 – Respostas dos estados estimados do sistema à perturbações



Fonte: (Do Autor (2023))

O tempo de simulação utilizado durante as simulações foi de 0.05s.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi apresentar um modelo de controle baseado na técnica LQG para o modo 1 de funcionamento do conversor VR-BESS, onde funciona como regulador de tensão e alimentação do banco de baterias.

Este modelo é dividido em duas partes implementação, sendo a primeira definida pela obtenção dos ganhos de realimentação  $K$ , a partir do controle LQR e adição de um estimador estocástico Gaussiano para obtenção dos estados do sistema, a partir do Filtro de Kalman.

A definição das Matrizes  $Q$  e  $R$  nos sistemas MIMO, auxilia e facilita a definição dos pesos para cada estado e cada entrada do sistema, pois atuam individualmente em cada um dos estados e saídas e mostram a correlação destes no resultado do controle ótimo do sistema. Lógico que para isso, os sistemas devem ser corretamente modelados.

Foi observado que o estado relacionado a corrente do indutor  $L_s$  tem grande influência no comportamento do sistema, visto que esse é responsável por garantir a correta energia na saída.

Foi constatada a robusta aplicabilidade do controle LQG, que combina os parâmetros medidos com as previsões, possibilitando uma estimativa muito precisa dos estados do sistema.

As simulações a partir do modelo matemático e sistema de controle foram realizadas para suas validações, atendendo as exigências de projeto, mantendo a estabilidade e a robustez na rejeição a distúrbios. Comprovando assim a importância da modelagem e técnicas de controle bem definidas para utilização segura e confiável do conversor.

Com isso, conclui-se que o sistema LQG foi capaz de garantir a estabilidade do sistema frente as perturbações externas para os variáveis de saída controladas e manteve os resultados das características do sistema abaixo das estipuladas em projeto.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, tem-se:

- Ajuste dos pesos das matrizes  $Q$  e  $R$  para o estado  $i_{L_s}$ , buscando adequar a corrente de saída.
- Ajuste do duty cycle para obter um significado físico, com possibilidade de implementação real.

- Implementação do Controle  $LQG$  para o Modo 2 de funcionamento do conversor VR-BESS
- Projeto de controle em tempo discreto.
- Realização de ensaios experimentais com protótipo do conversor.

## REFERÊNCIAS

- ÅSTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback systems: an introduction for scientists and engineers**. [S.l.]: Princeton university press, 2021.
- BARBI, I. Modelagem de conversores cc-cc empregando modelo médio em espaço de estados. **Florianópolis: Edição do autor**, 2015.
- BECQUEREL, M. Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. **Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences**, v. 9, p. 561–567, 1839.
- BRAGA, I. N. Controle preditivo baseado em modelo com conjunto de controle finito aplicado a conversores cc-cc. In: . [S.l.: s.n.], 2022. v. 1, n. 1.
- BROWN, M. C. **Practical switching power supply design**. [S.l.]: Elsevier, 2012.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. Fundamentals of power electronics. In: **Science Business Media**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 1, n. 1.
- HESPANHA, J. P. **Linear systems theory**. [S.l.]: Princeton university press, 2018.
- KOROISHI, E. H. Diagnose de falhas em sistemas rotativos com excitações desconhecidas, através da metodologia dos observadores de estado. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2009.
- MARCELLO, V. B. Modelagem e controle de conversor cc-cc aplicado a sistemas fotovoltaicos com armazenamento em baterias. In: . [S.l.: s.n.], 2018. v. 1, n. 1.
- MARCELLO, V. B.; PACHECO, V. M.; FERREIRA, S. C. Modelagem de conversor cc-cc aplicado a sistemas fotovoltaicos. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics: converters, applications, and design**. [S.l.]: John wiley & sons, 2003.
- OGATA, K. **Modern control engineering fifth edition**. [S.l.: s.n.], 2010.
- OLIVEIRA, W. dos S.; GONÇALVES, E. N. Implementação em c: filtro de kalman, fusão de sensores para determinação de ângulos. **ForScience**, v. 5, n. 3, 2017.
- PACHECO, V. M. Análise e desenvolvimento de um sistema destinado ao aproveitamento de energias alternativas e a fontes de alimentação ininterrupta com alto fator de potência. In: **UFU**. [S.l.: s.n.], 2003. p. 170.
- RASHID, M. H. **Power electronics handbook**. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2017.
- RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. [S.l.]: Editora UFSC, 2004.
- SAIPET, A.; NUCHPRAYOON, S. On controlling power ramping and output of grid-connected rooftop solar pv using battery energy storage system. In: **IEEE. 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)**. [S.l.], 2019. p. 1–5.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable feedback control: analysis and design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005.

TORRES, R. C. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.

VORPÉRIAN, V. Simplified analysis of PWM converters using model of PWM switch. ii. discontinuous conduction mode. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, IEEE, v. 26, n. 3, p. 497–505, 1990.

## APÊNDICE A – Códigos implementados no MATLAB

Figura 1 – Dados e Modelagem em espaço de estados

```

%%
%-----MODO 1 DE FUNCIONAMENTO DO CONVERSOR VRBESS-----%
%DADOS PARA SIMULAÇÃO

D1 = 0.25; %DUTY CYCLE DA CHAVE 1
D2 = 0.55; %DUTY CYCLE DA CHAVE 2
Vs = 300; %TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO
Ls = 1e-3; %INDUTANCIA DO INDUTOR DE ENTRADA
Lbat= 1.1e-3; %INDUTANCIA DO INDUTOR DA BATERIA
Co = 220e-6; %CAPACITÂNCIA DO CAPACITOR DE SAIDA
Cbat = 330e-6; %CAPACITANCIA DO CAPACITOR DA BATERIA
Ro = 80; %RESISTENCIA QUE SIMULA A CARGA DE SAIDA
Rbat = 29; %RESISTENCIA QUE SIMULA A CARGA DA BATERIA

%-----MODELO EM ESPAÇOS DE ESTADOS-----%

A = [ 0          -1/Lbat      0          (D2-D1)/Lbat;...
      1/Cbat     -1/(Cbat*Rbat)  0          0;...
      0          0           0          -(1-D1)/Ls;...
      -(D2-D1)/Co  0          (1-D1)/Co  -1/(Co*Ro) ];

B = [0;0; 1/Ls; 0];

E = Vs*[-1/((1-D1)*Lbat)  1/((1-D1)*Lbat); ...
        0  0;...
        1/(-1/(1-D1)*Ls)  0;...
        ((D2-D1)*(1-D1)*Ro-(D2-D1)^2*Ro-Rbat)/((1-D1)^2*Rbat*Ro*Co) -(D2-D1)/ ((1-D1)*Rbat*Ro)];

C = [0 0 0 1; 0 1 0 0];

```

Fonte: (Do Autor (2023))

Figura 2 – Definição dos ganhos "K"

```

%EXPANSÃO PARA GANHO INTEGRAL LQI
A0 = [0 0;0 0;0 0;0 0];
C0 = [0 0;0 0];
Ahat = [A A0; -C C0];
Ehat = [E; C0];
|
%DEFININDO AS MATRIZES Q E R
Q = 10e-6*diag([0.1,0.01,1.3,0.01,1e6,1e6]); %matriz escolhida segundo tentativa e erro
R = 10e-6*diag([1,0.1])%matriz escolhida segundo tentativa e erro

%OBTENDO OS VALORES DO GANHO "K" COMO MÉTODO LQR
Khat = lqr(Ahat,Ehat,Q,R)

Kp = Khat(1:2, 1:4) %separando os valores de ganho K proporcional
Ki = -Khat(1:2, 5:6)%separando os valores de ganho K integral

```

Fonte: (Do Autor (2023))

Figura 3 – Obtenção dos parametros do Simulink (TOWORKSPACE)

```

%OBTENÇÃO DOS DADOS DA BLOCO "TOWORKSPACE" DO SIMULINK
time = out.tout
Vobat = out.saída(:,2)
Vout = out.saída(:,1)
Vo = out.estados(:,4);
K_Vo = out.estados(:,8);
Vbat = out.estados(:,2);
K_Vbat = out.estados(:,6);
ilbat = out.estados(:,1);
K_ilbat = out.estados(:,5);
ils = out.estados(:,3);
K_ils = out.estados(:,7);

```

Fonte: (Do Autor (2023))

Figura 4 – Plotagem dos gráficos

```

figure(1)
plot(time,Vout,'b', 'linewidth',2)
hold on
plot(time,Vobat,'r','linewidth',2)
legend('Vout', 'Vobat')
grid on
xlabel('Time (s)', 'FontSize',10)
ylabel('Voltage (V)', 'FontSize',10)
hold off

figure (2)
plot(time,Vo,'y','linewidth',2)%,time,K_Vo,'--'
grid on
hold on
plot(time, K_Vo,'--')
plot(time,Vbat,'g','linewidth',2)
plot(time,K_Vbat,'--b')
legend('Vo real', 'Vo estimado', 'Vbat real', 'Vbat estimado')
xlabel('Time (s)', 'FontSize',10)
ylabel('Voltage (V)', 'FontSize',10)
hold off
|
figure (3)
plot(time,ilbat,'g','linewidth',2)
grid on
hold on
plot(time, K_ilbat,'--b')
plot(time,ils,'r','linewidth',2)
plot(time,K_ils,'--','linewidth',2)
axis([0,0.05,-50,150])
legend('ilbat real', 'ilbat estimado', 'ils real', 'ils estimado')
xlabel('Time (s)', 'FontSize',10)
ylabel('Current (A)', 'FontSize',10)

```

Fonte: (Do Autor(2023))