



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IVENS GABRIEL DE OLIVEIRA CIRÍACO MENDES**

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE  
ENERGIA NA SUAVIZAÇÃO DA CURVA DE GERAÇÃO DE UMA USINA  
FOTOVOLTAICA**

**FORTALEZA**

**2024**

IVENS GABRIEL DE OLIVEIRA CIRÍACO MENDES

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
NA SUAVIZAÇÃO DA CURVA DE OPERAÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M491a Mendes, Ivens Gabriel de Oliveira Ciriaco.  
Análise Da Utilização De Sistemas De Armazenamento De Energia Na Suavização Da Curva De Geração De Uma Usina Fotovoltaica / Ivens Gabriel de Oliveira Ciriaco Mendes. – 2024.  
53 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima.
1. Energia Solar. 2. Sistemas de Potência. 3. Sistemas de Armazenamento de Energia. 4. Bateria de íon-lítio. I. Título.

CDD 621.3

---

IVENS GABRIEL DE OLIVEIRA CIRÍACO MENDES

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
NA SUA VIZIÇÃO DA CURVA DE GERAÇÃO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima (Orientador).  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Mamour Sop Ndiaye  
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)

---

Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Primeiramente, a Deus.  
A minha amada esposa, Jéssica  
Aos meus pais, Evanizes e Vera.  
A todos os meus familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

À minha querida esposa, Jéssica, você foi a luz que iluminou o meu caminho, sem o seu brilho eu continuaria perdido nas sombras da incerteza e da dúvida. Sua delicadeza e graça foram minha bússola, guiando-me através dos momentos mais desafiadores e me tornaram o homem que Deus planejou que eu fosse. Sem você, nada disso teria sido possível. Sou eternamente grato por tudo o que você fez e continua a fazer na nossa família.

A toda minha família, em especial aos meus pais, Evanizes e Vera, que sempre me deram o suporte e o apoio para alcançar os meus sonhos.

Ao professor Dr. Kleber Lima por ter me dado a oportunidade de desenvolver este projeto, bem como a sua orientação durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores que aceitaram fazer parte da banca examinadora.

Ao LEA, Laboratório de Energias Alternativas, que disponibilizou os dados reais mensurados pelo próprio laboratório no campus do PICI.

À turma 2017.1 com os quais compartilhei momentos que guardarei para minha vida toda, além de toda a cooperação para que todos conseguissem êxito, compartilhando provas antigas e revisões momentos antes das provas.

A todos que foram e são importantes na minha caminhada, meus amigos do ensino médio do FB, meus amigos e irmãos da minha cidade, todos que de alguma forma passaram pela minha vida, compartilhando suas visões, suas experiências, o que mudou a maneira como eu vejo o mundo e me tornou o ser humano que sou hoje.

*“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei nos  
ombros de gigantes”*

Isaac Newton

## RESUMO

A busca por fontes renováveis de energia, como a solar e eólica tem se intensificado devido à crescente demanda por energia elétrica e acessibilidade por parte dos consumidores. Essas fontes apresentam uma crescente competitividade em termos de custo, impulsionando a transição energética dos sistemas elétricos no mundo todo. No entanto, a integração desses sistemas com a infraestrutura existente apresenta desafios significativos, exigindo o desenvolvimento de técnicas para garantir a confiabilidade e a qualidade da energia elétrica fornecida. O presente estudo propõe uma solução envolvendo o *Battery Energy Storage System* (BESS) e analisa a viabilidade e eficácia da integração dessa tecnologia juntamente com o *Voltage-Oriented Control* (VOC) no lado CA de uma planta fotovoltaica (FV) utilizando o *Power Ramp Rate* (PRR) para controlar a potência a ser compensada pelo banco de baterias em um cenário em que a usina FV está sujeita a variações de irradiância solar e outras condições operacionais reais. A plataforma de desenvolvimento utilizada foi o MATLAB/Simulink, escolhida pela sua robustez e ampla utilização na simulação de sistemas elétricos e de controle. O algoritmo desenvolvido foi testado em três diferentes cenários de parametrização do BESS: 30%/15min, 20%/15min e 10%/15min, correspondendo aos cenários 1, 2 e 3, respectivamente. O objetivo era avaliar a capacidade do BESS em compensar rampas com taxas superiores às especificadas. No primeiro cenário, todas as rampas acima da taxa estipulada foram compensadas, com uma taxa máxima de 24,92%/15min. No segundo cenário, houve apenas uma rampa com uma taxa superior à especificada, que atingiu 20,36%. Já no terceiro cenário, também foi registrada apenas uma rampa acima da taxa estipulada, com um valor de 11,49%. Esses resultados evidenciam a eficácia do algoritmo.

**Palavras Chave:** Energia Solar; Sistemas de Potência; Sistemas de Armazenamento de Energia; Bateria de íon-lítio.

## ABSTRACT

The search for renewable energy sources (RES), such as solar and wind, has intensified due to the increasing demand for energy and accessibility for consumers. These sources are becoming increasingly competitive in terms of cost, driving the energy transition of electrical systems worldwide. However, the integration of RES into the existing infrastructure presents significant challenges, requiring the development of techniques to ensure the reliability and quality of the supplied energy. This study proposes a solution involving the Battery Energy Storage System (BESS) and analyzes the feasibility and effectiveness of integrating this technology together with the *Voltage-Oriented Control* (VOC) on the AC side of a photovoltaic plant (PVP), using the *Power Ramp Rate* (PRR) to control the power to be compensated by the battery bank in a scenario where the PVP is subject to variations in solar irradiance and other real operational conditions. The developed algorithm was tested in three different BESS parameterization scenarios: 30%/15min, 20%/15min, and 10%/15min, corresponding to scenarios 1, 2, and 3, respectively. The objective was to evaluate the BESS's ability to compensate for ramp rates exceeding the specified limits. In the first scenario, all ramp rates above the stipulated threshold were compensated, with a maximum rate of 24.92%/15min. In the second scenario, there was only one ramp rate above the specified limit, reaching 20.36%. In the third scenario, only one ramp exceeded the specified threshold, with a rate of 11.49%. These results highlight the algorithm's effectiveness.

**Key words:** Solar energy; Power control; Battery Energy Storage System ; *Power Ramp Rate*; *Voltage-Oriented Control*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia final do acoplamento da Planta FV à Rede.....	12
Figura 2 – Topologia do Inversor.....	13
Figura 3 - Diagrama de blocos do VOC.....	17
Figura 4 - Diagrama de blocos do PLL.....	18
Figura 5 – Fluxograma P&O.....	19
Figura 6 - Diagrama de blocos do VOC para geração FV.....	20
Figura 7 – Fluxograma controle BESS.....	22
Figura 8 – Topologia final do BESS.....	22
Figura 9 – Curvas P-V.....	26
Figura 10 - Curva de irradiância solar no dia 02/01/2024.....	27
Figura 11 – Temperatura de operação dos módulos FV.....	28
Figura 12 – Conversor <i>Boost</i> com capacitor na entrada.....	29
Figura 13 – Potência injetada ao longo do dia.....	29
Figura 14 – PRR sem compensação.....	30
Figura 15 – Potência ativa oscilante sem compensação.....	31
Figura 16 – Curva de descarga do BESS.....	32
Figura 17 – Curva de potência com BESS atuando a 30%/15min.....	33
Figura 18– Ocorrência das rampas com BESS atuando a 30%/15min.....	34
Figura 19– Potência ativa oscilante com BESS atuando a 30%/15min.....	34
Figura 20 – SOC com BESS atuando a 30%/15min.....	35
Figura 21 - Curva de potência com BESS atuando a 20%/15min.....	36
Figura 22 - Ocorrência das rampas com BESS atuando a 20%/15min.....	37
Figura 23 – Potência ativa oscilante com BESS atuando a 20%/15min.....	37
Figura 24 – SOC com BESS atuando a 20%/15min.....	38
Figura 25- Curva de potência com BESS atuando a 10%/15min.....	39
Figura 26 - Ocorrência das rampas com BESS atuando a 10%/15min.....	40
Figura 27 – Potência ativa oscilante com BESS atuando a 10%/15min.....	40
Figura 28 – SOC com BESS atuando a 10%/15min.....	41
Figura 29 - Topologia do Conversor <i>Boost</i> .....	49
Figura 30 - Conversor <i>Boost</i> em MCC com chave S ligada.....	50
Figura 31 - Conversor <i>Boost</i> em MCC com chave S desligada.....	50
Figura 32 - Tensão no gatilho da chave S.....	51
Figura 33 – Ganho de tensão em função de D no conversor <i>Boost</i> .....	51
Figura 34 - Corrente no indutor do conversor <i>Boost</i> .....	52
Figura 35 – Tensão no Capacitor do conversor <i>Boost</i> .....	52
Figura 36 - Diagrama de blocos da malha de controle de tensão.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constantes utilizadas para o PI do PLL.....	18
Tabela 2 - Constantes utilizadas nos controladores do inversor FV.....	20
Tabela 3 - Constantes utilizadas nos controladores do BESS. ....	23
Tabela 4 - Parâmetros dos Painéis.....	25
Tabela 5 - Parâmetros do BESS. ....	32
Tabela 6- Constantes utilizadas para o PI do Boost. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
VOC	<i>Voltage-Oriented Control</i>
FV	Fotovoltaica
PRR	<i>Power Ramp Rate</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
SVC	<i>Static VAR Compensator</i>
STATCOM	<i>Static synchronous compensator</i>
SSSC	<i>Static Series Synchronous Compensator</i>
CGO	<i>Chaos Game Optimization</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
SCPS	<i>Static Phase Shifter</i>
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i>
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>
FAP	Filtro Ativo Paralelo
FAS	Filtro Ativo Série
SOC	<i>State of Charge</i>
PI	Proporcional-integral
P&O	Perturbar e Observar

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Metodologia Aplicada.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Estratégias Utilizando o BESS.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Estratégias utilizando equipamentos FACTS .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Controle Vetorial aplicado a geração FV .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.1</b>	<b><i>O Controle Vetorial Orientado pela Tensão.....</i></b>	<b><i>13</i></b>
<b>3.1.2</b>	<b><i>Phase Locked Loop (PLL) .....</i></b>	<b><i>18</i></b>
<b>3.1.3</b>	<b><i>Implementação do Algoritmo MPPT.....</i></b>	<b><i>18</i></b>
<b>3.2</b>	<b>Battery Energy Storage System.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO NO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>A planta fotovoltaica.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Sistema de Aquisição de Dados.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2.1</b>	<b><i>Aquisição da irradiância.....</i></b>	<b><i>27</i></b>
<b>4.2.2</b>	<b><i>Aquisição da temperatura .....</i></b>	<b><i>27</i></b>
<b>4.3</b>	<b>Conversor <i>Boost</i> .....</b>	<b>28</b>
<b>4.4</b>	<b>Resultados sem compensação .....</b>	<b>29</b>
<b>4.5</b>	<b>Resultados utilizando o BESS .....</b>	<b>31</b>
<b>4.5.1</b>	<b><i>Rampa máxima de 30%/15min .....</i></b>	<b><i>33</i></b>
<b>4.5.2</b>	<b><i>Rampa máxima de 20%/15min .....</i></b>	<b><i>35</i></b>
<b>4.5.3</b>	<b><i>Rampa máxima de 10%/15min .....</i></b>	<b><i>38</i></b>
<b>4.6</b>	<b>Discussão dos Resultados .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos Futuros .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalhos Aprovados .....</b>	<b>44</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>
<b>APÊNDICE A – CONVERSOR <i>BOOST</i> APLICADO AO CONTROLE DA TENSÃO NO ELO CC.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de garantir a geração de energia elétrica confiável, transmissão eficiente e fornecimento acessível aos consumidores é uma preocupação constante em todos os atores do sistema elétrico. Nas últimas décadas, testemunhou-se mudanças significativas nos paradigmas energéticos devido à crescente consciência ambiental e à necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

O rápido desenvolvimento industrial tem impulsionado a busca por fontes renováveis de energia como resposta aos desafios ambientais e à escassez de recursos não renováveis. Energias renováveis como solar e eólica têm se destacado como alternativas atrativas, não somente devido ao seu impacto ambiental reduzido, mas também pela sua crescente competitividade em termos de custo.

A transição para energias renováveis, no entanto, apresenta desafios únicos para a integração dessas fontes na infraestrutura elétrica existente. A natureza intermitente e variável dessas fontes pode causar instabilidade na rede elétrica, exigindo o desenvolvimento de técnicas inovadoras para garantir a estabilidade e a qualidade da energia fornecida aos consumidores. Dentre as técnicas que vem ganhando notoriedade entre os pesquisadores, pode-se destacar a utilização do BESS pela comprovação técnica da eficácia (Ramadhan *et al.*, 2022).

### 1.1 Justificativa

Contrabalancear a intermitência e a variabilidade inerentes às fontes de energia renovável, especialmente a solar, é um desafio significativo para a estabilidade e a qualidade da energia elétrica fornecida. A injeção intermitente de potência advinda de geração FV pode causar instabilidades na rede elétrica, afetando tanto a confiabilidade quanto a eficiência do sistema de energia.

Uma solução promissora para mitigar esses problemas é a integração de sistemas de armazenamento de energia em baterias. Esta solução permite armazenar o excedente de energia gerada durante períodos de alta irradiância solar e liberá-la quando a geração é insuficiente, garantindo assim uma entrega de energia mais estável e constante. Essa abordagem não só ajuda a suavizar as flutuações na geração de energia elétrica, mas também melhora a gestão da demanda e a estabilidade da rede elétrica.

Além disso, a aplicação do *Voltage-Oriented Control* (VOC) em sistemas FV permite um controle mais eficiente das variáveis elétricas, como tensão e corrente, proporcionando uma resposta dinâmica e precisa às mudanças nas condições de operação. Isso

é crucial para garantir a máxima eficiência na conversão de energia solar e para a operação estável dos sistemas de geração FV.

Portanto, fica clara a necessidade de desenvolver e implementar soluções que garantam a qualidade e a confiabilidade da energia fornecida pelas plantas FV. A combinação de técnicas de controle, como o VOC, com sistemas de armazenamento de energia, como o BESS, pode oferecer uma solução robusta para os desafios apresentados pelas fontes alternativas de energia.

## 1.2 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal validar a eficácia da utilização do VOC combinado o BESS, para suavizar a curva de operação de uma planta FV.

Todavia a validação da metodologia se dará quando os objetivos específicos a seguir forem atingidos: desenvolver uma estratégia que implemente o MPPT dentro do algoritmo do VOC permitindo a operação em sistemas FV; desenvolver uma estratégia de controle a ser implementado junto com o VOC para utilizar o BESS para suavizar a curva de geração de plantas FV; implementar simulações computacionais para testar e validar a integração das duas estratégias e desenvolver métodos para analisar a melhoria na qualidade da energia elétrica injetada na rede contribuindo para a evolução das estratégias de integração de energias renováveis na matriz energética.

## 1.3 Metodologia Aplicada

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho abrange:

- a) Apresentação das principais soluções, encontradas na bibliografia, para o acoplamento e suavização da potência injetada por plantas FV na rede;
- b) Apresentação dos algoritmos clássicos que compõem o trabalho, tais como controle do conversor *Boost*, *Phase Locked Loop* (PLL), VOC, *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) e BESS. A partir dos quais foram desenvolvidas as novas topologias;
- c) Apresentação da topologia proposta, destacando as modificações realizadas para viabilizar a utilização;
- d) Análise de simulação e experimental do sistema exposto a condições reais de temperatura e irradiância.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, estruturado da seguinte maneira.

No Capítulo 1, é feita uma introdução ao tema proposto, apresentando o conceito e a importância da utilização de sistemas de armazenamento de energia combinados com o VOC para suavizar a curva de operação de plantas FV. Além disso, são apresentadas a justificativa do estudo, os objetivos principais e específicos, e a metodologia empregada para desenvolver e validar as estratégias propostas neste trabalho de dissertação.

No Capítulo 2, são discutidas estratégias para melhorar a qualidade da energia elétrica gerada por plantas FV. Primeiramente são apresentadas as estratégias utilizando BESS, em seguida são apresentadas soluções utilizando *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS).

No Capítulo 3, são apresentadas as modelagens dos sistemas necessários para integrar uma planta FV à rede elétrica, além da modelagem do algoritmo utilizado para mitigar os problemas de intermitência solar com o BESS, também é descrita a topologia do sistema FV conectado à rede, o controle da tensão no elo CC utilizando um conversor *Boost* e a implementação do *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) para a maximização da geração de energia elétrica.

No Capítulo 4, é feita a implementação dos modelos e conceitos teóricos desenvolvidos no Capítulo 3 por meio de simulações computacionais. Estas simulações visam explorar o comportamento dinâmico das usinas FV e a operação conjunta dessas usinas com o sistema de armazenamento de energia em um ambiente virtual controlado. O capítulo descreve os parâmetros da planta FV, o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados reais para temperatura e irradiância, os cálculos dos parâmetros do conversor *Boost* e os parâmetros do BESS proposto. Também inclui uma análise detalhada dos resultados das simulações para validação da eficácia dos modelos desenvolvidos.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e considerações finais do trabalho, juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

## 2 ESTADO DA ARTE

Gerar energia elétrica com qualidade, mantendo estáveis todas as variáveis desde a geração, passando pela transmissão e chegando na distribuição é um desafio enfrentado por todos os sistemas de potência no mundo. Com o advento da geração distribuída esses desafios só aumentaram, seja pela natureza intermitente dessas fontes, seja pela penetração de cargas não-lineares entre os consumidores, qualquer que seja o desafio, a qualidade da energia distribuída deve ser a prioridade em qualquer sistema elétrico de potência (Yadav; Yadav, 2021).

Por outro lado, devido ao aumento do uso de conversores estáticos e outras cargas não-lineares existe a necessidade da utilização de filtros ativos que sejam capazes de compensar componentes harmônicas da tensão e da corrente, nesse caso uma melhora da qualidade de energia elétrica gerada, pode ser obtida ao complementar plantas FV, que por si já podem injetar harmônicos de corrente na rede por intermitências, com o uso de filtros ativos.

Nesse capítulo será realizada uma revisão bibliográfica relativa as estratégias de melhoria da qualidade de energia gerada por plantas FV. Serão abordadas as estratégias que utilizam tanto o BESS quanto FACTS em sistemas de potência com geração FV.

### 2.1 Estratégias Utilizando o BESS

Esta secção apresenta uma revisão bibliográfica sobre as estratégias de melhoria da qualidade da energia gerada por plantas FV concentrando-se nas abordagens que utilizam sistemas de armazenamento em baterias.

Um dos desafios centrais na implementação do BESS em sistemas é a determinação da capacidade ideal a ser escolhida para as baterias, equilibrando as melhorias técnicas proporcionadas pelas baterias com os custos adicionais que elas acarretam. A metodologia ideal para dimensionamento do BESS deve ser adaptada ao tipo específico de sistema de energia renovável em que será aplicado, bem como ao seu tamanho. Essa abordagem é essencial para projetar sistemas eficientes que não apenas melhorem o desempenho técnico, mas também sejam economicamente viáveis, atendendo assim aos critérios financeiros e técnicos envolvidos na implementação de plantas FV e outras fontes de energia renovável (Yang *et al.*, 2018).

Liu *et al.* (2017) avaliaram a confiabilidade de sistemas de armazenamento de energia em baterias, especialmente naqueles integrados a sistemas de energia renovável, como plantas FV. Foi proposto um método de avaliação da confiabilidade baseado no estado de saúde

das células das baterias. Além disso, foi discutida a influência das diferentes configurações e estratégias de gerenciamento de sistema na confiabilidade do BESS nessa integração.

Rakhshani *et al.* (2019) abordaram a integração da geração FV em larga escala nas redes de energia elétrica, destacando o papel dos sistemas de armazenamento de energia em baterias na mitigação dos desafios associados. A crescente penetração de energia FV, caracterizada por sua intermitência e variabilidade, exige soluções que garantam a estabilidade da rede. Nesse contexto, o uso do BESS é fundamental para suavizar as flutuações de energia, proporcionando suporte para a regulação de frequência e tensão, além de melhorar a confiabilidade do sistema.

Segundo Rakhshani *et al.* (2019), a integração do BESS com plantas FV em larga escala ainda enfrenta desafios tecnológicos e econômicos, porém essa integração representa uma solução viável e promissora para a transição energética global. Os benefícios de longo prazo da adoção de BESS em combinação com geração FV, incluem a redução da necessidade de investimentos em infraestrutura de rede e a capacidade de fornecer serviços auxiliares à rede, como controle de frequência (Rakhshani *et al.*, 2019).

Nair *et al.* (2010) estipularam a viabilidade técnica e econômica de sistemas onde bancos de baterias e plantas FV estão integrados, utilizando *softwares* como Simulink e HOMER. A integração com plantas FV é destacada, pois o BESS pode armazenar o excedente da geração FV durante o dia para uso noturno ou em períodos de baixa geração, maximizando o uso de energia renovável e minimizando a dependência da rede elétrica.

Com o objetivo de estudar a utilização do BESS em redes com alta penetração de geração distribuída, Raptis *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa utilizando o sistema IEEE de 33 barramentos, considerando diferentes cenários para avaliar o impacto da inserção dos BESS nessa rede.

A introdução de BESS em redes de distribuição com alta penetração de geração FV pode reduzir significativamente as perdas de energia, melhorar o perfil de tensão e reduzir a sobrecarga das linhas (Raptis *et al.*, 2018). Os cenários analisados por Raptis *et al.* (2018) consideram diferentes estratégias de localização e dimensionamento do BESS, evidenciando que a escolha adequada da localização do BESS é capaz de reduzir a perda de energia que foi de 590,4 kWh, no cenário apenas com a planta FV, para 420,3 kWh no cenário onde a localização do BESS estava otimizada, uma economia de 170 kWh.

Para investigar a importância do dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia para uma gestão eficiente de energia elétrica em residências inteligentes Zhou *et al.* (2018) consideraram diferentes mecanismos de precificação de eletricidade, além de avaliar o impacto de subsídios para geração distribuída e a incerteza na geração de energia com painéis FV.

Carriere *et al.* (2019) abordaram o uso de sistemas de armazenamento de energia em baterias em conjunto com plantas FV, propondo estratégias para integração dessa topologia com o mercado de eletricidade. O BESS é apresentado como uma solução eficaz para mitigar a intermitência da geração FV, compensando erros de previsão e garantindo uma operação mais estável da rede elétrica.

De acordo com Moghassemi *et al.* (2020), a integração do BESS com o DVR permite uma resposta mais rápida e eficiente a variações de tensão, garantindo a proteção de cargas sensíveis e melhorando a qualidade de energia. Além disso, Moghassemi *et al.* (2020) concluíram que a utilização do BESS como fonte de energia de *backup* oferece uma solução econômica e eficaz para mitigar quedas de tensão, ampliando a funcionalidade do DVR em redes de distribuição modernas.

Visando mitigar as flutuações de tensão que resultam das variações de potência ativa dos sistemas FV, Hu *et al.* (2022) propuseram o controle das potências ativa e reativa para redes de distribuição com alta penetração de sistemas FV. Para alcançar esse objetivo, foi feito o uso da integração de sistemas de armazenamento de energia em baterias com plantas FV. A metodologia proposta coordena a operação de dispositivos de regulação de tensão, como os transformadores com comutação e bancos de capacitores, junto com as plantas FV e BESS.

O BESS é utilizado tanto para carregar quanto para descarregar energia, permitindo a regulação em tempo real da tensão nas barras da rede, essa abordagem garante que as plantas FV e o BESS participem de forma conjunta na regulação de tensão ao longo dos alimentadores (Hu *et al.*, 2022).

Conte *et al.* (2018) discutiram uma metodologia de otimização para o planejamento e controle em tempo real de sistemas integrados de geração FV e armazenamento de energia em baterias. A abordagem visou maximizar a eficiência energética e a economia, integrando o BESS com a planta FV para lidar com a intermitência da geração FV e otimizar o uso da energia armazenada.

A integração do BESS com a planta FV é crucial para o gerenciamento da variabilidade da energia solar, permitindo o armazenamento do excesso de energia gerada durante períodos de alta irradiância e o uso dessa energia armazenada durante períodos de baixa geração ou alta demanda (Conte *et al.*, 2018).

Segundo Li, Hui e Lai (2013), graças ao rápido desenvolvimento tecnológico das baterias, sistemas como BESS passaram a ser utilizados em maior escala podendo ser usados para regulação e estabilização da rede, para carregamento de veículos elétricos, redução das perdas em transmissões, entre outros. Portanto a sua utilização na área de energias renováveis se torna cada vez mais atrativa.

Os autores propuseram um método de controle do BESS com o intuito de suavizar geração de potência de uma planta híbrida composta por uma planta eólica de 3 MW e uma planta solar de 1,26 MW de potência nominal. Utilizando um método iterativo de tentativa e erro foram capazes de diminuir a variação da potência ativa limitando-a dentro da faixa de 10%.

Lin *et al.* (2017) analisaram as estratégias típicas de armazenamento de energia para aplicação em plantas FV, e o BESS foi escolhido por ter melhor relação de custo e tamanho e o utilizaram para suavizar a forma de onda da potência gerada e reduzir picos de geração. Foram estudadas 3 plantas de 37 MW, 40MW e 58 MW, a utilização do BESS para suavizar a geração de energia elétrica. A estratégia de carga e descarga visa estipular uma potência esperada para geração, caso a potência gerada esteja maior que esse valor estipulado o BESS deve ser carregado, e caso a potência gerada esteja menor o BESS deve suprir com a carga que estiver disponível.

Shoubaki *et al.* (2017) simularam o acoplamento de um sistema de armazenamento de energia com baterias, no elo CC de uma planta FV, já que para a geração FV a capacitância é análoga ao momento de inércia de uma máquina elétrica. Para uma planta FV de 8 kW foi acoplado um sistema de armazenamento de 5 kW, feito que conseguiu emular uma capacitância de 30 mF em paralelo com os 10 mF já instalados no elo CC. Diminuindo a variação da tensão no elo CC em 75% após o acoplamento do BESS.

A intermitência da geração de energia elétrica, através painéis fotovoltaicos, pode ser quantificada a partir da variação da potência gerada por unidade de tempo, grandeza chamada de PRR (*Power Ramp Rate*), portanto, uma maneira de controlar o ciclo de carga ou descarga do BESS é utilizar como parâmetro essa variação (Ramadhan *et al.*, 2022).

Com isso, Ramadhan *et al.* (2022) implementaram uma estratégia para o controle do BESS a ser instalado para suavizar a geração de energia solar em uma ilha. O método consiste em definir um PRR máximo aceitável para a geração local usando a equação (1):

$$PRR = \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t}. \quad (1)$$

Onde o valor instantâneo da potência é dado pela função  $P(t)$ , e  $\Delta t$  descreve o incremento de tempo entre as medições.

Através do estudo de caso da penetração de energia solar nessa ilha chegou-se à conclusão que a variação máxima da geração para que as consequências na rede sejam mínimas seria de 4 kW/s, um acréscimo na potência injetada acima desse taxa leva ao carregamento do BESS, da mesma forma que uma queda da potência injetada menor que 4 kW/s leva ao uso do BESS para supri-la.

## 2.2 Estratégias utilizando equipamentos FACTS

Nesta seção será desenvolvida uma visão geral da utilização de equipamentos FACTS para melhoria da qualidade de energia em sistemas com utilização de plantas FV.

Liao *et al.* (2017) investigaram a implementação de dispositivos FACTS, com foco em seu papel na melhoria da qualidade de energia em redes de distribuição que incorporam plantas FV. Os desafios impostos por quedas de tensão, harmônicos e desbalanceamento, podem afetar significativamente o desempenho dos sistemas FV e a estabilidade geral da rede. Modelando alguns dispositivos FACTS, como *Static VAR Compensators* (SVC), STATCOM e DVRs, Liao *et al.* (2017) avaliaram a eficácia desses equipamentos na mitigação desses problemas de qualidade de energia, particularmente em cenários onde fontes de energia renovável como plantas FV são integradas à rede.

Para discutir a possibilidade de utilizar plantas FV como dispositivos FACTS em sistemas de distribuição Moawwad *et al.* (2011) propuseram a reconfiguração dos inversores em plantas FV para que possam se conectar à rede de distribuição formando sistemas chamados *Interline-PV (I-PV)*. Três topologias distintas foram apresentadas: *Shunt I-PV*, *Série I-PV* e *Shunt-Série I-PV*. Essas configurações permitem que as plantas FV atuem como FACTS tornando possível utilizar plantas FV para regular a tensão de rede, controlar fluxos de potência ativa e reativa, e melhorar o desempenho dinâmico dos sistemas de potência.

Nivedha *et al.* (2016), Yelpale *et al.* (2017) e Varma *et al.* (2019) propuseram mudar o controle do inversor da planta FV para fazê-la atuar como STATCOM, tanto durante o dia quanto à noite, visando otimizar a capacidade de transmissão de energia sem a necessidade de equipamentos adicionais.

A integração de uma planta FV como STATCOM, topologia chamada de PV-STATCOM, aumenta significativamente a qualidade da transmissão de energia, especificamente, a potência máxima que pode ser transferida que aumentou de 799 MW para 868 MW quando o STATCOM foi utilizado (Nivedha *et al.*, 2016).

A inovação no controle do inversor solar fotovoltaico, o tornando capaz de operar como STATCOM durante a noite, faz com que a necessidade de investir em dispositivos adicionais e onerosos, como capacitores em série ou paralelo e outros dispositivos FACTS, seja reduzida, essa operação do PV-STATCOM cria uma nova possibilidade para as usinas FV gerarem receitas tanto à noite quanto durante o dia, além de contribuírem com a potência ativa durante o período diurno (Yelpale *et al.*, 2017).

A operação do PV-STATCOM mostrou-se crucial na estabilização de um motor de indução de 5 hp, fornecendo suporte de potência reativa e controle de tensão durante todo o dia, independentemente da produção de energia solar (Varma *et al.*, 2019).

Ceaki *et al.* (2014) analisaram a integração do SVC com plantas FV em redes elétricas e concluíram que quando utilizado em conjunto com plantas FV, o SVC pode fornecer suporte de potência reativa, ajudando a estabilizar a tensão da rede e melhorando a capacidade de transmissão de energia.

Chavan *et al.* (2017) implementaram o *Static Series Synchronous Compensator* (SSSC) em sistemas com utilização de plantas FV para mitigar oscilações de potência em sistemas elétricos. A implementação foi realizada em um sistema distribuído com múltiplas unidades do SSSC, controlando de maneira síncrona a injeção de tensão em série para ajustar a potência reativa e mitigar as oscilações, sem comprometer a operação das plantas FV (Chavan *et al.*, 2017).

Mohamed *et al.* (2024) exploraram a aplicação do algoritmo de *Chaos Game Optimization* (CGO) para otimizar a alocação dos dispositivos *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC), *Static Phase Shifter* (SCPS) e o SVC no sistema de potência. O objetivo é

melhorar a estabilidade e a eficiência da rede elétrica, especialmente ao incorporar fontes de energia renovável, como plantas FV. O CGO, inspirado na teoria do caos, é empregado para definir as melhores posições e configurações desses dispositivos, garantindo que o sistema opere com mínima perda de potência e maior confiabilidade (Mohamed *et al.*, 2024).

Xiaoqing *et al.* (2012) e Mohanty *et al.* (2016) exploraram a aplicação do *Unified Power Flow Controller* (UPFC) em sistemas fotovoltaicos para melhorar a estabilidade e a eficiência da rede elétrica.

Xiaoqing *et al.* (2012) implementaram o UPFC baseado nas transformadas de Park, segundo os autores a integração de sistemas FACTS em plantas FV é necessária para atender às exigências de qualidade de energia da rede, o uso do UPFC demonstrou ser uma abordagem promissora para mitigar flutuações de tensão e melhorar a capacidade de transmissão.

Mohanty *et al.* (2016) implementaram o UPFC baseado em lógica *fuzzy*. Após uma comparação quantitativa entre o UPFC, o STATCOM e o SVC, o equipamento FACTS com o menor *overshoot* foi o UPFC com apenas 2%, o STATCOM e o SVC ficaram com 2,5% e 5% respectivamente.

O *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC) é um equipamento FACTS que une o filtro ativo paralelo, FAP, com o filtro ativo série, FAS, sendo capaz de melhorar a qualidade de energia tanto eliminando as componentes harmônicas da corrente através do FAP, como compensando possíveis harmônicos de tensão na rede em que o UPQC está conectado por também ter à disposição o FAS. O UPQC é formado por esses dois conversores ligados na topologia *back-to-back*. e é capaz de lidar com distúrbios de tensões, sejam eles de sobretensão e subtensão, além de ser capaz de controlar a potência ativa que será extraída da planta FV. (Devassy; Singh, 2018)

Com o intuito de controlar a corrente injetada por uma planta FV, Gautam e Agrawal (2021) utilizaram o FAP para melhorar a qualidade da energia elétrica gerada por uma planta FV de 100 kW a fim de alimentar uma carga não linear, com o FAP para compensação de corrente. A carga não linear gerou um fator de distorção harmônica de 16,34%, que somados aos 0,87% do inversor, foram compensados pelo FAP gerando um fator de distorção harmônica para a corrente injetada na rede de apenas 2,67%.

O FAP-PV é a topologia que utiliza uma planta FV para alimentar o elo CC do FAP, esta configuração permite algumas funcionalidades a mais tais como, funcionamento do FAP-PV mesmo quando há ausência ou baixa incidência de luz solar, a planta solar apenas alimentando o link CC enquanto a carga é alimentada pela rede ou até mesmo é possível utilizar totalmente a energia da planta solar e a energia excedente ser injetada na rede (Castillo; Castro, 2018).

Para testar essa topologia, Castillo e Castro (2018) a simularam no Simulink alimentando uma carga com distorção e desbalanço entre as fases, a potência ativa vinda da rede variou de acordo com a etapa de funcionamento, chegando a ser negativa, ou seja, a rede estava recebendo energia, quando a planta FV foi utilizada na sua máxima capacidade. A redução da distorção harmônica foi clara chegando a diminuir de 51% para 1% em uma das fases.

### **2.3 Conclusão**

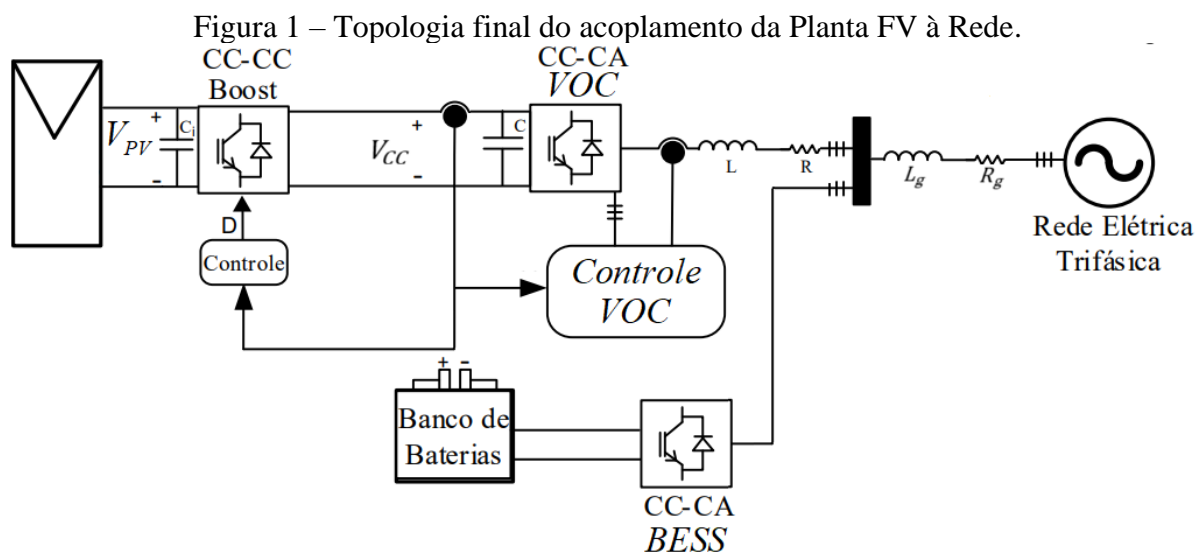
Foram abordadas duas ferramentas documentadas na bibliografia com o intuito de observar sua capacidade de atuar na melhoria da qualidade da energia elétrica entregue por plantas FV, ferramentas capazes de garantir a estabilidade e confiabilidade dos sistemas de geração distribuída. A introdução de bancos de baterias e filtros ativos representa uma resposta promissora aos desafios enfrentados, oferecendo soluções eficazes para mitigar problemas como flutuações de potência e distorções harmônicas.

Após a revisão bibliográfica, identificou-se uma lacuna relacionada à utilização do BESS conectado à rede em paralelo com a planta FV para compensar as intermitências características da potência injetada na rede por esse tipo de geração distribuída, o que motivou a realização deste trabalho.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica detalhada de cada um dos sistemas necessários ao acoplamento de uma planta FV à rede elétrica, bem como do sistema escolhido para mitigação dos problemas decorrentes da intermitência solar.

Inicialmente, é necessário descrever a topologia do sistema de geração FV conectado à rede, esta topologia inclui a representação da planta FV, do conversor CC-CC utilizado para controlar a tensão no elo CC e do inversor CC-CA utilizado para implementação do MPPT, como mostrado na Figura 1.



Fonte: Próprio Autor (2024).

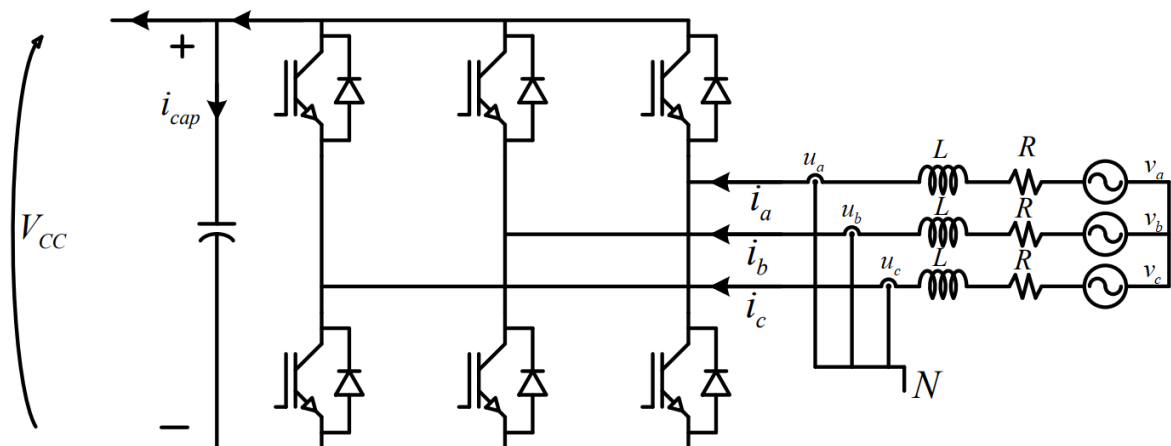
Deve-se pontuar, também, que o sistema de armazenamento de energia foi ligado em paralelo a planta FV sendo composto por bancos de baterias e seu inversor bidirecional associado. Essa ligação tem como objetivo compensar diretamente a corrente, e por conseguinte, a potência injetada na rede. Assim, o BESS é capaz de desempenhar um papel fundamental na estabilização da rede elétrica e na gestão da potência injetada, armazenando o excedente da geração FV e fornecendo energia quando necessário. A modelagem detalhada deste sistema inclui a representação das características dinâmicas das baterias, juntamente com o controle vetorial do inversor para garantir uma resposta rápida e precisa às variações de carga e condições da rede.

Os modelos matemáticos desenvolvidos serão fundamentais para a análise do desempenho dos geradores FV e do BESS, bem como para o projeto e implementação de estratégias de controle eficazes.

### 3.1 Controle Vetorial aplicado a geração FV

Para fazer o controle do inversor, foi escolhida a estratégia de controle vetorial, estratégia concebida para garantir uma resposta precisa e dinâmica às variações na demanda de carga e nas condições da rede elétrica. O VOC é baseado em um modelo matemático do inversor, que utiliza da transformada de Park de tal sorte que as grandezas vetoriais de tensão e corrente no eixo direto e em quadratura são controladas independentemente. Isso permite ajustes precisos na magnitude e na fase da tensão de saída do inversor, garantindo assim a estabilidade e a eficiência do sistema em condições intermitentes de operação. Essa abordagem é amplamente reconhecida por sua capacidade de fornecer um desempenho superior em termos de resposta transitória e rejeição de distúrbios, tornando-a ideal para aplicações sensíveis à qualidade da energia elétrica, como sistemas fotovoltaicos conectados à rede. A topologia do inversor está representada na Figura 2.

Figura 2 – Topologia do Inversor.



Fonte: Próprio Autor (2024).

#### 3.1.1 O Controle Vetorial Orientado pela Tensão

Este tópico tem o objetivo de analisar a topologia e obter as relações matemáticas que permitem a utilização de controladores PI para regular a tensão no elo CC e a potência reativa. As equações da tensão da rede são dadas por:

$$v_a = \sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen}(\omega t), \quad (2)$$

$$v_b = \sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (3)$$

$$v_c = \sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (4)$$

No qual  $V$  é o módulo da tensão da rede e  $\omega$  é a frequência angular da rede.

Com isso, tem-se o vetor espacial girante da tensão na forma:

$$\vec{v}(t) = \frac{3}{2} \sqrt{2} V e^{-j\omega t}. \quad (5)$$

Esta forma de representação vetorial para o vetor espacial, facilita a percepção de que existem duas componentes para este vetor e que podem ser escritas nas coordenadas de Park, tendo suas componentes nos eixos  $d$  e  $q$ .

A equação para o sistema representada em coordenadas estacionárias é da forma:

$$\vec{v}(t)^{est} = R \vec{i}(t)^{est} + L \frac{d}{dt} (\vec{i}(t)^{est}) + \vec{u}(t)^{est}. \quad (6)$$

Para passar o sistema de coordenadas estacionárias para as coordenadas girantes de Park, basta multiplicar todo o sistema por  $e^{-j\theta}$ .

$$\vec{v}(t) = R \vec{i}(t) + L \frac{d}{dt} (\vec{i}(t)^{est}) \cdot e^{-j\theta} + \vec{u}(t). \quad (7)$$

Onde os vetores que não estão assinalados com *est* já estão no referencial síncrono, mas resta um termo ainda no referencial estacionário, para solucionar este problema deve-se utilizar da relação da derivada da soma:

$$\frac{d}{dt} (\vec{i}(t)^{est} \cdot e^{-j\theta}) = \frac{d}{dt} (\vec{i}(t)^{est}) \cdot e^{-j\theta} + \vec{i}(t)^{est} \cdot \frac{d}{dt} e^{-j\theta}. \quad (8)$$

Logo o termo que procuramos substituir é da forma:

$$\frac{d}{dt}(\vec{i}(t)^{est}) \cdot e^{-j\theta} = \frac{d}{dt}(\vec{i}(t)) - \left( \vec{i}(t)^{est} \cdot (-j)e^{-j\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right).$$

Simplificando:

$$\frac{d}{dt}(\vec{i}(t)^{est}) \cdot e^{-j\theta} = \frac{d}{dt}(\vec{i}(t)) + j\omega\vec{i}(t). \quad (9)$$

Substituindo:

$$\vec{v}(t) = R\vec{i}(t) + L \frac{d}{dt}(\vec{i}(t)) + jL\omega\vec{i}(t) + \vec{u}(t). \quad (10)$$

Com todas as variáveis no referencial síncrono das coordenadas de Park.

Utilizando de um algoritmo de sincronização com a rede, PLL, é possível sincronizar as componentes da tensão de modo que a componente sobre o eixo q será nula e todo o módulo da tensão estará sobre o eixo d. Por isso pode-se reescrever a equação (10) para cada eixo:

Para o eixo d:

$$v_d(t) = Ri_d(t) + L \frac{d}{dt}(i_d(t)) + jL\omega i_d(t) + u_d(t),$$

Mas  $j \cdot i_d(t) = -i_q(t)$ , Logo:

$$v_d(t) = Ri_d(t) + L \frac{d}{dt}(i_d(t)) - \omega Li_q(t) + u_d(t). \quad (11)$$

Para o eixo q:

$$v_q(t) = Ri_q(t) + L \frac{d}{dt}(i_q(t)) + jL\omega i_q(t) + u_q(t),$$

Mas  $j \cdot i_q(t) = i_d(t)$  e  $v_q(t) = 0$ , Logo:

$$0 = Ri_q(t) + L \frac{d}{dt}(i_q(t)) + L\omega i_d(t) + u_q(t). \quad (12)$$

Assim tem-se as equações para a tensão a ser sintetizada pelo inversor:

$$u_d = v_d - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q. \quad (13)$$

$$u_q = -Ri_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d. \quad (14)$$

As potências nesse sistema são da forma:

$$p = v_d i_d + v_q i_q.$$

$$q = v_q i_d - v_d i_q.$$

Mas como  $v_q(t) = 0$ :

$$p = v_d i_d. \quad (15)$$

$$q = -v_d i_q. \quad (16)$$

Fazendo o balanço da potência imaginária ser nulo para os dois lados do conversor, temos:

$$p = v_d i_d = V_{cc} i_{cap}.$$

$$i_{cap} = \frac{v_d i_d}{V_{cc}} = C \frac{dV_{cc}}{dt}.$$

Mas:

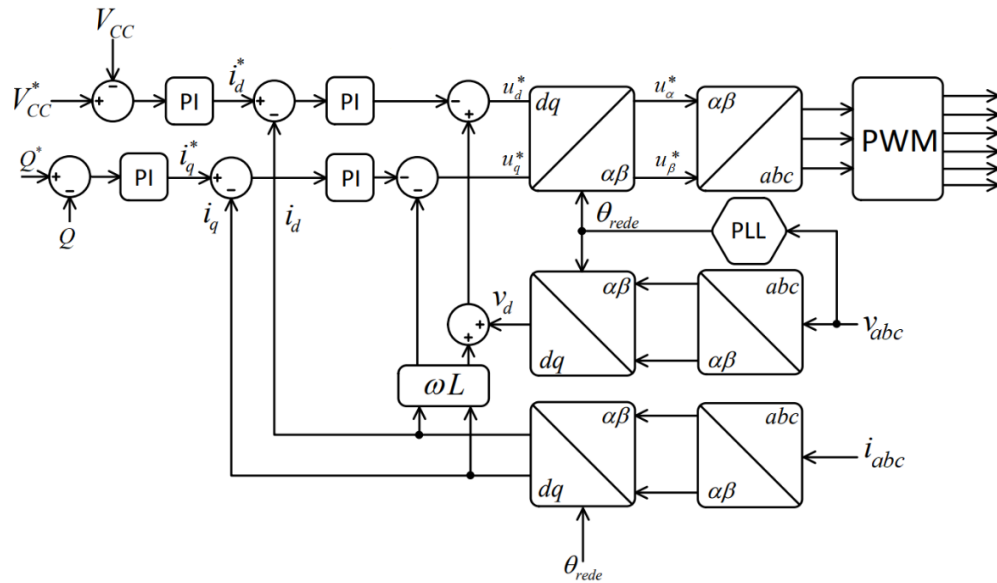
$$m = \frac{2\sqrt{2} \cdot v_d}{V_{cc}}.$$

Onde  $m$  é o índice de modulação. Com isso:

$$C \frac{dV_{cc}}{dt} = \frac{mi_d}{2\sqrt{2}}. \quad (17)$$

Logo, percebe-se que a tensão no elo CC pode ser controlada através da corrente no eixo direto. A montagem do diagrama de blocos para o controle nesse sistema utilizará as equações (13), (14). O diagrama de blocos está representado na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de blocos do VOC.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Pode-se observar na Figura 3 que o controle VOC clássico utiliza um PLL, o qual é empregado na conversão das tensões e correntes trifásicas para o sistema de coordenadas dq. O controle é realizado em dois eixos, sendo que cada eixo possui dois controladores PI.

No eixo d, a tensão no elo CC é comparada à tensão de referência escolhida para o projeto, gerando um erro que alimenta o primeiro PI. A saída deste PI é a estimativa da corrente a ser sintetizada no eixo d. Essa corrente estimada é, então, comparada à corrente real do eixo d, gerando um novo erro, que alimenta o segundo PI. A saída deste segundo PI é ajustada pelo fator  $v_d + \omega L i_q$ , conforme a equação (13), resultando na tensão estimada pelo controle para o eixo d, que será modulada pelo PWM.

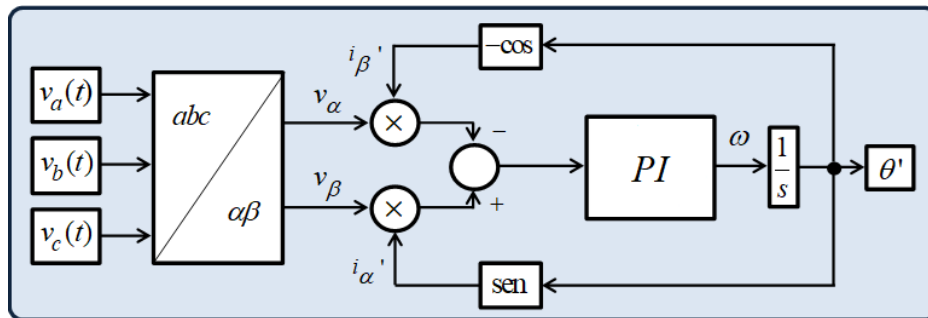
No eixo q, o controle é focado diretamente na potência reativa. O valor desejado para a potência reativa é comparado ao valor medido, gerando um erro que alimenta o primeiro PI, cuja saída é a estimativa da corrente a ser sintetizada no eixo q. Novamente, essa corrente estimada é comparada à corrente real no eixo q, gerando um novo erro que alimenta o segundo PI. A saída deste PI é ajustada pelo fator  $\omega L i_d$ , conforme a equação (14), resultando na tensão estimada pelo controle para o eixo q, que será modulada pelo PWM.

### 3.1.2 Phase Locked Loop (PLL)

O algoritmo de PLL escolhido foi o tipo q, por ser uma estrutura confiável, que pode rejeitar altos níveis de harmônicos de acordo com Rolim *et al.*, (2006). Esta estrutura tem controle baseado na equação (18), tem seu diagrama de blocos exposto na Figura 4.

$$q = v_{\beta} i'_{\alpha} - v_{\alpha} i'_{\beta}. \quad (18)$$

Figura 4 - Diagrama de blocos do PLL.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Para a implementação em ambiente de simulação foram utilizadas as constantes expostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Constantes utilizadas para o PI do PLL.

Constantes	
$K_p \left( \frac{rad}{s \cdot var} \right)$	0,4
$K_i \left( \frac{rad}{s^2 \cdot var} \right)$	100

Fonte: Próprio Autor (2024).

### 3.1.3 Implementação do Algoritmo MPPT

O aproveitamento máximo da energia gerada por sistemas fotovoltaicos é uma atividade fundamental de um conversor a ser utilizado em geração distribuída. Nesse contexto, o MPPT é um algoritmo que desempenha um papel crucial, permitindo que os sistemas fotovoltaicos operem no ponto de máxima potência de sua curva de potência-corrente, garantindo assim a máxima eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica.

Nesta seção, será explorada a implementação conjunta do MPPT e do VOC em sistemas FV. Para isto, como estratégia de busca do MPPT, foi escolhido o algoritmo Perturbar

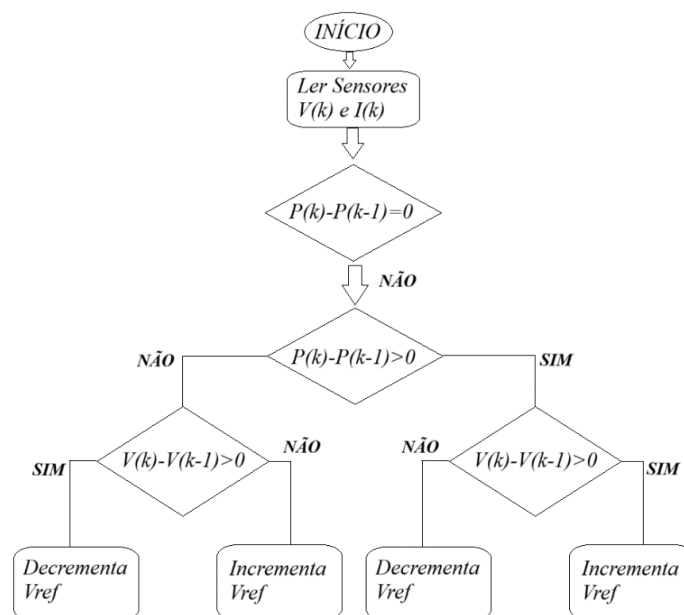
e Observar, P&O, por se tratar de um algoritmo amplamente utilizado e documentado na literatura, apesar dos desafios enfrentados pelo algoritmo em algumas situações como sombreamento parcial, onde o P&O pode ficar preso em um máximo local, resultando em eficiência reduzida (Ahmed *et al.*, 2015).

O algoritmo P&O funciona analisando duas variáveis principais: a tensão e a corrente geradas pela planta FV. A partir dessas variáveis, é possível calcular a potência instantânea atual da planta.

O algoritmo compara a potência da iteração atual com a potência da iteração anterior. Em seguida, compara-se a tensão atual com a tensão da iteração anterior. Se a tensão atual for maior, significa que um aumento da tensão na iteração anterior resultou em um aumento de potência. Portanto, a tensão será incrementada nesta iteração. Se a tensão atual for menor, isso sugere que um aumento na tensão anterior resultou em uma diminuição na potência, portanto, a tensão é reduzida nesta iteração.

Por outro lado, se a potência atual for menor que a da iteração anterior, o algoritmo busca o oposto. Se um aumento na tensão resultou em uma diminuição na potência, a tensão é reduzida. Se uma diminuição na tensão resultou em uma diminuição na potência, a tensão é aumentada. Caso a potência não tenha se alterado a tensão de referência permanecerá constante. Como mostra a Figura 5.

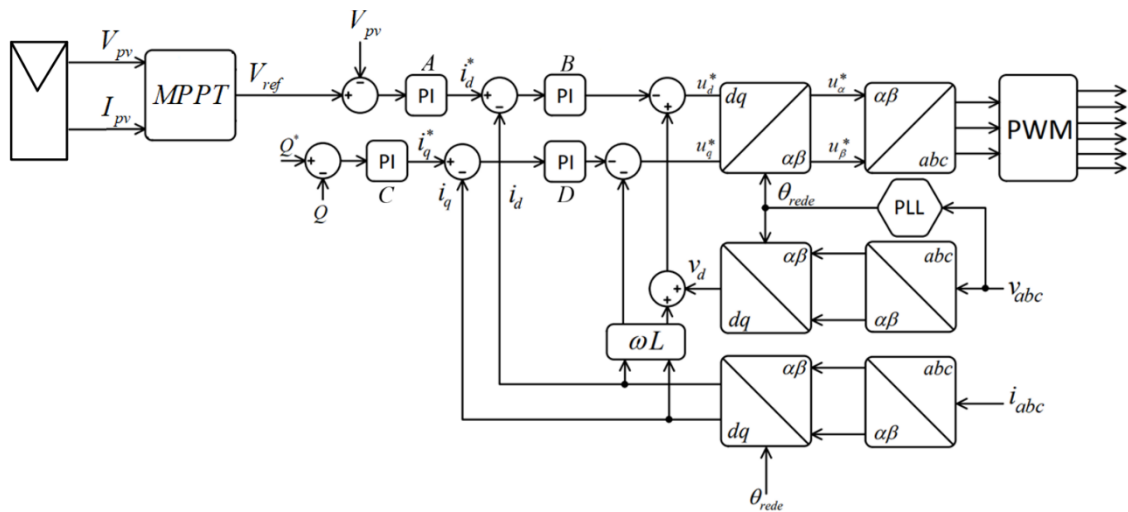
Figura 5 – Fluxograma P&O.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Para implementar o fluxograma da Figura 5 no VOC, o PI que buscava estimar a corrente no eixo direto para controlar a tensão no elo CC, na Figura 3, agora será designado para estimar a corrente  $i_d$  para controlar a tensão de saída da planta FV, uma vez que, para o sistema FV, a tensão e a corrente estão correlacionadas através da curva I-V. Enquanto isso, a tensão no elo CC será controlada pelo conversor *Boost*. O diagrama de blocos final para a aplicação será apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de blocos do VOC para geração FV.



Fonte: Próprio Autor (2024).

É possível observar na Figura 6 que o diagrama de blocos é semelhante ao exposto na Figura 3, tendo como única alteração a variável que irá gerar o erro do primeiro PI do eixo direto. Na Tabela 2, encontram-se as constantes utilizadas para os controladores do sistema.

Tabela 2 - Constantes utilizadas nos controladores do inversor FV.

Constantes			
PI	A	$K_p \left( \frac{A}{V} \right)$	2
		$K_i \left( \frac{A}{s \cdot V} \right)$	5
	B	$K_p \left( \frac{V}{A} \right)$	2
		$K_i \left( \frac{V}{s \cdot A} \right)$	10

<b>PI</b>	C	$K_p \left( \frac{A}{var} \right)$	$2 \cdot 10^{-4}$
		$K_i \left( \frac{A}{s \cdot var} \right)$	10
	D	$K_p \left( \frac{V}{A} \right)$	2
		$K_i \left( \frac{V}{s \cdot A} \right)$	10

Fonte: Próprio Autor (2024).

### 3.2 Battery Energy Storage System

Fluctuações na potência injetada por usinas FV na rede, devido a fatores climáticos como nuvens e variação sazonal, podem causar desequilíbrios na oferta e demanda de energia, resultando em instabilidade na rede e possíveis interrupções no fornecimento de eletricidade.

Nesta seção, serão explorados os princípios fundamentais da integração do BESS com sistemas FV. Conforme ilustrado na Figura 1, o BESS será conectado no lado CA em paralelo com a planta FV, com o objetivo de controlar a corrente injetada na rede elétrica. Para facilitar a integração do BESS com a rede CA, foi implementado o controle vetorial, exigindo apenas ajustes mínimos em seu sistema de controle, o que destaca a versatilidade dessa estratégia de controle para os conversores CC-CA.

Na estratégia adotada será fundamental no conceito de PRR, conforme descrito na equação (1). Em cada iteração, o PRR máximo permitido será calculado, tanto para aumentos quanto para reduções na potência gerada. Com base nesse cálculo, a potência de saída do BESS será ajustada para compensar essas variações.

Se a potência estiver aumentando a uma taxa superior ao PRR, o BESS será carregado. Por outro lado, se a inclinação da curva for inferior ao PRR durante uma redução na potência, o BESS será descarregado para compensar.

O algoritmo atualizará uma variável chamada de potência de referência ( $P_{ref}$ ) utilizando o PRR. Se a potência gerada pela planta FV ( $P_{pv}$ ) for superior à potência de referência,  $P_{ref}$  será incrementada pelo valor do PRR, e a potência de saída do BESS será:



Como exposto na Figura 8, o PI que controla a corrente no eixo direto, estará focado em controlar diretamente a potência ativa, uma vez que é através do controle dela que o BESS irá armazenar ou descarregar a energia de modo a mitigar a intermitência solar. Segue, na Tabela 3, as constantes adotadas para o controle do BESS.

Tabela 3 - Constantes utilizadas nos controladores do BESS.

Constantes			
PI	A	$K_p \left( \frac{A}{W} \right)$	$2 \cdot 10^{-4}$
		$K_i \left( \frac{A}{s \cdot W} \right)$	10
	B	$K_p \left( \frac{V}{A} \right)$	2
		$K_i \left( \frac{V}{s \cdot A} \right)$	10
PI	C	$K_p \left( \frac{A}{var} \right)$	$2 \cdot 10^{-4}$
		$K_i \left( \frac{A}{s \cdot var} \right)$	10
	D	$K_p \left( \frac{V}{A} \right)$	2
		$K_i \left( \frac{V}{s \cdot A} \right)$	10

Fonte: Próprio Autor (2024).

### 3.3 Conclusão

Durante este capítulo, foi desenvolvida a modelagem matemática dos sistemas fundamentais para a integração eficaz de uma planta FV à rede elétrica, juntamente com a mitigação dos desafios associados à intermitência solar. Optou-se por utilizar um sistema de armazenamento de energia em baterias como solução para enfrentar esses desafios de forma abrangente.

Primeiramente foi feita a apresentação da topologia do sistema FV conectado à rede, destacando a aplicação do Conversor *Boost* para controle da tensão CC e o uso do VOC

na geração FV. Além disso, foi discutida a implementação do algoritmo MPPT para a busca constante do ponto de máxima potência.

Em seguida, foi explorado como utilizar o BESS na estabilização da rede elétrica e na gestão eficiente da energia. Essa análise abrangeu a modelagem das características dinâmicas das baterias, bem como a implementação do controle vetorial do inversor, garantindo uma resposta ágil e precisa às variações de carga e condições da rede.

Ao final deste capítulo, os modelos matemáticos desenvolvidos emergem como ferramentas essenciais para avaliar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos e de armazenamento de energia. Esses modelos não apenas fornecem *insights* valiosos sobre a operação e eficácia desses sistemas, mas também servem como base para o projeto e a implementação de estratégias de controle eficazes.

## 4 IMPLEMENTAÇÃO NO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Esta secção tem o objetivo de implementar os modelos e conceitos teóricos desenvolvidos na secção anterior. Na secção 3, foi estabelecida uma base teórica ao desenvolver modelos matemáticos detalhados para a integração de sistemas FV com BESS. Esses modelos capturam aspectos cruciais, desde a geração FV até o armazenamento e distribuição de energia por meio do BESS.

Ao longo desta secção, serão conduzidas as etapas necessárias para a simulação do sistema em questão. Isso inclui a seleção da planta FV, o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados para capturar parâmetros essenciais como irradiância solar e temperatura, aos quais os painéis serão submetidos durante a simulação, o cálculo dos parâmetros do conversor *Boost* selecionado para o conversore CC-CC, os parâmetros escolhidos para o BESS e finalmente a discussão dos resultados obtidos.

### 4.1 A planta fotovoltaica

A planta FV será composta por módulos de 349,59 W de potência, modelo 1STH-350-WH da Soltech, que já fazem parte do banco de dados do MATLAB/Simulink. O arranjo contém 5 *strings* com 17 módulos em série em cada *string*, totalizando 85 módulos e uma potência total instalada de 29,715 kW. Os módulos têm os parâmetros mostrados na Tabela 4.

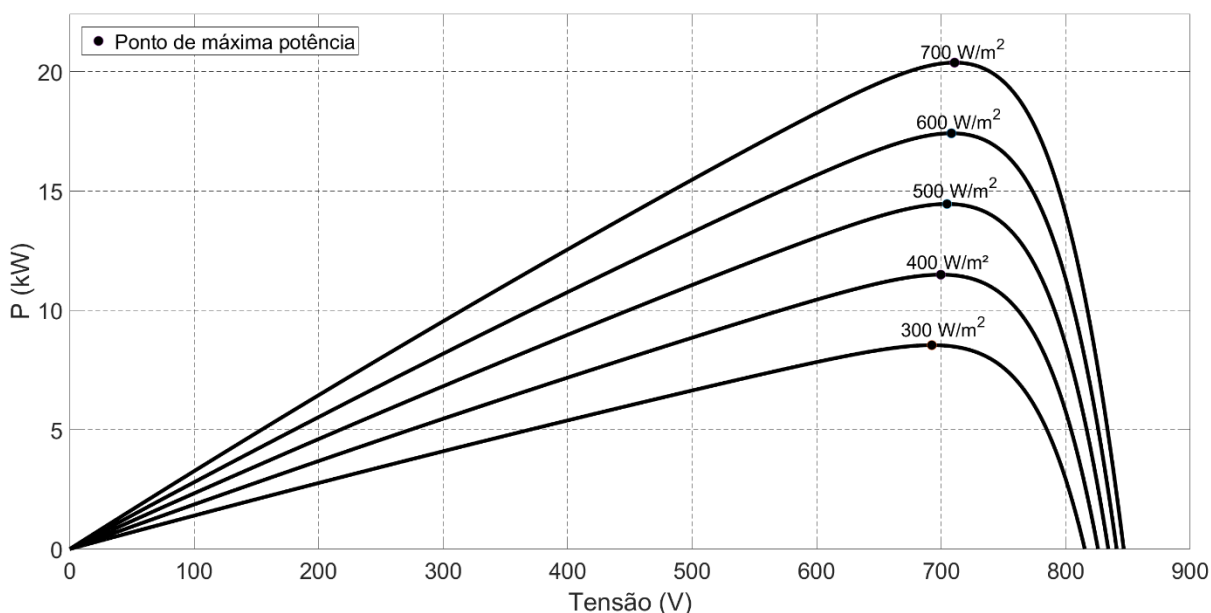
Tabela 4 - Parâmetros dos Painéis.

Parâmetros	
Potência Nominal $P_n$ (W)	349,59
Tensão no ponto de máxima potência $V_{mp}$ (V)	43
Corrente no ponto de máxima potência $I_{mp}$ (A)	8,13
Tensão de circuito aberto $V_{oc}$ (V)	51,5
Corrente de Curto Circuito $I_{sc}$ (A)	9,4
Coef. de temp. da $V_{oc}$ $K_{voc}$ (%/°C)	-0,36
Coef. de temp. da $I_{sc}$ $K_{isc}$ (%/°C)	0,09
Nº de Células por painel	80

Fonte: Adaptado de Soltech (2024).

Com isso foram traçadas, na Figura 9, as curvas de potência para variadas irradiâncias, em todas as curvas os painéis estavam com 30°C de temperatura.

Figura 9 – Curvas P-V.



Fonte: Adaptado do MATLAB/Simulink (2024).

De onde pode ser tirada uma importante informação, a tensão de operação da planta, que será em torno de 700V, dado importante para a escolha dos parâmetros do conversor *Boost* que irá controlar a tensão no elo CC.

## 4.2 Sistema de Aquisição de Dados

Para a correta simulação das condições às quais uma planta FV estará exposta, é crucial levar em consideração dois fatores principais: Irradiância solar e temperatura dos painéis solares. A irradiância solar é o fluxo de energia solar por segundo que incide por unidade de área, e sua variação ao longo do dia e em diferentes condições climáticas tem um impacto direto na geração FV. Da mesma forma, a temperatura dos painéis solares influencia significativamente sua eficiência, pois o aumento da temperatura reduz a geração FV. Portanto, a realização de simulações computacionais, tem como desafio a incorporação de dados precisos de Irradiância solar e temperatura dos painéis para garantir resultados realistas e relevantes.

Os dados utilizados foram obtidos pelo LEA, Laboratório de Energias Alternativas, no campus do PICI da UFC. Foram recebidos em formato CSV e receberam o devido tratamento para serem inseridos no modelo do MATLAB/Simulink. A temperatura de operação foi obtida a partir de um sensor instalado junto aos módulos de uma planta FV que possui 12 módulos do modelo JKM330PP, de 330Wp, e os dados referentes a irradiância solar são registrados por um piranômetro instalado junto com a planta FV.

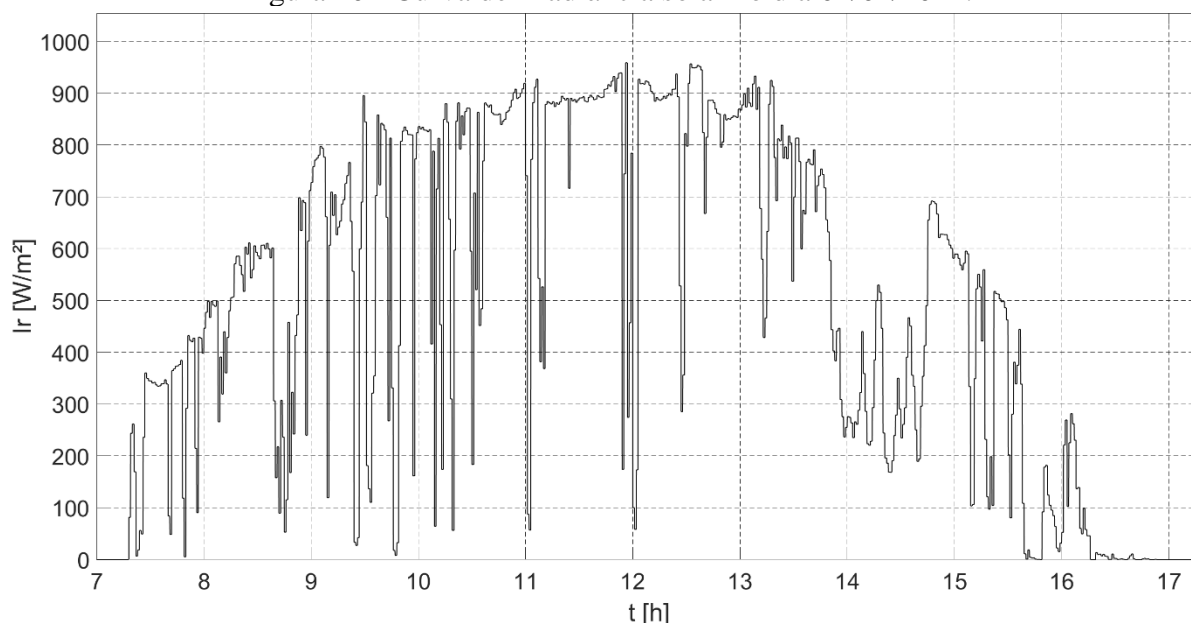
#### 4.2.1 Aquisição da irradiância

O modelo do piranômetro que foi utilizado na medição da irradiância solar foi o LP02, sensor capaz de medir a irradiância com faixa de medição que vai de 0 W/m<sup>2</sup> a 2000 W/m<sup>2</sup>, para coletar as informações deste sensor utilizou-se o microcontrolador ESP32 (Assis, 2024).

Com isso foi feita uma análise dos dados recebidos e após o tratamento dos mesmos foi escolhido o dia 02/01/2024 para fazer as simulações, por ser um dia crítico no que se refere a intermitência da irradiância registrada pelos sensores, com vales de irradiância numerosos e duradouros.

O piranômetro registrou para o dia 02/01/2024 a curva de irradiância mostrada na Figura 10 para o período de 7:02 às 17:20.

Figura 10 - Curva de irradiância solar no dia 02/01/2024.



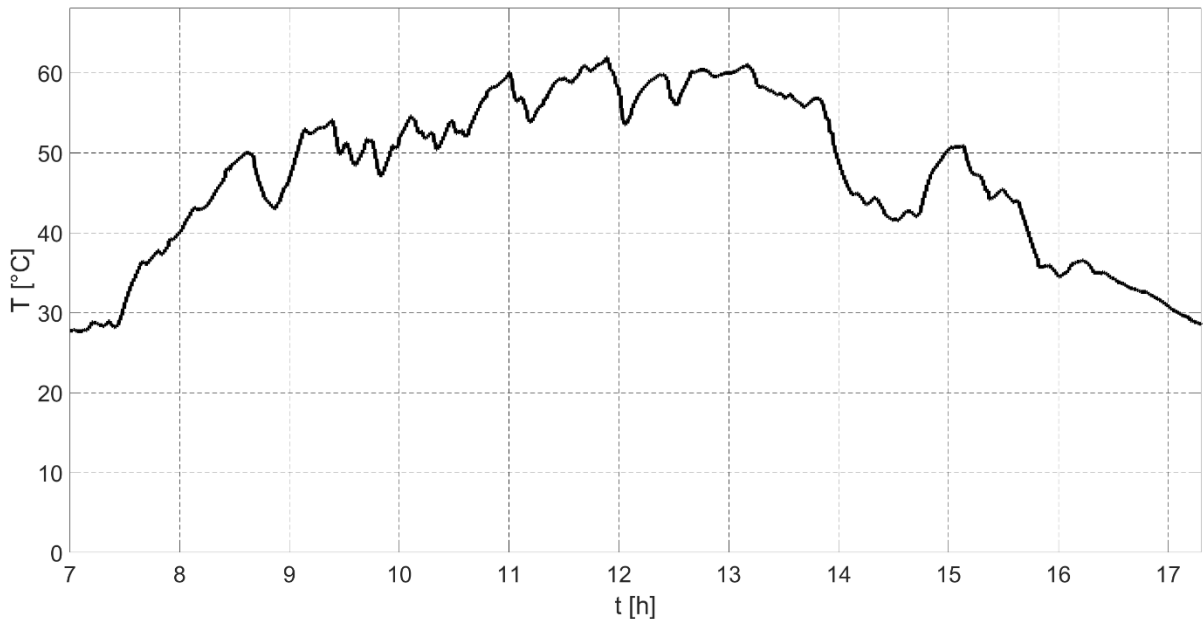
Fonte: LEA (2024).

#### 4.2.2 Aquisição da temperatura

O sensor que foi instalado para medir a temperatura dos módulos foi o DS18B20, este sensor mede temperaturas na faixa de -55°C a +125°C e tem precisão de 0,5°C para mais ou para menos.

O sensor de temperatura dos módulos instalados no LEA registrou, para o dia 02/01/2024, a variação de temperatura apresentada na Figura 11 começando das 7:02 até as 17:20.

Figura 11 – Temperatura de operação dos módulos FV.



Fonte: LEA (2024).

### 4.3 Conversor *Boost*

Sabendo-se as características da planta como a potência instalada, e os outros parâmetros apresentados na seção 4.2. Pode-se então calcular os parâmetros do conversor CC/CC que irá garantir uma tensão constante no elo CC, utilizando a metodologia exposta no Apêndice A.

Observando a Figura 9, pode-se notar que a tensão nos pontos de máxima potência da planta FV estão em torno de  $V_i = 700V$ , portanto essa será a tensão de entrada do conversor. A tensão de saída escolhida para o conversor *Boost* foi de  $V_o = 800V$ , pois em condições reais de operação existe um limite para a razão cíclica do conversor *Boost*, a partir do qual a tensão de saída passa a retroceder, como mostrado no Apêndice A. Sendo a tensão de saída e a tensão de entrada iguais as expostas anteriormente, a razão cíclica esperada para o conversor será  $D = 0,125$ .

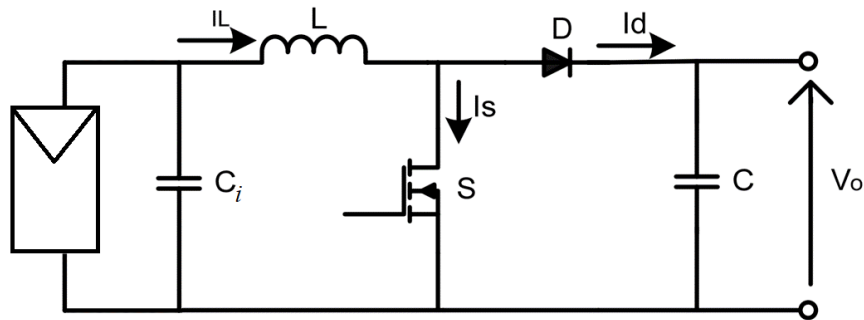
A variação estipulada para a tensão no capacitor será  $\Delta V_C = 0,8V$  e a variação da corrente no indutor  $\Delta I_L = 17,14A$ . Logo usando a metodologia exposta no Apêndice A, tem-se:

$$C = 585,9 \mu F .$$

$$L = 0,51 mH .$$

Para a utilização desse conversor acoplado a uma planta FV no MATLAB/Simulink, é necessário um capacitor na entrada do conversor tal qual a Figura 12:

Figura 12 – Conversor *Boost* com capacitor na entrada.



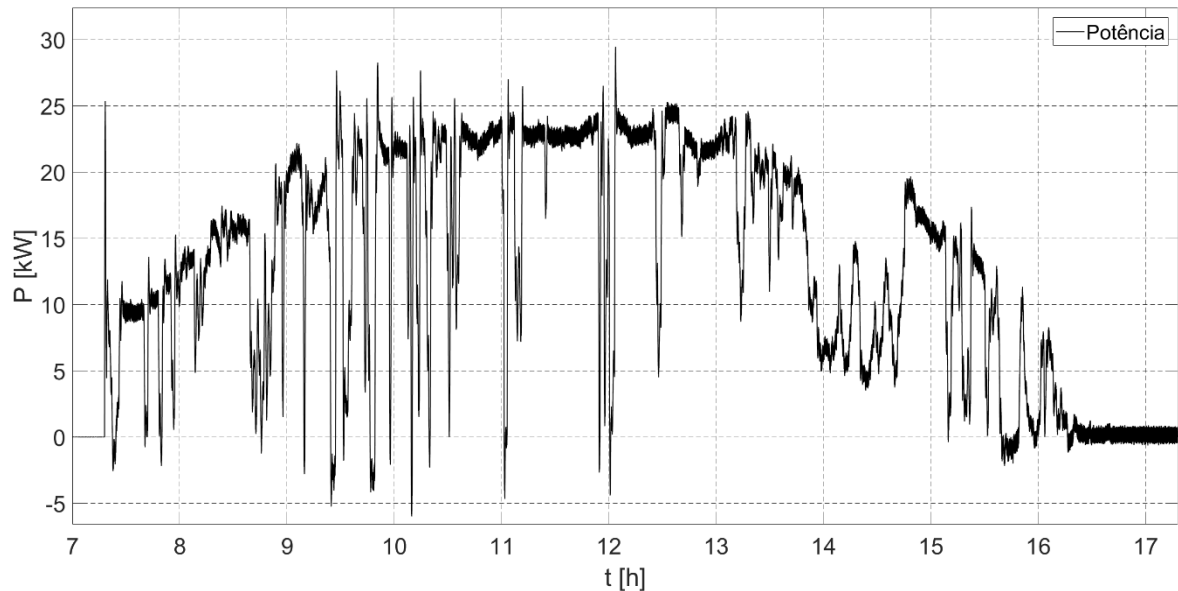
Fonte: Próprio Autor (2024).

O Capacitor de entrada foi escolhido  $C_i = 4,04 \text{ mF}$ .

#### 4.4 Resultados sem compensação

Com a implementação no MATLAB/Simulink, pôde-se obter o seguinte resultado para a geração de potência ativa ao longo do dia, levando em consideração a irradiância e a temperatura expostas nas secção 4.3. O resultado está exposto na Figura 13.

Figura 13 – Potência injetada ao longo do dia.



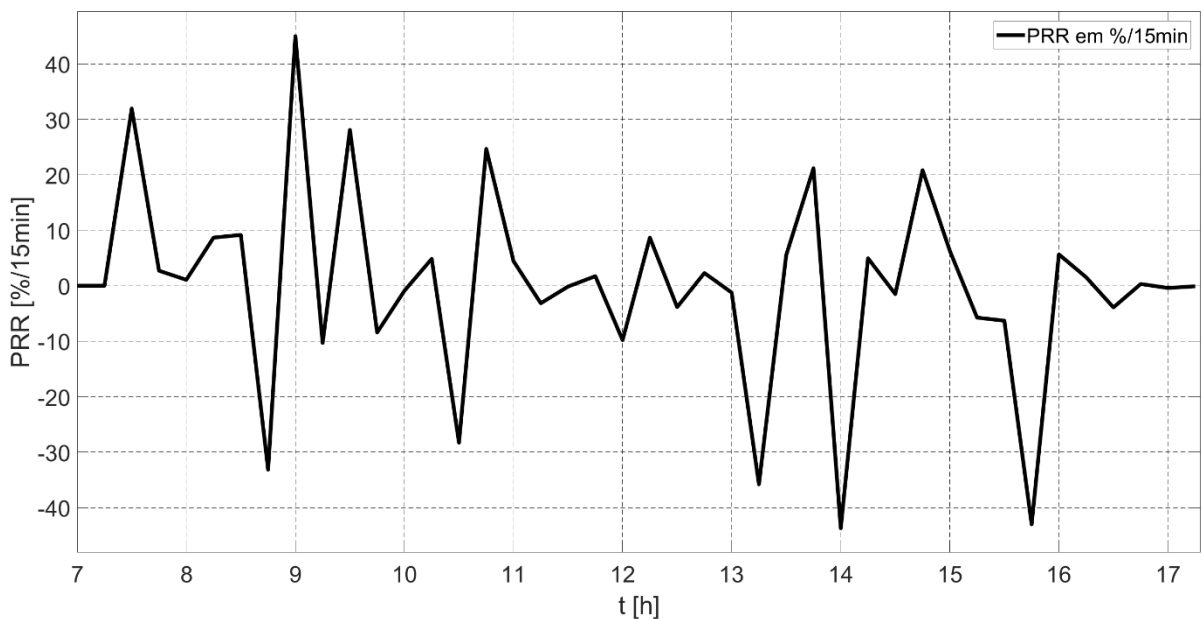
Fonte: Próprio Autor (2024).

Percebe-se que a intermitência da irradiância é refletida, também, na curva de potência. Fenômeno esse que como exposto nos capítulos anteriores diminui a confiabilidade da rede em caso de uma penetração massiva desse tipo de fonte.

Na secção 2.1 foi explorado o conceito de PRR, uma forma de mensurar a intermitência e medir as consequências dela na rede. Com os dados obtidos anteriormente, na

Figura 13, foi possível levantar o PRR, em % a cada 15 min, ao longo das 10 horas de operação. Como mostra a Figura 14. Optou-se por realizar a análise em intervalos de 15 minutos, pois esse é o intervalo utilizado por grande parte das concessionárias para a medição e faturamento de demanda.

Figura 14 – PRR sem compensação.

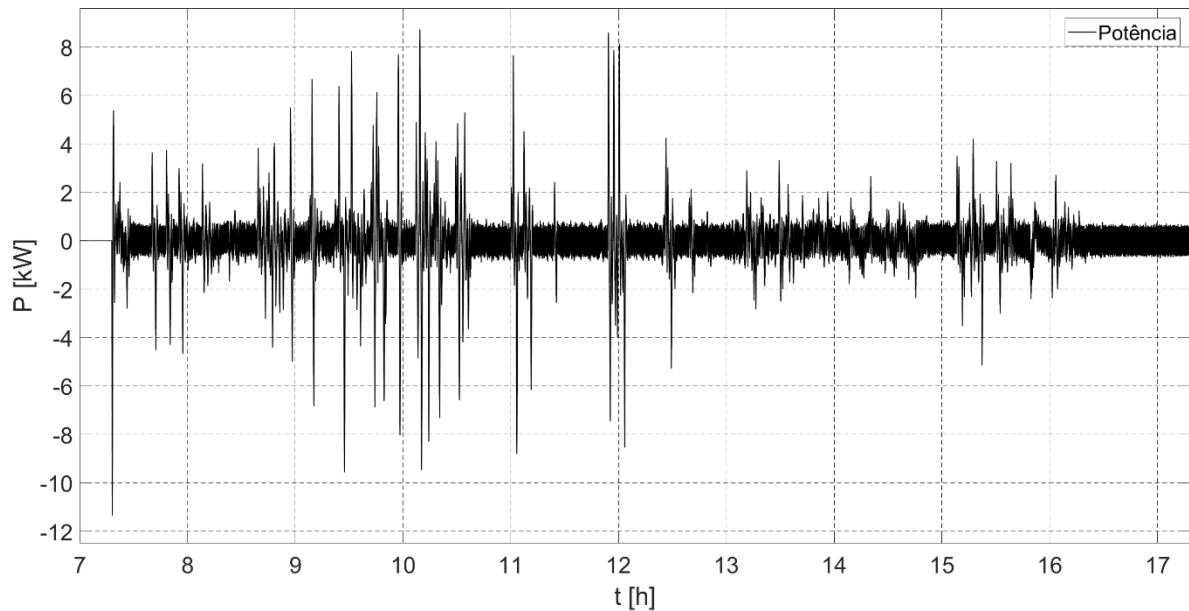


Fonte: Próprio Autor (2024).

Esta análise revela oscilações significativas na curva de potência analisada. Em particular, destaca-se que foram 12 ocorrências de rampas acima de 10%/15 minutos, dentro dos 42 intervalos analisados, o que representa 28,57% do total, chegando a variar no máximo, 45% da potência instalada dentro desse período. Essas constatações sugerem a presença de flutuações na potência injetada, com implicações diretas para a estabilidade e operacionalidade da rede elétrica.

Outra maneira de quantificar a intermitência da potência injetada na rede é calculando-se a potência ativa oscilante que é o fruto das harmônicas de alta frequência da curva de potência, para obter essa variável é necessário utilizar um filtro passivo que pode ser um filtro passa-baixa ou passa-alta. Optou-se por utilizar um filtro passa baixa e subtrair da potência ativa original o valor obtido na saída do filtro. Com isso foi possível traçar a curva da potência ativa oscilante indicada na Figura 15.

Figura 15 – Potência ativa oscilante sem compensação.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Analisando a curva da potência mostrada na Figura 15, pode-se pontuar que na maior parte do dia a amplitude da potência ativa oscilante injetada na rede estava em torno de 2 kW, mas com picos que podiam chegar até a 8 kW.

#### 4.5 Resultados utilizando o BESS

Para validar a eficácia do sistema, foram realizadas simulações utilizando um algoritmo implementado para aceitar rampas máximas de 30%/15min, 20%/15min e 10%/15min. Esta abordagem tem o intuito de avaliar o desempenho do BESS em diferentes cenários de variação de potência, proporcionando uma visão abrangente da capacidade do BESS de suavizar flutuações e garantir uma operação mais estável da usina FV.

Para compor o BESS foi escolhida a bateria Rontek 17330 de LiFePO<sub>4</sub> pelo seu preço competitivo e por ter a capacidade de armazenamento desejada. Os parâmetros que caracterizam o banco de baterias dimensionado são mostrados na Tabela 5.

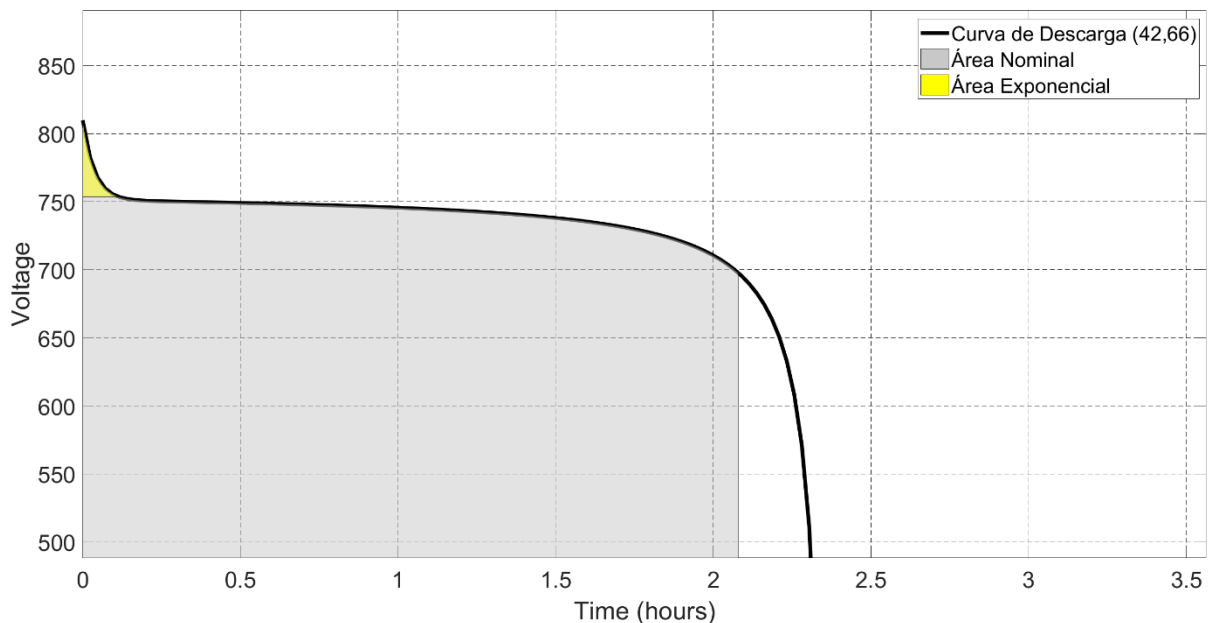
Tabela 5 - Parâmetros do BESS.

Parâmetros		
<b>Bateria Rontek 17330</b>	<b>Tipo</b>	LiFePO4
	<b>Tensão (V)</b>	3,2
	<b>Capacidade (Ah)</b>	0,45
<b>Banco de Baterias</b>	<b>Baterias em série</b>	218
	<b>Tensão (V)</b>	697,6
	<b>Capacidade Instalada (Ah)</b>	98,1
	<b>Capacidade Instalada (kWh)</b>	68,4

Fonte: Adaptado de STA Eletrônica (2024).

Com isso, é possível traçar a curva de descarga do BESS utilizando o MATLAB/Simulink, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Curva de descarga do BESS.



Fonte: Adaptado do MATLAB/Simulink (2024).

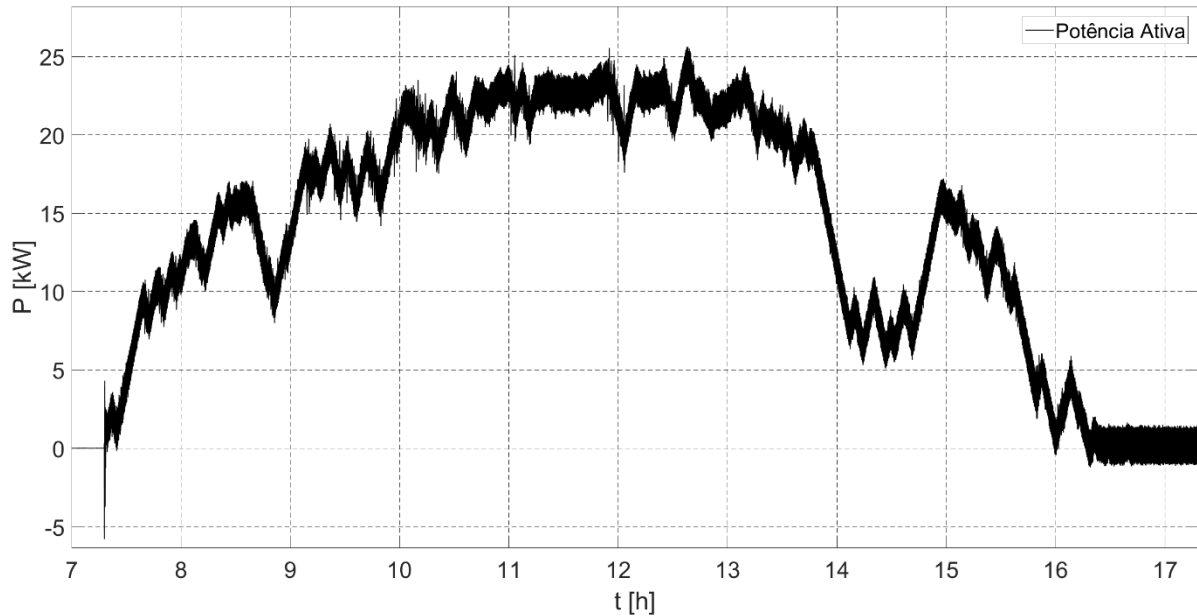
Ao informar os parâmetros do banco de baterias o próprio simulador é capaz de identificar a corrente nominal de descarga, a tensão de operação e de traçar a curva de descarga.

A Figura 16 foi traçada levando em consideração que a corrente nominal do banco de baterias proposto será de 42,66 A. Pode-se observar que a tensão de operação na zona nominal é em torno de 750 V, o que resulta em uma potência de 31,9 kW para essa zona. Para as simulações, optou-se por fazer o BESS começar o dia com 50% de carga, possibilitando fazer uma análise comparativa entre a carga no começo do dia, e a carga ao final do dia.

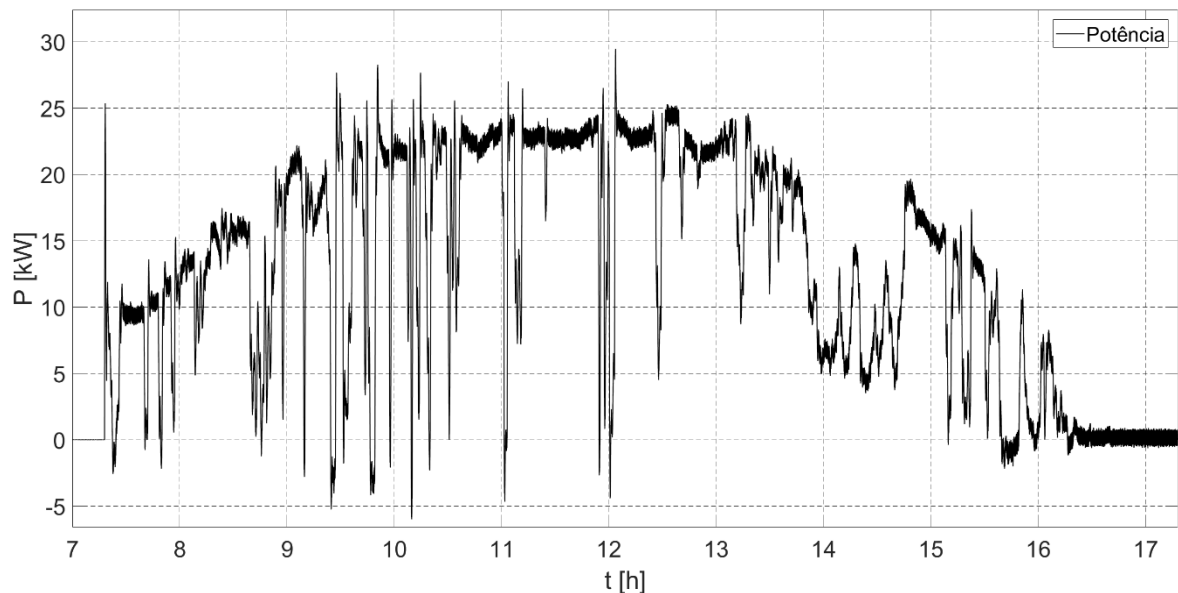
#### 4.5.1 Rampa máxima de 30%/15min

Parametrizando o banco de baterias para compensar qualquer rampa com valor absoluto maior que 30%/15min, foi possível obter a seguinte curva para a potência injetada na rede. O resultado está exposto na Figura 17.

Figura 17 – Curva de potência com BESS atuando a 30%/15min.



(a)



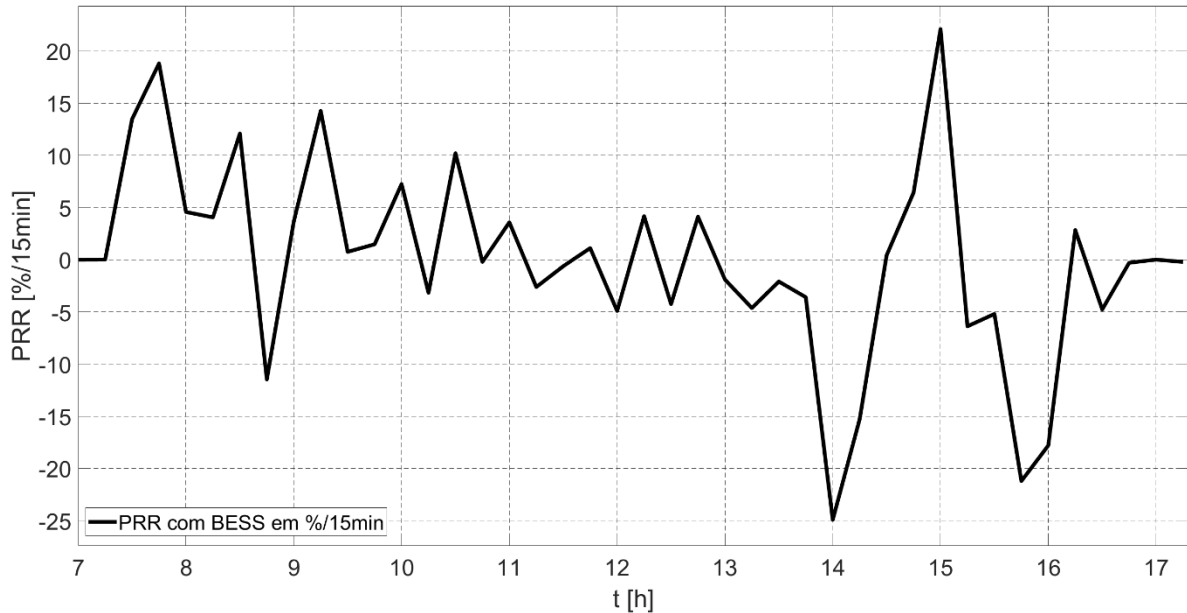
(b)

Fonte: Próprio Autor (2024).

Onde a Figura 17 (a) mostra a curva da potência injetada com a compensação do BESS e a Figura 17 (b) mostra a curva da potência injetada pelo inversor sem o BESS.

Fazendo a análise de PRR a maior rampa foi de 24,93%, ou seja, não houveram rampas superiores ao limite escolhido, como pode-se observar na Figura 18.

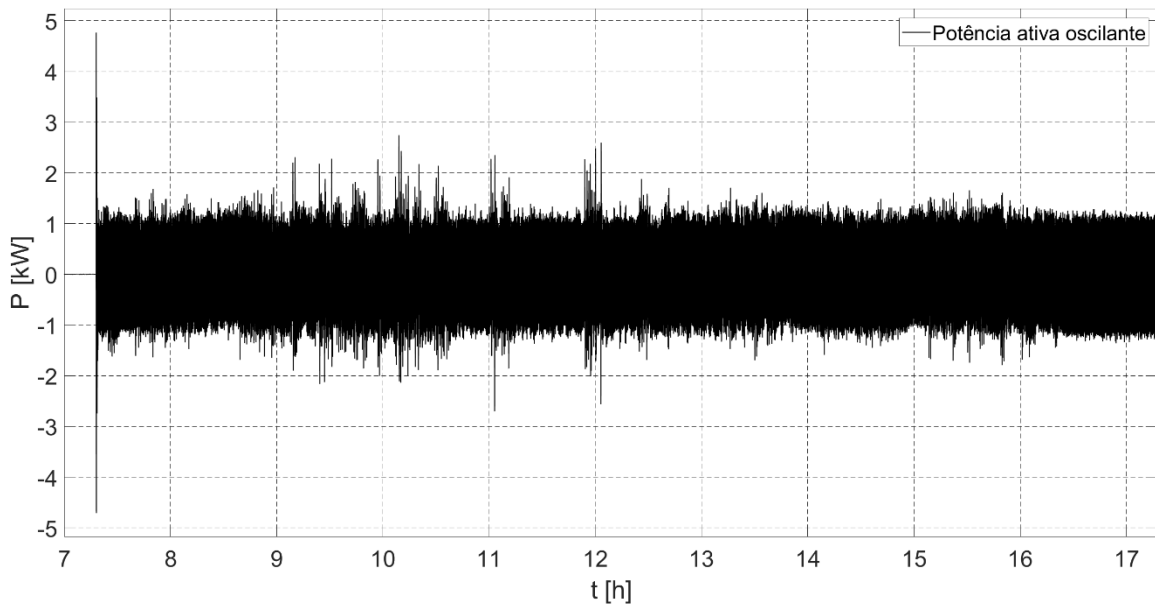
Figura 18– Ocorrência das rampas com BESS atuando a 30%/15min.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Já para a análise da potência ativa oscilante, foi traçada a curva indicada na Figura 19.

Figura 19– Potência ativa oscilante com BESS atuando a 30%/15min.

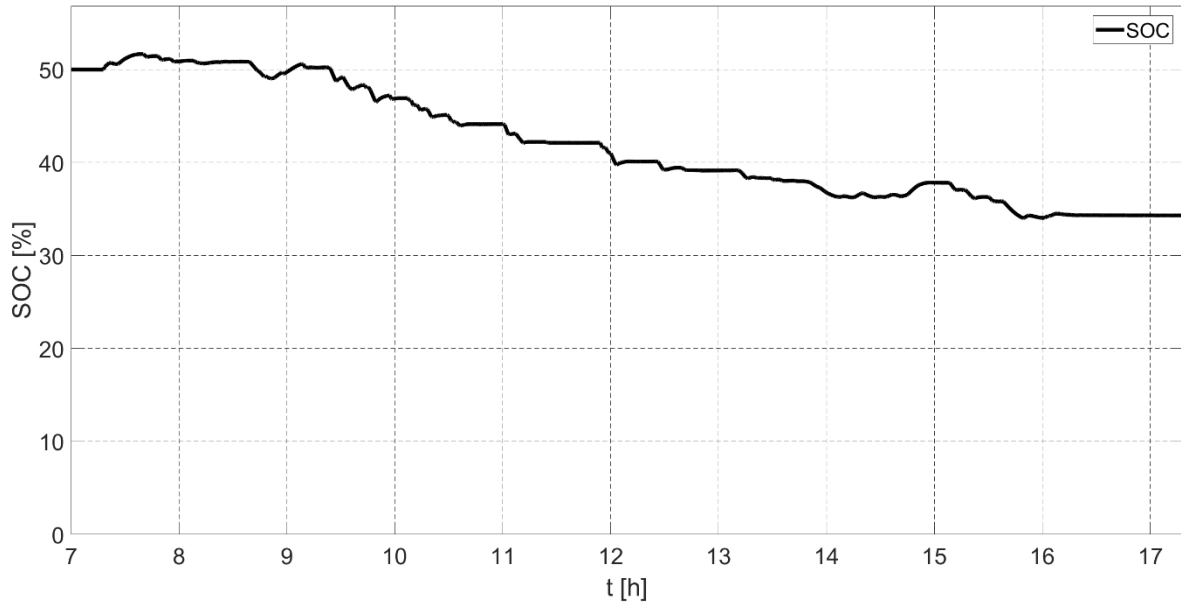


Fonte: Próprio Autor (2024).

Analisando a curva da potência ativa oscilante mostrada na Figura 19, concluiu-se que na maior parte do dia a amplitude da potência ativa oscilante injetada na rede estava em torno de 2 kW, mas com picos que podiam chegar até 4,76 kW.

O *State of Charge* (SOC) representa a carga, em porcentagem, do banco de baterias, variável que foi utilizada como método para quantificar a utilização do BESS ao longo do dia. A curva do SOC, para esse cenário, foi traçada na Figura 20.

Figura 20 – SOC com BESS atuando a 30%/15min.



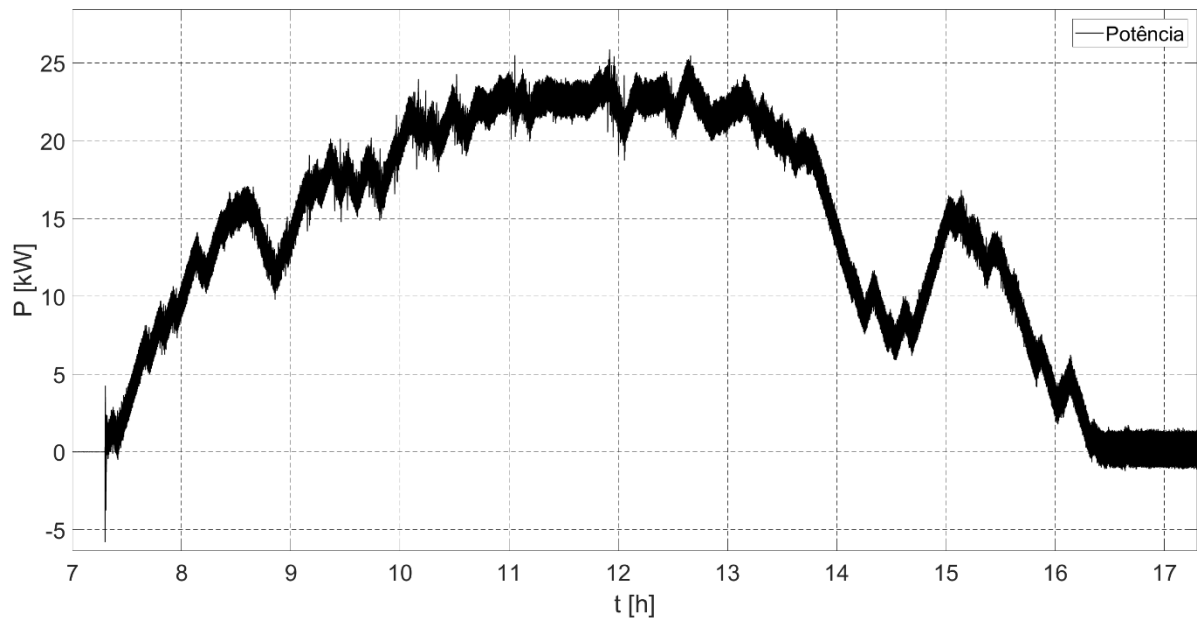
Fonte: Próprio Autor (2024).

Começando o dia com 50% de carga o BESS foi carregado na primeira metade do dia para compensar picos de potência, e chegou a ter um SOC máximo de 51,67%, na segunda metade do dia quando o BESS foi utilizado para compensar os vales na potência injetada, o valor mínimo para o SOC foi de 34,02%.

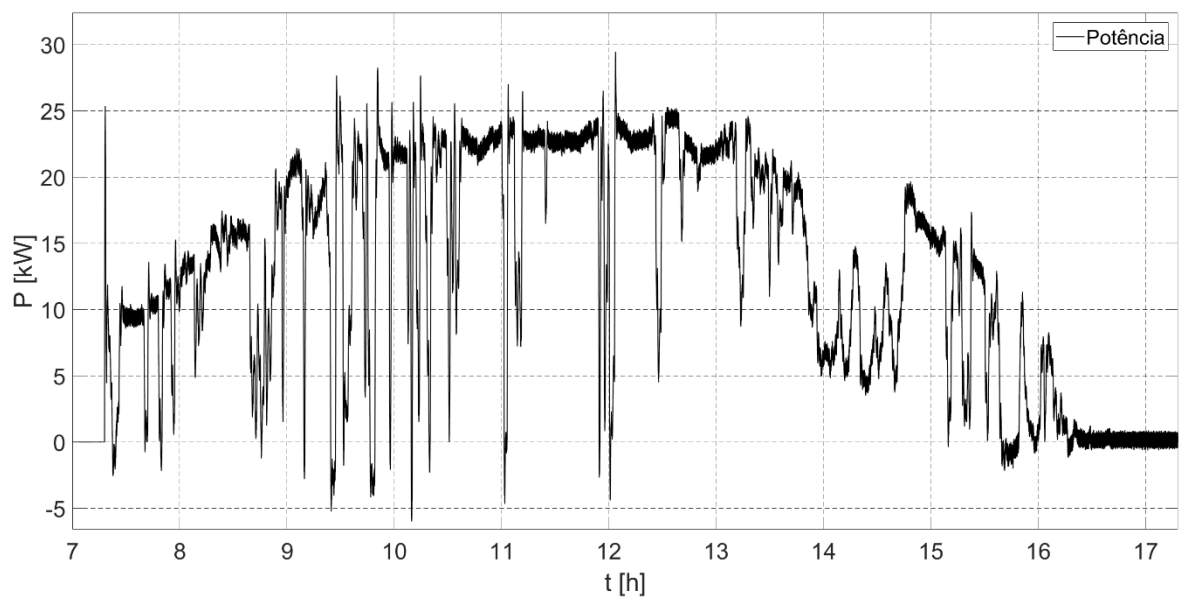
#### 4.5.2 Rampa máxima de 20%/15min

Configurando o banco de baterias para compensar qualquer rampa com valor absoluto superior a 20%/15min, foi traçada na Figura 21, a curva para a potência injetada na rede.

Figura 21 - Curva de potência com BESS atuando a 20%/15min.



(a)



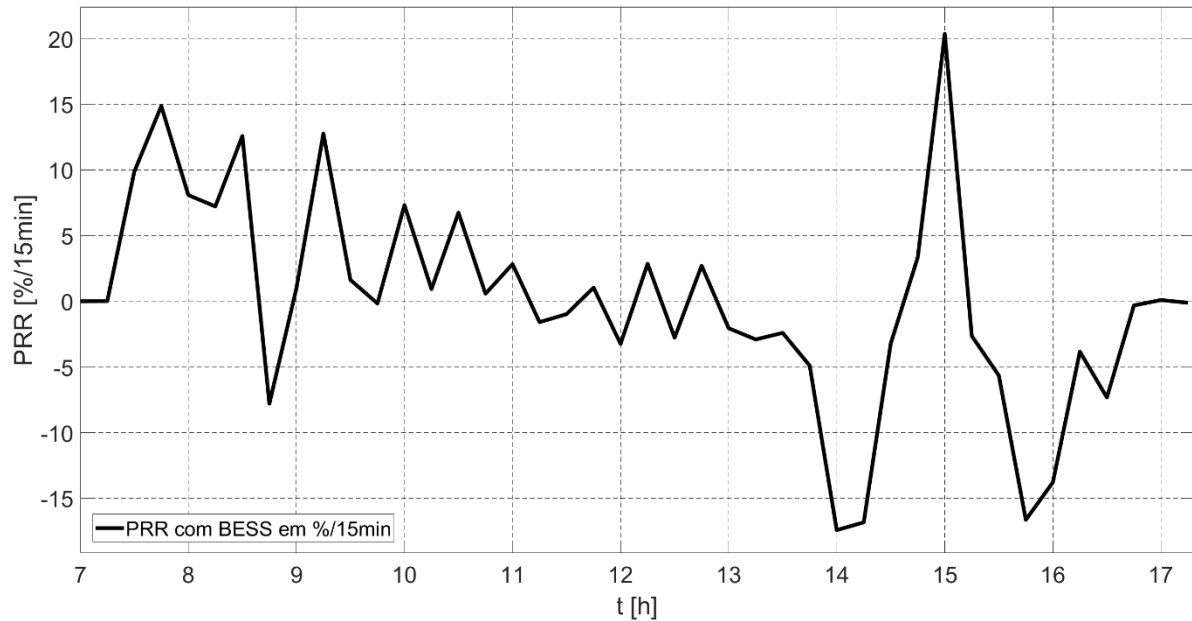
(b)

Fonte: Próprio Autor (2024).

De maneira análoga à Figura 17, a Figura 21 (a) é a potência injetada na rede para o cenário em questão, enquanto que na Figura 21 (b) é a potência injetada sem o BESS.

Nesse cenário, a maior variação registrada foi de 20,36%, sendo a única rampa que ultrapassou o limite definido. É possível comprovar essa observação através da Figura 22.

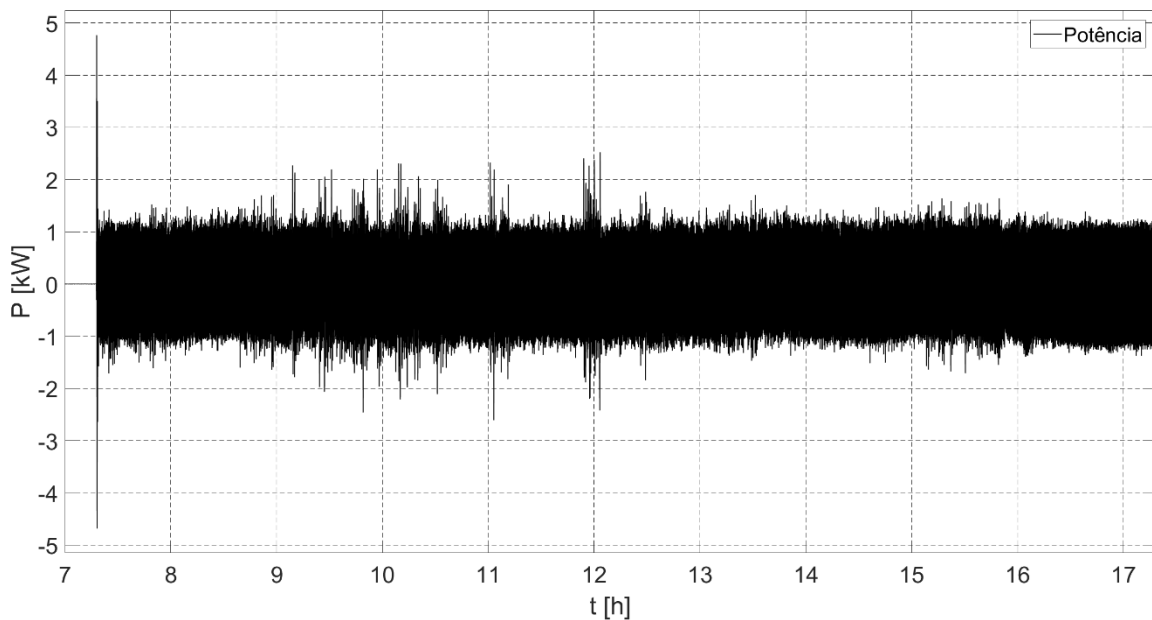
Figura 22 - Ocorrência das rampas com BESS atuando a 20%/15min.



Fonte: Próprio Autor (2024).

A curva da potência ativa oscilante para o caso em questão encontra-se na Figura 23.

Figura 23 – Potência ativa oscilante com BESS atuando a 20%/15min.

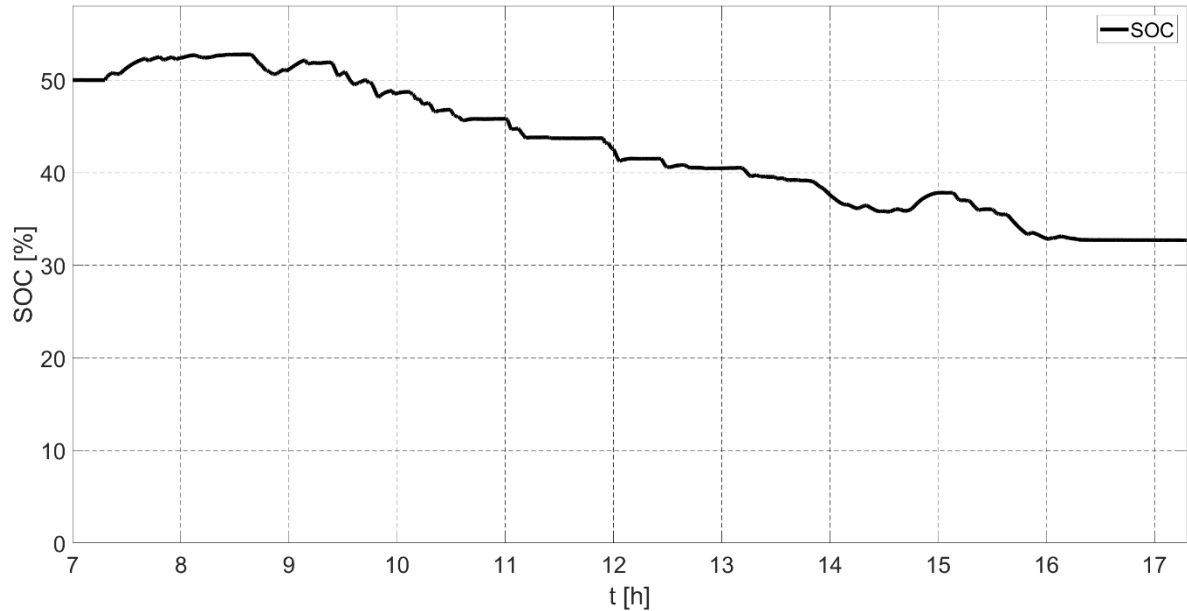


Fonte: Próprio Autor (2024).

Não foi possível perceber redução na potência ativa oscilante entre os dois cenários expostos, visto que nesse cenário a potência ativa oscilante teve amplitude em torno de 2 kW ao longo do dia e com o mesmo pico máximo do caso anterior.

A curva do SOC ao longo do dia encontra-se na Figura 24.

Figura 24 – SOC com BESS atuando a 20%/15min.



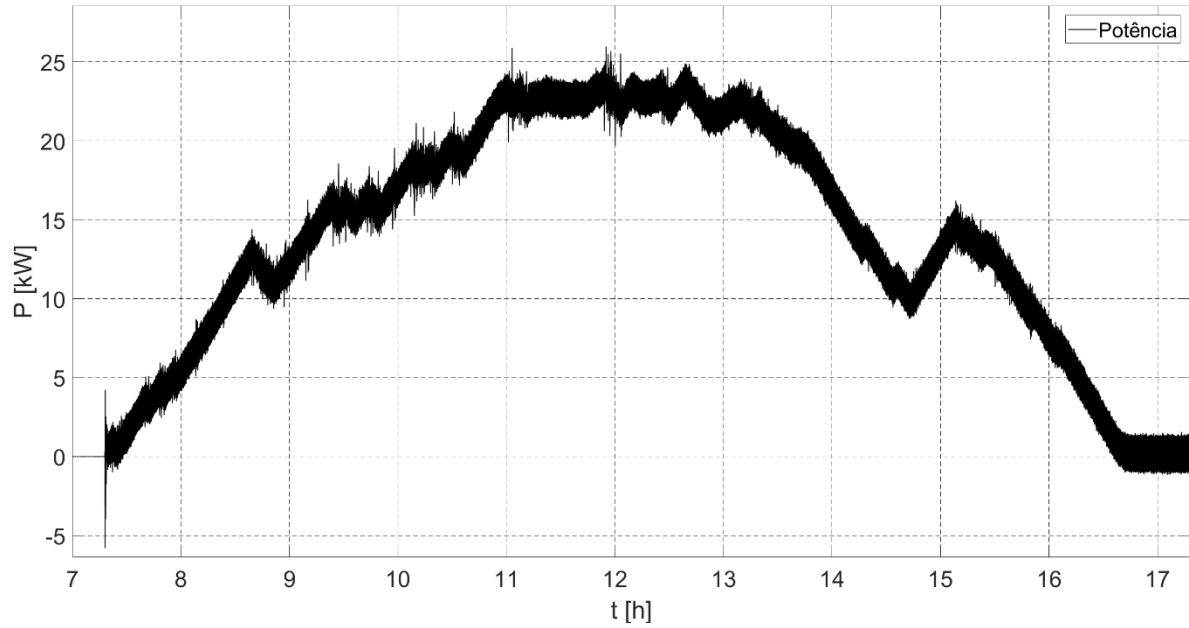
Fonte: Próprio Autor (2024).

Na primeira metade do dia o BESS carregou-se um 1,1% a mais que no cenário anterior, chegando a 52,77%, e terminou o dia, também acima dos 30%, tendo como valor mínimo 32,70%.

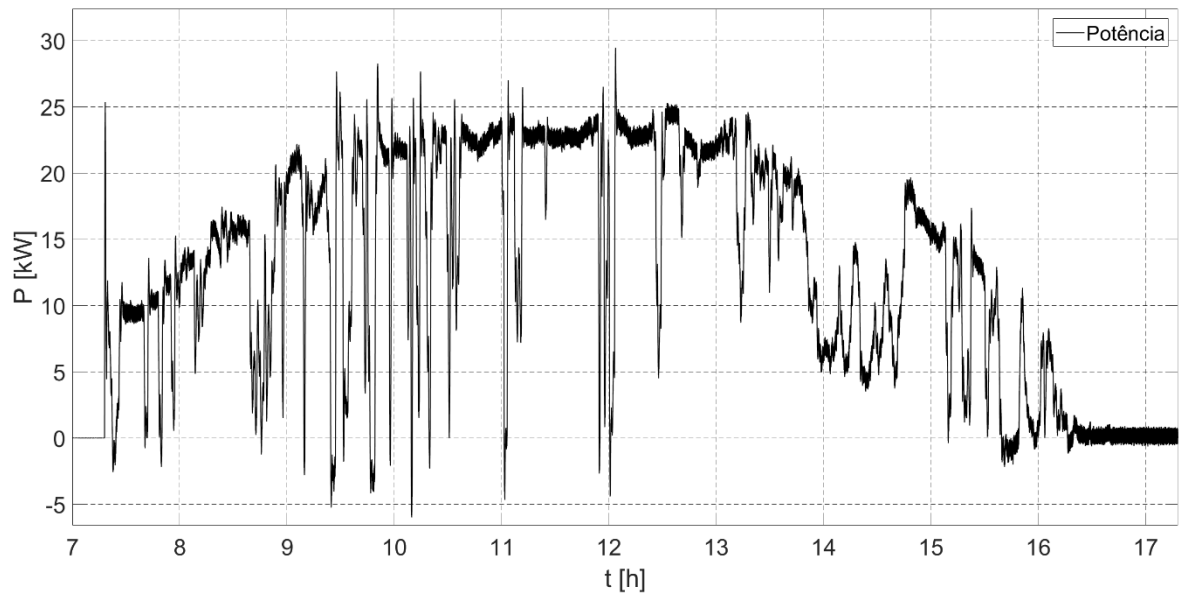
#### 4.5.3 Rampa máxima de 10%/15min

Configurando o banco de baterias para neutralizar rampas com valor absoluto maior que 10% a cada 15 minutos, é possível observar na Figura 25 a curva de potência injetada na rede.

Figura 25- Curva de potência com BESS atuando a 10%/15min.



(a)



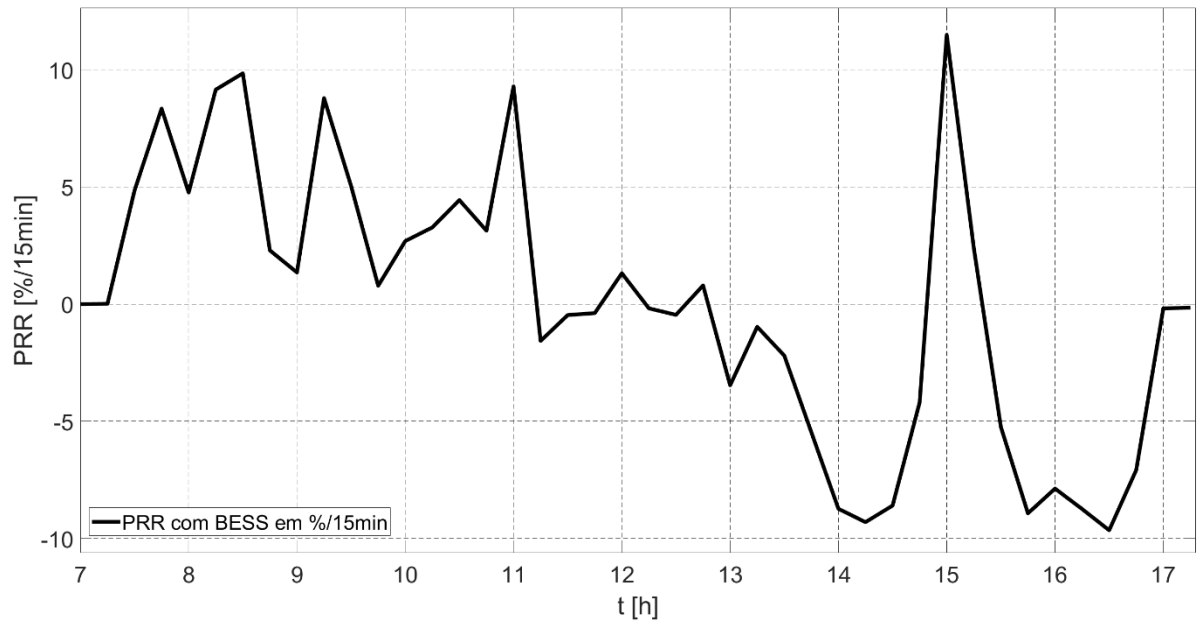
(b)

Fonte: Próprio Autor (2024).

Novamente, a Figura 25 (b) é a potência injetada sem o BESS e a Figura 25 (a) é a potência injetada na rede após o BESS.

Neste exemplo, a rampa máxima atingiu 11,49%, sendo a única ocorrência de rampas que ultrapassaram o limite definido, como ilustra a Figura 26.

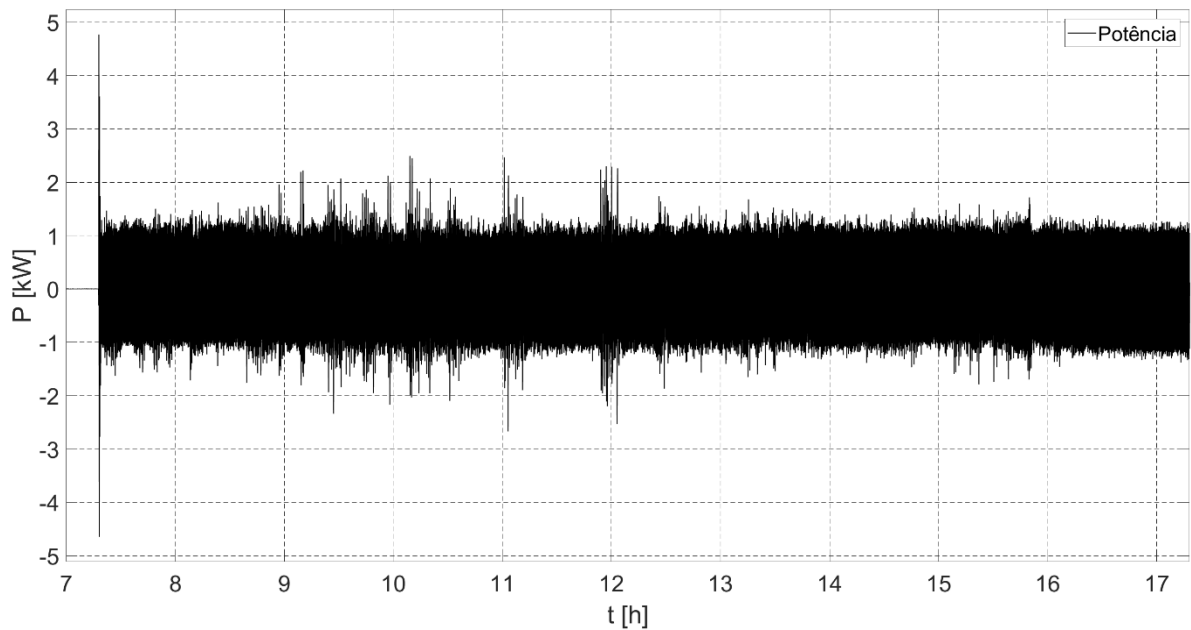
Figura 26 - Ocorrência das rampas com BESS atuando a 10%/15min.



Fonte: Próprio Autor (2024).

A curva de potência ativa oscilante para este cenário encontra-se na Figura 27.

Figura 27 – Potência ativa oscilante com BESS atuando a 10%/15min.

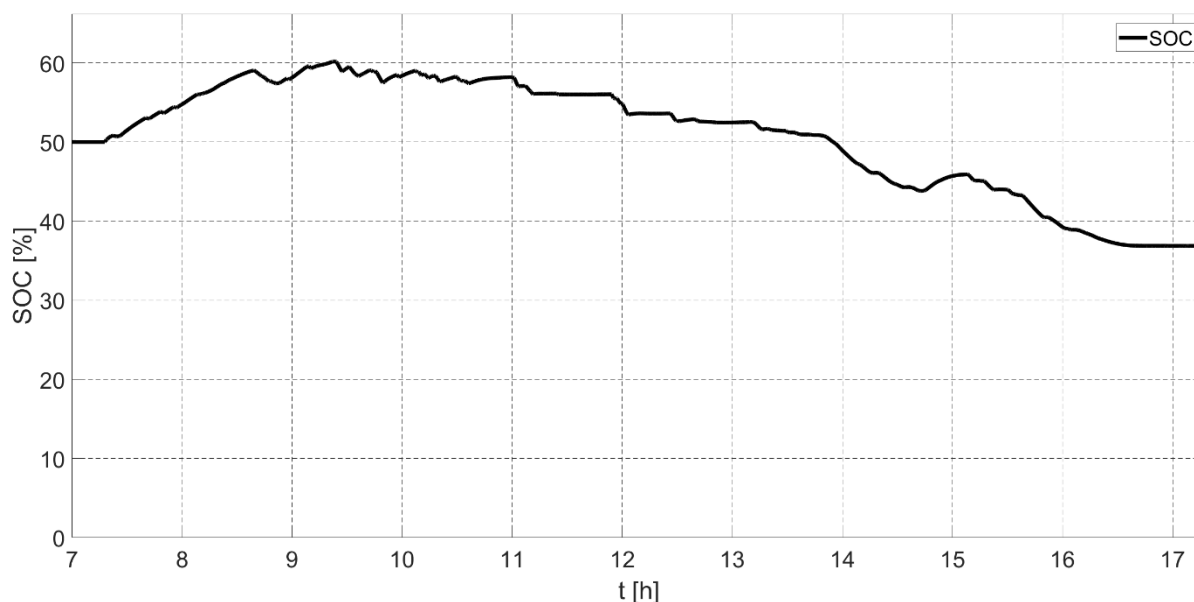


Fonte: Próprio Autor (2024).

Nota-se que não houve redução significativa no valor da amplitude da potência ativa oscilante entre três cenários analisados que permaneceu em 2 kW.

O SOC ao longo do dia para o cenário em questão está explicitado na Figura 28.

Figura 28 – SOC com BESS atuando a 10%/15min.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Nota-se como o BESS necessitou ser carregado na primeira metade do dia, chegando a 60,18% de carga, o que facilitou a segunda metade do dia, levando ao maior valor mínimo registrado para o SOC, 36,87%.

#### 4.6 Discussão dos Resultados

Nesta secção foram levantados os parâmetros necessários para a simulação do sistema no MATLAB/Simulink. Logo após foi feita a simulação sem nenhuma estratégia de compensação, o que gerou uma curva de geração com alta parcela de potência ativa oscilante, tanto em pico, 11,36 kW, como na maior parte do dia, 4,5 kW. Ademais foi possível quantificar a variação da potência injetada ao longo dos 42 intervalos de 15 minutos, análise que evidenciou variações de até 45% da potência instalada em apenas 15 minutos. E então o BESS foi utilizado para suavizar a curva de geração em 3 cenários.

No primeiro cenário o BESS foi parametrizado para atuar em rampas maiores que 30% dentro do intervalo de medição. Foi possível zerar o número de rampas acima da estipulada e também diminuir a potência ativa oscilante injetada, passando de 4,5 kW para 1 kW na maior parte do dia, e reduzindo também o valor de pico da potência ativa oscilante, que foi de 11,36 kW para 4,76 kW.

No segundo cenário o BESS foi parametrizado para atuar em rampas maiores que 20% dentro do intervalo de medição. Houve apenas 1 rampa acima da estipulada e os mesmos valores do cenário anterior para a potência ativa oscilante.

No terceiro cenário o BESS foi parametrizado para atuar em rampas maiores que 10% dentro do intervalo de medição. Também foi possível compensar todas as rampas acima da estipulada, com exceção de apenas uma. Os três cenários reduziram a potência ativa oscilante para a mesma ordem de grandeza.

Por fim, o BESS mostrou-se bem dimensionado não chegando a valores críticos de carga em nenhum dos cenários apresentados, mesmo no cenário em que o BESS estava atuando no maior número de ocorrências, quando o BESS estava programado para compensar qualquer rampa com taxa acima de 10%/15min.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho, teve como objetivo melhorar a qualidade da energia injetada na rede por plantas FV para, assim, contribuir com as lacunas encontradas através da revisão bibliográfica. Por meio de simulações, foi implementado um algoritmo que utiliza o BESS para suavizar a curva da potência característica da geração FV.

Para atingir este objetivo concentrou-se, primeiramente, na fundamentação teórica da aplicação do VOC em sistemas de geração FV, colocando o presente trabalho, em relação à literatura existente, na posição de usar de sistemas de armazenamento de energia para mitigar problemas associados a intermitências na geração FV. Foram desenvolvidos matematicamente todos os componentes necessários a essa aplicação, tais como o VOC, utilizado para controle das potências ativa e reativa injetadas na rede; o algoritmo MPPT escolhido; o algoritmo do PLL implementado; e por fim, o algoritmo de controle do BESS.

Com base nos resultados obtidos, pôde-se concluir que o algoritmo desenvolvido para a utilização do BESS demonstrou eficácia tanto em reduzir o número de ocorrências de rampas acima da taxa desejada, quanto em reduzir grande parte da potência ativa oscilante injetada pelo inversor na rede. Quando a taxa limite foi de 30%/15min houve uma redução de 100%, ou seja, nenhuma rampa foi superior à taxa máxima e a maior rampa foi de apenas 24,93% dentro do intervalo de demanda. Já para o limite de 20%/15min houve apenas uma ocorrência superior ao limite e foi de 20,36%/15min. Para o caso mais crítico onde o algoritmo devia aceitar apenas rampas inferiores a 10%/15min, o sistema passou de 12 ocorrências de rampas superiores ao limite, com o BESS desligado, tendo rampa máxima de 45%/15min, para apenas 1 ocorrência, com no máximo 11,49%/15min após a intervenção do BESS. Essa significativa redução demonstra a capacidade do algoritmo em controlar de forma eficiente as variações repentinas na potência injetada pela planta FV, proporcionando uma operação mais estável do sistema de energia.

Isso conclui a lista de objetivos específicos, pois foi desenvolvida uma estratégia de controle capaz de utilizar armazenamento em baterias para suavizar a curva de operação de plantas FV; foram implementadas simulações computacionais que validaram a integração do VOC e do BESS e foi analisada a melhoria na qualidade da energia elétrica injetada na rede. O objetivo principal, validar a eficácia da utilização do algoritmo de controle vetorial combinada sistemas de armazenamento de energia para suavizar a curva de operação de uma planta FV, também foi atingido como consequência.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Apesar dos avanços alcançados, o estudo reconhece algumas limitações, como a necessidade de estudos adicionais para ratificar metodologia proposta como a implementação em bancada.

Considerando os resultados promissores, surgem diversas oportunidades para novas investigações no campo da qualidade de energia. Uma abordagem interessante seria implementar a mesma solução, porém utilizando o FAP em vez do BESS, e então comparar o desempenho das duas soluções. Essa comparação poderia fornecer *insights* valiosos sobre as vantagens e desvantagens de cada abordagem, ajudando a orientar futuras implementações em sistemas reais. Além disso, existe a possibilidade de explorar a integração do FAP com a topologia atual do VOC. Esta abordagem híbrida poderia potencializar os benefícios de ambas as tecnologias, resultando em um sistema ainda mais robusto e eficiente.

## 5.2 Trabalhos Aprovados

“Análise da Utilização de Sistemas de Armazenamento de Energia na Suavização da Curva de Operação de uma Usina Fotovoltaica Flutuante” foi ACEITO para apresentação no XXV Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2024).

## REFERÊNCIAS

- AHMED, Jubaer; SALAM, Zainal. A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 933-953, jul. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.080>. Acesso em: 21 set. 2024.
- ASSIS, Dionizio Porfírio de. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO COM REDE LORA APLICADO A UMA PLANTA FOTOVOLTAICA. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) - Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- CARRIERE, Thomas *et al.* Strategies for combined operation of PV/storage systems integrated into electricity markets. **IET Renewable Power Generation**, v. 14, n. 1, p. 71-79, 31 maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.0375>. Acesso em: 21 set. 2024.
- CASTILLO, Tuesman D.; CASTRO, Jose Raul. Renewable Energy Source P-V conected to the grid through Shunt Active Power Filter based in P-Q theory. *In*: 2018 IEEE THIRD ECUADOR TECHNICAL CHAPTERS MEETING (ETCM), 2018, Cuenca, Ecuador. **2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)**. [S. l.]: IEEE, 2018. ISBN 9781538666579. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/etcm.2018.8580274>. Acesso em: 21 set. 2024.
- CEAKI, Oana *et al.* Analysis of the grid-connected PV plants behavior with FACTS influence. *In*: 2014 49TH INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC), 2014, Cluj-Napoca, Romania. **2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S. l.]: IEEE, 2014. ISBN 9781479965571. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/upec.2014.6934822>. Acesso em: 21 set. 2024.
- CHAVAN, Govind *et al.* Damping of power oscillations induced by photovoltaic plants using distributed series-connected FACTS devices. *In*: 2017 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, 2017, Cincinnati, OH. **2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. [S. l.]: IEEE, 2017. ISBN 9781509048946. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ias.2017.8101759>. Acesso em: 21 set. 2024.
- CONTE, Francesco *et al.* A Stochastic Optimization Method for Planning and Real-Time Control of Integrated PV-Storage Systems: Design and Experimental Validation. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 9, n. 3, p. 1188-1197, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tste.2017.2775339>. Acesso em: 21 set. 2024.
- DEVASSY, Sachin; SINGH, Bhim. Design and Performance Analysis of Three-Phase Solar PV Integrated UPQC. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 1, p. 73-81, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tia.2017.2754983>. Acesso em: 21 set. 2024.
- GAUTAM, Shivansh; AGRAWAL, Seema. Performance Analysis of Three Phase Grid Connected PV Array with ANN Controlled SAPF. *In*: 2021 2ND GLOBAL CONFERENCE FOR ADVANCEMENT IN TECHNOLOGY (GCAT), 2021, Bangalore, India. **2021 2nd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)**. [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/gcat52182.2021.9587532>. Acesso em: 21 set. 2024.

- HU, Ruonan *et al.* Coordinated active and reactive power control for distribution networks with high penetrations of photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 231, p. 809-827, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.025>. Acesso em: 21 set. 2024.
- LI, Xiangjun; HUI, Dong; LAI, Xiaokang. Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 2, p. 464-473, abr. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tste.2013.2247428>. Acesso em: 21 set. 2024.
- LIAO, Huilian; MILANOVIĆ, Jovica V. On capability of different FACTS devices to mitigate a range of power quality phenomena. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 11, n. 5, p. 1202-1211, 30 mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1017>. Acesso em: 21 set. 2024.
- LIN, Qirong *et al.* Optimal control of battery energy storage system integrated in PV station considering peak shaving. *In: 2017 CHINESE AUTOMATION CONGRESS (CAC), 2017, Jinan. 2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. [S. l.]: IEEE, 2017. ISBN 9781538635247. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/cac.2017.8243243>. Acesso em: 21 set. 2024.
- LIU, Mingjun *et al.* Reliability Evaluation of Large Scale Battery Energy Storage Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 8, n. 6, p. 2733-2743, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tsg.2016.2536688>. Acesso em: 21 set. 2024.
- MOAWWAD, Ahmed; KHADKIKAR, Vinod; KIRTLEY, James L. Photovoltaic power plant as FACTS devices in multi-feeder systems. *In: IECON 2011 - 37TH ANNUAL CONFERENCE OF IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2011, Melbourne, Vic, Australia. IECON 2011 - 37th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. [S. l.]: IEEE, 2011. ISBN 9781612849720. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/iecon.2011.6119433>. Acesso em: 21 set. 2024.
- MOGHASSEMI, Ali; PADMANABAN, Sanjeevikumar. Dynamic Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies, Power Converters, Control Methods, and Modified Configurations. **Energies**, v. 13, n. 16, p. 4152, 11 ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13164152>. Acesso em: 21 set. 2024.
- MOHAMED, Amal Amin *et al.* Optimal Power Flow Incorporating Renewable Energy Sources and FACTS Devices: A Chaos Game Optimization Approach. **IEEE Access**, p. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3363237>. Acesso em: 21 set. 2024.
- MOHANTY, Asit; PATRA, Sandipan; RAY, Prakash K. Robust fuzzy-sliding mode based UPFC controller for transient stability analysis in autonomous wind-diesel-PV hybrid system. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 10, n. 5, p. 1248-1257, 7 abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1000>. Acesso em: 21 set. 2024.
- NAIR, Nirmal-Kumar C.; GARIMELLA, Niraj. Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 11, p. 2124-2130, nov. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.002>. Acesso em: 21 set. 2024.
- NIVEDHA, R.; BANU, R. Narmatha; PRAKASH, A. Om. Enhancement of grid power transmission limits using photovoltaic solar farm as STATCOM (PV-STATCOM). *In: 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING TECHNOLOGIES AND*

INTELLIGENT DATA ENGINEERING (ICCTIDE), 2016, Kovilpatti, India. **2016 International Conference on Computing Technologies and Intelligent Data Engineering (ICCTIDE)**. [S. l.]: IEEE, 2016. ISBN 9781467384377. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icctide.2016.7725325>. Acesso em: 21 set. 2024.

RAMADHAN, Muhammad Fajri *et al.* PV Intermittent Smoothing with BESS: A Case Study in Selayar Island Electrical Grid. *In: 2022 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ENGINEERING AND RENEWABLE ENERGY (ICPERE)*, 2022, Bandung, Indonesia. **2022 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)**. [S. l.]: IEEE, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icpere56870.2022.10037559>. Acesso em: 21 set. 2024.

ROLIM, Lus Guilherme Barbosa; RODRIGUES DA COSTA, Diogo; AREDES, Mauricio. Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing PLL Circuit Based on the pq Theory. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 53, n. 6, p. 1919-1926, dez. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/tie.2006.885483>. Acesso em: 21 set. 2024.

RAKHSHANI, Elyas *et al.* Integration of Large Scale PV-Based Generation into Power Systems: A Survey. **Energies**, v. 12, n. 8, p. 1425, 13 abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12081425>. Acesso em: 21 set. 2024.

RAPTIS, Dimitris A. *et al.* Optimal Siting of BESS in Distribution Networks under High PV Penetration. *In: 2018 53RD INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC)*, 2018, Glasgow. **2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S. l.]: IEEE, 2018. ISBN 9781538629109. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/upec.2018.8542010>. Acesso em: 21 set. 2024.

SHOUBAKI, Ehab *et al.* Synthetic inertia for BESS integrated on the DC-link of grid-tied PV inverters. *In: 2017 IEEE 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS FOR DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS (PEDG)*, 2017, Florianopolis, Brazil. **2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)**. [S. l.]: IEEE, 2017. ISBN 9781509053391. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/pedg.2017.7972515>. Acesso em: 21 set. 2024.

SOLTECH. PV Module 1STH-350-WH Details. 2024. Disponível em: <https://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/24996-1STH-350-WH-1Soltech>. Acesso em: 21 set. 2024.

STA ELETRÔNICA. BATERIAS RECARREGÁVEIS. 2024. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/produtos/baterias-recarregaveis/cilindricas-lifepo4/32v-450mah-17330>. Acesso em: 21 set. 2024.

VARMA, Rajiv K. *et al.* First in Canada, Night and Day Field Demonstration of a New Photovoltaic Solar-Based Flexible AC Transmission System (FACTS) Device PV-STATCOM for Stabilizing Critical Induction Motor. **IEEE Access**, v. 7, p. 149479-149492, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2935161>. Acesso em: 21 set. 2024.

XIAOQING, Hu; QIMING, Cheng. Application of UPFC Based on Improved Double-loop Decoupling PI Control in Photovoltaic Systems. *In: 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER DISTRIBUTED CONTROL AND INTELLIGENT ENVIRONMENTAL MONITORING (CDCIEM)*, 2012, Zhangjiajie, Hunan, China. **2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent**

**Environmental Monitoring (CDCIEM)**. [S. l.]: IEEE, 2012. ISBN 9781467304580. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/cdciem.2012.43>. Acesso em: 21 set. 2024.

YADAV, Shravan Kumar; YADAV, Krishna Bihari. The Role of BESS and UPQC in PV Integrated Power System for Power Quality Improvement: A Brief Review. *In: 2021 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART ELECTRONICS AND COMMUNICATION (ICOSEC)*, 2021, Trichy, India. **2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)**. [S. l.]: IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icosec51865.2021.9591826>. Acesso em: 21 set. 2024.

YANG, Yuqing *et al.* Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 109-125, ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047>. Acesso em: 21 set. 2024.

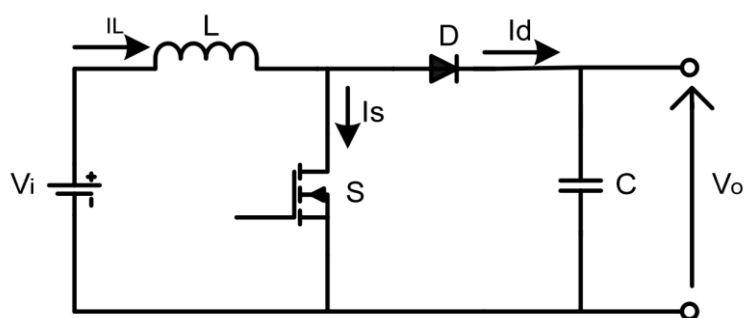
YELPALE, Priyanka R.; JADHAV, H. T.; CHORMALE, Chandrakant. New control strategy for grid integrated PV solar farm to operate as STATCOM. *In: 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIRCUIT ,POWER AND COMPUTING TECHNOLOGIES (ICCPCT)*, 2017, Kollam, India. **2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)**. [S. l.]: IEEE, 2017. ISBN 9781509049677. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/iccpct.2017.8074263>. Acesso em: 21 set. 2024.

ZHOU, Lai *et al.* Optimal Sizing of PV and BESS for a Smart Household Considering Different Price Mechanisms. **IEEE Access**, v. 6, p. 41050-41059, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/access.2018.2845900>. Acesso em: 21 set. 2024.

## APÊNDICE A – CONVERSOR *BOOST* APLICADO AO CONTROLE DA TENSÃO NO ELO CC

O conversor *Boost* é um dispositivo CC-CC que sintetiza em sua saída tensão igual ou superior a sua entrada. Sua entrada é caracterizada por se comportar como uma fonte de corrente, devido à presença de um indutor em série com a fonte de alimentação. Já sua saída é similar a uma fonte de tensão, devido à conexão de um capacitor em paralelo com saída do conversor. A topologia de um conversor *Boost* está representada na Figura 29

Figura 29 - Topologia do Conversor *Boost*.



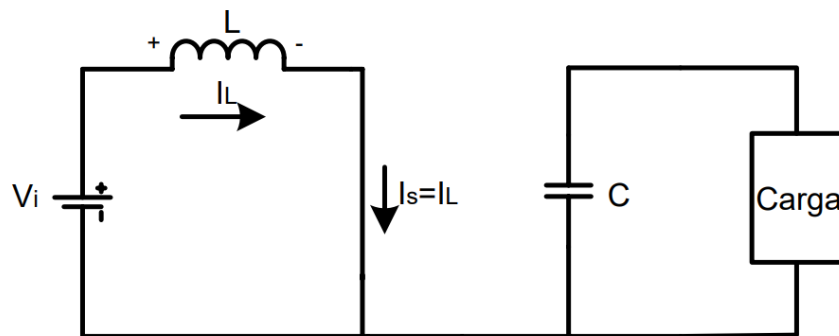
Fonte: Próprio Autor (2024).

Este conversor possui dois modos de operação, a depender dos parâmetros, o modo de condução contínua e o modo de condução descontínua, o modo de operação do conversor implica diretamente na estratégia de controle, por isso deve-se projetar o conversor de modo que seja garantida a operação em condição contínua para determinada faixa de potência.

O modo de condução contínua, MCC, pode ser estudado através das duas posições possíveis para a chave, ligada ou desligada, cada posição da chave terá a sua análise. Ambas as etapas serão descritas a seguir.

Na Figura 30 está descrito o circuito quando a chave S está ligada, o diodo D estará reversamente polarizado, fazendo com que a Fonte  $V_i$  carregue o indutor L, e quem fornecerá energia a carga nesta etapa será o capacitor C.

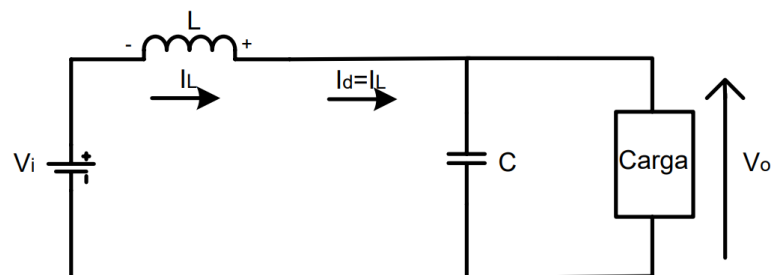
Figura 30 - Conversor *Boost* em MCC com chave S ligada.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Já na Figura 31 pode-se observar o circuito com a chave S desligada, o diodo D passa a estar diretamente polarizado, tanto a carga quanto o capacitor passam a receber energia da fonte, como mostra o circuito da figura a seguir:

Figura 31 - Conversor *Boost* em MCC com chave S desligada.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Para obter a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída, considerando o caso ideal, deve-se fazer o balanço de energia entre a entrada e a saída, de modo que a energia na entrada seja igual a energia na saída,  $E_i = E_o$  desprezando-se as perdas no caso ideal, sabendo-se que a corrente média no circuito é a corrente do indutor  $I_L$ :

$$E_i = V_i \cdot I_L \cdot T, \quad (19)$$

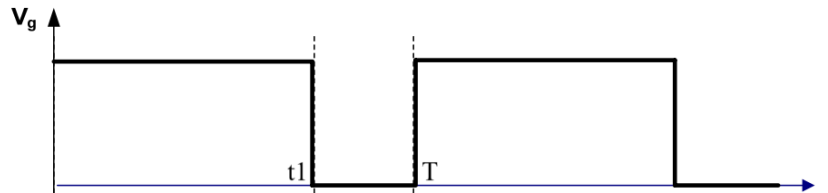
Onde T é o período de chaveamento da chave S, mas sabendo que a resistência só recebe corrente vinda do indutor quando a chave está aberta a energia de saída deve ser da forma:

$$E_o = V_o \cdot I_L \cdot (T - t_1). \quad (20)$$

Como mostrado na Figura 3.5,  $t_1$  é o tempo em que a chave passa fechada. A relação entre  $t_1$  e  $T$  é chamada de razão cíclica de trabalho ( $D$ ), para a qual, tem-se:

$$D = t_1/T. \quad (21)$$

Figura 32 - Tensão no gatilho da chave S.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Fazendo  $E_i = E_o$ :

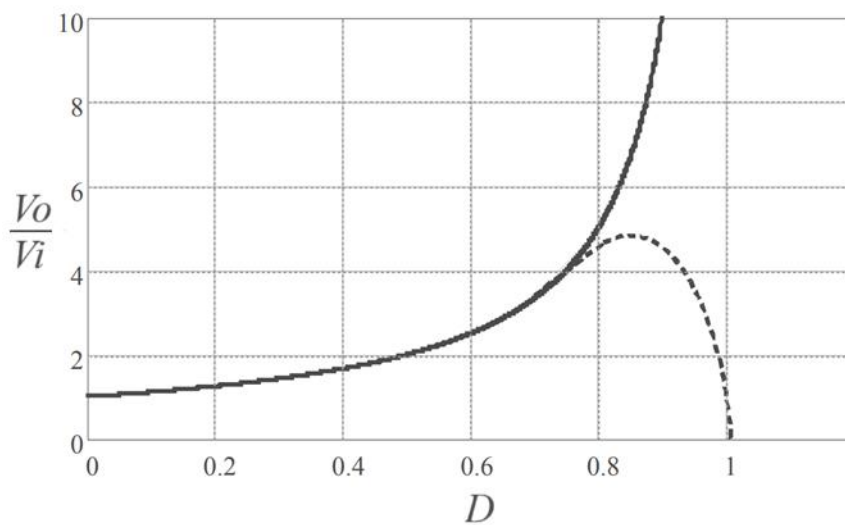
$$V_i \cdot I_L \cdot T = V_o \cdot I_L \cdot (T - D \cdot T),$$

Ou seja:

$$V_o/V_i = \frac{1}{(1-D)}. \quad (22)$$

A Figura 33 mostra a relação  $V_o/V_i$  em função de  $D$  no conversor *Boost*.

Figura 33 – Ganho de tensão em função de  $D$  no conversor *Boost*.



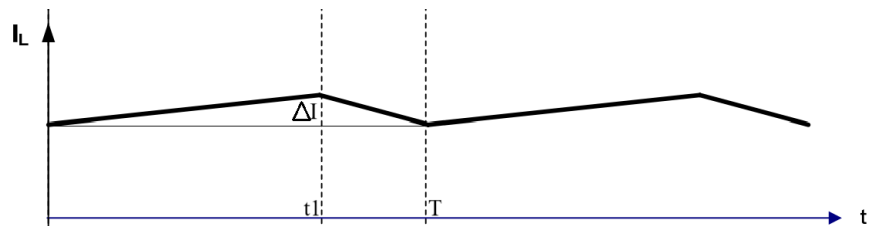
Fonte: Próprio Autor (2024).

A linha contínua representa o ganho de tensão ideal para o conversor *Boost*, seguindo estritamente a relação da equação (22), já a linha pontilhada representa a real curva

de ganho de tensão do conversor, que atinge a tensão máxima de saída próximo de  $D=0,8$  e tem tensão de saída nula em  $D=1$ .

Para o dimensionamento do indutor é necessário observar a forma de onda da corrente no indutor, que se encontra na Figura 34.

Figura 34 - Corrente no indutor do conversor *Boost*.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Sabendo-se que quando a chave está fechada a tensão no indutor é constante igual e  $V_i$  pode-se afirmar que, para essa etapa:

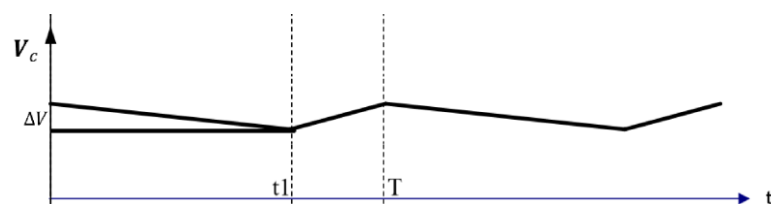
$$V_i = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (23)$$

Logo fazendo  $\Delta t = D \cdot T$  a indutância será uma função tal qual:

$$L = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{\Delta I} \quad (24)$$

Já para dimensionar o capacitor é necessário analisar a forma de onda da tensão no capacitor, que se encontra na Figura 35.

Figura 35 – Tensão no Capacitor do conversor *Boost*.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Sabe-se que quando a chave está fechada o capacitor se descarrega com uma corrente constante no valor da corrente média da carga. Com isso, tem-se:

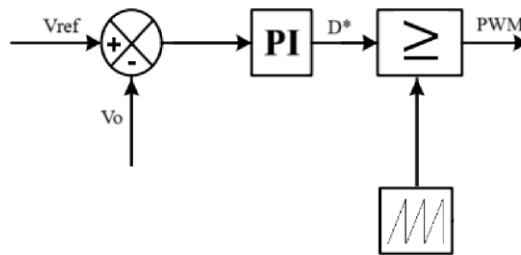
$$I_0 = C \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (25)$$

Ou seja, a capacitância depende da potência entregue a carga  $P_0 = V_0 \cdot I_0$ . Logo fazendo  $\Delta t = D \cdot T$  a capacitância será uma função tal que:

$$C = \frac{I_0 \cdot D \cdot T}{\Delta V}. \quad (26)$$

Para o controle da tensão no elo CC, foi utilizada uma malha simples representada na Figura 36.

Figura 36 - Diagrama de blocos da malha de controle de tensão.



Fonte: Próprio Autor (2024).

Foi realizado um processo de comparação entre a tensão de saída do conversor *Boost* e uma tensão de referência. O erro resultante foi utilizado para alimentar um controlador proporcional-integral (PI), cujas constantes estão mostradas na Tabela 6, que regula o valor estimado para a variável D. A partir disso, comparou-se o valor estimado de D com uma forma de onda dente de serra, obtendo assim o pulso PWM necessário para acionar a chave S de modo a manter a tensão no elo CC constante.

Tabela 6- Constantes utilizadas para o PI do Boost.

Constantes	
$K_p \left( \frac{1}{V} \right)$	0,01
$K_i \left( \frac{1}{s \cdot V} \right)$	0,1

Fonte: Próprio Autor (2024).