



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

FELIPE JOSÉ PEREIRA FERREIRA

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE GERAÇÃO DE  
REFERÊNCIA PARA SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA**

Recife  
2024

FELIPE JOSÉ PEREIRA FERREIRA

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE GERAÇÃO  
DE REFERÊNCIA PARA SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto

Coorientador: Prof. M.Sc. Ricardo Moura de Souza

Recife  
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Ferreira, Felipe José Pereira.

Análise e comparação de algoritmos de suavização de potência para geração de referência / Felipe José Pereira Ferreira. - Recife, 2024.

58 p : il., tab.

Orientador(a): Rafael Cavalcanti Neto

Cooorientador(a): Ricardo Moura de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. Suavização de Potência. 2. Geração de Referência. 3. Fotovoltaica . 4. Processamento de Energia. 5. Sistemas de Armazenamento de Energia. I. Neto, Rafael Cavalcanti. (Orientação). II. de Souza, Ricardo Moura. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

FELIPE JOSÉ PEREIRA FERREIRA

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE ALGORITMOS DE GERAÇÃO  
DE REFERÊNCIA PARA SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovado em: 22/02/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. M.Sc. Ricardo Moura de Souza (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Eduardo José Barbosa (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. M.Sc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

Primeiro, gostaria de agradecer à minha família, aos meus pais Jucelino e Claudia, por sempre me incentivarem a ser a melhor versão de mim. À minha irmã, Maria Clara, que sempre me apoiou, incondicionalmente. Aos meus avós, Aguinaldo José e Marlene Ricardo, *in memoriam*, pelos ensinamentos que levarei por toda a minha vida.

Agradeço, também, ao professor Rafael Cavalcanti Neto, pela extensa orientação ao decorrer do curso me incentivando e mostrando o que é fazer pesquisa. A Valdemar Cavalcante, quem foi um pivô para o meu desenvolvimento acadêmico. A Ricardo Moura de Souza, pelo companheirismo ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos amigos do Grupo de Eletrônica de Potência (GEPAE), Ericles, Tiago, Nathan, Camila, Renato, Eduardo Augusto, Eduardo Barbosa, Néstor, Gustavo, Carol e Antônio por todos os momentos, seja de aprendizado, ensinamento ou na convivência do dia a dia. Também, para todos os amigos feitos durante a graduação, em especial para Beatriz, Iago, Clarissa, Genilson e PH.

Agradeço muito, especialmente, a todos os amigos que fazem parte da minha vida desde os anos do colégio. Mesmo seguindo caminhos acadêmicos e rumos de vida diferentes, a presença de vocês foi um presente valioso que iluminou meus dias e enriqueceu cada momento. Mesmo distantes na maior parte do tempo, trouxeram alegria e apoio, tornando tudo mais leve.

Por fim, gostaria de agradecer os professores do Departamento de Engenharia Elétrica que distribuíram conhecimento e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pelo desenvolvimento acadêmico.

## RESUMO

Com a expansão das energias renováveis, como solar e eólica, em microrredes, definida como associações de gerações distribuídas, surge a demanda por soluções eficientes para lidar com o perfil intermitente dessa geração e otimizar o fornecimento durante variações de demanda. Embora as fontes de energias renováveis promovam a sustentabilidade, seus perfis de geração intermitente na rede elétrica podem gerar problemas, como desvios de frequência e oscilações de tensão. Na literatura, existem diversos métodos de controle para contornar esse problema; Entretanto, muitos desses métodos resultam em perda de energia devido à ausência de Sistemas de Armazenamento de Energia. Os *Energy Storage System* (ESS), ajustam-se para absorver ou fornecer energia conforme a demanda, promovendo, assim, um equilíbrio entre oferta e demanda e aprimorando a estabilidade do sistema. Dessa forma, o presente trabalho busca, explorar diferentes métodos de geração de referência para sistemas de suavização de potência, nos quais são utilizados ESS. Portanto, são avaliados três métodos principais de geração de referência, sendo eles baseados em média móvel, taxa de rampa e filtro passa-baixas. A partir do conjunto de dados disponibilizado publicamente pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), os dados são com o objetivo de padronizá-los, utilizando a linguagem de programação *Python*. Posteriormente, os métodos de geração de referência são implementados utilizando o *software* MATLAB/*Simulink*, e os dados processados são aplicados em simulação. Finalmente, é feita a comparação entre os métodos, considerando os parâmetros específicos que atendem aos requisitos, utilizando métricas previamente estabelecidas na literatura para identificar seus aspectos positivos e negativos.

**Palavras-chaves:** Suavização de Potência. Geração de Referência. Fotovoltaico. Processamento de Energia. Sistemas de Armazenamento de Energia.

## ABSTRACT

With the expansion of renewable energies, such as solar and wind, in microgrids, defined as associations of distributed generations, there is a demand for efficient solutions to deal with the intermittent profile of this generation and optimize supply during variations in demand. Although renewable energy sources promote sustainability, their intermittent generation profiles can cause problems, such as frequency deviations and voltage oscillations. In the literature, there are several control methods to get around this problem, however, many of these methods result in energy loss due to the absence of Energy Storage Systems. Energy Storage Systems (ESS) are designed to absorb or provide energy according to demand, thus promoting a balance between supply and demand and improving system stability. This paper therefore seeks to explore different reference generation methods for power smoothing systems in which ESS are used. Therefore, three main reference generation methods are evaluated: moving average, ramp rate and low-pass filter. From the data set made publicly available by NREL, the data is standardized using the programming language *Python*. Subsequently, the reference generation methods are implemented using MATLAB/*Simulink* and the processed data is applied in simulation. Finally, a comparison is made between the methods, considering the specific parameters that meet the requirements, using metrics previously established in the literature to identify their positive and negative aspects.

**Keywords:** Power smoothing. Reference Generation. Photovoltaic. Energy Processing. Energy Storage Systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais famílias de métodos de suavização de potência. . . . .	18
Figura 2 – Classificação de sistemas de armazenamento de energia com base nas tecnologias empregadas. . . . .	20
Figura 3 – Exemplo numérico da aplicação da Média Móvel Simples. . . . .	22
Figura 4 – Exemplo visual da aplicação da Média Móvel Simples. . . . .	23
Figura 5 – Exemplo numérico da aplicação da Taxa de Rampa. . . . .	24
Figura 6 – Exemplo visual da aplicação da Taxa de Rampa. . . . .	24
Figura 7 – Exemplo numérico da aplicação do Filtro Passa-Baixas. . . . .	26
Figura 8 – Exemplo visual da aplicação do Filtro Passa-Baixas. . . . .	26
Figura 9 – Exemplo de estrutura de microrrede. . . . .	30
Figura 10 – Exemplo de estrutura de microrrede com ESS. . . . .	30
Figura 11 – Exemplo de malha de controle para o ESS. . . . .	31
Figura 12 – Fluxograma de projeto para o algoritmo Média Móvel Simples. . . . .	32
Figura 13 – Fluxograma de projeto para a Taxa de Rampa. . . . .	33
Figura 14 – Exemplo de malha de controle para o ESS. . . . .	34
Figura 15 – Fluxograma de projeto para o Filtro Passa-Baixas. . . . .	34
Figura 16 – Resposta de um sistema de primeira ordem (Filtro Passa-Baixas). . . . .	35
Figura 17 – Foto da instalação em Golden, Colorado. . . . .	37
Figura 18 – Fluxograma da estratégia utilizada para o tratamento dos dados. . . . .	37
Figura 19 – Histograma da variação de potência natural da planta, normalizada, para a avaliação do desvio padrão. . . . .	38
Figura 20 – Exemplo de geração solar. . . . .	39
Figura 21 – Aplicação da Média Móvel Simples para um dia com perfil de irradiância próximo ao ideal. . . . .	40
Figura 22 – Aplicação da Média Móvel Simples para um dia com perfil de irradiância não-ideal. . . . .	40
Figura 23 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma <i>Simple Moving Average</i> (SMA) com uma janela de $n = 3$ . . . . .	41
Figura 24 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma SMA com uma janela de $n = 4$ . . . . .	41
Figura 25 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma SMA com uma janela de $n = 5$ . . . . .	42

Figura 26 – Aplicação da Taxa de Rampa para um dia com perfil de irradiância próximo ao ideal. . . . .	43
Figura 27 – Aplicação da Taxa de Rampa para um dia com perfil de irradiância não-ideal. . . . .	43
Figura 28 – Distribuição de densidade de probabilidade da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma <i>Ramp Rate</i> (RR) para um limite de $\lambda = 0,15 pu$ . . . . .	44
Figura 29 – Distribuição de densidade de probabilidade da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma RR para um limite de $\lambda = 0,20 pu$ . . . . .	44
Figura 30 – Distribuição de densidade de probabilidade da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma RR para um limite de $\lambda = 0,25 pu$ . . . . .	45
Figura 31 – Aplicação do Filtro Passa-Baixas para um dia com perfil de irradiância próximo ao ideal. . . . .	46
Figura 32 – Aplicação do Filtro Passa-Baixa para um dia com perfil de irradiância não-ideal. . . . .	46
Figura 33 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para uma a aplicação de um <i>Low-Pass Filter</i> (LPF) com constante de tempo de $\tau = 900$ . . . . .	47
Figura 34 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para uma a aplicação de um LPF com constante de tempo de $\tau = 1250$ . . . . .	47
Figura 35 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para uma a aplicação de um LPF com constante de tempo de $\tau = 1600$ . . . . .	48
Figura 36 – Aplicação dos métodos de suavização para um dia com perfil de irradiância ideal. . . . .	49
Figura 37 – Aplicação dos métodos de suavização para um dia com perfil de irradiância não-ideal. . . . .	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de avaliação dos dados de Golden, obtidos para operação natural.	38
Tabela 2 – Tabela para os dados de suavização da Média Móvel Simples. . . . .	42
Tabela 3 – Tabela para os dados de suavização da Taxa de Rampa. . . . .	43
Tabela 4 – Tabela para os dados de suavização do Filtro Passa-Baixa. . . . .	47
Tabela 5 – Tabela de análise para a Variação Máxima. . . . .	48
Tabela 6 – Tabela de análise para o Desvio Padrão. . . . .	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**BESS** *Battery Energy Storage System*

**CA** Corrente Alternada

**CC** Corrente Contínua

**CSV** *Comma Separated Variable*

**ESS** *Energy Storage System*

**FESS** *Flywheel Energy Storage System*

**LPF** *Low-Pass Filter*

**NREL** *National Renewable Energy Laboratory*

**RR** *Ramp Rate*

**SCESS** *Supercapacitor Energy Storage System*

**SMA** *Simple Moving Average*

**SMESS** *Superconducting Magnetic Energy Storage System*

**SoC** *State of Charge*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$n$	Janela de suavização para a Média Móvel Simples
$\lambda$	Limite da Taxa de Rampa
$\tau$	Constante de tempo para o Filtro Passa-Baixa
$\sigma_{\Delta}$	Desvio Padrão
$\mu_{\Delta}$	Média do Desvio Padrão
$\Delta_P$	Variação de Potência
$pu$	Por Unidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	15
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos Gerais</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>15</b>
1.2	METODOLOGIA	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
2.1	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	18
2.2	MÉTODOS DE GERAÇÃO DE REFERÊNCIA	21
<b>2.2.1</b>	<b>Média Móvel Simples</b>	<b>21</b>
2.2.1.1	Exemplo de Aplicação da Média Móvel Simples	22
<b>2.2.2</b>	<b>Taxa de Rampa</b>	<b>22</b>
2.2.2.1	Exemplo de Aplicação da Taxa de Rampa	24
<b>2.2.3</b>	<b>Filtro Passa-Baixas</b>	<b>25</b>
2.2.3.1	Exemplo de Aplicação da Filtro Passa-Baixa	25
2.3	MÉTRICAS DE SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA	26
<b>2.3.1</b>	<b>Variação Máxima</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Análise Probabilística</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Análise Visual</b>	<b>27</b>
2.4	CONCLUSÃO PARCIAL	28
<b>3</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS DE GERAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA</b>	<b>29</b>
3.1	IMPLEMENTAÇÃO EM UMA MICRORREDE	29
3.2	PROJETO DE SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA E IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS DE GERAÇÃO DE REFERÊNCIA	31
<b>3.2.1</b>	<b>Média Móvel Simples</b>	<b>32</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Taxa de Rampa</b>	<b>32</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Filtro Passa-Baixa</b>	<b>33</b>
3.3	CONCLUSÃO PARCIAL	35
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE SUAVIZAÇÃO EM UM CONJUNTO DE DADOS REAIS</b>	<b>36</b>
4.1	APRESENTAÇÃO DO <i>DATASET</i>	36
<b>4.1.1</b>	<b>Características do <i>Dataset</i></b>	<b>36</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Tratamento dos dados</b>	<b>36</b>
4.2	RESULTADOS	39
<b>4.2.1</b>	<b>Resultados - Média Móvel Simples</b>	<b>39</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Resultados - Taxa de Rampa</b>	<b>41</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Resultados - Filtro Passa-Baixas</b>	<b>45</b>

<b>4.2.4</b>	<b>Comparação entre os Métodos</b> . . . . .	<b>46</b>
4.2.4.1	Avaliação da Variação . . . . .	48
4.2.4.2	Análise Probabilística (Desvio Padrão) . . . . .	48
4.2.4.3	Análise Visual . . . . .	49
4.3	CONCLUSÃO PARCIAL . . . . .	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>52</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	52
5.2	PUBLICAÇÕES . . . . .	53
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>54</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGOS NO MATLAB</b> . . . . .	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Frente ao crescente consumo de energia elétrica e os danos ambientais associados às fontes de geração baseadas em combustíveis fósseis, viu-se a necessidade de buscar por novas fontes de energia sustentáveis. Como consequência disso, observa-se, em todos os países do mundo, uma progressiva expansão na utilização de fontes de energia renováveis, como solar e eólica. Essas fontes de energia estão, em sua maioria, presentes em microrredes, que podem ser definidas como uma associação de gerações distribuídas podendo operar de forma independente da rede elétrica ou em conjunto (PEPERMANS et al., 2005; BARRA et al., 2021).

São inegáveis os impactos da utilização de fontes de energia renovável para a sustentabilidade. Porém, quando se trata da rede elétrica, a conexão dessas fontes de geração, principalmente devido ao seu caráter intermitente, pode trazer impactos nocivos, quando não identificados e tratados, ao funcionamento da rede de elétrica geral (NGUYEN; LEE, 2017). A literatura apresenta diversos métodos tradicionais, com foco inteiramente em controle, para mitigar esses problemas; No entanto, devido ao fato desses métodos não utilizarem ESS implicam na perda de energia.

Os ESS desempenham um papel crucial em microrredes, fornecendo soluções eficientes para gerenciar a geração intermitente de energia e otimizar o fornecimento em períodos de alta demanda e baixa demanda (BARRA et al., 2021). A utilização desses sistemas ajuda a equilibrar a oferta e a demanda, maximizando a integração de fontes renováveis e aprimorando a resistência do sistema a possíveis adversidades. Esses sistemas geralmente incluem tecnologias como baterias, supercapacitores e outros dispositivos de armazenamento, contribuindo para a estabilidade, confiabilidade e eficiência energética das microrredes.

Para a aplicação em microrrede, os sistemas de armazenamento, mais especificamente, atuam como absorvedores ou fornecedores de energia elétrica. Devido ao caráter intermitente das fontes de energia renovável, há períodos que não haverá o fornecimento necessário para a demanda, cabendo aos ESS garantir a manutenção do fornecimento. Portanto, para que não existam problemas graves aos equipamentos conectados à rede, cada país desenvolveu seu código de rede, responsáveis por regular como as fontes de energia renovável devem operar no sistema. O código da rede é um conjunto de requisitos técnicos, administrativos e legais para conexão ou interconexão ao Sistema de Transmissão de Eletricidade, com principal objetivo de assegurar que esses sistemas sejam mantidos, operados, expandidos e modernizados de forma coordenada com base nos requisitos técnico-operacionais, e da maneira mais eficiente e econômica possível. Como exemplo, em (DUAN et al., 2020) e (LANDERA et al., 2023) são feitas análises comparativas entre códigos de rede. Os sistemas de armazenamento, então, operam como intermediários na resolução desse problema, intervindo nos momentos críticos da geração ao fornecer energia durante quedas na geração

e absorver excessos quando há uma produção excedente. Para garantir a injeção/absorção da quantidade correta de energia pelos ESSs, são utilizadas estratégias de suavização de potência.

Os métodos de geração de referência para suavização de potência, estão presentes como forma de gerar a curva de referência para a operação do sistema de controle do ESS. São diversos os métodos de suavização de potência presentes na literatura, por exemplo, em (SUKUMAR et al., 2018) há referência a três famílias de métodos principais, baseadas em média móvel, taxa de rampa e filtros passa-baixa. Ainda, em uma revisão bibliográfica, foi perceptível que as métricas de comparação estão fortemente baseadas em uma análise visual (KHALID; SAVKIN, 2010; LI; HUI; LAI, 2013) e ferramentas probabilísticas (TELEKE et al., 2009), como o desvio padrão. Nesse contexto, é de suma importância o desenvolvimento de trabalhos que busquem avaliar, caracterizar e comparar os diferentes algoritmos para geração de referência para suavização de potência.

Devido à associação frequente dos métodos de suavização de potência a sistemas de armazenamento de energia, destaca-se a importância do projeto preciso da curva de suavização, pois isso irá afetar diretamente o dimensionamento global do sistema. Em paralelo, o presente trabalho é resultado de uma pesquisa desenvolvida durante o projeto "*E-Lounge* - Uma solução para o reabastecimento de veículos elétricos de frotas no Brasil", financiado pela EDP no contexto da Chamada Estratégia 22 (Mobilidade Elétrica) do programa de Pesquisa e Desenvolvimento (*P&D*) da ANEEL. Inicialmente foi planejado fazer um estudo de suavização de potência da potência absorvida/injetada na rede elétrica pela microrrede que compõe o *E-Lounge*. Contudo, por conta da diferença de calendário entre execução do *P&D* e desenvolvimento do presente trabalho, o autor optou por utilizar dados públicos da NREL para o estudo. Todavia, é importante ressaltar que todo desenvolvimento e contribuições associadas ao presente trabalho podem ser implementadas no contexto de microrredes com fontes de geração renovável, estações de reabastecimento de veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo geral a implementação de diferentes métodos de geração de referência para uma aplicação de suavização de potência, utilizando dados reais. Com isso, pretende-se realizar a comparação dos métodos de geração de referência, buscando identificar seus pontos positivos e negativos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Apresentar de forma concisa, alguns métodos de suavização de potência e realizar a aplicação desses métodos em um ambiente de simulação, utilizando um banco de dados de geração solar real;
- Avaliar o impacto da variação dos parâmetros dos algoritmos de geração de referência no nível de suavização;
- Conduzir uma análise comparativa entre os métodos de geração de referência, utilizando métricas existentes na literatura.

## 1.2 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foram definidos os seguintes passos metodológicos:

- De forma inicial, é necessário realizar uma revisão bibliográfica, buscando levantar os métodos de suavização presentes na literatura. Também é necessário destacar os algoritmos mais utilizados e as métricas utilizadas na comparação entre eles;
- Implementar, no *software* MATLAB/*Simulink*, os métodos de suavização de potência levantados na revisão bibliográfica. Utilizar um conjunto de dados experimentais disponibilizados pela NREL a fim de validar os algoritmos de geração de referência;
- Comparar, com as métricas levantadas, o resultado da suavização que cumpre os requisitos de projeto, buscando destacar as dificuldades de limitações associadas a cada método.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

O presente trabalho de conclusão de curso esta organizado da forma a seguir:

- **Capítulo 2:** Neste capítulo, são introduzidas, de forma geral, aplicações de sistemas de armazenamento, demonstrando as diferentes formas de armazenar energia presentes na literatura. Além disso, são apresentados os métodos de geração de referência aplicados no presente trabalho e. A fim de contextualizar didaticamente, aplicar exemplos numéricos e visuais dos métodos de suavização de potência;
- **Capítulo 3:** O capítulo tem como principal objetivo apresentar, em um contexto mais realista, em que parte de uma microrrede está presente o método de geração de referência para a suavização. Em seguida, são apresentas as etapas e as ferramentas utilizadas, relacionadas ao projeto dos métodos de suavização;
- **Capítulo 4:** Neste capítulo é apresentado o banco de dados utilizado para a aplicação dos métodos de geração de referência, incluindo algumas características desse

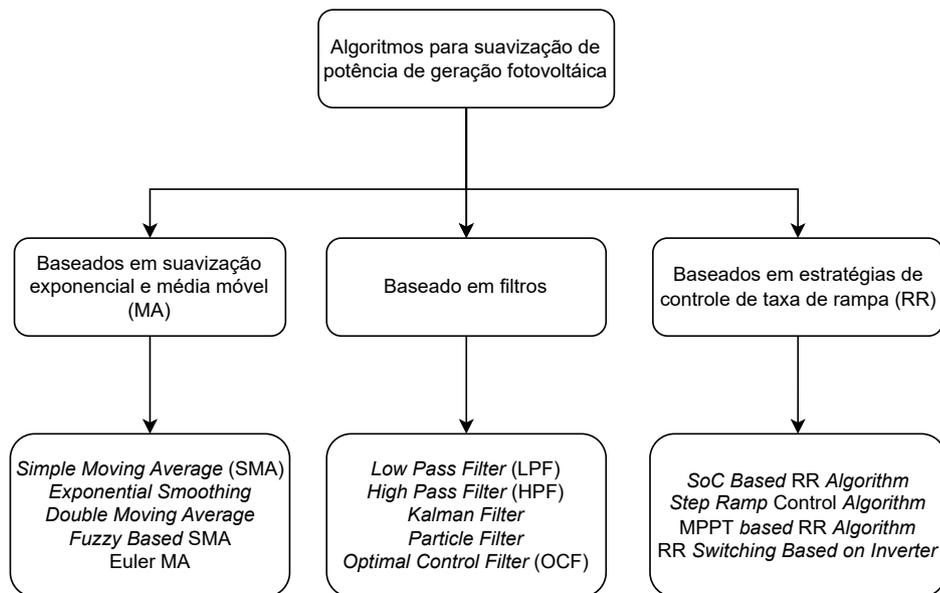
conjunto de dados. Em sequência, são demonstrados os resultados obtidos para cada um dos métodos de suavização, assim é feita uma comparação entre esses resultados;

- **Capítulo 5:** Por fim, este capítulo apresenta as conclusões obtidas a partir da aplicação dos métodos de referência para um banco de dados, assim como os possíveis trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os métodos de suavização de potência estão sempre associados a ESS, tendo como principal objetivo mitigar os efeitos associados as bruscas variações de potência em fontes renováveis de energia, devido a característica intermitente. Com a utilização dos EESs, é possível absorver picos na geração ou fornecer potência para a rede, melhorando o desempenho da geração e impedindo problemas que podem ser causados pelas bruscas variações de potência. Em (HAQUE; KHAN; SHEIKH, 2015; SUKUMAR et al., 2018), há menção de três principais métodos de geração de referência ou técnicas de suavização de potência: (i) média móvel; (ii) taxa de rampa; (iii) filtros passa-baixa. A Figura 1 indica as três principais famílias de métodos de suavização de potências, presentes na literatura.

Figura 1 – Principais famílias de métodos de suavização de potência.



Fonte: Retirada de (SUKUMAR et al., 2018).

Ao analisa a suavização, um dos pontos mais importantes é a variação de potência em um determinado intervalo de tempo, pois há regulamentação quanto a máxima variação, a fim de manter a estabilidade, manutenção e qualidade de energia para os clientes. Essa regulamentação é chamado de código de rede, em (LANDERA et al., 2023) é possível observar as características regulamentarias de alguns operadores do sistema de transmissão pelo mundo.

### 2.1 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Com a crescente utilização de fontes energéticas renováveis, como solar e eólica, há uma diminuição da poluição associada as formas de produção de energia. Porém, devido ao

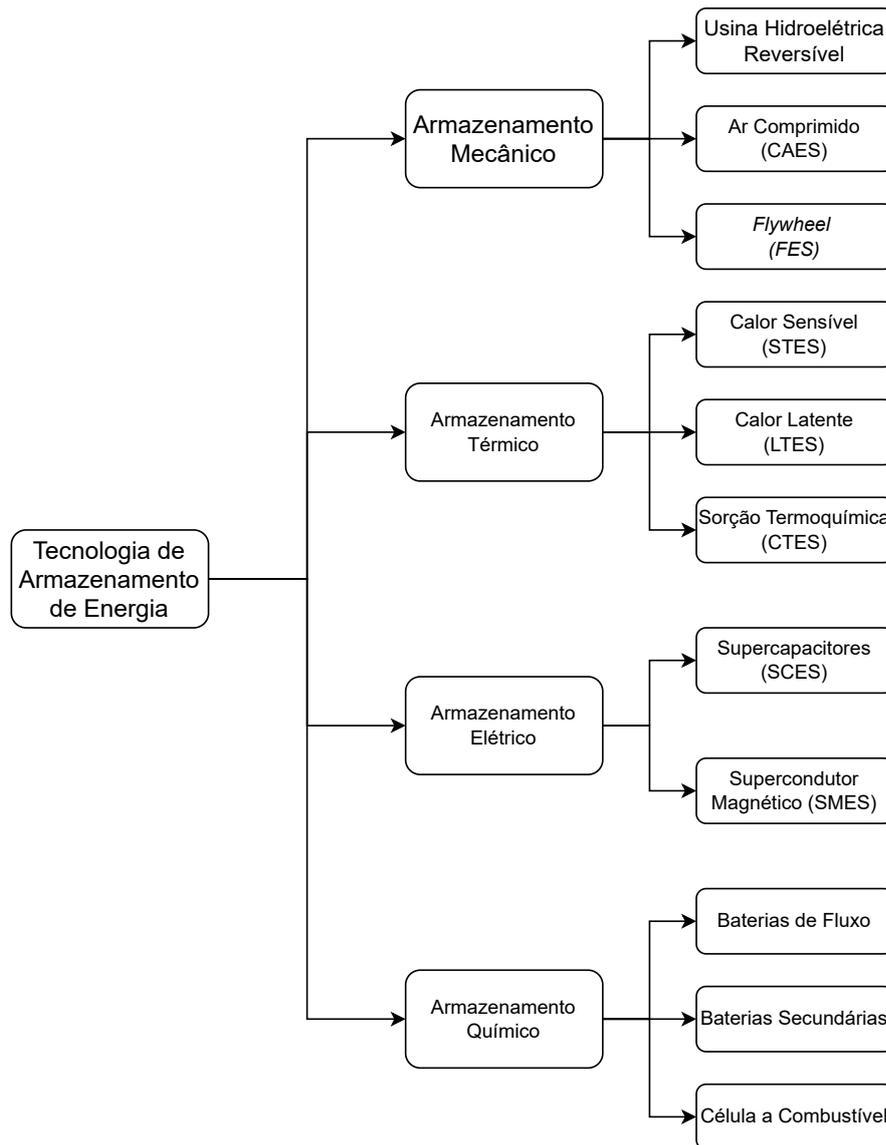
caráter intermitente dessas fontes, podem surgir obstáculos para o funcionamento ideal da rede elétrica. Com isso, existem diversos meios de mitigar esses problemas, alguns deles resultam na perda de uma parte da energia que é gerada pelas fontes. Contudo, a utilização de sistemas de armazenamento de energia dão uma nova ótica para a solução desses problemas.

Os sistemas de armazenamento de energia fornecem uma solução ao problema, regulando a potência na geração renovável a curto prazo e a longo prazo, dependendo do método empregado. De forma geral, a Figura 2 apresenta uma classificação feita para os métodos de armazenamento de energia, de acordo com a tecnologia utilizada, adaptada de (DIAZ, 2019). Para a aplicação em microrrede (BARRA et al., 2021) lista os métodos de armazenamento, baseados em tecnologias diferentes, mais frequentemente usados para fins de suavização de potência:

- **Baterias Eletroquímicas:** Nessa tecnologia, o armazenamento de energia é feito de forma química. As características dessas baterias, também conhecido por *Battery Energy Storage System* (BESS), variam grande forma quanto a densidade de energia, eficiência, vida útil e custo, a depender do material utilizados para a construção. Geralmente, os BESS são utilizados para respostas a variações de frequência a longo prazo. Dentre os tipos de baterias eletroquímicas, as baterias de íon-lítio possuem as melhores características, quanto aos componentes principais, há um elevado custo associado;
- **Flywheel:** O *Flywheel Energy Storage System* (FESS) é uma forma de armazenamento que utiliza energia cinética a partir da manutenção de uma massa de momento de inércia elevado, girando em torno do seu eixo. Utilizando de uma conexão de massa com uma máquina elétrica, consegue-se fazer com que, a depender da necessidade do sistema, a máquina opere como motor ou gerador. O FESS é uma solução que permite mitigar variações de potência com uma ordem menor que 10 minutos;
- **Supercapacitores:** O *Supercapacitor Energy Storage System* (SCESS) é capaz de armazenar energia em um campo elétrico, porém, quando comparado a capacitores normais, essa tecnologia possui uma densidade de energia muito maior. Entretanto, em paralelo, ainda há uma grande deficiência quando equiparado com outros sistemas de armazenamento, mesmo com características associadas a baixa densidade de energia e alta densidade de potência;
- **Supercondutores:** Nos *Superconducting Magnetic Energy Storage System* (SMESS) o armazenamento de energia é feito por meio de um campo magnético de uma bobina. Por se tratar de um material supercondutor, há a necessidade de armazenar a bobina em temperaturas muito baixas, para manutenção das características físicas

do supercondutor. Essa tecnologia é associada a propriedades de baixa densidade de energia, alta densidade de potência, baixo tempo de resposta e ciclos de vida alto, isso faz esse sistema de armazenamento ser muito utilizado para respostas rápidas e com alta necessidade de potência, mesmo possuindo um alto custo inicial.

Figura 2 – Classificação de sistemas de armazenamento de energia com base nas tecnologias empregadas.



Fonte: Retirada de (DIAZ, 2019).

Ainda há métodos que compartilham da utilização de mais de uma tecnologia de armazenamento, sendo chamados de Sistemas Híbridos de Armazenamento (HESS - *Hybrid Energy Storage System*). A depender das características de cada aplicação, a associações de mais de um método de armazenamento pode fazer com o que o sistema funcione da melhor forma possível, atuando em mudanças lentas de variações de potência ou, ainda, em variações muito rápidas. Em (SHI et al., 2019), é apresentado o desenvolvimento de um

sistema híbrido de armazenamento com um foco em variações muito rápidas de potência; Por outro lado, em (LV et al., 2021) é apresentada uma análise de desempenho de um desses sistemas híbridos, voltados para a suavização de potência em uma planta fotovoltaica.

## 2.2 MÉTODOS DE GERAÇÃO DE REFERÊNCIA

Os métodos de geração de referência são abordagens utilizadas para gerar curvas de referência para suavização em sistemas de gestão de energia. Esses métodos são aplicados principalmente em contextos onde a geração de energia ocorre de forma intermitente. Existem diversas propostas na literatura utilizados para a geração das curvas de potência, tendo destaque maior as abordagens que fazem uso de média móvel, taxas de rampa constantes e filtros passa-baixas. Essas três abordagens representam os três grandes grupos de algoritmos que são mais utilizados para suavização de potência.

A definição do método a ser utilizado depende de características associadas ao sistema de geração e aos requisitos desejados para o comportamento do sistema. Entre os objetivos para a definição do método utilizado, destacam-se: minimizar flutuações, suavizar picos da demanda ou, até, otimizar a integração de energias renováveis à rede elétrica existente. A seguir, são apresentados um método de geração de referência, escolhidos com base no volume de presença em artigos da área, para cada um dos grupos de algoritmos citados a cima.

### 2.2.1 Média Móvel Simples

A média móvel é uma família de algoritmos no âmbito estatístico que busca suavizar flutuações temporais que ocorrem de forma aleatória em uma sequência de dados e, possivelmente, indicar tendências ou padrões. A média móvel simples (SMA) é o método mais comum de aplicação da média móvel em uma sequência de dados, e consiste no cálculo da média aritmética de uma janela de  $n$  elementos sequenciais de um conjunto de dados, considerando essa janela móvel ao longo do tempo. A representação matemática da SMA, para uma janela de  $n$  elementos, adaptada de (KINI et al., 2020), é dada por:

$$P_{\text{SMA}, k} = \frac{\sum_{j=0}^{n-1} P_{k-j}}{n}, \quad (2.1)$$

em que  $k \geq n$ , onde  $k$  representa um índice da sequência de dados que compõe o espaço amostral, e  $j$  um índice auxiliar utilizado para o cálculo da média móvel. Diferente de (KINI et al., 2020), o somatório irá começar por  $j = 0$ , considerando o primeiro ponto de medição como 0. Por se tratar de uma aplicação simples, um dos pontos positivos da aplicação desse método é o baixo esforço computacional.

Dentre os métodos pertencentes desse grupo, há a existência de outros métodos matemáticos mais complexos que podem ser utilizados para essa aplicação. A média móvel

dupla (DMA - *Double Moving Average*) e a média móvel exponencial (EMA - *Exponential Moving Average*), por exemplo, são métodos que são utilizados na literatura para a aplicação de suavização de potência (ZHOU; YANG, 2019; SYED et al., 2020; WANG, 2008).

### 2.2.1.1 Exemplo de Aplicação da Média Móvel Simples

A fim de exemplificar a aplicação da Média Móvel Simples, também é utilizado para demonstrar uma suavização de uma sequência de dados para SMAs com diferentes tamanhos de janela móvel  $n$  na Figura 3. Além disso, um exemplo visual, indicado na Figura 4, também é utilizado para demonstrar a relação de  $n$  e o impacto na suavização.

A Figura 3 apresenta um conjunto de oito números aleatórios, nos quais é aplicada a Média Móvel Simples, utilizando uma janela móvel de três valores. Uma característica notável, em comparação com outros métodos é que, ao empregar o SMA, ocorre uma perda de dados diretamente relacionada ao valor da janela móvel.

Na Figura 4 indica uma aplicação visual da SMA de um sinal ruidoso qualquer, variando de +10 até -10, é possível visualizar de forma gráfica o impacto do aumento do valor da janela da média móvel. É possível observar a manutenção da perda de dados, para fins gráficos foi considerado esses valores como zero.

Figura 3 – Exemplo numérico da aplicação da Média Móvel Simples.

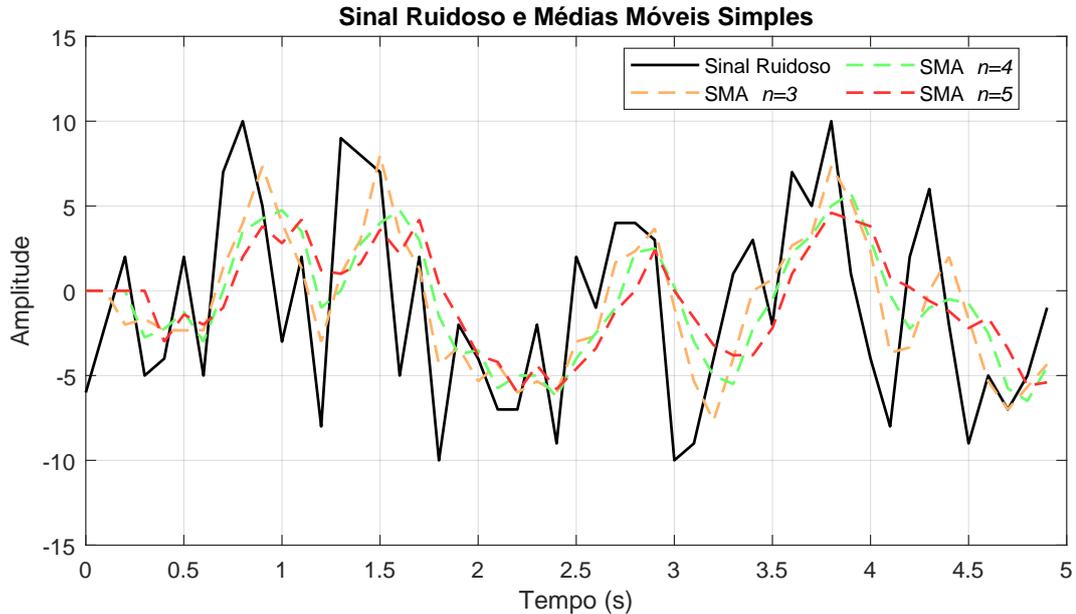
$k$		1	2	3	4	5	6	7	8
$P_k$		67	87	34	91	112	102	75	20
$P_{SMA, k}$	$n = 2$	-	70	60,5	62,5	101,5	107	87	46
	$n = 3$	-	-	62,7	70,7	79	101,7	95,3	64,7
	$n = 4$	-	-	-	69,75	81	84,75	94,25	76,5

Fonte: Própria do autor (2024).

### 2.2.2 Taxa de Rampa

A definição de taxa de rampa (RR) consiste, na medida que se tem uma sequência de dados, manter a máxima taxa de variação entre amostra dessa sequência dentro de limites preestabelecidos. Assim, de maneira geral, ao ocorrer uma grande variação na potência gerada num curto intervalo de tempo, uma solução comum é assegurar que a taxa de crescimento/decrescimento da potência injetada/absorvida da rede fique constante. Portanto, essa técnica limita a quantidade de potência que é inserida na rede elétrica quando um evento acontece, de acordo com a variação máxima que é permitida pelo

Figura 4 – Exemplo visual da aplicação da Média Móvel Simples.



Fonte: Própria do autor (2024).

código de rede local, é representada por  $\lambda$ . Em (D'AMICO; PETRONI; VERGINE, 2022), é apresentada a representação matemática do método de taxa de rampa, o qual pode ser adaptado da seguinte forma:

$$P_{RR,k} = \begin{cases} P_{RR, k-1} + \lambda, & \text{se } \Delta P > \lambda; \\ P_{RR, k-1} - \lambda, & \text{se } \Delta P < -\lambda; \\ P_k, & \text{caso contrário;} \end{cases} \quad (2.2)$$

em que  $P_k$  representa o valor na sequência de dados,  $\Delta P$  representa a variação de potência entre dados sequenciais,  $\lambda$  o limite de variação máxima e  $P_{RR,k}$  representa o valor processado pela taxa de rampa.

É evidente que, a depender do ponto de ocorrência do evento, o sistema de armazenamento de energia pode absorver ou fornecer potência para a rede, atuando, assim, como um suavizador nos pontos de ocorrência dos eventos. Contudo, se a taxa de variação do sinal original estiver dentro dos limites estabelecidos pelo algoritmo RR ( $-\lambda, +\lambda$ ), o sinal de saída de geração de referência será igual ao sinal equivalente. Um exemplo dessa característica é mostrado adiante. Nessa família, ainda há métodos de suavização em taxa de rampa que se baseiam no *State of Charge* (SoC), que é o estado de carga da bateria em um determinado momento. Portanto, é levado em consideração parâmetros da bateria. Em (GONZALEZ-MORENO et al., 2022) é proposto um novo método de suavização, o RR é utilizado para aprimorar o SoC de baterias e aumentar o tempo de vida desse sistema de armazenamento de energia.

### 2.2.2.1 Exemplo de Aplicação da Taxa de Rampa

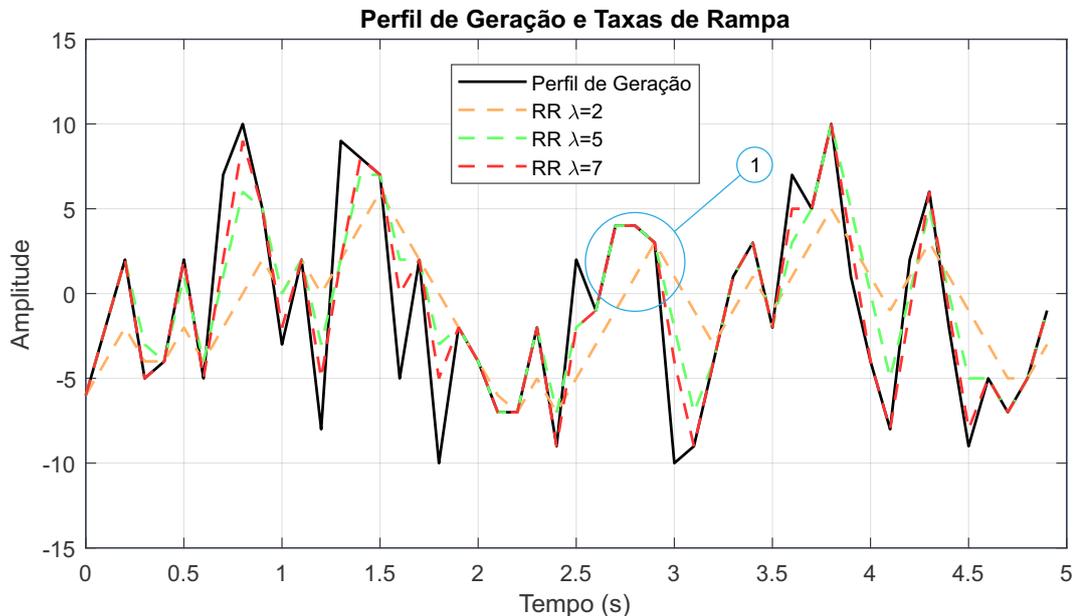
A fim de exemplificar a aplicação do método Taxa de Rampa, será apresentado na Figura 5 a suavização de uma sequência de dados para RRs com diferentes parâmetros  $\lambda$ , demonstrando de forma prática a aplicação desse método. Além disso, um exemplo, indicado na Figura 6, também é utilizado para demonstrar a relação de  $\lambda$  e com o impacto na suavização.

Figura 5 – Exemplo numérico da aplicação da Taxa de Rampa.

$k$		1	2	3	4	5	6	7	8
$P_k$		67	87	34	91	112	102	75	20
$P_{RR,k}$	$\lambda = 10$	67	77	67	77	87	97	87	77
	$\lambda = 25$	67	87	62	87	112	102	77	52
	$\lambda = 50$	67	87	37	87	112	102	72	22

Fonte: Própria do autor (2024).

Figura 6 – Exemplo visual da aplicação da Taxa de Rampa.



Fonte: Própria do autor (2024).

A Figura 5 utiliza um conjunto de dados aleatórios na implementação da Taxa de Rampa, com diversos limites para a variação. Uma característica distintiva em relação à SMA é a ausência de perda de dados durante o processo de suavização.

A Figura 6 apresenta de forma gráfica um sinal ruidoso qualquer, é perceptível que, no ponto marcado como 1, uma característica distintamente visível surge em relação a esse método de suavização. Quando a variação entre uma sequência de dados é menor que a taxa de rampa, o sinal de saída do algoritmo torna-se igual ao sinal original.

### 2.2.3 Filtro Passa-Baixas

Filtros são amplamente utilizados para atenuar ou elevar algumas características de sinais, como amplitude, fase ou resposta em frequência. Dependendo da característica, o filtro pode permitir a passagem de determinadas faixas de frequências dos sinais, como exemplo típico, os filtros passa-baixas mantém o conteúdo harmônico que estão abaixo da frequência de corte,  $f_c$ , enquanto atenuam as componentes harmônicas do sinal que possuem uma frequência maior.

A representação do LPF, em português Filtro Passa-Baixas, de primeira ordem pode ser obtida pela aplicação da transformada de *Laplace* a uma equação diferencial ordinária de primeira ordem com coeficiente linear e constante (YANG et al., 2018). Dessa forma, a função de transferência do LPF ser representada por:

$$LPF(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (2.3)$$

endo  $\tau$ , para o caso da aplicação em sistemas de suavização, a constante de tempo do filtro passa-baixa dado em segundos. A seguir é apresentado um exemplo da aplicação do LPF.

#### 2.2.3.1 Exemplo de Aplicação da Filtro Passa-Baixa

A fim de exemplificar a aplicação do Filtro Passa-Baixas, é apresentado na Figura 7 uma suavização de uma sequência de dados para LPFs com diferentes parâmetros, demonstrando de forma prática a aplicação dessa estratégia. Além disso, um exemplo visual, indicado na Figura 8, também é utilizado para demonstrar a relação de  $\tau$  e o impacto na suavização. É importante destacar que, para essa aplicação, considerou-se um intervalo entre valores de 60 segundos, com a finalidade de ser implementado em simulação.

A Figura 7 apresenta o mesmo conjunto de dados utilizados para o exemplo numérico da SMA e RR. Na aplicação do LPF, é visível que, diferentemente da SMA, não há perda de dados.

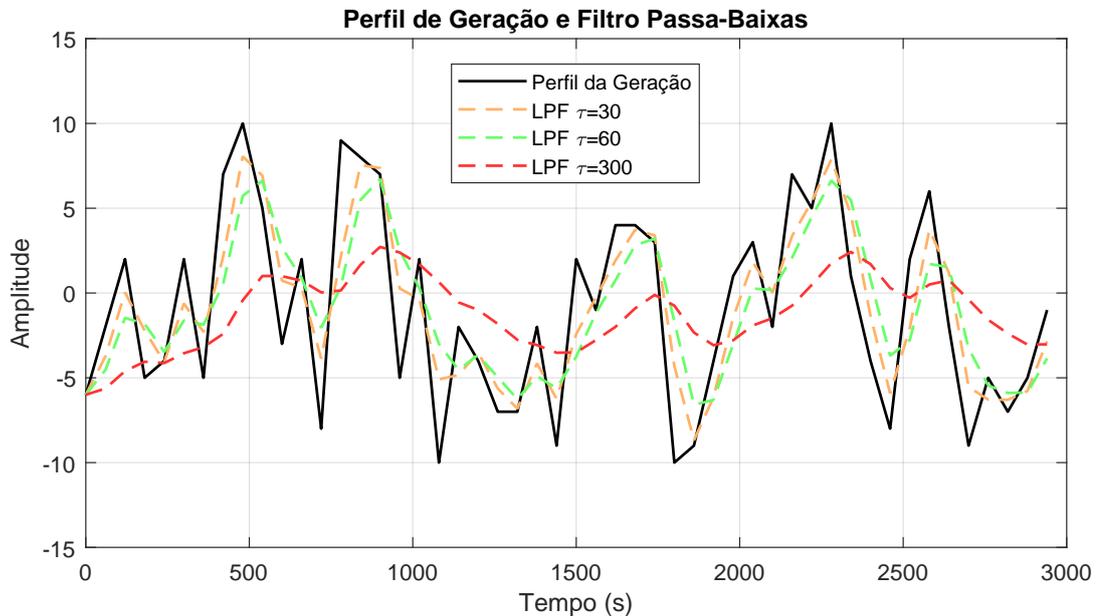
Na Figura 8 é apresentado o mesmo sinal que foi utilizado para o desenvolvimento dos exemplos visuais da SMA e RR. Observando a imagem, é possível verificar a relação proporcional da constante de tempo com o grau de suavização, ainda com um comportamento mais próximo da SMA.

Figura 7 – Exemplo numérico da aplicação do Filtro Passa-Baixas.

$k$		1	2	3	4	5	6	7	8
$P_k$		67	87	34	91	112	102	75	20
$P_{LPF, k}$	$\tau = 30$	67	78,31	55,9	69,1	100	104,8	84,5	44,35
	$\tau = 60$	67	74,3	63,3	65,4	89,3	100,1	90,35	59,7
	$\tau = 300$	67	68,8	67,25	66,47	72,86	79,05	80,44	74,11

Fonte: Própria do autor (2024).

Figura 8 – Exemplo visual da aplicação do Filtro Passa-Baixas.



Fonte: Própria do autor (2024).

### 2.3 MÉTRICAS DE SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA

As métricas de suavização de potência envolvem o uso de ferramentas para comparar diferentes métodos de suavização, com o objetivo de destacar seus pontos positivos e negativos durante a avaliação. Dimensionando, assim, os equipamentos presentes na microrrede associada a um sistema de armazenamento.

Há diversos pontos na literatura que se utilizam de diferentes métricas de suavização de potência, (LAMSAL et al., 2019) apresenta a aplicação de algumas métricas de suavização utilizadas na literatura. Dentre as métricas apresentadas, destaca-se a utilização da Variação Máxima, Análise Probabilística e Análise Visual, que é discutida, de forma

breve, nas seções a seguir.

### 2.3.1 Variação Máxima

Conforme definido nos códigos de rede, um dos pontos mais importantes a serem garantidos é que a máxima variação de potência proveniente de fontes de geração renovável respeite os limites operacionais definidos pelos códigos de rede. Em outras palavras a máxima variação de potência encontrada em sequências de medições de potência são limitadas. Nesse contexto, grande parte dos trabalhos científicos, desenvolvidos na área de suavização de potência analisa a curva de geração para um único dia e, com isso, associa o melhor algoritmo de geração de referência e define seus parâmetros, avaliando os resultados para a única análise feita. Assim, para avaliar a adequação do projeto, é feita uma análise numérica, com a finalidade de observar se os parâmetros dos métodos de suavização cumprem com os requisitos de variação máxima de potência do respectivo código de rede do país (LAMSAL et al., 2019).

### 2.3.2 Análise Probabilística

Por se tratar de fontes intermitente de geração de potência, a aplicação de métodos probabilísticos pode resultar a métricas e formas mais eficientes de comparação dos métodos de suavização de potência. Contudo, a principal desvantagem dessa abordagem é observada na necessidade de um banco de dados abrangente com o espectro de dados das variações ao longo do ano para realizar uma análise estatística coerente. Nesse contexto, uma das métricas probabilísticas mais utilizadas, na literatura, é o desvio padrão, que pode ser representado pela seguinte equação:

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (P_j - \mu_{\Delta})^2}, \quad (2.4)$$

onde  $\sigma_{\Delta}$  representa o desvio padrão da variação de potência e

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j, \quad (2.5)$$

representa a média do desvio padrão.

De forma ideal, o desvio padrão pode ser definido por meio de uma distribuição gaussiana. Entretanto, é importante destacar que a distribuição de probabilidades da intensidade das variações, não necessariamente, seguem uma distribuição gaussiana.

### 2.3.3 Análise Visual

A análise visual é uma métrica presente na literatura para avaliação da suavização de potência e representa a comparação visual direta entre os resultados obtidos da imple-

mentação dos métodos. No entanto, comparar visualmente os dados obtidos, na maioria dos casos, não é a melhor forma de encontrar o método de suavização que se destaca, quando comparado às outras métricas. Isso ocorre pois, quando são avaliados para essa métrica, assim como para a Variação Máxima, um único dia é posto em análise a fim de comparar tanto os métodos de suavização, como o nível da suavização, em termos de  $n$ , para a SMA, de  $\lambda$ , para RR, e a constante de tempo  $\tau$ , para o LPF.

Ainda, pela falta de um indicador numérico para a avaliação, a utilização da Análise Visual não garante de forma efetiva que a curva gerada pelos métodos de suavização estão de acordo com os limites impostos código de rede.

## 2.4 CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo, foi apresentados as tecnologias associadas aos sistemas de armazenamento de energia e os mais aplicados para microrredes. Ainda, em seguida foi apresentados os métodos de suavização de potência SMA, RR e LPF, demonstrando uma breve noção da literatura voltada para os métodos. Por fim, as métricas para suavização de potência, variação máxima, análise probabilística e análise visual.

### 3 IMPLEMENTAÇÃO DE ALGORITMOS DE GERAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA

Este capítulo tem como objetivo demonstrar de qual forma os métodos de suavização de potência são aplicados em uma microrrede típica, contendo geração solar e eólica. Para tanto, é demonstrado tanto a estrutura geral quanto o funcionamento de alguns dispositivos que estão presentes nesse tipo de sistema.

Em seguida, são apresentadas formas de implementação de cada um dos métodos de suavização de potência, conforme explicados no Capítulo 2. Por fim, são abordadas as etapas e requisitos do projeto para os algoritmos de geração de referência.

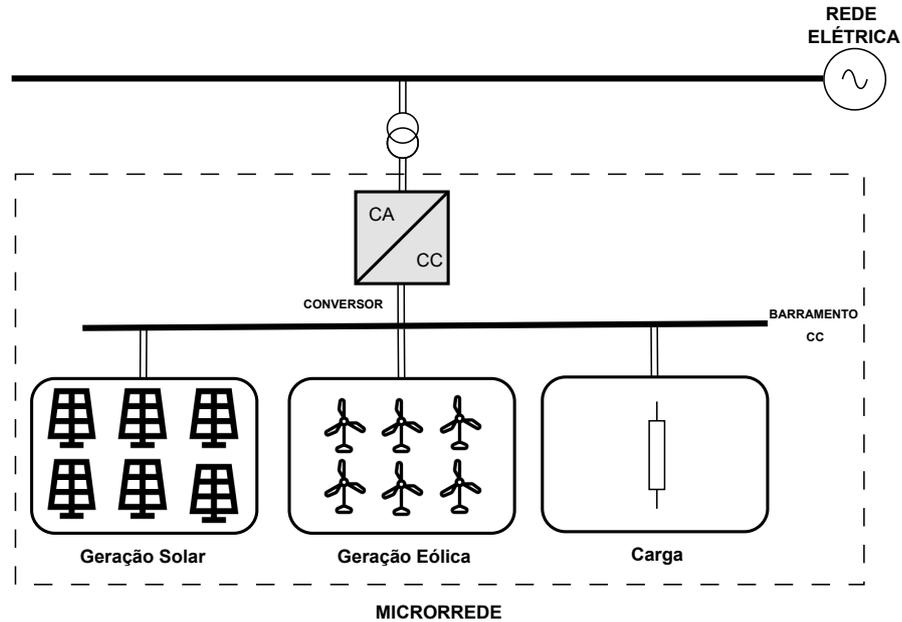
#### 3.1 IMPLEMENTAÇÃO EM UMA MICRORREDE

Em se tratando de microrredes, há várias formas dela ser conectada à rede geral, assim como diferentes topologias de associação de fontes de geração no barramento da microrrede. A definição de microrrede consiste no agrupamento e integração de gerações distribuídas, possibilitando operar de forma independente da rede elétrica principal ou em conjunto (AZEVEDO, 2011). Além disso, a microrrede ainda pode ser classificada como de Corrente Alternada (CA), Corrente Contínua (CC) ou híbridas, a depender da natureza de seu barramento. Um exemplo de topologia de microrrede encontrada na literatura está representada na Figura 9, sem a presença de sistemas de armazenamento e funcionando com um barramento de CC dentro da microrrede. Inicialmente, faz-se uma abstração quanto a presença de outros elementos que possam existir na microrrede, com a finalidade de explicar a aplicação do método de suavização de potência.

Numa microrrede simples, conforme indicado na Figura 9, considera-se, apenas, a geração solar e eólica, que estão conectadas (através de conversores estáticos de potência) em um único barramento de CC, esse barramento, por sua vez, está conectado a um conversor estático, fazendo a interface entre a microrrede e a rede elétrica local. Um desafio associado a esse tipo de conexão é a grande variabilidade da potência injetada na rede, devido à natureza intermitente dessas fontes renováveis, além da falta de inércia na geração e da introdução de harmônicos na rede, entre outros potenciais problemas (BARRA et al., 2021). Uma maneira de atenuar esses problemas é realizar a integração da geração com um sistema de armazenamento, o qual irá desempenhar o papel de otimizar o funcionamento da microrrede.

Na Figura 10, há um diagrama da mesma rede explicitada anteriormente, porém com a presença de um sistema de armazenamento. Por estarem conectados a um mesmo barramento, há a possibilidade do sistema de armazenamento fornecer ou absorver energia, a capacidade de bidirecionalidade. O equilíbrio dinâmico entre fornecimento e absorção de energia é essencial para garantir o desempenho eficiente e a confiabilidade operaci-

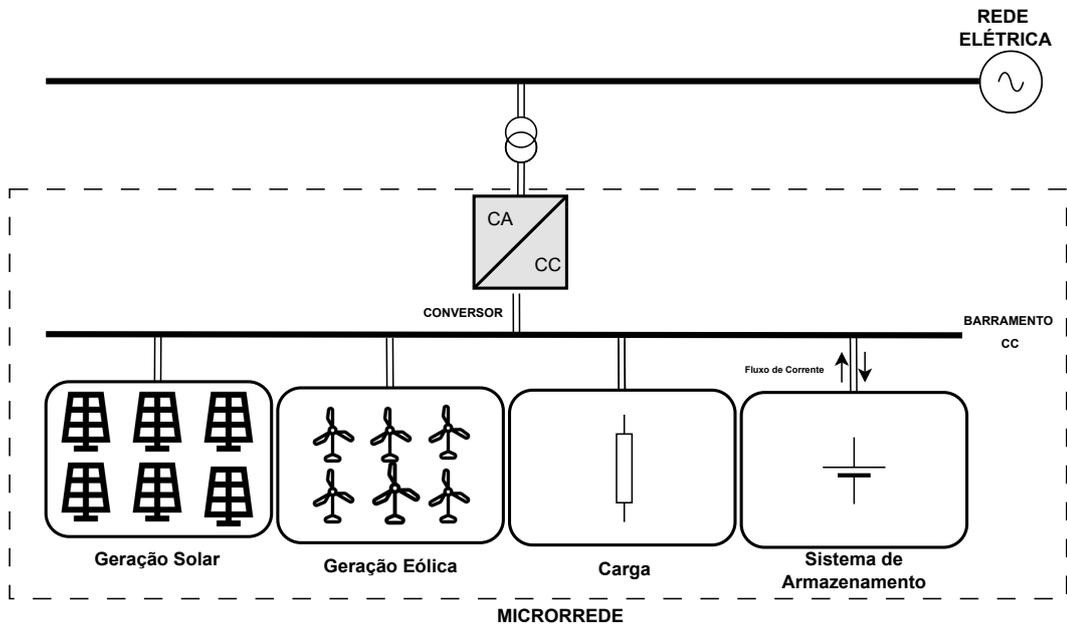
Figura 9 – Exemplo de estrutura de microrrede.



Fonte: Própria do autor (2024).

onal do sistema de armazenamento, contribuindo para a sua funcionalidade contínua e sustentável.

Figura 10 – Exemplo de estrutura de microrrede com ESS.

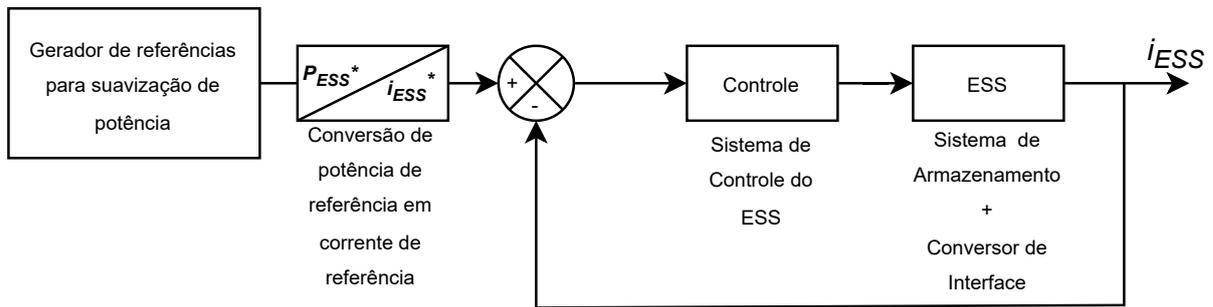


Fonte: Própria do autor (2024).

Em decorrência da necessidade de atender os Códigos de Rede quanto às taxas de rampa de injeção de potência na rede elétrica, associado ao ESS frequentemente se utiliza um sistema de suavização. Em outros termos, um sistema de controle é implementado para controlar o sistema de armazenamento de modo que este possa atuar diretamente

na suavização de potência. Como indicado na Figura 11, a entrada da malha de controle é sintetizada pelo algoritmo de geração da curva de referência, determinando assim o padrão de comportamento do sistema de armazenamento e especificando os momentos nos quais ocorrerá o fornecimento ou absorção de energia. Como a tensão do barramento estará estar estabelecida, a injeção/absorção de potência ocorre através da sintetização da corrente do conversor de interface do sistema de armazenamento. Isso significa que o controle da potência é feito através da corrente sintetizada ( $i_{ESS}$ ), que pode variar tanto em módulo como em fase.

Figura 11 – Exemplo de malha de controle para o ESS.



Fonte: Própria do autor (2024).

Tendo em vista que o funcionamento adequado do sistema depende da correta geração de referência para o sistema de suavização, a seguir, é apresentado como implementar os algoritmos de geração de referência discutidos no capítulo anterior.

### 3.2 PROJETO DE SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA E IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS DE GERAÇÃO DE REFERÊNCIA

Esta seção possui como objetivo demonstrar as etapas de projeto para cada um dos três métodos de suavização de potência que foram descritos no Capítulo 2. Para tanto, foi necessário definir alguns requisitos gerais a serem adotados para o projeto dos métodos: (i) assumiu-se que o objetivo de suavização, com base em uma revisão da literatura e no conjunto de dados utilizado, para todos os métodos é atingir o ponto de operação em que cerca de 99% das variações dentro do espaço amostral avaliado sejam inferiores a um limite de 20%, ou  $0,2 pu$ , da potência nominal do sistema; e (ii) considerou-se, em função do conjunto de dados disponível para realização do presente trabalho, que os dados de potência do sistema foram capturados em intervalo de 15 minutos de medição. Para atender o primeiro requisito descrito acima, é necessário definir os parâmetros de configuração de cada uma das estratégias de geração de referência avaliadas.

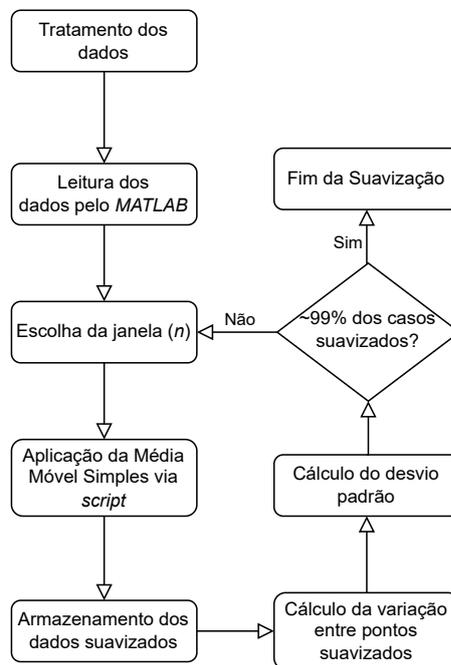
Para a aplicação e verificação dos métodos de suavização, foi utilizado o *software* MATLAB/*Simulink*. O MATLAB é uma ferramenta computacional muito utilizada para diversas áreas, possuindo uma linguagem de programação muito bem estruturada e de-

envolvida para aplicações em pesquisa. Por sua vez, o *Simulink* é uma ferramenta gráfica, voltada para a realização de simulações computacionais. Os códigos implementados estão disponíveis no Apêndice A.

### 3.2.1 Média Móvel Simples

Com a finalidade de implementar o algoritmo Média Móvel Simples, foi necessário fazer um *script*. De forma simples, o código consistiu na implementação matemática da fórmula que foi indicada em na Seção 2.2.1, aplicando-a aos dados tratados. O fluxograma indicado na Figura 12, demonstra as etapas do projeto para a implementação do SMA.

Figura 12 – Fluxograma de projeto para o algoritmo Média Móvel Simples.



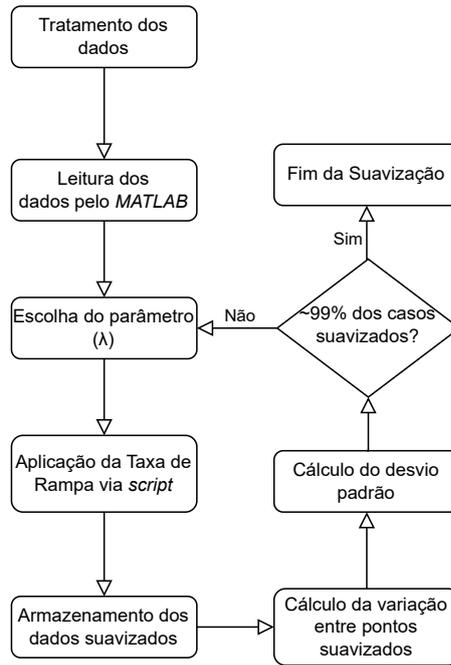
Fonte: Própria do autor (2024).

É válido destacar que há uma relação de proporcionalidade entre o tamanho da janela da média móvel ( $n$ ) e o efeito da suavização. Quanto maior for a janela  $n$ , maior será o efeito de suavização. Portanto, a escolha dessa janela será feita de acordo com o menor valor de  $n$  que irá deixar 99% das variações de potência do conjunto amostral abaixo de  $0,2 pu$ . O valor inicial escolhido para a janela da média móvel simples foi a  $n = 1$ .

### 3.2.2 Taxa de Rampa

A implementação do algoritmo Taxa de Rampa é feita de forma bastante similar à apresentada previamente para a SMA. Por meio de um *script*, implementou-se a relação descrita na Seção 2.2.2, aplicando os dados amostrais que foram tratados. O fluxograma apresentado na Figura 13 indica as etapas do projeto para a implementação do RR.

Figura 13 – Fluxograma de projeto para a Taxa de Rampa.



Fonte: Própria do autor (2024).

É importante salientar que existe uma relação direta entre a máxima taxa de rampa ( $\lambda$ ) e o efeito da suavização no sistema. Quanto menor for  $\lambda$  maior será o efeito da suavização. Com isso, a escolha desse valor é feita buscando a condição que cumpre o requisito de suavizar 99% das variações de potência do conjunto amostral abaixo de  $0,2 pu$ . A escolha do valor de  $\lambda$  faz referência as condições de projeto especificadas, portanto igual a uma variação máxima de 20%.

### 3.2.3 Filtro Passa-Baixa

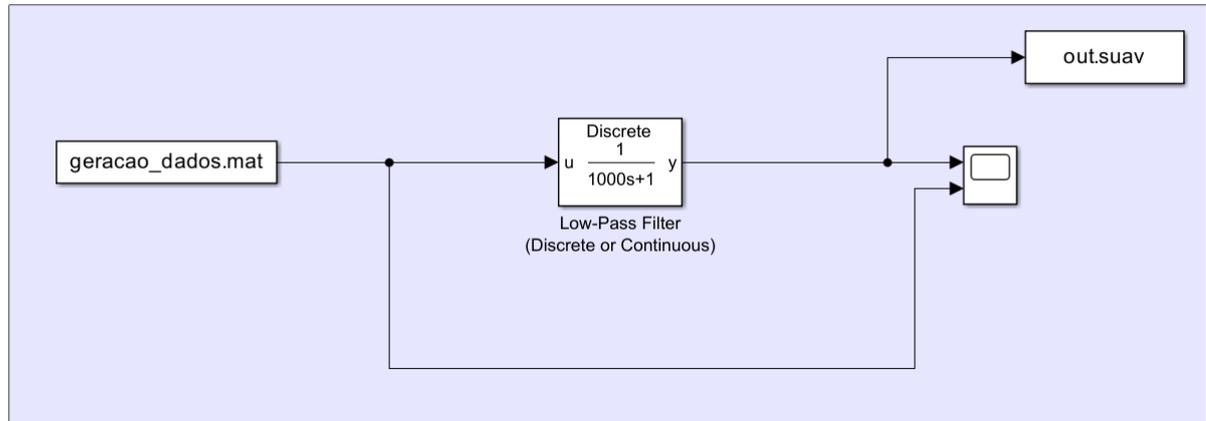
Para o desenvolvimento da aplicação do Filtro Passa-Baixas, é utilizado uma combinação do MATLAB e *Simulink*. A partir da criação de um *script*, foi possível aplicar os dados da geração, após normalizados e processados, como uma entrada para a simulação do filtro implementada no *Simulink*, como indicado na Figura 14.

O fluxograma indicado na Figura 15 demonstra, de forma geral, a sequência de passos seguidos para a implementação do Filtro Passa-Baixas. O passo crucial reside na seleção da constante de tempo ( $\tau$ ), a qual está diretamente vinculada ao grau de suavização do filtro, seguindo uma relação proporcional: quanto maior o valor de  $\tau$ , maior será a suavização. A escolha desse valor fará referência ao requisito de suavização de 99% das variações de potências do conjunto amostral abaixo de  $0,2 pu$ .

A constante  $\tau$  faz referência ao intervalo de tempo entre as medições do *dataset* em segundos. Para a seleção inicial da constante de tempo a ser aplicada no filtro, empregou-se a curva de resposta ao degrau do sistema de primeira ordem, indicada na Figura 16, escolhendo o valor relacionado  $1\tau$  que representa 63,2% da amplitude do sinal. Outro

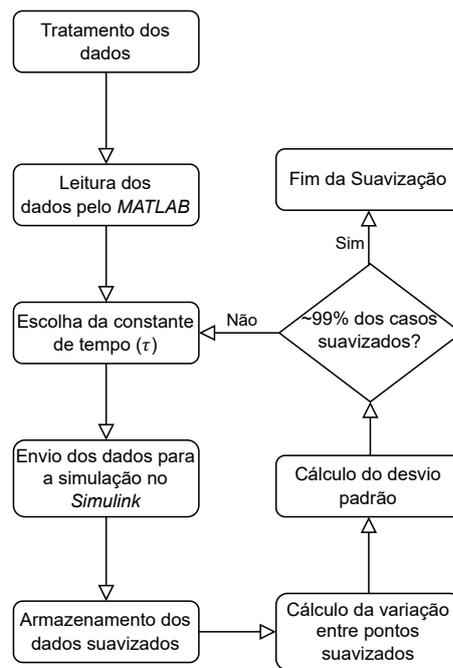
Figura 14 – Exemplo de malha de controle para o ESS.

Filtro Passa-Baixa



Fonte: Própria do autor (2024).

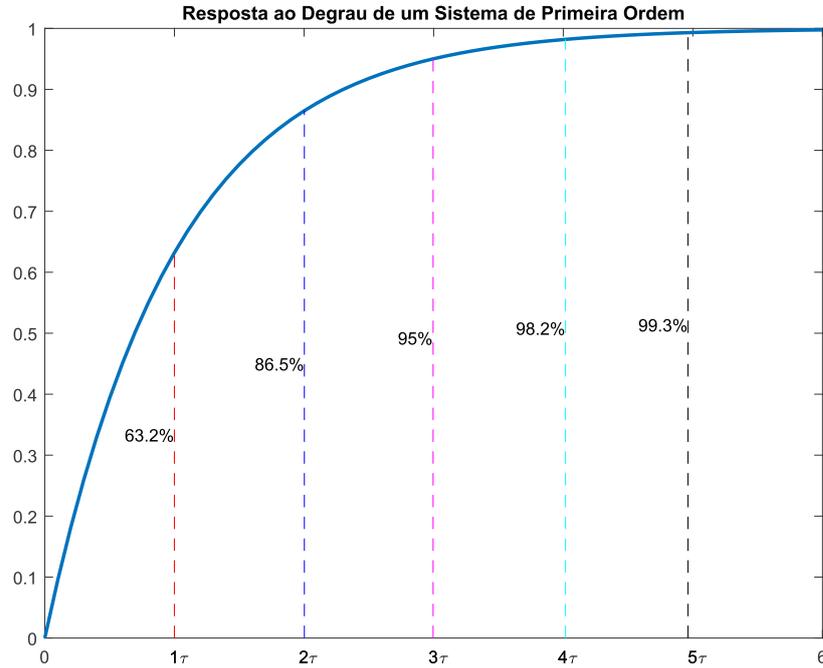
Figura 15 – Fluxograma de projeto para o Filtro Passa-Baixas.



Fonte: Própria do autor (2024).

ponto no qual se deve ter cuidado na avaliação do filtro é que o intervalo entre medições do conjunto de dados impacta significativamente no desempenho e comportamento do filtro.

Figura 16 – Resposta de um sistema de primeira ordem (Filtro Passa-Baixas).



Fonte: Própria do autor (2024).

### 3.3 CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo, foi apresentada a estrutura básica de uma microrrede, com relação a seus componentes de geração e sistemas de armazenamento, buscando demonstrar o papel da geração de referência para a suavização de potência. Além disso, o presente capítulo indicou como se deu o projeto dos métodos de suavização de potência, utilizando fluxogramas, descrevendo as etapas que fizeram parte do projeto. Após uma breve revisão da literatura, o autor não conseguiu encontrar metodologias bem estruturadas para o projeto dos algoritmos de suavização. Portanto, optou-se por desenvolver estratégias interativas para o projeto, conforme apresentadas nas Figuras 12, 13 e 15. Essa característica reforça a importância de parametrizar os métodos de suavização de potência corretamente, pois um projeto inadequado pode impactar de forma negativa na rede elétrica ou até no dimensionamento de componentes do ESS e da microrrede.

## 4 APLICAÇÃO DOS ALGORITMOS DE SUAVIZAÇÃO EM UM CONJUNTO DE DADOS REAIS

### 4.1 APRESENTAÇÃO DO *DATASET*

O *dataset* utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, para a aplicação dos métodos de suavização previamente desenvolvidos, consiste em um conjunto de dados disponibilizados pela NREL. O NREL é um laboratório localizado nos Estados Unidos, financiado pelo governo federal, com a principal missão de avançar nas tecnologias de energia renovável e promover a integração de fontes de geração com o sistema energético do país. Recentemente como parte do projeto de pesquisa divulgado em (MARION et al., 2021), foi disponibilizado um conjunto de dados focado na validação do desempenho de modelos de módulos fotovoltaicos. Embora o *dataset* esteja originalmente direcionado para outro ramo de pesquisa, os dados podem ser perfeitamente utilizados para a aplicação dos métodos de suavização avaliados neste trabalho.

#### 4.1.1 Características do *Dataset*

Dentre o conjunto de dados disponibilizados no projeto conduzido pela NREL, foram utilizados os dados diretamente extraídos da sede da NREL, localizado em Golden, no estado do Colorado, uma cidade com um clima predominante semi-árido. Uma imagem das instalações pode ser vista na Figura 17. O *dataset* é apresentado em um arquivo no formato *Comma Separated Variable* (CSV), e as medições foram realizadas ao longo de um período de mais de um ano, compreendendo os meses de agosto de 2012 a setembro de 2013. Essas medições são abrangente quanto às informações coletadas dos painéis solares. Notavelmente, para a aplicação dos métodos de suavização, duas informações no conjunto de dados merecem destaque: as medições realizadas nessa localidade são registradas em intervalos de 15 minutos; e a informação referente à potência gerada pelos painéis.

Em (MARION et al., 2021), há uma seção específica voltada para dados faltando, demonstrando como esses dados estão representados no arquivo CSV. Em Golden, há cerca de 25% dos dados meteorológicos faltando, sendo indicados por -9999, devido a um período de tempo que os equipamentos associados a essas medições estiveram inativos. Porém, é garantido que os campos de medição necessários para a aplicação da suavização de potência estão sempre disponíveis, com exceção dos casos onde não foi possível realizar as medições devido a problemas diversos.

#### 4.1.2 Tratamento dos dados

Dada a possibilidade de inconsistências nas medições e a necessidade de adequar a formatação dos dados para aplicação nos métodos de suavização, torna-se essencial realizar o

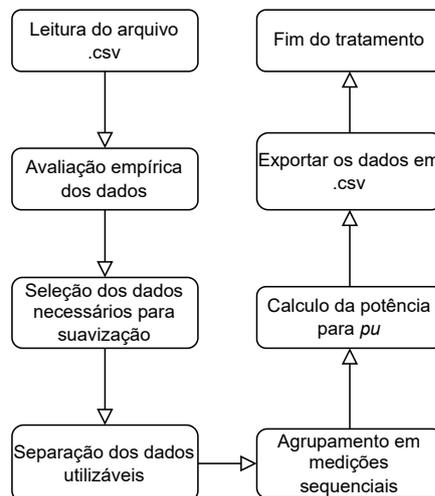
Figura 17 – Foto da instalação em Golden, Colorado.



Fonte: (MARION; DECEGLIE; SILVERMAN, 2014), NREL.

tratamento adequado dessas informações. A Figura 18 ilustra algumas das etapas executadas durante o processo de tratamento dos dados. Ainda, pela diversidade de tecnologias de painéis fotovoltaicos presentes, a escolha da tecnologia do painel solar foi feita com base na popularidade. Portanto, foi escolhido o painel de silício amorfo (aSiMicro03038).

Figura 18 – Fluxograma da estratégia utilizada para o tratamento dos dados.



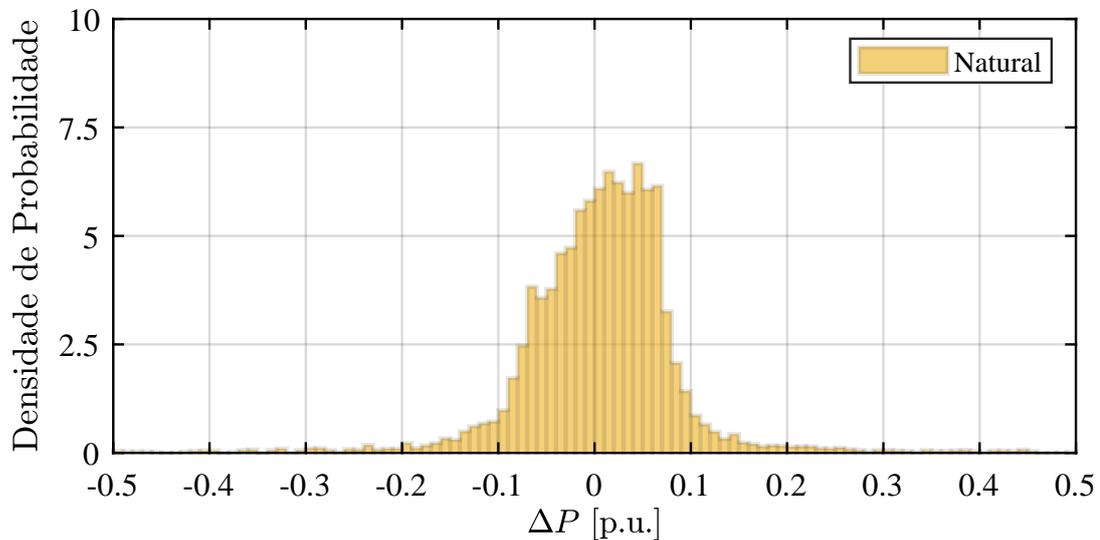
Fonte: Própria do autor (2024).

Em (MARION; DECEGLIE; SILVERMAN, 2014), são delineadas algumas etapas fundamentais para o tratamento dos dados disponibilizados. Contudo, para a aplicação da suavização da potência, são necessárias etapas adicionais. A fim de mitigar efeitos relacionados a falhas de equipamento, manutenções ou intervalos não representados no arquivo CSV por outros motivos, foi necessário segmentar os dados em sequências temporais contínuas de 15 minutos. É importante ressaltar que as medições foram realizadas ao longo de 12

horas, resultando em, no máximo, 48 pontos de medições de geração de potência no dia. Dessa forma, apenas intervalos consecutivos de medição foram considerados para a avaliação deste projeto. Por fim, os valores de geração de potência foram calculados e separados em *pu* durante o tratamento dos dados, utilizando a linguagem de programação *Python*.

Posteriormente, após o tratamento dos dados, procedeu-se ao cálculo da variação de potência entre as medições. Com a finalidade de demonstrar graficamente essa variação, conforme indicado na Figura 19, e para calcular o desvio padrão natural da geração fotovoltaica em Golden, foram realizadas análises comparativas entre os dados antes e após a suavização.

Figura 19 – Histograma da variação de potência natural da planta, normalizada, para a avaliação do desvio padrão.



Fonte: Própria do autor (2024).

Tabela 1 – Tabela de avaliação dos dados de Golden, obtidos para operação natural.

Golden	Média Variação (pu)	Desvio Padrão ( $\sigma_{\Delta}$ )
Natural	0,0047	0,1136

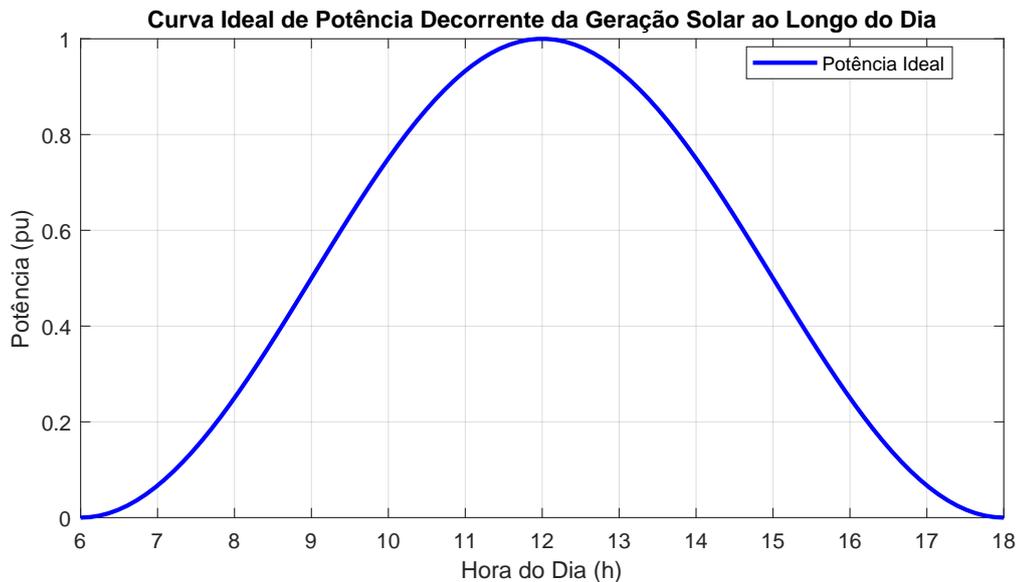
Fonte: Própria do Autor (2024).

Ainda, observando o histograma indicado na Figura 19, observa-se um comportamento não usual, conforme discutido em (ZHOU; YAN; LI, 2017; TELEKE et al., 2009), há uma tendência positiva nas variações de potência. Ao analisar a Figura 19 em conjunto com a Tabela 1, é evidente o desvio positivo, indicado pelo valor da média das variações.

Ao analisar o comportamento de geração solar, como por exemplo na Figura 20, percebe-se praticamente uma simetria na curva de geração diária, sugerindo uma variação de potência aproximadamente nula ao longo do dia. Portanto, esse comportamento deveria ser estendido para o conjunto de dados anuais. Esta observação aponta para um possível problema inerente associado ao *dataset*, podendo ser ocasionado por problemas

nos equipamentos de medições ou falhas na tecnologia do painel escolhido para análise. Apesar da tendência positiva na variação, é importante destacar que isso não impactará na análise de suavização que será feita, pois para a aplicação dos métodos, foi utilizado, somente, sequências de medições ininterruptas.

Figura 20 – Exemplo de geração solar.



Fonte: Própria do autor (2024).

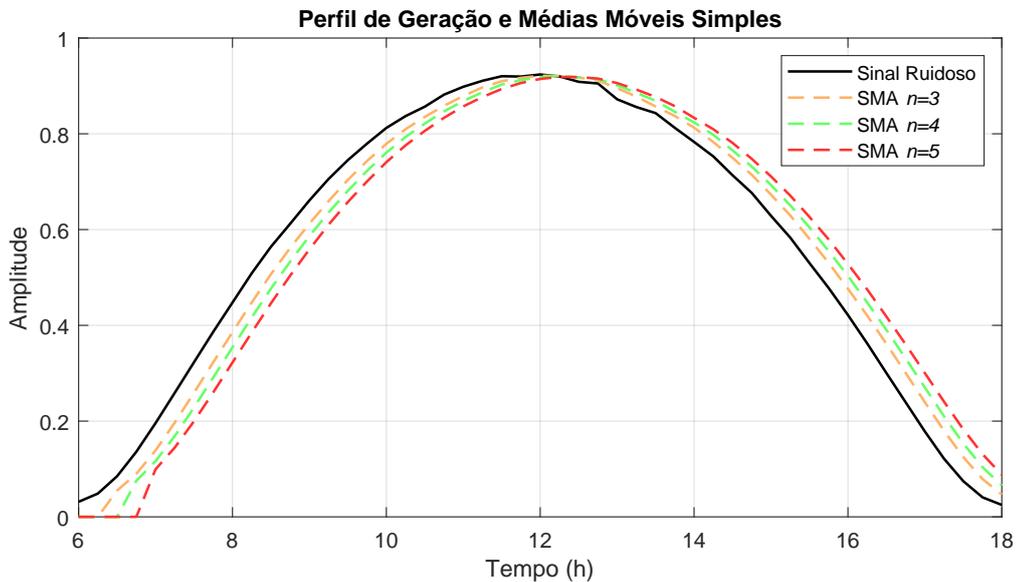
## 4.2 RESULTADOS

O objetivo principal desta seção é apresentar e explicar os resultados que foram obtidos em decorrência da aplicação dos métodos de suavização de potência, descritos no Capítulo 2, em um *dataset* real. Em conjunto com a análise descrita no Capítulo 3, reforçando que a meta é de suavizar 99% das variações de potência obtidas dos dados presentes no *dataset*, dentro de um limite de variação arbitrário de 0,2 pu em 15 minutos. Por fim, é realizar a comparação desses métodos.

### 4.2.1 Resultados - Média Móvel Simples

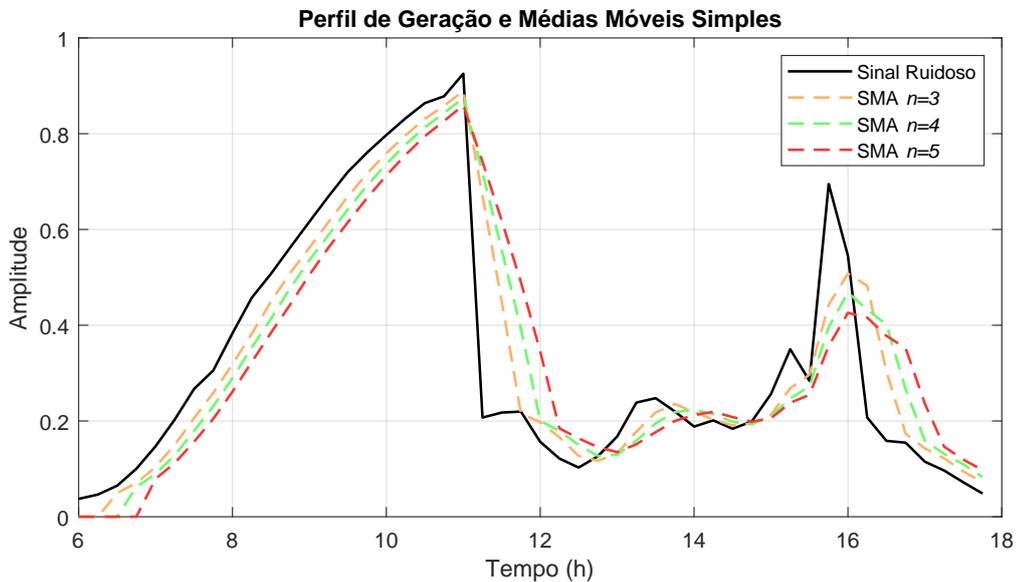
Para escolha da janela  $n$  da Equação (2.1), foi necessário realizar, de forma iterativa, o procedimento representado no fluxograma da Figura 12. Durante o processo de projeto, com o auxílio do fluxograma, foi necessário a escolha de um valor inicial da janela de suavização. Posteriormente, foram realizadas iterações no código até encontrar o menor valor de  $n$  que cumpra com o requisito de suavizar 99% dos eventos presentes no *dataset*. Com o valor da janela de suavização determinado, realizou-se variações positivas e negativas de  $n$  a fim de destacar o impacto desse método de suavização em casos extremos, conforme indicado nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 – Aplicação da Média Móvel Simples para um dia com perfil de irradiância próximo ao ideal.



Fonte: Própria do autor (2024).

Figura 22 – Aplicação da Média Móvel Simples para um dia com perfil de irradiância não-ideal.

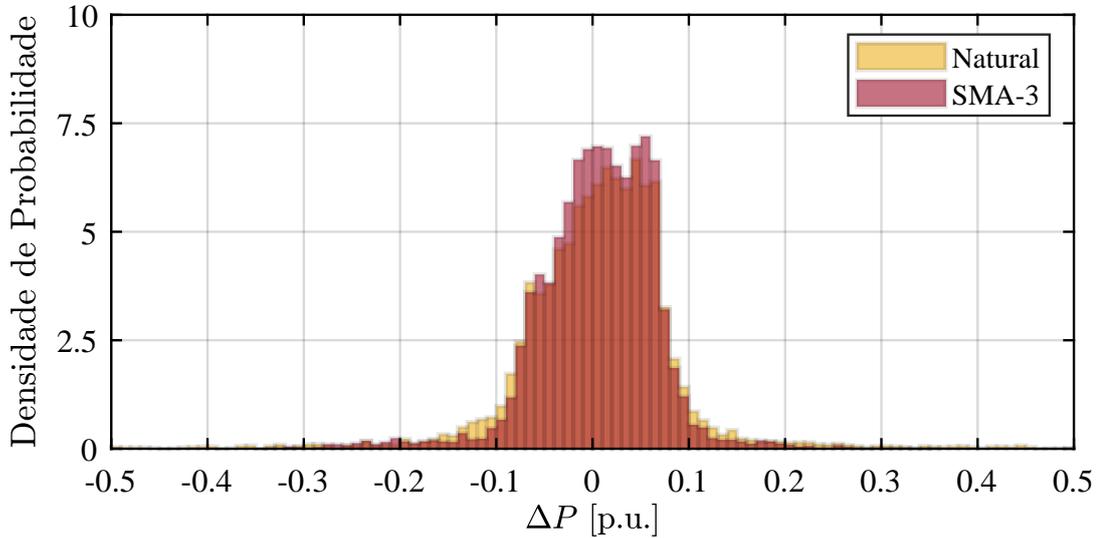


Fonte: Própria do autor (2024).

Uma característica bastante evidente da aplicação da SMA é o atraso associado ao método matemático em relação a curva de geração, o que pode causar problemas caso seja projetado de forma errônea, pois impacta diretamente no dimensionamento do ESS. Com isso, foi feita a análise do conjunto de dados aplicando a Média Móvel Simples e os histogramas comparativos para cada janela de suavização podendo ser observado nas Figuras 23, 24 e 25. Além disso, os valores de média da variação de suavização, desvio padrão e suavização são apresentados na Tabela 2 para efeitos de comparação entre as

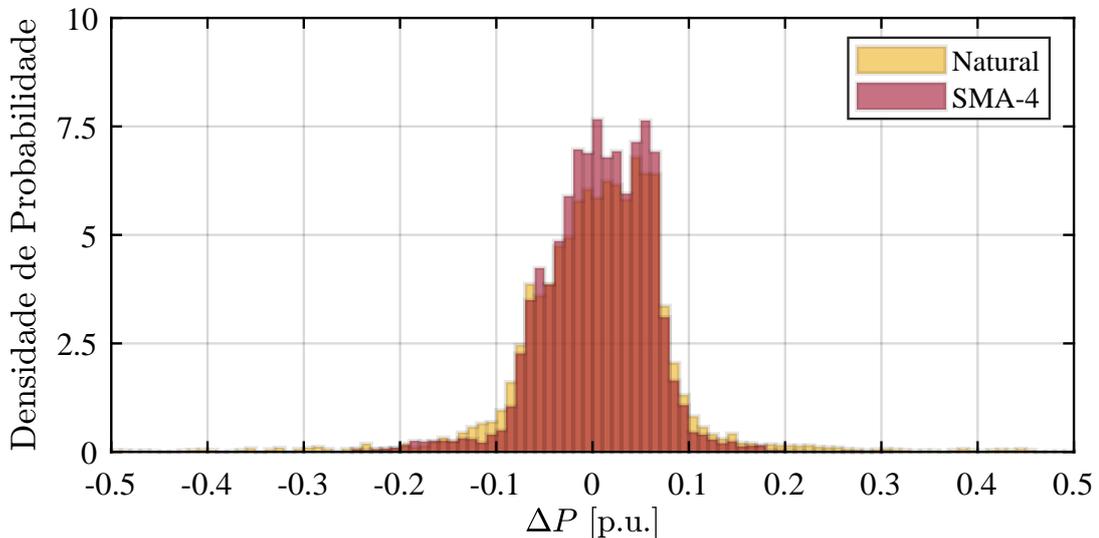
janelas de suavização.

Figura 23 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma SMA com uma janela de  $n = 3$ .



Fonte: Própria do autor (2024).

Figura 24 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma SMA com uma janela de  $n = 4$ .



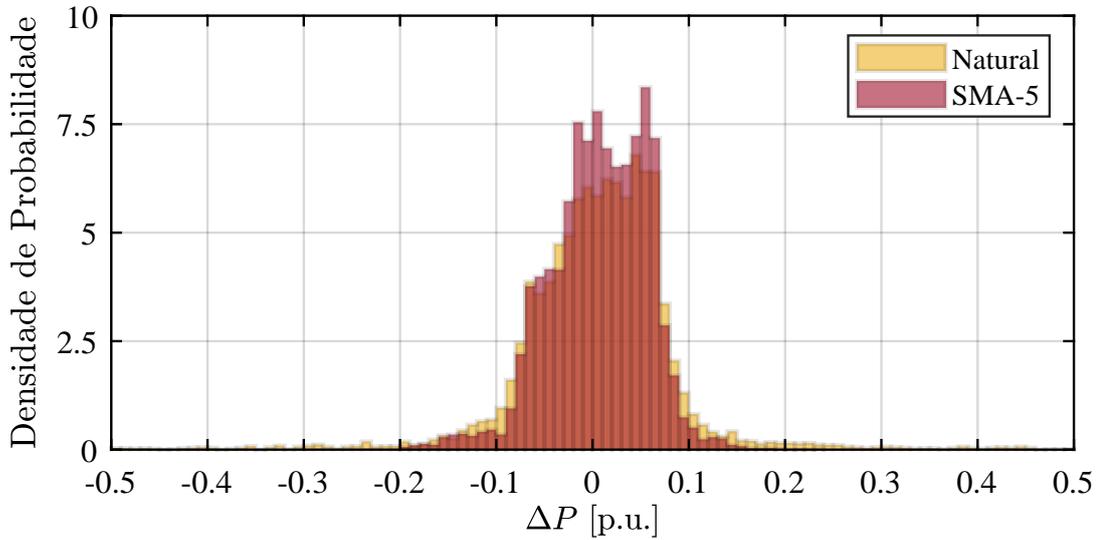
Fonte: Própria do autor (2024).

Portanto, analisando os histogramas em conjunto com os valores descritos na Tabela 2, observa-se que o menor valor de  $n$  que cumpre o requisito de projeto é  $n = 4$ .

#### 4.2.2 Resultados - Taxa de Rampa

Com a finalidade de determinar o limite da taxa de rampa  $\lambda$  da Equação ( 2.2), realizou-se, de forma iterativa, o procedimento representado no fluxograma descrito na

Figura 25 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma SMA com uma janela de  $n = 5$ .



Fonte: Própria do autor (2024).

Tabela 2 – Tabela para os dados de suavização da Média Móvel Simples.

SMA	Média Variação (pu)	Desvio Padrão ( $\sigma_{\Delta}$ )	Suavização (%)
$n = 3$	0,0057	0,0624	98,2677
$n = 4$	0,0064	0,0551	99,5608
$n = 5$	0,0070	0,0507	99,9842

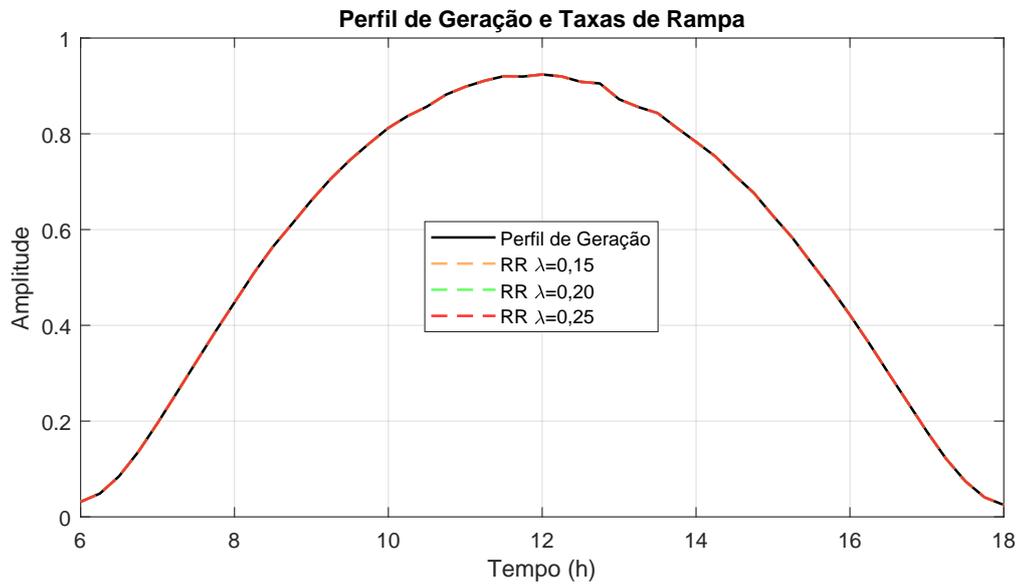
Fonte: Própria do Autor (2024).

Figura 13. Inicialmente, a escolha do limite da taxa de rampa deu-se com base no limite arbitrário proposto de  $0,2 pu$  em um intervalo de 15 minutos. Em seguida, avaliou-se do cumprimento do requisito de suavizar 99% dos dados e caso essa condição não fosse satisfeita, seriam feitas iterações até que o valor de  $\lambda$  cumprisse com o requisito, fazendo variações de  $0,05 pu$ . A fim de demonstrar o comportamento da Taxa de Rampa, foram realizadas variações positivas e negativas no parâmetro de  $\lambda$ , apresentando, assim, o efeito da variação da limitação do RR em casos extremos, conforme indicado nas Figuras 26 e 27.

Uma característica desse método é que, caso não existam variações que excedam os limites impostos pelo  $\lambda$  que foi projetado, a curva da suavização irá seguir a curva da geração, como indicado na Figura 26. Isso é diferente da aplicação da SMA, que apresenta um atraso inerente devido à janela utilizada. Com isso, foi feita a análise do conjunto de dados aplicando a Taxa de Rampa e os histogramas comparativos de cada limite de suavização podendo ser observados nas Figuras 28, 29 e 30. Ademais, pode ser observado na Tabela 1 os valores de média da variação de suavização, desvio padrão e suavização para a comparação entre os limites da Taxa de Rampa considerados.

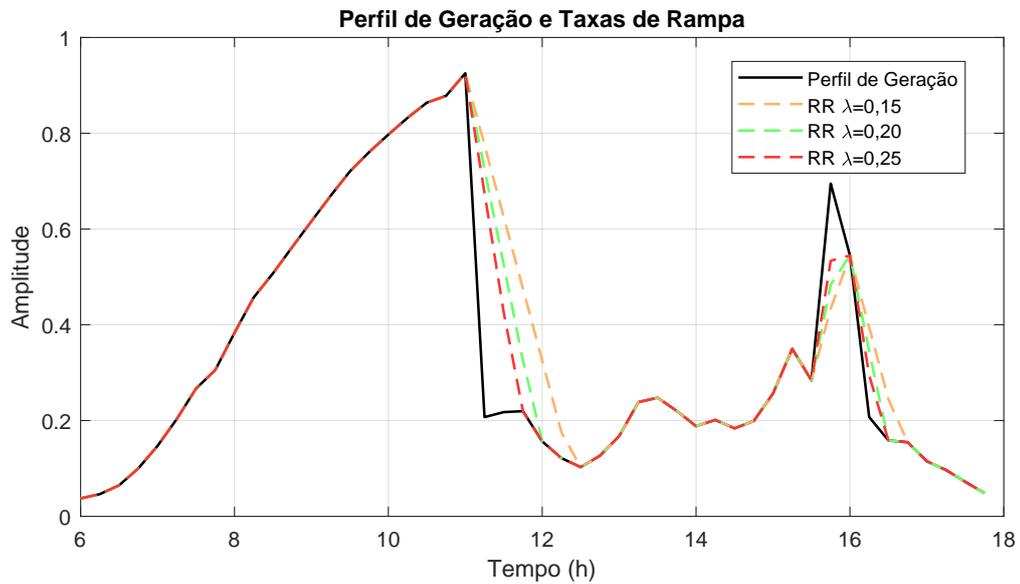
Nos histogramas, é possível observar uma outra característica desse método, pois ao limitar as variações a valores máximos e mínimos, há uma concentração de probabilidade

Figura 26 – Aplicação da Taxa de Rampa para um dia com perfil de irradiância próximo ao ideal.



Fonte: Própria do autor (2024).

Figura 27 – Aplicação da Taxa de Rampa para um dia com perfil de irradiância não-ideal.



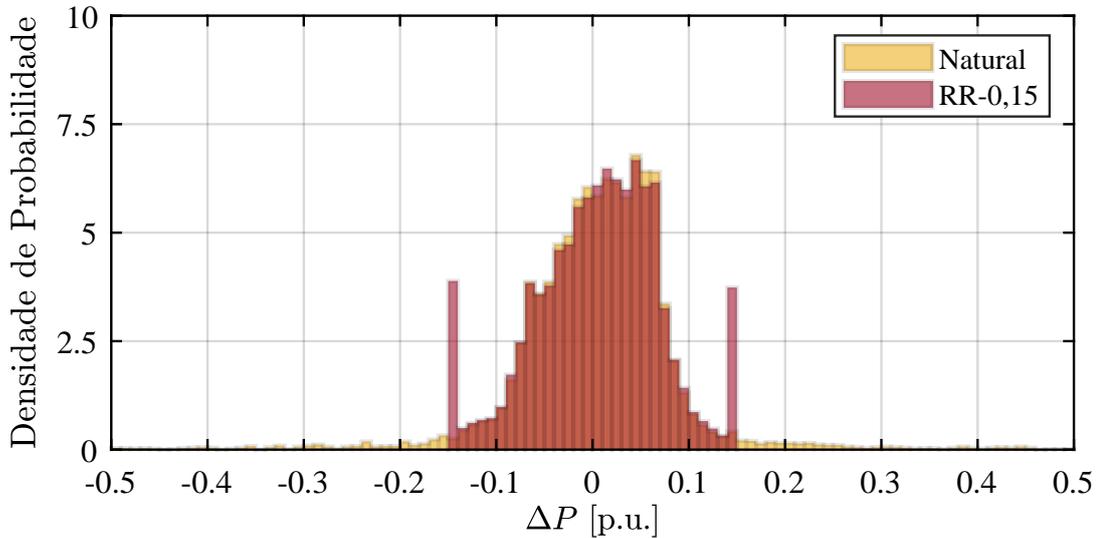
Fonte: Própria do autor (2024).

Tabela 3 – Tabela para os dados de suavização da Taxa de Rampa.

RR	Média Variação ( $pu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma_{\Delta}$ )	Suavização (%)
$\lambda = 0,15 pu$	0,0060	0,0656	100
$\lambda = 0,20 pu$	0,0059	0,0728	100
$\lambda = 0,25 pu$	0,0058	0,0792	95,1096

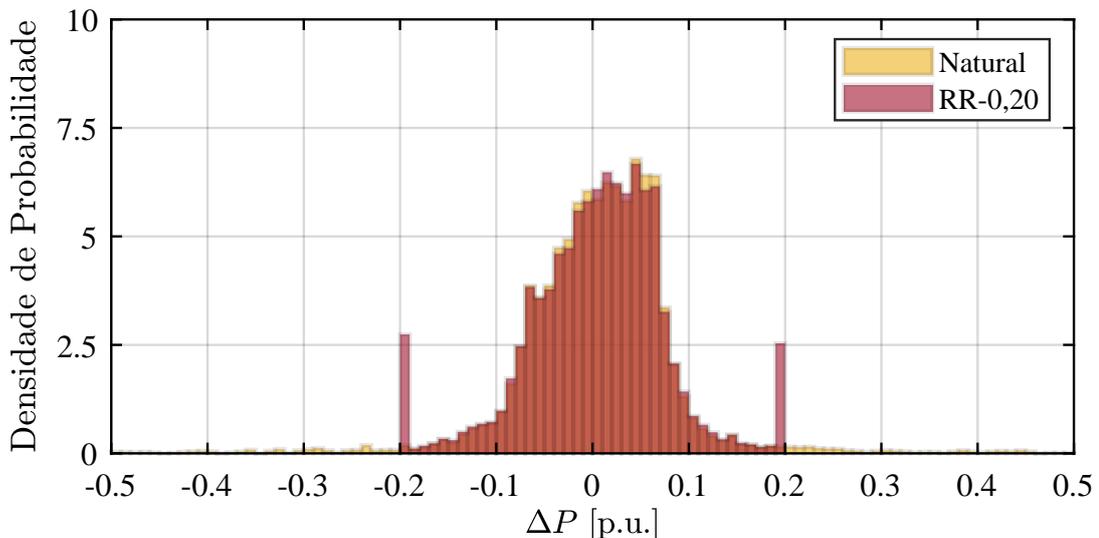
Fonte: Própria do Autor (2024).

Figura 28 – Distribuição de densidade de probabilidade da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma RR para um limite de  $\lambda = 0,15 pu$ .



Fonte: Própria do autor (2024).

Figura 29 – Distribuição de densidade de probabilidade da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma RR para um limite de  $\lambda = 0,20 pu$ .

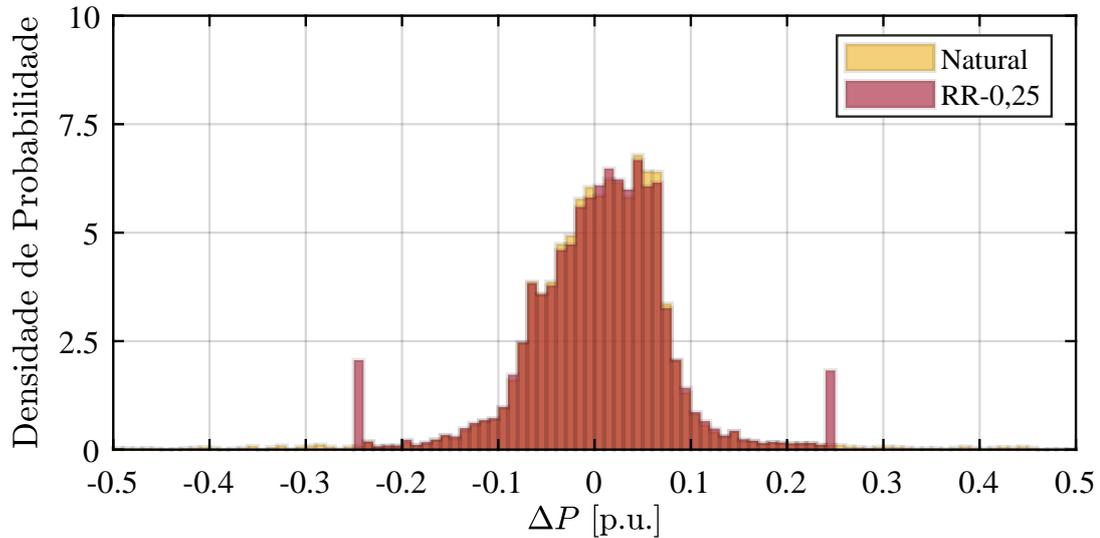


Fonte: Própria do autor (2024).

nesses pontos limites da Taxa de Rampa. Por outro lado, não há amostras que apresentem variações de potência com intensidade superior ao limite imposto pelo algoritmo RR (isso pode ser observado pela ausência de conteúdo na cauda das distribuições de densidade de probabilidade).

Portanto, ao analisar os histogramas e a tabelas com os dados para cada limite da Taxa de Rampa, é possível observar que o valor inicial escolhido de  $\lambda$ , que atende ao requisito de suavizar 99% dos dados e está de acordo com a variação máxima, imposta pelo requisito de projeto, é  $\lambda = 0,20 pu$ .

Figura 30 – Distribuição de densidade de probabilidade da planta. Resultado obtido para a aplicação de uma RR para um limite de  $\lambda = 0,25 pu$ .



Fonte: Própria do autor (2024).

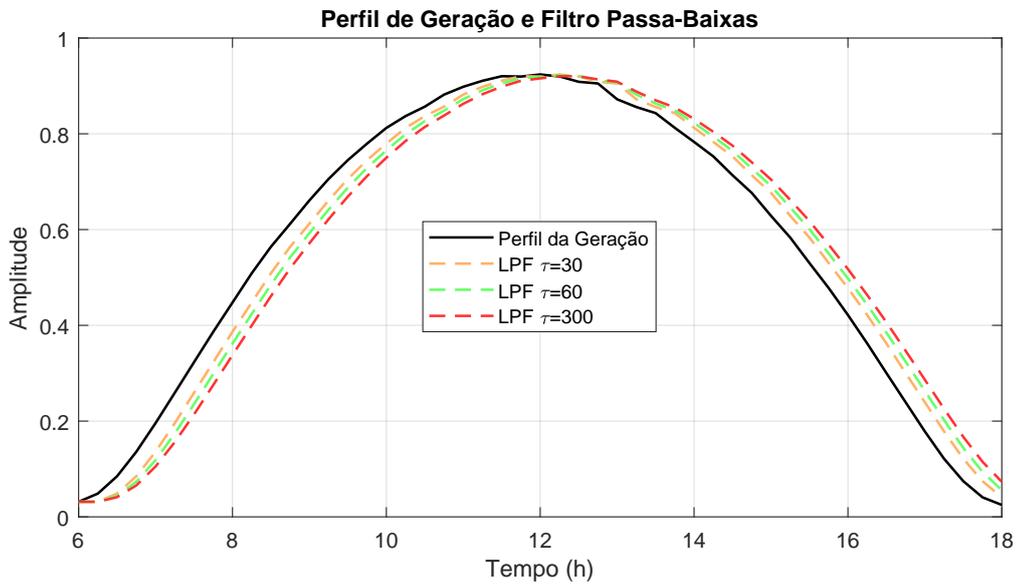
#### 4.2.3 Resultados - Filtro Passa-Baixas

De forma semelhante ao que foi desenvolvido nos métodos anteriores, é feita a escolha de  $\tau$ , na Equação 2.3, de maneira iterativa, seguindo os passos indicados no fluxograma da Figura 15. Para a escolha da constante de tempo, realizou-se as iterações destacadas no fluxograma, variando  $\tau$  até que o requisito de suavização fosse satisfeito. Com o valor da constante de tempo encontrado, a fim de demonstrar características do LPF, variou-se  $\tau$  em  $\pm 350$ , de forma a demonstrar o impacto da constante de tempo para as métricas de comparação, aplicando o filtro para dois dias com características diferentes, casos extremos da geração, conforme indicado nas Figuras 31 e 32.

Uma característica desse método, assim como a SMA, é o atraso na curva de referência em relação à geração, inerente ao funcionamento do LPF. Além disso, observa-se uma suavização relativamente maior nos picos de potência. Após a aplicação do Filtro Passa-Baixas, assim como nos outros métodos de suavização, foi realizada uma análise do conjunto de dados, com base nos histogramas apresentados nas Figuras 28, 29 e 30, variando a constante de tempo. Por conseguinte, pode ser observado na Tabela 4, os valores de média da variação de suavização, desvio padrão e suavização para a comparação entre as constantes de tempo.

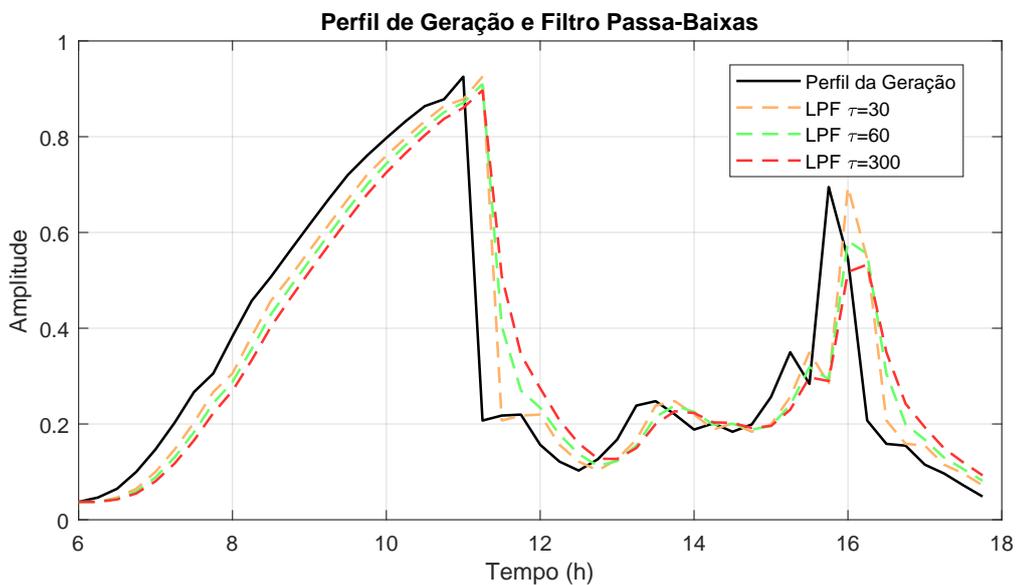
Assim, ao analisar os histogramas e tabelas que apresentam os dados para cada constante de tempo, nota-se que o valor mínimo de  $\tau$  capaz de atender ao critério de suavizar 99% dos dados é  $\tau = 1250$ .

Figura 31 – Aplicação do Filtro Passa-Baixas para um dia com perfil de irradiância próximo ao ideal.



Fonte: Própria do autor (2024).

Figura 32 – Aplicação do Filtro Passa-Baixa para um dia com perfil de irradiância não-ideal.

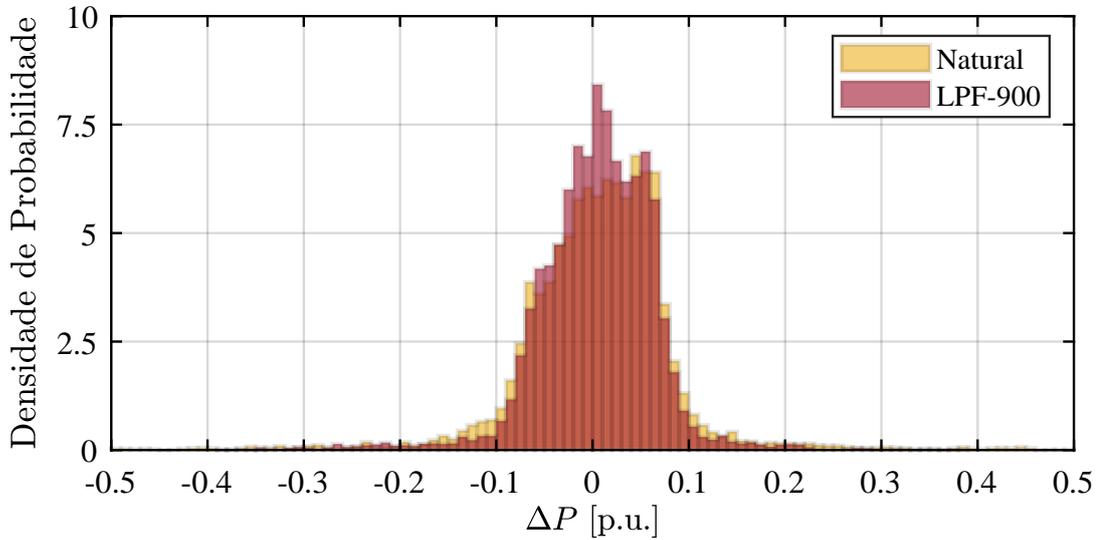


Fonte: Própria do autor (2024).

#### 4.2.4 Comparação entre os Métodos

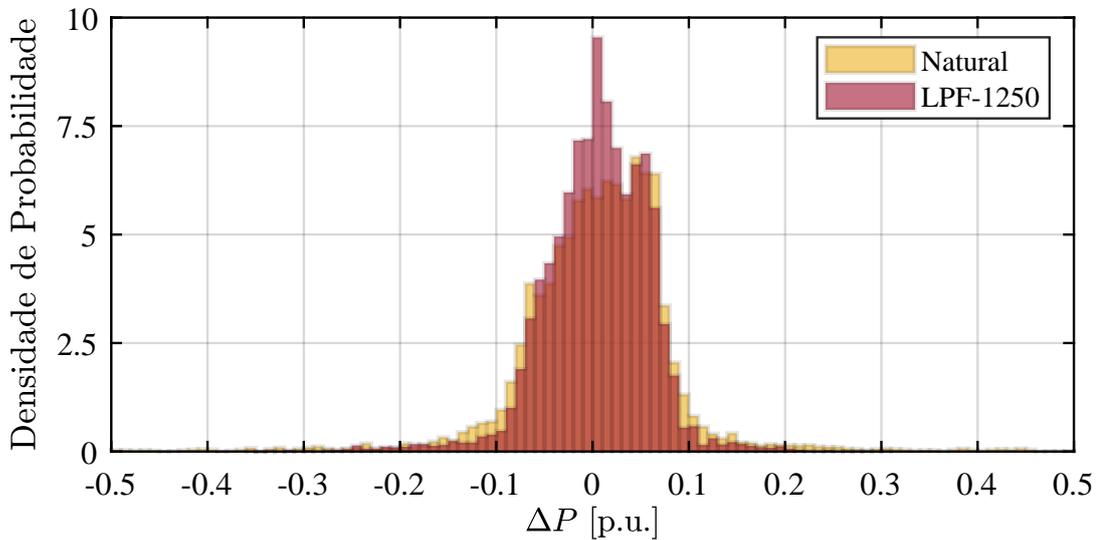
Esta seção possui como objetivo introduzir a comparação entre os métodos de suavização aplicados no conjunto de dados, buscando demonstrar que há variações para a escolha do melhor parâmetro.

Figura 33 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para uma aplicação de um LPF com constante de tempo de  $\tau = 900$ .



Fonte: Própria do autor (2024).

Figura 34 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para uma aplicação de um LPF com constante de tempo de  $\tau = 1250$ .



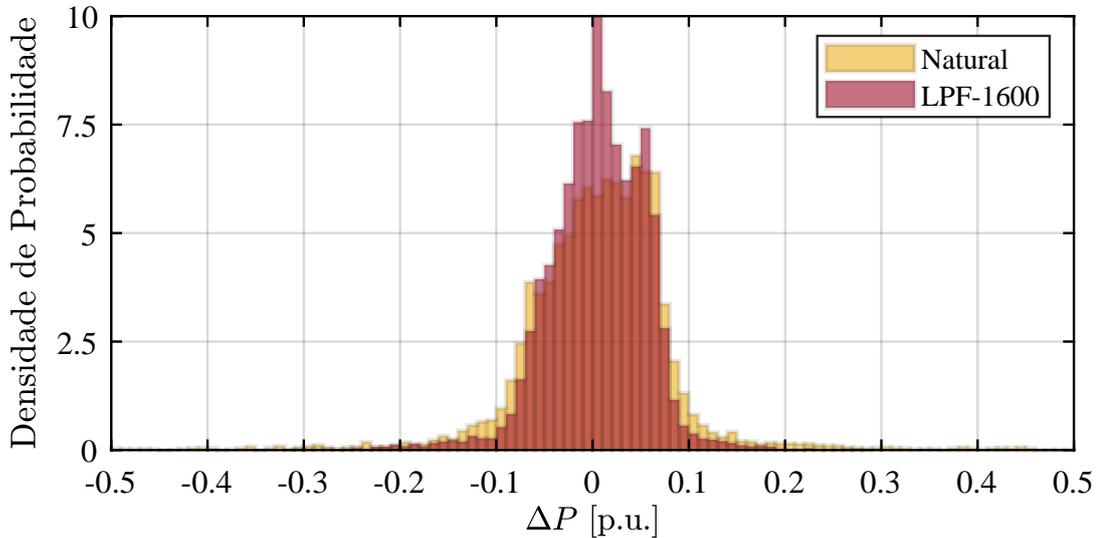
Fonte: Própria do autor (2024).

Tabela 4 – Tabela para os dados de suavização do Filtro Passa-Baixa.

LPF	Média Variação (pu)	Desvio Padrão ( $\sigma_{\Delta}$ )	Suavização (%)
$\tau = 900$	0,0050	0,0618	98,2079
$\tau = 1250$	0,0051	0,0557	99,0392
$\tau = 1600$	0,0053	0,0514	99,4494

Fonte: Própria do Autor (2024).

Figura 35 – Distribuição de densidade de probabilidade da variação de potência da planta. Resultado obtido para uma aplicação de um LPF com constante de tempo de  $\tau = 1600$ .



Fonte: Própria do autor (2024).

#### 4.2.4.1 Avaliação da Variação

Para o desenvolvimento do projeto, considerou-se a suavização de aproximadamente 99% do conjunto de dados, para um intervalo menor ou igual que 0,2 pu em 15 minutos. Portanto, quanto a intensidade, observando a Tabela 5, todos os métodos são passíveis de aplicação. Contudo, é válido destacar que o Filtro Passa-Baixas foi o método que, dentro dos requisitos de projeto, apresentou a porcentagem de suavização mais próxima de 99%.

Tabela 5 – Tabela de análise para a Variação Máxima.

Método	Parâmetro	Suavização (%)
SMA	$n = 4$	99,5608
RR	$\lambda = 0,20 \text{ pu}$	99,4278
LPF	$\tau = 1250$	99,0392

Fonte: Própria do Autor (2024).

#### 4.2.4.2 Análise Probabilística (Desvio Padrão)

Em termos de desvio padrão, pode-se observar na Tabela 6, de forma resumida, os valores para cada um dos métodos de suavização que cumprem com o requisito de projeto, com o acréscimo do desvio padrão natural da planta.

Ao analisar o desvio padrão, deseja-se que este seja o menor possível, pois ele indica que o conjunto de dados está mais próximo da média, portanto, com variações menores e com maior consistência nos dados. Dessa forma, a Tabela 6 destaca dois métodos com desvios padrões bastante semelhantes, nomeadamente o Média Móvel Simples e o Filtro

Tabela 6 – Tabela de análise para o Desvio Padrão.

Método	Parâmetro	Desvio Padrão ( $\sigma_{\Delta}$ )
Natural	-	0,1136
SMA	$n = 4$	0,0551
RR	$\lambda = 0,20 pu$	0,0728
LPF	$\tau = 1250$	0,0557

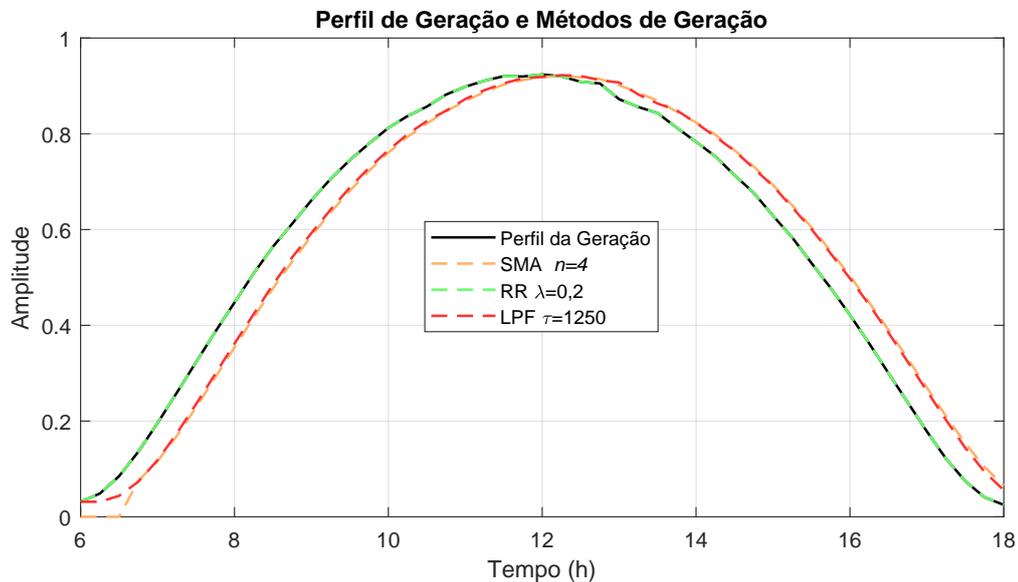
Fonte: Própria do Autor (2024).

Passa-Baixas, sendo o SMA ligeiramente superior, apresentando um desvio padrão um pouco menor.

#### 4.2.4.3 Análise Visual

A análise visual é aplicada para um conjunto de dados pequenos, nos quais alguns casos são analisados em vez do espectro total dos dados. Com a finalidade de demonstrar essa aplicação, as Figura 36 e 37 apresentam a aplicação dos métodos de suavização, para dois dias com perfis de geração significativamente diferentes, com os parâmetros que cumprem com o requisito de suavizar 99% dos dados.

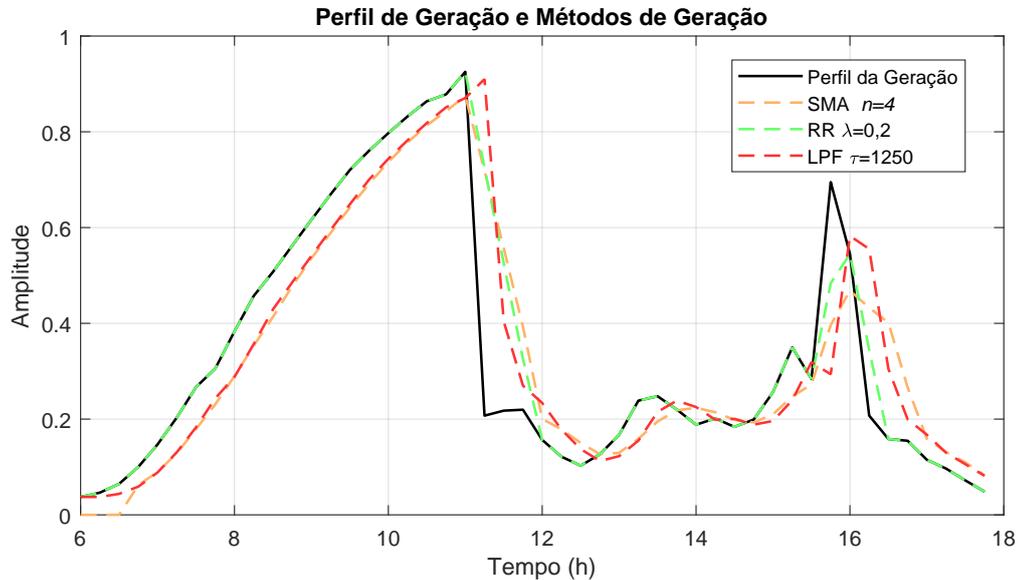
Figura 36 – Aplicação dos métodos de suavização para um dia com perfil de irradiância ideal.



Fonte: Própria do autor (2024).

Com base em uma análise visual, como já foi dito previamente, a Média Móvel Simples e o Filtro Passa-Baixas apresentam um atraso natural, intrinsecamente ligado a aplicação matemática dos métodos. No entanto, na Taxa de Rampa não há esse atraso, podendo ser considerado como um ponto positivo quando comparado aos demais métodos. Portanto,

Figura 37 – Aplicação dos métodos de suavização para um dia com perfil de irradiância não-ideal.



Fonte: Própria do autor (2024).

analisando estritamente de uma forma visual, há um certo destaque a geração de referência utilizando a Taxa de Rampa.

### 4.3 CONCLUSÃO PARCIAL

Neste capítulo, foi fornecida uma explicação sobre o conjunto de dados utilizado para o desenvolvimento do projeto, bem como as etapas associadas ao tratamento dos dados para sua utilização plena para avaliação dos métodos de geração de referência para suavização de potência avaliados. Em seguida, um conjunto de dados disponibilizados de forma pública pela NREL, foi aplicado e comparado para três métodos de geração de referência, SMA, RR e LPF.

Ao comparar os dados obtidos pós-suavização para os três métodos que cumpriram com o requisito de suavizar cerca de 99% dos casos, para a métrica de Variação Máxima, foi possível obter parâmetros que cumprem com o requisito, porém, com índices de suavização diferentes. Já para a utilização do Desvio Padrão, analisando a Tabela 6, é visível que, nos melhores casos (SMA e LPF), houve uma diminuição de aproximadamente 50%, do desvio padrão das variações de potência. Por fim, a utilização de uma Análise Visual pode ser insuficiente para concluir o melhor método de suavização, principalmente por ser utilizado em conjunto com poucos dados, não demonstrando a real natureza da suavização, contudo, ela aponta que o uso do RR pode gerar um sistema com melhor eficiência geral, visto que a bateria será menos demandada quando não houver grandes variações de potência o perfil de geração natural da planta. Utilizando métricas presentes na literatura, é visível a indefinição quanto ao melhor método de suavização de potência.

Mesmo com uma certa indefinição, alguns cenários serão apresentados, onde a utilização de um método se destaca quanto aos outros:

- **Minimização da utilização de reservas operativas para o parque fotovoltaico:**

*Método:* SMA e LPF

*Justificativa:* Verificando os resultados obtidos, é possível perceber uma grande proximidade entre o desvio padrão da variação da suavização para a SMA e LPF. Para fins de dimensionamento das reservas operativas, a utilização de um método que possui um menor desvio padrão, quando comparado, significa um menor dimensionamento, pois esse índice sugere uma menor variabilidade dos dados e a menor necessidade de reservas operativas.

- **Minimização dos custos na implementação do sistema de armazenamento:**

*Método:* RR

*Justificativa:* Analisando o desvio padrão, é notável que a Taxa de Rampa possui o maior valor associado, indicando que haverá uma maior variabilidade de energia para a utilização desse método. Porém, para os mesmos requisitos de projeto, a implementação do RR, reduziu em um grau menor a variabilidade do sistema, quando comparado ao desvio padrão natural da planta, indicando, assim, um menor dimensionamento do sistema de armazenamento.

- **Maior otimização de projeto de suavização de potência:**

*Método:* LPF

*Justificativa:* Quando se é analisado o desvio padrão, em conjunto com a possibilidade de maior precisão no projeto, a utilização do Filtro Passa-Baixas possui uma melhor qualidade comparado aos outros métodos. Devido ao fato que para SMA funciona em janelas de números inteiros, não tendo uma grande precisão, e para o RR tem como limitação imposição da variação máxima pelo código de rede local.

- **Localidade com baixa variação de potência diária:**

*Método:* RR

*Justificativa:* Se há uma comprovação climática que em um local há, de forma histórica e estatística, a utilização da Taxa de Rampa é uma boa opção devido ao comportamento da curva de referência seguir a curva de geração, atuando somente nos eventos que raramente ocorrem.

Portanto, a escolha da melhor implementação, além de ser importante uma análise comparativa entre os métodos, é importante a descrição do cenário e as necessidade em que o projeto será implementado, buscando assim filtrar e concentrar no método de geração de referência para suavização de potência que melhor de encaixa.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi possível realizar o desenvolvimento do projeto para três grandes métodos de suavização de potência presentes na literatura. A aplicação foi conduzida utilizando o software MATLAB/*Simulink* e um conjunto de dados reais, seguida da comparação dos resultados obtidos com base em métricas presentes em trabalhos científicos dessa área de pesquisa.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram abordados, de maneira abrangente, os sistemas de armazenamento presentes em microrredes, incluindo topologias e componentes atuantes para a suavização de potência. Posteriormente, foram elaborados os métodos de geração de referência que foram aplicados, incluindo exemplos ilustrativos tanto visuais quanto numéricos.

Na sequência, apresentou-se o banco de dados disponibilizado pela NREL em (MARION et al., 2021), enfatizando as principais características desse conjunto, como o intervalo de medição e a localização da instalação. Além disso, foram ressaltadas as etapas relacionadas ao processamento dos dados, para a implementação dos métodos de suavização em *scripts* no MATLAB. Com os dados tratados, foi possível aplicar em códigos desenvolvidos para a aplicação dos métodos de geração de referência e realizar a comparação entre os resultados.

Com a comparação, utilizando as métricas encontradas na literatura, ficou evidente a presença de certas limitações, no que se diz respeito à plena utilização de um dos métodos. Dentre os métodos aplicados, o que tem um melhor desempenho, sendo possível obter uma conclusão mais realista quanto ao desempenho da suavização é o Desvio Padrão da diferença, mas mesmo utilizando essa métrica, foi possível encontrar duas suavizações com comportamentos muito próximos, que foi a Média Móvel Simples e o Filtro Passa-Baixas.

Porém, ainda seria necessário realizar uma com outros bancos de dados, com a finalidade de avaliar e comparar o comportamento do desvio padrão. E, ainda, com o emprego das outras métricas apresentadas, a Variação Máxima, não define de forma efetiva o melhor método e a Análise Visual não consiste em uma boa métrica para a avaliação, dado a diversidade e quantidade de dados. A métrica que apresenta uma melhor índice para comparar, visando, principalmente o dimensionamento do sistema de armazenamento, é o Desvio Padrão.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo final do trabalho concluído, aplicando e comparando os métodos de suavização de potência, sugere-se, para trabalhos futuros, alguns tópicos importantes a serem desenvolvidos:

- Ampliar a aplicação dos métodos de suavização de potência para variados conjuntos

de dados, abrangendo não só a geração solar, mas, também, eólica, com o objetivo de reforçar as estratégias de suavização;

- Aplicar o mesmo processo de projeto e requisitos para outros métodos de geração de referência presentes na literatura;
- Propor um novo método de suavização de potência, que busquem indicar de forma assertiva a melhor utilização do método de suavização para o caso aplicado;
- Aprofundar nas métricas de comparação entre os métodos de suavização, com a finalidade de encontrar formas mais assertivas de indicar a melhor métrica, podendo até propor uma métrica para a comparação.

## 5.2 PUBLICAÇÕES

Em decorrência deste trabalho, houve a publicação do seguinte artigo em anais de congresso:

- DE SOUZA, RICARDO M.; **FERREIRA, F. J. P.**; NETO, A. S.; NETO, R. C.; NEVES, F. A. S.; CASTRO, J. F. C.. *A Comparative Analysis of Power Smoothing Metrics: Unveiling Limitations Through Observational Data*. 2023 8th IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC) / 17th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), 2023.

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, G. M. D. S. *Controle e Operação de Conversores em Microrredes*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- BARRA, P.; de Carvalho, W.; MENEZES, T.; FERNANDES, R.; COURY, D. A review on wind power smoothing using high-power energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 137, p. 110455, 2021. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307413>>.
- DIAZ, V. N. S. *Avaliação de Desempenho das Estratégias de Controle Para Suavização de Potência Ativa de Sistemas Fotovoltáicos com Armazenamento de Energia*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2019.
- DUAN, S.; ZHANG, S.; WEN, F.; SHAHNIA, F.; PALU, I.; ZOU, B.; DAI, P. Current situation and prospect of grid codes for a power system with integrated photovoltaic generation. In: *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 832–836.
- D'AMICO, G.; PETRONI, F.; VERGINE, S. Ramp rate limitation of wind power: An overview. *Energies*, v. 15, n. 16, 2022. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/5850>>.
- GONZALEZ-MORENO, A.; MARCOS, J.; de la Parra, I.; MARROYO, L. A pv ramp-rate control strategy to extend battery lifespan using forecasting. *Applied Energy*, v. 323, p. 119546, 2022. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922008601>>.
- HAQUE, M. E.; KHAN, M. N. S.; SHEIKH, M. R. I. Smoothing control of wind farm output fluctuations by proposed low pass filter, and moving averages. In: *2015 International Conference on Electrical Electronic Engineering (ICEEE)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 121–124.
- KHALID, M.; SAVKIN, A. A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage. *Renewable Energy*, v. 35, n. 7, p. 1520–1526, 2010. ISSN 0960-1481. Special Section: IST National Conference 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109005175>>.
- KINI, R.; RAKER, D.; STUART, T.; ELLINGSON, R.; HEBEN, M.; KHANNA, R. Mitigation of pv variability using adaptive moving average control. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 11, n. 4, p. 2252–2262, 2020.
- LAMSAL, D.; SREERAM, V.; MISHRA, Y.; KUMAR, D. Output power smoothing control approaches for wind and photovoltaic generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 113, p. 109245, 2019. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119304459>>.

- LANDERA, Y. G.; ZEVALLOS, O. C.; NETO, R. C.; CASTRO, J. F. d. C.; NEVES, F. A. S. A review of grid connection requirements for photovoltaic power plants. *Energies*, v. 16, n. 5, 2023. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/5/2093>>.
- LI, X.; HUI, D.; LAI, X. 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, 2013.
- LV, Q.; ZHANG, J.; DING, K.; ZHANG, Z.; ZHU, H.; HOU, R. The output power smoothing method and its performance analysis of hybrid energy storage system for photovoltaic power plant. In: *2021 10th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 36–39.
- MARION, B.; ANDERBERG, A.; DELINE, C.; MULLER, M.; PERRIN, G.; RODRIGUEZ, J.; RUMMEL, S.; SILVERMAN, T.; VIGNOLA, F.; BARKASZI, S. Data for validating models for pv module performance. 8 2021.
- MARION, B.; DECEGLIE, M. G.; SILVERMAN, T. J. Analysis of measured photovoltaic module performance for florida, oregon, and colorado locations. *Solar Energy*, v. 110, p. 736–744, 2014. ISSN 0038-092X.
- NGUYEN, C.-L.; LEE, H.-H. Power management approach to minimize battery capacity in wind energy conversion systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 53, n. 5, p. 4843–4854, 2017.
- PEPERMANS, G.; DRIESEN, J.; HAESLONCKX, D.; BELMANS, R.; D'HAESELEER, W. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*, v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421503003069>>.
- SHI, J.; WANG, L.; LEE, W.-J.; CHENG, X.; ZONG, X. Hybrid energy storage system (hess) optimization enabling very short-term wind power generation scheduling based on output feature extraction. *Applied Energy*, v. 256, p. 113915, 2019. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919316022>>.
- SUKUMAR, S.; MARSADEK, M.; AGILESWARI, K.; MOKHLIS, H. Ramp-rate control smoothing methods to control output power fluctuations from solar photovoltaic (pv) sources—a review. *Journal of Energy Storage*, v. 20, p. 218–229, 2018. ISSN 2352-152X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18302366>>.
- SYED, M. A.; ABDALLA, A. A.; AL-HAMDI, A.; KHALID, M. Double moving average methodology for smoothing of solar power fluctuations with battery energy storage. In: *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 291–296.
- TELEKE, S.; BARAN, M. E.; HUANG, A. Q.; BHATTACHARYA, S.; ANDERSON, L. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 24, n. 3, p. 725–732, 2009.

- WANG, C. Quantitative analysis on the bullwhip effect in a supply chain using double moving average and double exponential smoothing forecasts. In: *2008 International Symposiums on Information Processing*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 114–118.
- YANG, Z.-L.; LI, Z.-Z.; LIU, R.-X.; HOU, J.-Y.; ZHANG, J. Fitting the variations from the wind speed to the active power of a wind powered generator by a low-pass filter. In: *2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1685–1690.
- ZHOU, Y.; YAN, Z.; LI, N. A novel state of charge feedback strategy in wind power smoothing based on short-term forecast and scenario analysis. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 8, n. 2, p. 870–879, 2017.
- ZHOU, Y.; YANG, L. Control strategy to smooth wind power fluctuations of pmsg wind turbine based on the secondary exponential moving average method. In: *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5.

## APÊNDICE A – CÓDIGOS NO MATLAB

Os códigos fornecidos neste apêndice foram criados utilizando o *software* MATLAB, utilizado para implementar os métodos de suavização de potência empregados neste trabalho. Nesse contexto, estão dispostos a baixo os *scripts* para a implementação dos algoritmos Média Móvel Simples, Taxa de Rampa e Filtro Passa-Baixas.

### Código no MATLAB para a aplicação da Média Móvel Simples

```
clear;
load sequencia_dados_ger_golden.mat;
seq_suav = sequencia_dados_ger_golden';
[m,n] = size(seq_suav);
MM = [];
dif_MM = [];
dados_ger=[];
janela_MM = [3 4 5];
len = [];
tic

for a = 1:m
    data = seq_suav(a,:);
    sampleTime = 15*60;
    mascara_nan = isnan(data);
    data_sem_nan = data;
    data_sem_nan(mascara_nan) = [];
    tam = length(data_sem_nan);
    SMA = zeros(size(tam));
    len = [len, length(data_sem_nan)];

    if length(data_sem_nan) > janela_MM(1)-1
        for i = janela_MM(1):tam
            SMA(i) = mean(data_sem_nan(i - janela_MM(1) + 1:i));
        end

        MM = [MM,SMA];
        dif_MM = [dif_MM,diff(SMA(janela_MM(1):end))];
        dados_ger = [dados_ger,diff(data_sem_nan(1:end))];
    end
end
```

```
end
```

```
e1_time = toc;
fprintf('\nOkk! (%.2f seconds to complete)\n',e1_time);
```

### Código no MATLAB para a aplicação da Taxa de Rampa

```
clear
load sequencia_dados_ger_golden.mat;
seq_suav = sequencia_dados_ger_golden';
[m,n] = size(seq_suav);
RR = [];
dif_RR = [];
dados_ger=[];
limite_superior = 0.2;
limite_inferior = -0.2;
tic

for a = 1:m
    data = seq_suav(a,:);
    sampleTime = 5*60;
    mascara_nan = isnan(data);
    data_sem_nan = data;
    data_sem_nan(mascara_nan) = [];
    ramp_rate = diff(data_sem_nan);
    tam = length(data_sem_nan);
    SMA = zeros(size(tam));

    if length(data_sem_nan) > 4
        dados_da_geracao = data_sem_nan;
        ramp_rate(ramp_rate > limite_superior) = limite_superior;
        ramp_rate(ramp_rate < limite_inferior) = limite_inferior;
        dados_reconstruidos = cumsum([dados_da_geracao(1), ramp_rate]);
        RR = [RR,dados_reconstruidos];
        dif_RR = [dif_RR,diff(dados_reconstruidos(1:end))];
        dados_ger = [dados_ger,diff(dados_da_geracao(2:end))];
    end
end
e1_time = toc;
fprintf('\nOkk! (%.2f seconds to complete)\n',e1_time)
```

### Código no MATLAB para a aplicação do Filtro Passa-Baixas

```

clear
load sequencia_dados_ger_golden.mat;
seq_suav = sequencia_dados_ger_golden';
[m,n] = size(seq_suav);
res_simu=[];
dif = [];
res = [];
dados_ger=[];
len = [];
cons_vet = [1250];
tic

for a = 1:m

    data = seq_suav(a,:);
    sampleTime = 15*60;
    mascara_nan = isnan(data);
    data_sem_nan = data;
    data_sem_nan(mascara_nan) = [];
    len = [len, length(data_sem_nan)];

    if length(data_sem_nan) > 4
        numSteps = length(data_sem_nan);
        time = sampleTime*[0:(numSteps-1)];
        time = time';
        inputData = timeseries(data_sem_nan,time);
        dados_ger = [dados_ger,diff(data_sem_nan(2:end))];
        tout = time(end);
        save("geracao_dados.mat","inputData","-v7.3");

    for i = cons_vet
        simu_suav = [];
        dif_suav = [];
        numerator = 1;
        cons = cons_vet(i);
        denominator = [i,1];
        filtro = tf(numerator,denominator);
        sim('simu');
    end
end

```

```
        simulacao = ans.suav;  
        dif = [dif;diff(simulacao(1:end))];  
        res_simu = [res_simu;ans.suav];  
    %end  
end  
  
else  
    continue  
end
```