



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CAMPUS DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CECA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA



ESTUDO DE CASO DA OCORRÊNCIA DE RAMPAS DE POTÊNCIA EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NA CIDADE DE MACEIÓ-AL

CLEDSON CALAÇA CAVALCANTE GOMES

Rio Largo - AL, 2023

CLEDSON CALAÇA CAVALCANTE GOMES

**ESTUDO DE CASO DA OCORRÊNCIA DE RAMPAS DE POTÊNCIA
EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NA CIDADE DE MACEIÓ-AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL - Campus de Engenharia e Ciências Agrárias - CECA, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia, sob orientação do Prof. Dr. Igor Cavalcante Torres.

Rio Largo - AL, 2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

G633e Gomes, Cledson Calaça Cavalcante.

Estudo de caso da ocorrência de rampas de potência em um sistema fotovoltaico na cidade de Maceió-AL / Cledson Calaça Cavalcante Gomes. – 2023.

65f.: il.

Orientador(a): Igor Cavalcante Torres.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. Rampas. 2. Potência. 3. Irradiância. I. Título.

CDU: 620.91: 981.35

Folha de Aprovação

CLEDSON CALAÇA CAVALCANTE GOMES

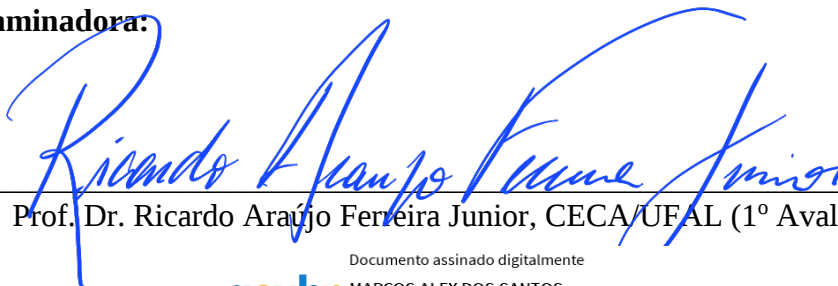
Estudo de caso da ocorrência de rampas de potência em um sistema fotovoltaico na cidade de Maceió-AL.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia pela Universidade Federal de Alagoas. Aprovado em 10 de fevereiro de 2023.

Documento assinado digitalmente
 IGOR CAVALCANTE TORRES
Data: 24/02/2023 10:58:40-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Igor Cavalcante Torres, CECA/UFAL (Orientador)

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Ricardo Araújo Ferreira Junior, CECA/UFAL (1º Avaliador)

Documento assinado digitalmente
 MARCOS ALEX DOS SANTOS
Data: 24/02/2023 14:41:27-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Marcos Alex Dos Santos, CECA/UFAL (2º Avaliador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por minha vida e por me dar saúde, força de vontade, inspiração e por nunca me deixa desistir de terminar esta graduação em Engenharia de Energia.

Agradeço à minha esposa Islânia por estar sempre ao meu lado durante esta trajetória, me apoiando e me ajudando da melhor maneira possível, além de cuidar com muito amor dos nossos filhos, Valentim e Isadora, que nasceram no meio deste processo e fizeram com que a gente diminuísse um pouco o ritmo de estudo e trabalho para poder dedicar mais tempo para nossa família.

Agradeço ao Prof. Igor, que além de um excelente professor e profissional se mostrou um grande amigo durante esse período da graduação, sempre me aconselhando e me orientando nas minhas decisões pessoais e acadêmicas e que geraram alguns bons frutos, como a apresentação e publicação de artigos em congressos internacionais e nacionais sobre nossas pesquisas.

Agradeço também a todos os professores do curso que se propuseram a dividir o conhecimento adquirido por eles comigo e com os demais colegas do curso durante a graduação. Um agradecimento especial aos professores: Amanda, Márcio, Alana, Leonardo, Ricardo, Sandro, Jerusa e Fábio.

Agradeço também a todos os amigos e colegas que pude dividir o tempo nas salas de aula, bibliotecas e em outros locais da universidade e fora dela, foram diversos bons momentos onde cada um teve também sua pequena parcela de contribuição para que hoje eu pudesse chegar onde estou.

Enfim, Engenheiro de Energia.

RESUMO

A quantidade de energia produzida a partir de sistemas fotovoltaicos depende diretamente da irradiância solar, sendo as mudanças climáticas, como a formação de chuvas e os movimentos das nuvens, a principal razão para a flutuação da potência de saída em sistemas fotovoltaicos. Tão importante quanto a análise das variações de irradiância solar, é a análise das consequentes variações da potência de saída do sistema. Estas variações bruscas podem ser definidas como rampas, e podem causar flutuações na geração de energia fotovoltaica, podendo impactar negativamente a estabilidade da rede. Este trabalho apresenta os principais conceitos encontrados na literatura sobre essas rampas, sejam elas de irradiância ou potência, apresentando também suas principais características e os problemas mais comuns que elas podem causar em sistemas fotovoltaicos. É apresentado um estudo de caso, utilizando dados coletados durante 18 meses por um sistema de aquisição de dados acoplado a um sistema fotovoltaico experimental de 5,1 kWp, para identificação, análise e classificação das rampas de potência utilizando uma ferramenta computacional, denominada *Ramp Rate Analyzer*, desenvolvida exclusivamente para esta finalidade. Com a flexibilidade que a ferramenta apresentou, ficou claro sua contribuição no sentido de classificar e apresentar de forma rápida, através de gráficos, a ocorrência de rampas de potência em um sistema fotovoltaico qualquer, variando apenas o tamanho do sistema, o intervalo de rampas e o período temporal que se deseja analisar.

Palavras-chave: Rampas, Potência, Irradiância.

ABSTRACT

The amount of energy produced from photovoltaic systems depends directly on solar irradiance, with climate changes, such as rain formation and cloud movements, the main reason for the fluctuation of output power in photovoltaic systems. As important as the analysis of variations in solar irradiance, is the analysis of the consequent variations in the output power of the system. These sudden variations can be defined as ramps, and can cause fluctuations in the generation of photovoltaic energy, which can negatively impact the stability of the grid. This work presents the main concepts found in the literature about these ramps, whether they are irradiance or power, also presenting their main characteristics and the most common problems they can cause in photovoltaic systems. A case study is presented, using data collected during 18 months by a data acquisition system coupled to an experimental photovoltaic system of 5.1 kWp, for identification, analysis and classification of power ramps using a computational tool called *Ramp Rate Analyzer*, developed exclusively for this purpose. With the flexibility that the tool presented, it became clear its contribution in the sense of quickly classifying and presenting, through graphs, the occurrence of power ramps in any photovoltaic system, varying only the size of the system, the interval of ramps and the time period of analysis.

Keywords: Ramp, Solar Power, Solar Irradiance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de passagem das nuvens sobre um sistema fotovoltaico, causando sombreando no sistema. Fonte: Adaptado de Hoff e Perez (2010).	14
Figura 2 – Representação da variabilidade da irradiância solar e da potência fotovoltaica. Fonte: Torres (2021).	17
Figura 3 – Métodos de cálculo da rampa: 1. Diferença entre dois pontos em um intervalo de 60 segundos $(P_4 - P_1)/(t_4 - t_1)$; 2. Diferença entre os valores mínimo/máximo de um intervalo considerado $(P_3 - P_2)/(t_3 - t_2)$; 3. Diferença entre dois pontos em um intervalo de um segundo $(P_6 - P_5)/1s$. Fonte: Martins et al. (2019).	18
Figura 4 – Classificação de eventos de Rampas. Fonte: Adaptado de Abuella e Chowdhury (2019).	20
Figura 5 – Princípio operacional do algoritmo de controle de rampas de potência (PRRC): modo MPPT (A→B) e modo PRRC (B→C). Fonte: Adaptado de Blaabjerg et al. (2018).	25
Figura 6 – Esquema do sistema de aquisição de dados SCADA presente no sistema fotovoltaico utilizado no trabalho. Fonte: Autoria própria. . .	27
Figura 7 – Tela principal do <i>Ramp Rate Analyzer</i> . Fonte: Autoria própria. . . .	28
Figura 8 – Tela principal do <i>Ramp Rate Analyzer</i> . Fonte: Autoria própria. . . .	28
Figura 9 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 17/01/2020. Fonte: Autoria própria.	29
Figura 10 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 17/01/2020, no período entre 09h e 10h. Fonte: Autoria própria. . . .	30
Figura 11 – Rampas de potência com variação entre 30% e 40% ocorridas no dia 23/06/2020. Fonte: Autoria própria.	31
Figura 12 – Rampas de potência com variação entre 30% e 40% ocorridas no dia 23/06/2020, no período entre 11h e 12h. Fonte: Autoria própria. . . .	31
Figura 13 – Filtros de análise de rampas do <i>Ramp Rate Analyzer</i> . Fonte: Autoria própria.	34
Figura 14 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 10% e 20% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria. .	36
Figura 15 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 20% e 30% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria. .	36
Figura 16 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 30% e 40% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria. .	37

Figura 17 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 40% e 50% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria. .	37
Figura 18 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 50% e 60% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria. .	38
Figura 19 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 60% e 70% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria. .	38
Figura 20 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 70% e 80% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria. .	39
Figura 21 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 80% e 90% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria. .	39
Figura 22 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 90% e 100% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.	40
Figura 23 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Janeiro/2020. Fonte: Autoria própria.	41
Figura 24 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Fevereiro/2020. Fonte: Autoria própria.	41
Figura 25 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Março/2020. Fonte: Autoria própria.	42
Figura 26 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Abril/2020. Fonte: Autoria própria.	42
Figura 27 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Maio/2020. Fonte: Autoria própria.	43
Figura 28 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Junho/2020. Fonte: Autoria própria.	43
Figura 29 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Julho/2020. Fonte: Autoria própria.	44
Figura 30 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Agosto/2020. Fonte: Autoria própria.	44
Figura 31 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Setembro/2020. Fonte: Autoria própria.	45
Figura 32 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Outubro/2020. Fonte: Autoria própria.	45
Figura 33 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Novembro/2020. Fonte: Autoria própria.	46
Figura 34 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Dezembro/2020. Fonte: Autoria própria.	46
Figura 35 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Janeiro/2020. Fonte: Autoria própria.	47

Figura 36 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Fevereiro/2020. Fonte: Autoria própria.	47
Figura 37 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Março/2020. Fonte: Autoria própria.	48
Figura 38 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Abril/2020. Fonte: Autoria própria.	48
Figura 39 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Maio/2020. Fonte: Autoria própria.	49
Figura 40 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Junho/2020. Fonte: Autoria própria.	49
Figura 41 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Julho/2020. Fonte: Autoria própria.	50
Figura 42 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Agosto/2020. Fonte: Autoria própria.	50
Figura 43 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Setembro/2020. Fonte: Autoria própria.	51
Figura 44 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Outubro/2020. Fonte: Autoria própria.	51
Figura 45 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Novembro/2020. Fonte: Autoria própria.	52
Figura 46 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Dezembro/2020. Fonte: Autoria própria.	52
Figura 47 – Ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 10% e 20% no mês de setembro de 2020. Fonte: Autoria própria.	53
Figura 48 – Ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 40% e 50% no mês de janeiro de 2020. Fonte: Autoria própria.	53
Figura 49 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 10/09/2020. Fonte: Autoria própria.	55
Figura 50 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 10/09/2020, no período entre 12h e 13h. Fonte: Autoria própria.	55
Figura 51 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 10/09/2020, no período entre 13h e 14h. Fonte: Autoria própria.	56
Figura 52 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 10/09/2020, no período entre 14h e 15h. Fonte: Autoria própria.	56
Figura 53 – Rampas de potência com variação entre 40% e 50% ocorridas no dia 17/01/2020. Fonte: Autoria própria.	57
Figura 54 – Rampas de potência com variação entre 40% e 50% ocorridas no dia 17/01/2020, no período entre 11h e 12h. Fonte: Autoria própria.	57

Figura 55 – Rampas de potência com variação entre 40% e 50% ocorridas no dia 17/01/2020, no período entre 12h e 13h. Fonte: Autoria própria. . . .	58
Figura 56 – Rampas de potência com variação entre 40% e 50% ocorridas no dia 17/01/2020, no período entre 13h e 14h. Fonte: Autoria própria. . . .	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de Rampas permitidos em outras localidades no mundo. Fonte: Autoria própria.	19
Tabela 2 – Dias analisados e dias descartados devido às inconsciências nos dados. Fonte: Autoria própria.	32
Tabela 3 – Exemplo de dados analisados pelo <i>Ramp Rate Analyzer</i> . Fonte: Autoria própria.	33
Tabela 4 – Quantitativo mensal da ocorrência de Rampas de Potência, mês a mês, entre Janeiro/2020 e Junho/2021. Fonte: Autoria própria. . . .	59
Tabela 5 – Quantitativo da ocorrência de Rampas de Potência no mês de Ja- neiro/2020. Fonte: Autoria própria.	60
Tabela 6 – Quantitativo da ocorrência de Rampas de Potência no mês de Se- tembro/2020. Fonte: Autoria própria.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARIMA	Auto Regressive Integrated Moving Average
BESS	Battery Energy Storage System
GFS	Global Forecast System
kWp	Kilowatt Pico
LRE	Load Ramp Event
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Track
NWP	Numerical Weather Prediction
PRRC	Power Ramp Rate Control
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RR	Ramp Rate
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SPRE	Solar Power Ramp Event
WPRE	Wind Power Ramp Event

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Geral	15
1.1.2	Específicos	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Definição de Rampas	16
2.2	Importância da Caracterização de Rampas	18
2.3	Características	20
2.4	Problemas Ocasionados por Rampas	21
2.5	Métodos de Mitigação e Controle de Rampas	22
3	METODOLOGIA	27
3.1	<i>Ramp Rate Analyzer</i>	28
3.2	<i>Tratamento e análise dos dados</i>	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Comparativo mensal da ocorrência de rampas de potência no ano de 2020	35
4.2	Análise mensal da ocorrência de rampas de potência	52
4.3	Análises diária e horária da ocorrência de rampas de potência	54
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1	Perspectivas futuras	62
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A intermitência do recurso solar é um dos temas mais estudados nos últimos anos pelos cientistas das mais diversas áreas. Estes estudos costumam ser amplos e bem detalhados, uma vez que levam em consideração um vasto número de variáveis de comportamento aleatório, como por exemplo: irradiância solar, temperatura, velocidade do vento, etc.

A maioria destes estudos e métodos busca investigar e subsidiar o crescimento da geração de energia solar, seja ela fotovoltaica ou térmica, otimizando a geração de energia e diminuindo as perdas de energia gerada, sem reduzir sua qualidade, mantendo também a segurança dos sistemas de transmissão e distribuição de eletricidade.

A quantidade de energia produzida a partir de sistemas fotovoltaicos depende diretamente da irradiância solar. No entanto, as mudanças climáticas, como a formação de chuvas e os movimentos das nuvens (Figura 1), são a principal razão para a flutuação da potência de saída em sistemas fotovoltaicos.

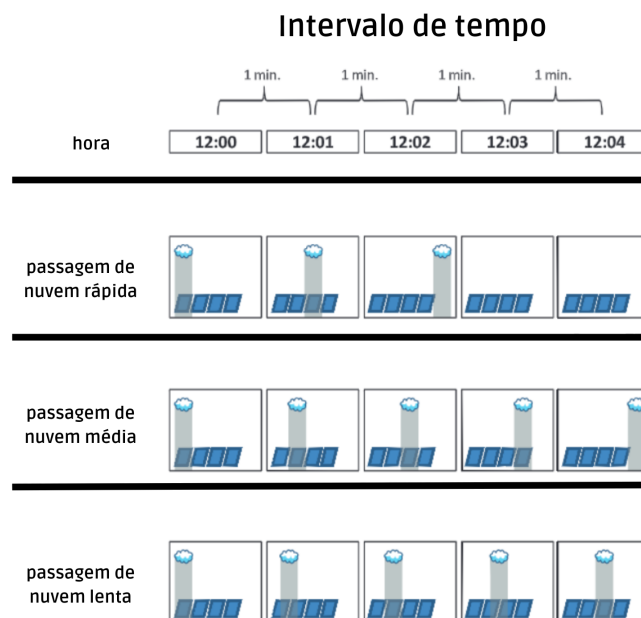


Figura 1 – Exemplo de passagem das nuvens sobre um sistema fotovoltaico, causando sombreando no sistema. Fonte: Adaptado de Hoff e Perez (2010).

É possível observar na Figura 1 um exemplo de como as nuvens podem influenciar na geração de energia de acordo com a velocidade (rápida, média ou lenta)

que elas cruzam o céu, sombreando o sistema e influenciado na captação da irradiância solar por parte dos módulos fotovoltaicos.

No entanto, tão importante quanto a análise das variações de irradiância solar, é a análise das conseqüentes variações da potência de saída do sistema. Estas variações podem ser definidas como Rampas. Essas rampas são geralmente ocasionadas por nuvens em movimento, causando flutuações na potência instantânea do gerador fotovoltaico, podendo impactar negativamente a estabilidade da rede.

Assim, este trabalho apresenta os principais conceitos encontrados na literatura sobre rampas, sejam elas de irradiância ou potência, apresentando também suas principais características e os problemas mais comuns que elas podem causar em sistemas fotovoltaicos.

Além disso, é apresentado um estudo de caso, utilizando dados coletados durante 18 meses por um sistema fotovoltaico experimental de 5,1 kWp, para identificação, análise e classificação das rampas de potência ocorridas nesse sistema durante o período analisado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Este trabalho apresenta como objetivo geral a identificação, análise e classificação das rampas de potência encontradas durante um período de 18 meses (jan/2020 a jul/2021) de medição de dados de um sistema fotovoltaico experimental de 5,1 kWp.

1.1.2 Específicos

- Apresentar os principais aspectos conceituais encontrados na literatura sobre rampas;
- Coletar e tratar os dados de medição do sistema fotovoltaico experimental;
- Desenvolver uma ferramenta computacional que facilite a identificação, análise e classificação de rampas a partir de um banco de dados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DEFINIÇÃO DE RAMPAS

As rampas podem ser definidas pelas variações de potência, ou variações de irradiância, durante um certo intervalo de tempo, conforme a Equação 1 abaixo:

$$R = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (1)$$

onde Δp refere-se à diferença de potência, ou irradiância, em um determinado período de tempo Δt .

Por exemplo, considerando um intervalo de tempo Δt de 1 minuto, tem-se que a potência em W injetada na rede por um sistema fotovoltaico no instante t_1 tenha sido 3000 W, e no instante t_2 tenha sido 3500 W. Desta forma, tem-se neste exemplo uma rampa de potência R igual a 500 W/min.

Eventos de rampa podem ocorrer na geração de energia eólica, na geração de energia solar e também na carga, e são causados por vários fatores diferentes. De acordo com Cui et al. (2017), os eventos de rampa de energia eólica (*Wind Power Ramp Events – WPRE*) são geralmente causados por processos físicos e fenômenos atmosféricos, como tempestades, rajadas de vento e ciclones. Nos eventos de rampa de energia solar (*Solar Power Ramp Events – SPRE*), os microclimas de curto prazo, como, por exemplo, nuvens passageiras, são a principal razão, além da própria variabilidade diurna. Já os eventos de rampa de carga (*Load Ramp Events – LRE*) são impulsionados principalmente pelo comportamento humano, através de aquecimento e resfriamento de edifícios ou grandes cargas industriais.

Os eventos de rampa solar podem ser classificados em duas categorias com base nos assuntos estudados: eventos de rampa de irradiância e eventos de rampa de potência. Os estudos destes eventos são muito importantes para um melhor entendimento e gerenciamento, para o controle de inversores, para o gerenciamento de sistemas fotovoltaicos, assim como para operações de despacho em tempo real de

usinas de energia solar.

A Figura 2.a apresenta um intervalo de tempo com variações da irradiância solar, onde é possível observar a variabilidade deste recurso solar, bem como algumas rampas positivas e negativas de irradiância. O reflexo desse fenômeno é propagado para a potência elétrica na saída do inversor (Figura 2.b) que apresenta as flutuações, além de rampas positivas e negativas, de potência ocorridas no lado do inversor.

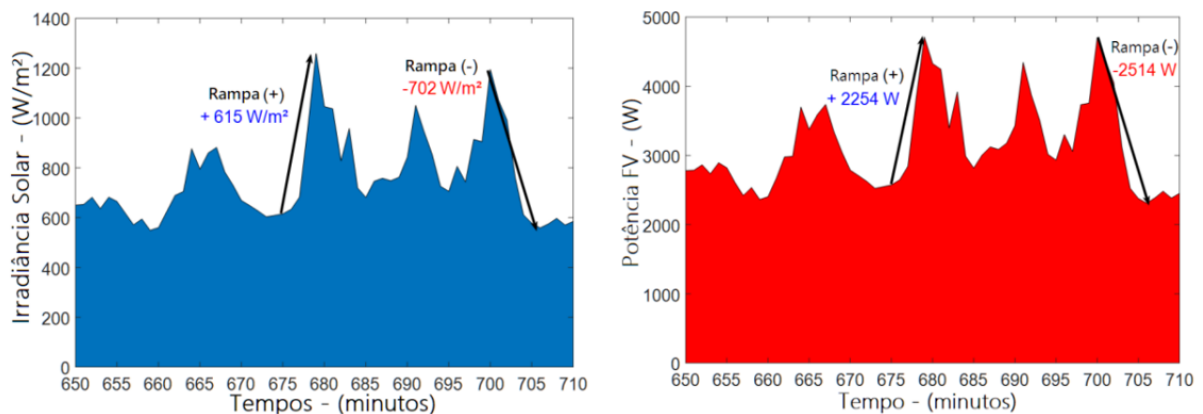


Figura 2 – Representação da variabilidade da irradiância solar e da potência fotovoltaica. Fonte: Torres (2021).

É possível perceber uma forte correlação entre os perfis comportamentais de ambos os gráficos (irradiância e potência). Assim, a Equação 1 também pode ser aplicada, quando necessário, para o cálculo de rampas de irradiância solar.

Há ainda, de acordo com Marcos et al. (2014b) e Diaz (2019), para as rampas de potência, a definição matemática de rampa normalizada pela potência do inversor, conforme Equação 2:

$$R = \frac{\Delta P_{(\Delta t)}}{P_{INV}} * 100(\%) \quad (2)$$

onde $\Delta P_{(\Delta t)}$ refere-se à diferença de potência ΔP em um determinado período de tempo Δt , e P_{INV} refere-se a potência do inversor, com a rampa R calculada em percentual.

Por exemplo, considerando um intervalo de tempo Δt de 1 minuto, tem-se que a potência em W injetada na rede por um sistema fotovoltaico no instante $t1$ tenha sido

3000 W, e no instante t_2 tenha sido 4000 W. Desta forma, tem-se neste exemplo um ΔP igual a 1000 W/min. Levando em consideração que a potência do inversor P_{INV} seja de 5000 W, tem-se então uma rampa positiva de 20%.

Existem diferentes metodologias encontradas na literatura para se calcular as rampas com relação à sua duração ou intervalo de ocorrência. A Figura 3 representa graficamente os seguintes métodos existentes: diferença entre dois pontos em um intervalo de um segundo; diferença entre dois pontos em um intervalo de 60 segundos; diferença entre os valores mínimo/máximo de um intervalo considerado.

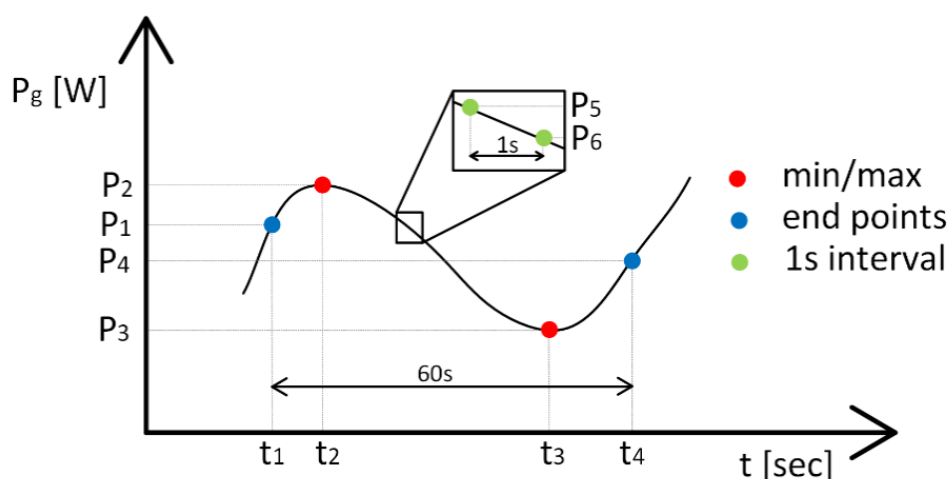


Figura 3 – Métodos de cálculo da rampa: 1. Diferença entre dois pontos em um intervalo de 60 segundos $(P_4 - P_1) / (t_4 - t_1)$; 2. Diferença entre os valores mínimo/máximo de um intervalo considerado $(P_3 - P_2) / (t_3 - t_2)$; 3. Diferença entre dois pontos em um intervalo de um segundo $(P_6 - P_5) / 1s$. Fonte: Martins et al. (2019).

2.2 IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DE RAMPAS

A importância de se entender e conhecer os eventos de rampa e analisar seus comportamentos, segundo Willy et al. (2014), consiste em responder às seguintes perguntas: *Quais as características das rampas que podem ocorrer no sistema fotovoltaico? Qual o pior cenário de eventos de rampa que podem ocorrer no sistema fotovoltaico?* Em cima dessas duas perguntas, é importante também tentar responder uma outra pergunta relevante sobre o tema: *Quanto um sistema pode flutuar numa rede elétrica de forma segura?*

A intermitência do recurso solar pode causar grandes variações na potência

injetada pelo sistema, que conseqüentemente podem causar sérios problemas de estabilidade na rede, como por exemplo: sobretensão transitória, problemas de frequência na rede e flutuações de potência de saída.

Com relação aos níveis aceitáveis de rampas em sistemas fotovoltaicos, embora no Brasil ainda não exista exigências de normatização e padronização, alguns trabalhos vêm sendo realizados ao redor do mundo nesse sentido, visando mitigar os problemas já mencionados, além de outros, através de medidas de limitação de rampas de potência na rede elétrica.

Neste sentido, segundo Lobo et al. (2022), alguns países como Irlanda, Havaí e Dinamarca saíram na frente ao catalogar valores permissíveis para rampas, respectivamente, de 30 MW/minuto, 2 MW/minuto e 100 kW/segundo. Enquanto Marcos et al. (2014a) afirmam que países como Porto Rico e México apresentam rampas aceitáveis menores que 10 %/minuto (Porto Rico) e entre 1 %/minuto e 5 %/minuto (México) da capacidade do sistema fotovoltaico instalado. Além desses, Diaz (2019) cita ainda Alemanha e China, com valores permissíveis de rampas de 10 %/minuto e 3 MW/minuto, respectivamente.

Um resumo dessas localidades e suas rampas de potência permitidas em seus sistemas elétricos é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites de Rampas permitidos em outras localidades no mundo. Fonte: Autoria própria.

Local	Rampa Positiva/Ascendente	Rampa Negativa/Descendente
Irlanda	30 MW/minuto	-
Havaí	2 MW/minuto	2 MW/minuto
Dinamarca	100 kW/segundo	-
Porto Rico	10%/minuto	10%/minuto
México	entre 2%/minuto e 5%/minuto	entre 1%/minuto e 5%/minuto
Alemanda	10%/minuto	10%/minuto
China	30 MW/minuto	30 MW/minuto

2.3 CARACTERÍSTICAS

Basicamente, os eventos de rampa são caracterizados por terem grandes magnitudes e curtas durações, ou seja, quanto maior a magnitude e menor a duração, mais extremo é o evento.

Mais especificamente, de acordo com Willy et al. (2014), as rampas possuem as seguintes características que as definem: frequência, duração e magnitude. Já Zhang et al. (2017) afirma que, geralmente, os eventos de rampa são parametrizados pelas seguintes propriedades: início/fim da rampa, duração da rampa, variação da rampa e magnitude da rampa.

Já Rocha et al. (2020), além das características citadas por Zhang et al. (2017), inclui também a direção da rampa como outra característica, corroborando com Kleissl et al. (2013), Sukumar et al. (2018) e Abuela e Chowdhury (2019), que afirmam que as rampas podem ser crescentes (positivas), ou decrescentes (negativas). Além disso, ainda de acordo com Kleissl et al. (2013) e Abuela e Chowdhury (2019), as rampas podem ser consideradas rampas extremas, ou variação alta, ou rampas normais, com uma variação baixa. A Figura 4 representa estas últimas características citadas.

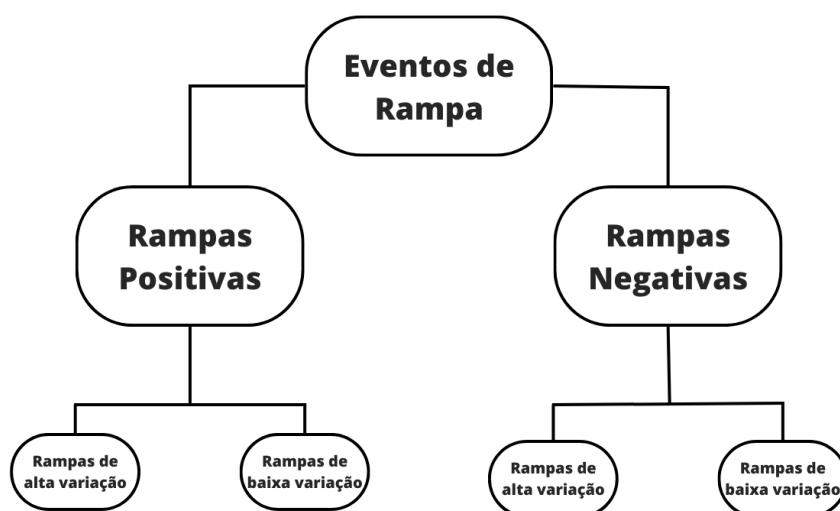


Figura 4 – Classificação de eventos de Rampas. Fonte: Adaptado de Abuela e Chowdhury (2019).

Outras características dos eventos de rampas podem ainda ser encontradas em alguns trabalhos na literatura, como, por exemplo, no trabalho de Deetjen et al. (2016), onde os autores apresentam os conceitos de fator de rampa e aceleração de

rampa. No entanto, esses conceitos são mais abstratos e pontuais.

2.4 PROBLEMAS OCASIONADOS POR RAMPAS

De acordo com Dugan et al. (2003), a definição de um problema relacionado a QEE (Qualidade da Energia Elétrica) é qualquer anormalidade da energia elétrica que pode se manifestar por meio de variações de tensão, corrente ou frequência e que resultam em falha ou operação incorreta de equipamentos utilizados pelos consumidores.

A inserção da geração distribuída pode contribuir de forma positiva com a operação do sistema elétrico, entretanto, em grande escala, pode ocasionar impactos negativos para a rede e seus usuários (PASSEY et al., 2011).

Diante disso, o crescente nível de penetração de sistemas fotovoltaicos e outros sistemas renováveis intermitentes têm levantado preocupações das concessionárias devido aos possíveis problemas e impactos negativos na qualidade da energia gerada por esses sistemas na rede.

Mesmo sabendo que sistemas fotovoltaicos conectados na rede de alta tensão tem impactos semelhantes aos sistemas conectados na média/baixa tensão, como afirmam Bird et al. (2013), existem diferenças. As usinas ou sistemas conectados em nível de transmissão fornecem dados de geração em tempo real para os operadores do sistema de energia, enquanto os sistemas solares distribuídos não, o que torna difícil para um operador de sistema saber se um aumento na carga líquida se deu devido ao aumento da demanda ou à diminuição da geração solar (BIRD et al., 2013).

Assim, o conhecimento sobre rampas é importante para que os operadores do sistema sejam capazes de tomar as medidas necessárias para evitar problemas mais graves ocasionados por estes eventos (CUNHA, 2021).

Dentre os principais problemas ocasionados pela inserção massiva de geração fotovoltaica na rede é possível citar: sobretensão, flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e corrente, fator de potência, distúrbios de frequência e harmônicos.

Levando em consideração que variabilidade da geração fotovoltaica está in-

trinsecamente relacionada às características do recurso solar, os principais problemas relacionados, diretamente, com a ocorrência de rampas são a flutuação de tensão e os distúrbios de frequência.

Com relação à flutuação de tensão, sabe-se que o movimento de nuvens sobre um sistema fotovoltaico é capaz de reduzir sua potência de saída, e, tão logo as nuvens deixam de afetar a superfícies dos painéis fotovoltaicos, a produção atinge seu valor nominal de operação, ou seja, ocorre neste intervalo de tempo um evento de rampa.

A frequência, como um dos fatores importantes da qualidade da energia, deve ser mantida inalterada. No entanto, como afirmam Sukumar et al. (2016), a variação de carga pode causar desvios de frequência na rede quando a potência de saída do sistema fotovoltaico muda de forma rápida em consequência às rápidas mudanças de irradiância sobre o sistema, ou seja, devido aos eventos de rampas. Vale destacar que, ainda de acordo com o mesmo autor, estas variações ainda não são tão perceptíveis, mas, em um futuro próximo, serão bem mais comuns devido ao aumento da penetração fotovoltaica.

2.5 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO E CONTROLE DE RAMPAS

O controle de rampas de potência (*Power Ramp Rate Control – PRRC*), segundo Yang et al. (2019), é uma estratégia empregada para mitigar a flutuação na potência de saída fotovoltaica sob condições em que a irradiância muda dinamicamente, como, por exemplo, com a passagem de nuvens. Neste modo de operação, a potência de saída fotovoltaica é controlada de modo a limitar a variação de rampas a um determinado valor, de forma que, para se ter um controle efetivo, a variação da potência de saída fotovoltaica deve ser medida continuamente.

De acordo com Martins et al. (2019), para permitir a limitação das rampas, os sistemas fotovoltaicos necessitam ter energia adicional de reserva. Na prática, isso é possível, por exemplo, operando o sistema abaixo da sua capacidade nominal. Em plantas de grande capacidade isso é feito, por exemplo, desconectando automaticamente uma parte dos arranjos fotovoltaicos, reduzindo efetivamente a potência injetada

na rede e o controle de potência ativa.

Outra possibilidade consiste em restringir o ponto de potência máxima (*Maximum Power Point – MPP*), modificando os algoritmos tradicionais do rastreador de ponto de potência máxima (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*).

Outra solução é o uso de sistemas de armazenamento de energia por bateria (*Battery Energy Storage Systems – BESS*), que podem absorver ou injetar energia para compensar a violação das rampas. Estes sistemas geralmente são instalados com sistemas fotovoltaicos para executar uma ou mais das seguintes tarefas:

1. *Controle de flutuações de energia*: a suavização da potência de saída do sistema fotovoltaico pode ser alcançada armazenando energia durante períodos de alta geração e fornecendo energia quando a saída do sistema cai devido à passagem de nuvens. Nesse caso, o dispositivo de armazenamento deve ter um tempo de resposta que corresponda à velocidade das flutuações e deve ser capaz de fornecer energia no intervalo de alguns minutos a algumas horas.
2. *Deslocar o período de pico de geração*: esta é uma tarefa importante sempre que o pico de carga não for em torno do meio-dia, que corresponde ao período de pico de geração dos sistemas fotovoltaicos. Nesse caso, o dispositivo de armazenamento armazena energia durante o período de pico de geração e injeta essa energia durante o período de pico de carregamento. Assim, o dispositivo de armazenamento deve ser capaz de operar por até algumas horas.
3. *Proteção contra interrupção*: neste caso, o dispositivo de armazenamento junto com o sistema fotovoltaico pode ser operado durante interrupções de energia elétrica para alimentar cargas críticas no alimentador. Isso deve ser feito após a coordenação com a concessionária local para não violar os regulamentos de proteção de ilhamento.

Riquelme-Dominguez et al. (2022) afirmam que a principal vantagem desta solução é a otimização da geração de energia, pois não há desperdício de energia. No entanto, o uso de sistemas BESS requer sistemas de comunicação avançados, a

vida útil das baterias ainda é reduzida e o custo total do sistema fotovoltaico aumenta consideravelmente. Apesar disso, a diminuição contínua dos preços das baterias, combinado a políticas e incentivos para aumentar sua utilização, tornam o armazenamento de energia em baterias uma solução cada vez mais atraente (MARTINS et al., 2019).

Algumas outras pesquisas sobre a utilização de sistemas de armazenamento de energia por bateria podem ser encontrados nos trabalhos de Pourmousavi e Saha (2018), Huo e Gruosso (2020), Li et al. (2013), Huo e Gruosso (2020) e Alam et al. (2014).

Os métodos de controle de rampas, segundo Huo e Gruosso (2020), podem ser classificados em suavização de rampas e limitação de rampas. Os métodos de suavização, como o próprio nome já diz, visam suavizar as flutuações da curva de potência, enquanto os métodos de limitação monitoram a curva de potência para obter as rampas.

Com relação aos métodos de suavização, Sukumar et al. (2018) afirmam que eles podem ser classificados em métodos baseados em média móvel e média exponencial, métodos baseados em filtros e métodos baseados em algoritmos de controle de rampas.

Os métodos de suavização baseados em média móvel e média exponencial são métodos usados para limitar as rampas de potência de saída do sistema fotovoltaico, sendo o método baseado em média móvel amplamente mais utilizado devido à sua simplicidade na implementação e menor esforço computacional. Algumas pesquisas sobre a utilização de métodos de suavização baseados em média móvel e média exponencial podem ser encontrados nos trabalhos de Koohi-Kamali et al. (2014), Kakimoto et al. (2009), Kanehira et al. (2013), Monai et al. (2004) e Ellis et al. (2012).

Ainda segundo Sukumar et al. (2018), com relação aos métodos de suavização baseados em filtros, dentre os principais tipos de filtros, como por exemplo: filtro passa-baixa, filtro passa-alta, filtro de Kalman e estimador de mínimos quadrados, o que mais tem sido utilizado por pesquisadores para mitigar a flutuação da potência de saída fotovoltaica é o filtro passa-baixa. Neste esquema, a potência fotovoltaica real é

fornecida como entrada para o filtro, e a saída do filtro é uma potência de referência suavizada.

Já nos métodos de suavização baseados em algoritmos de controle, segundo Kumar et al. (2022), as rampas são obtidas pelo monitoramento da curva de potência fotovoltaica e são incluídas no esquema de controle para alcançar a saída de potência fotovoltaica suavizada desejada, sendo um dos métodos mais eficientes e econômicos o controle baseado no rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*), para controlar as rampas de potência fotovoltaica, como é possível observar no trabalho de Sangwongwanich et al. (2016).

De acordo com Wu e Kerekes (2021), um exemplo do princípio de funcionamento do método de suavização baseado em algoritmos de controle pode ser: quando a variação de potência estiver abaixo do limite permitido de rampa, o algoritmo MPPT será empregado. Quando a variação de potência estiver acima do limite, a potência de saída dos sistemas fotovoltaicos deve ser reduzida imediatamente, até que a potência atinja o limite de rampa exigido. Para isso, um algoritmo MPPT modificado pode ser adotado, onde os pontos de operação dos sistemas fotovoltaicos podem ser ajustados regulando a tensão fotovoltaica. A Figura 5 apresenta de forma gráfica o funcionamento deste método.

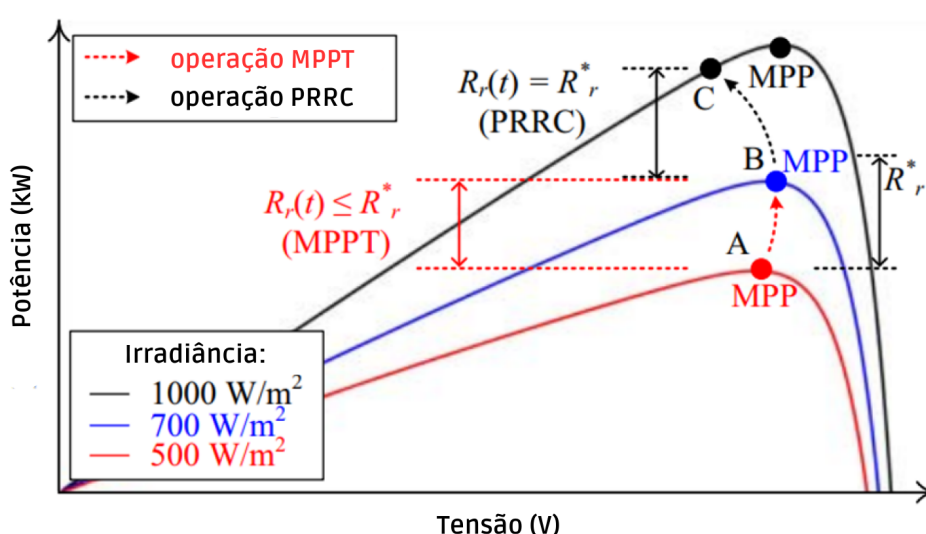


Figura 5 – Princípio operacional do algoritmo de controle de rampas de potência (PRRC): modo MPPT (A→B) e modo PRRC (B→C). Fonte: Adaptado de Blaabjerg et al. (2018).

É possível observar que enquanto a potência fotovoltaica estiver abaixo do limite máximo, ou seja, $Rr(t) \leq R$, o sistema fotovoltaico pode operar no modo operação MPPT, porque a restrição da rampa de potência é cumprida, ou seja, do ponto A para o ponto B. No entanto, durante um rápido aumento de irradiância, por exemplo, de 700 W/m^2 a 1000 W/m^2 , a potência fotovoltaica pode exceder o limite máximo e violar a restrição de rampa de potência, ou seja, $Rr(t) > R$. Nesse caso, a potência fotovoltaica extraída precisa ser reduzida para regular a potência fotovoltaica. Isso pode ser alcançado perturbando a tensão fotovoltaica em direção ao lado esquerdo do MPP até que a potência fotovoltaica seja igual ao ponto de ajuste, ou seja, $Rr(t) = R$.

Outras pesquisas sobre a utilização de métodos de suavização baseados em algoritmos de controle podem ser encontrados nos trabalhos de Riquelme-Dominguez et al. (2022) e Martins et al. (2019).

O outro tipo de método de controle (Limitação de Rampa), de acordo com Huo e Gruosso (2020) tem o objetivo de manter as rampas sob um limite predefinido, e, ao contrário do método de suavização, eliminam a incerteza sobre as rampas resultantes e normalmente utilizam os sistemas de armazenamento em baterias de forma mais eficiente.

3 METODOLOGIA

Para identificar, analisar e classificar as rampas de potência, foram utilizados dados coletados por um sistema fotovoltaico experimental de 5,1 kWp, conectado à rede elétrica, e uma estação climatológica local. O sistema analisado possui 19 módulos divididos em duas strings independentes. A string 1 possui 10 módulos e a string 2 os outros 9 módulos, conectados em série. O inversor possui duas entradas em corrente contínua (CC) com seguidores de ponto de máxima potência (MPPT) isolados. O sistema está instalado sobre um telhado com inclinação de 5 graus ($\beta = 5^\circ$) e alinhado com norte ($\Phi = 180^\circ$), localizado na cidade de Maceió/AL.

A coleta de dados do sistema fotovoltaico foi realizada por um sistema de aquisição de dados SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) através de um *datalogger* CR1000 da Campbell Scientific, atrelado a sensores de instrumentação elétrica e climatológica, como mostra o esquema na Figura 6.

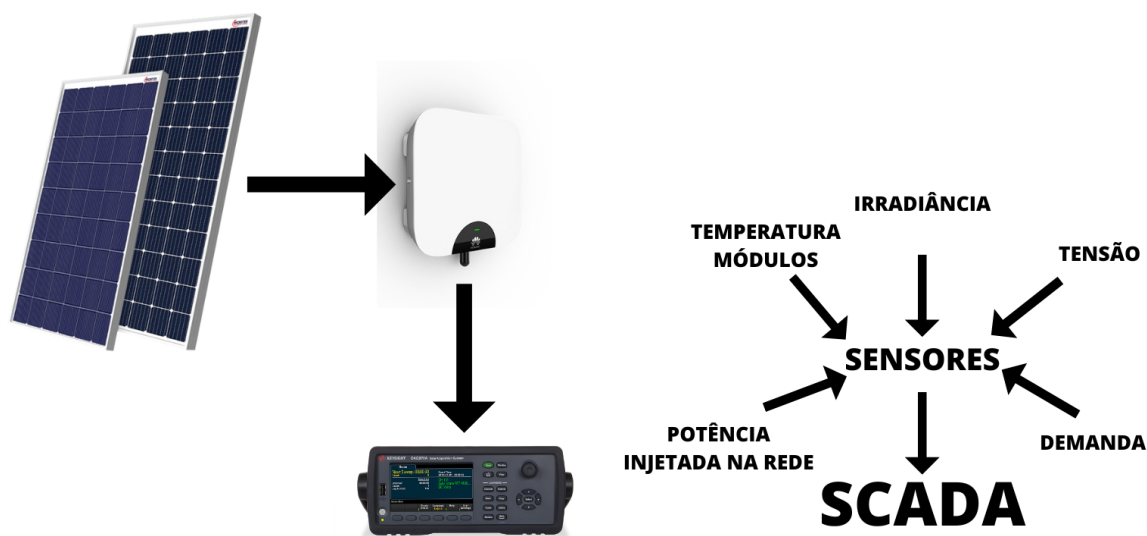


Figura 6 – Esquema do sistema de aquisição de dados SCADA presente no sistema fotovoltaico utilizado no trabalho. Fonte: Autoria própria.

O sistema de aquisição foi programado para armazenar, em intervalos de 1 minuto, todas as variáveis de funcionamento dos módulos fotovoltaicos, como tensão, corrente e potência contínua das strings, além da potência injetada na rede pelo inversor e da tensão elétrica no ponto de conexão com a rede elétrica. São medidos

também a temperatura de operação dos módulos e a irradiância solar global incidente na superfície dos módulos fotovoltaicos.

3.1 RAMP RATE ANALYZER

Foi desenvolvida uma aplicação com interface gráfica no MATLAB. A aplicação foi denominada de *Ramp Rate Analyzer* (Figuras 7 e 8).

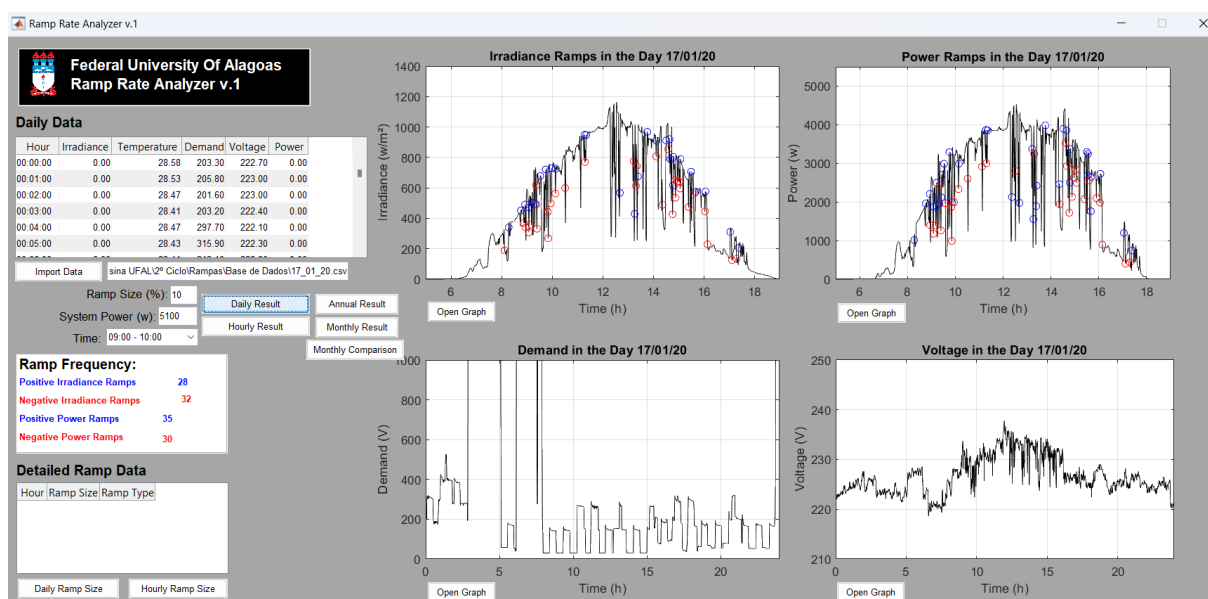


Figura 7 – Tela principal do *Ramp Rate Analyzer*. Fonte: Autoria própria.

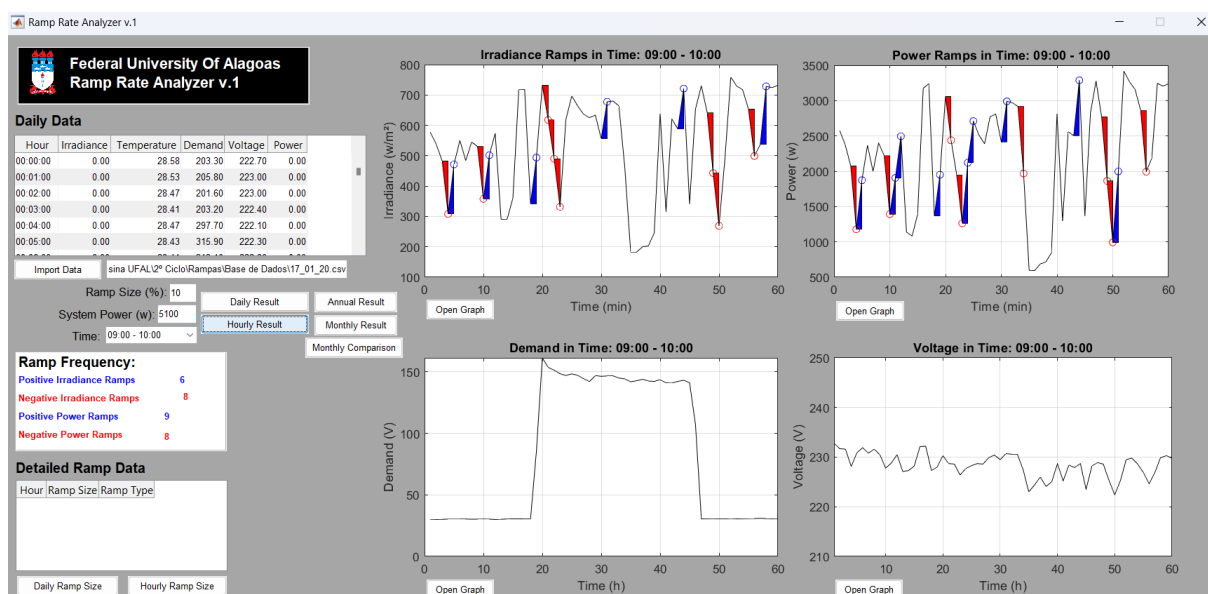


Figura 8 – Tela principal do *Ramp Rate Analyzer*. Fonte: Autoria própria.

O *Ramp Rate Analyzer* foi concebido, inicialmente, como uma aplicação de cunho educacional com objetivo de estudar e analisar a ocorrência e o comportamento de rampas, bem como classificá-las e gerar os gráficos das rampas de interesse. Além da análise quantitativa, a aplicação é capaz de realizar uma análise qualitativa de acordo com o perfil da irradiância solar e potência injetada no sistema.

Uma vez que os dados utilizados pelo *Ramp Rate Analyzer* neste trabalho foram armazenados de forma constante a cada minuto, ou seja, $\Delta t = 1$ min, as rampas R identificadas são equivalentes ao próprio ΔP da Equação 1. Sendo assim, o termo **magnitude** é utilizado para representar o valor em W desta variação. Enquanto o termo **variação** é utilizado para representar o percentual do quanto esse ΔP representa com relação à potência do sistema fotovoltaico, conforme a Equação 2.

Nas Figuras 9 e 10, por exemplo, pode-se observar 2 exemplos de gráficos gerados pela aplicação.

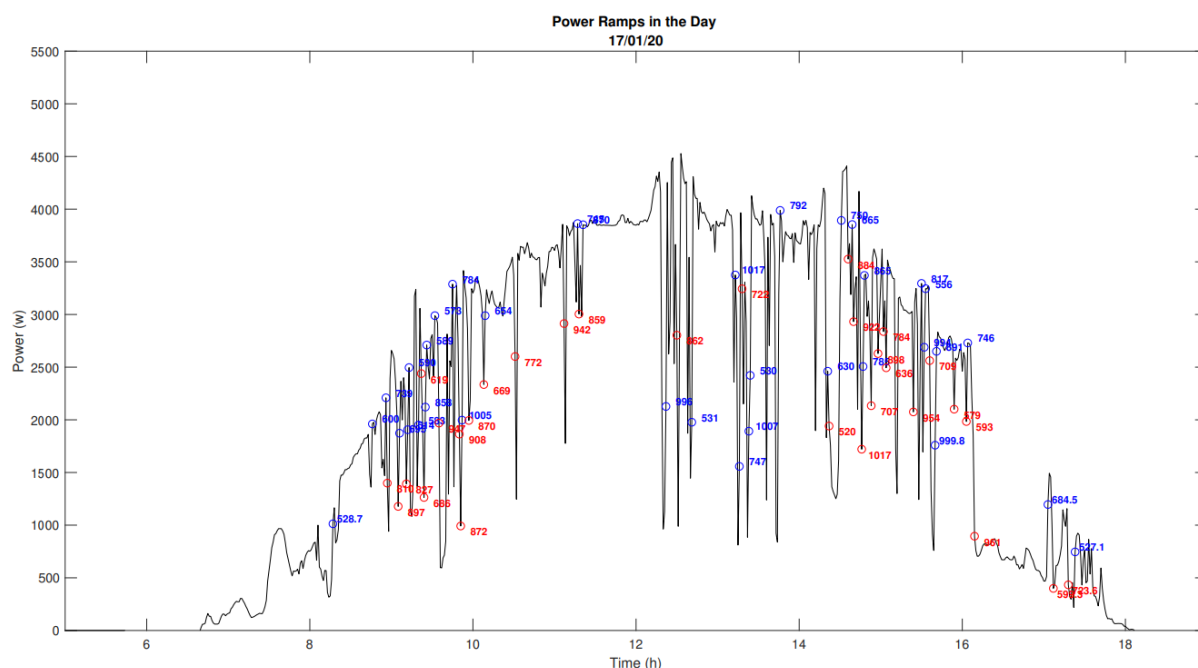


Figura 9 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 17/01/2020. Fonte: Autoria própria.

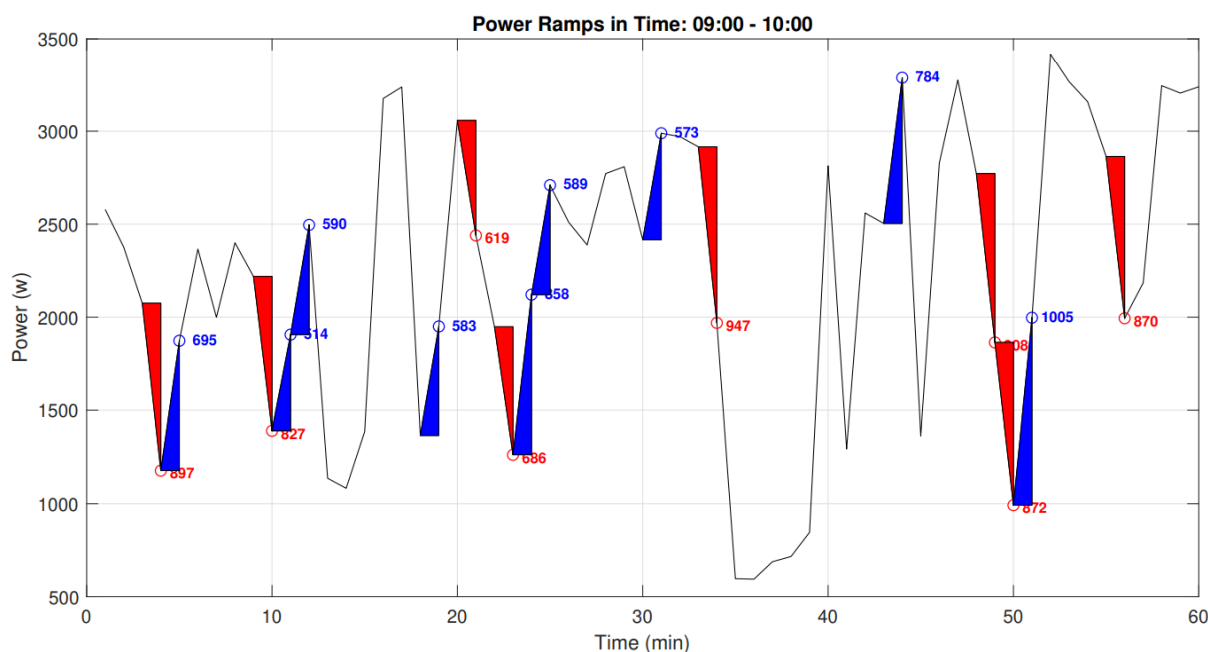


Figura 10 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 17/01/2020, no período entre 09h e 10h. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 9 observa-se o gráfico diário da potência injetada pelo sistema fotovoltaico na rede (em Watts) no dia 17/01/2020, com a identificação das rampas de potência com variação entre 10% e 20%, tanto positivas (representadas pelas bolinhas azuis com suas magnitudes ao lado), quanto negativas (representadas pelas bolinhas vermelhas com suas magnitudes ao lado).

Já na Figura 10 observa-se o gráfico da potência injetada pelo sistema fotovoltaico na rede (em Watts) para o mesmo dia 17/01/2020, porém no período entre 09h e 10h, cujas rampas de potências com variação entre 10% e 20% positivas são representadas pelos triângulo azuis, com suas magnitudes ao lado, e as rampas negativas são representadas pelos triângulos vermelhos, com suas magnitudes ao lado.

As Figuras 11 e 12 apresentam os mesmos tipos de gráficos das Figuras 9 e 10, porém, com relação às rampas ocorridas no dia 23/06/2020 (Figura 11), no período entre 11h e 12h (Figura 12), com variação entre 30% e 40%.

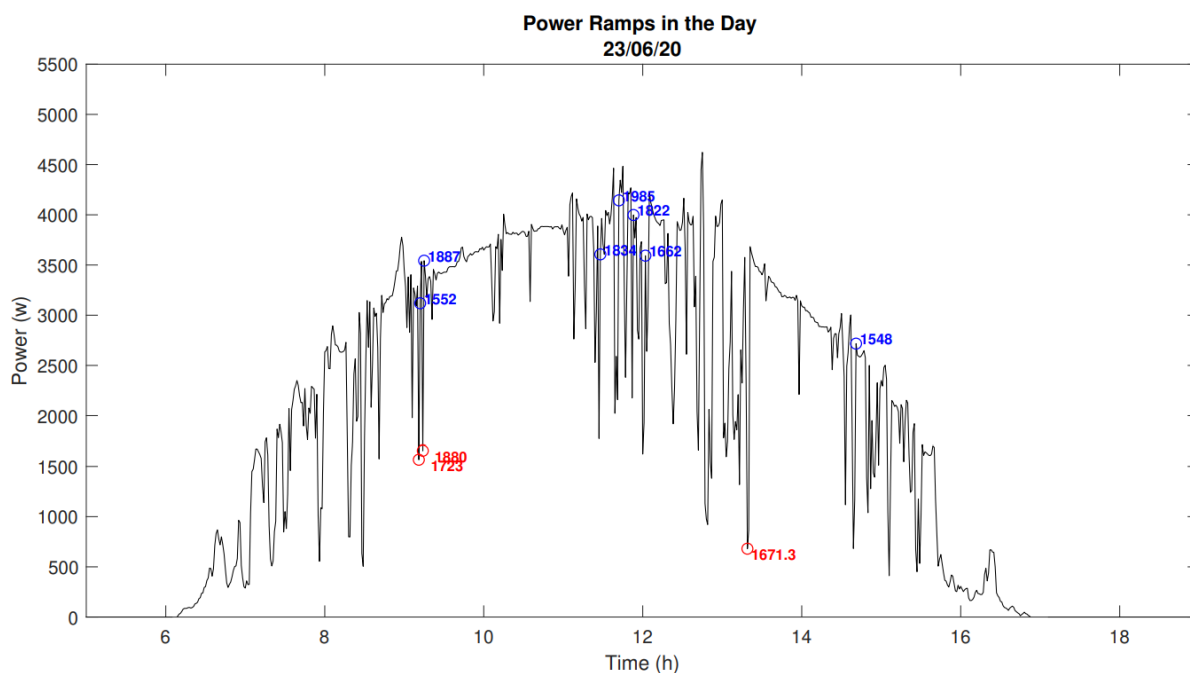


Figura 11 – Rampas de potência com variação entre 30% e 40% ocorridas no dia 23/06/2020.
Fonte: Autoria própria.

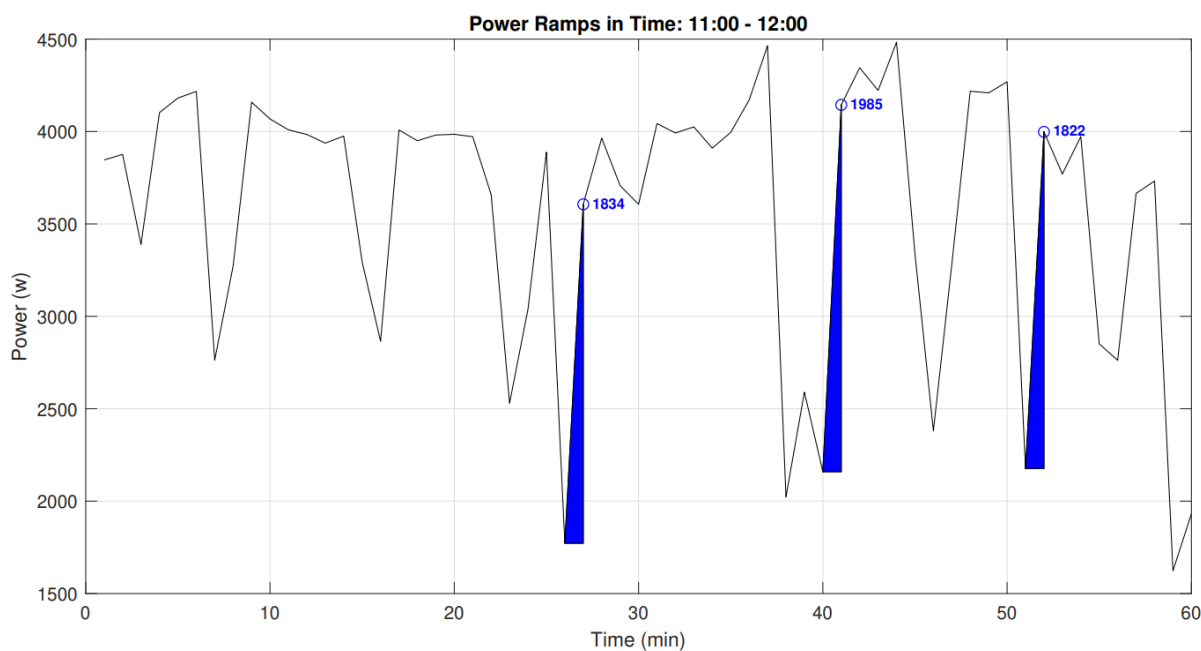


Figura 12 – Rampas de potência com variação entre 30% e 40% ocorridas no dia 23/06/2020, no período entre 11h e 12h. Fonte: Autoria própria.

Como é possível observar, a ocorrência de rampas é bem menor, visto que quanto maior a magnitude e variação das rampas, menos frequentes são suas ocorrências.

3.2 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados coletados pelo sistema de aquisição do sistema fotovoltaico utilizado foram tratados preliminarmente para serem analisados posteriormente no *Ramp Rate Analyzer*. Ao todo foram analisados dados de todos os dias do ano de 2020 (366 dias) e de todos os dias de janeiro a junho do ano de 2021 (180 dias), totalizando 546 dias.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos dias analisados neste trabalho, mostrando aqueles que foram descartados da análise por apresentarem inconsistências nos dados.

Tabela 2 – Dias analisados e dias descartados devido às inconsciências nos dados. Fonte: Autoria própria.

Mês/Ano	2020	2021
Jan	OK	Dias com falhas: 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
Fev	OK	OK
Mar	Dias com falhas: 21, 22, 23 e 24	Dias com falhas: 1, 2 e 3
Abr	OK	OK
Mai	OK	OK
Jun	OK	OK
Jul	OK	-
Ago	OK	-
Set	OK	-
Out	OK	-
Nov	OK	-
Dez	OK	-

Como é possível observar, de todos os 546 dias analisados, apenas 14 (sendo 4 dias em 2020 e 10 dias em 2021, considerando apenas os 6 meses de dados disponíveis no ano de 2021) não foram analisados, representando, desta forma 2,56% dos dados com alguma inconsistência. Ou seja, os resultados encontrados e aqui apresentados podem ser validados devido a amostragem ser representativa dentro do

universo de dados disponível.

Dos dados captados pelo sistema de aquisição, o *Ramp Rate Analyzer* possui um *input* de 6 variáveis: ***Hora***, ***Irradiância***, ***Temperatura dos Módulos***, ***Demanda***, ***Tensão*** e ***Potência Injetada***. Um exemplo dos dados utilizados pelo *Ramp Rate Analyzer* é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo de dados analisados pelo *Ramp Rate Analyzer*. Fonte: Autoria própria.

Hora	Irradiância (W/m²)	Temperatura dos Módulos (°C)	Demanda (W)	Tensão (V)	Potência Injetada (W)
12:45:00	1013	47,3	161,5	232,2	4132
12:46:00	988	46,15	158,9	232,5	4058
12:47:00	971	46,03	159	232,5	3980
12:48:00	960	46,79	157,9	232,7	3943
12:49:00	963	46,92	156,7	231,9	3965
12:50:00	982	46,98	157,6	232,7	4036
12:51:00	1023	46,94	157,5	232,7	4190
12:52:00	1041	47,44	155,2	232,4	4250
12:53:00	1002	47,6	155,8	230,6	4056
12:54:00	937	45,1	153,7	230,3	3910
12:55:00	988	46,09	153	231,3	4082
12:56:00	950	47,45	153,2	230,1	3864
12:57:00	915	47,8	154,2	230,2	3742
12:58:00	947	47,35	153,7	230,7	3914
12:59:00	948	47,51	153,1	230,4	3926

A partir do tratamento destes dados, considerando essas variáveis como *input*, o *Ramp Rate Analyzer* é capaz de realizar várias análises (horárias, diárias e mensais) levando em consideração a ocorrência de rampas, tanto positivas quanto negativas, gerando gráficos que servem para comparação e consequentemente para o entendimento do comportamento destas rampas em um determinado período de interesse.

Na Figura 13 percebe-se como é possível filtrar a variação das rampas que se deseja analisar, levando em consideração a potência do sistema fotovoltaico, bem como um seletor de horário para o caso de uma análise horária da ocorrência de rampas em um dia específico.

The screenshot displays the 'Ramp Rate Analyzer' interface. At the top, there are input fields for 'Ramp Size (%)' set to 10, 'System Power (w)' set to 5100, and 'Time' set to '13:00 - 14:00'. To the right of these inputs are four buttons: 'Daily Result', 'Annual Result', 'Hourly Result', and 'Monthly Result'. Below the input fields, a 'Ramp Frequency:' section shows a list of results: 'Positive Irradiance Ramps' (6), 'Negative Irradiance Ramps' (4), 'Positive Power Ramps' (6), and 'Negative Power Ramps' (6). To the right of this list is a large grey area, likely for a graph, with a vertical axis label 'id (V)' at the bottom right. A 'Monthly Comparison' button is located below the 'Monthly Result' button.

Ramp Frequency:	
Positive Irradiance Ramps	6
Negative Irradiance Ramps	4
Positive Power Ramps	6
Negative Power Ramps	6

Figura 13 – Filtros de análise de rampas do *Ramp Rate Analyzer*. Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das análises dos dados realizadas através do *Ramp Rate Analyzer* considerando uma janela temporal decrescente, ou seja, seguindo a sequência: dados anuais, mensais, diários e horários.

Considerando apenas o ano de 2020, com 12 meses, 365 dias e 4380 intervalos de 1 hora (compreendidos entre 6h e 18h), levando em consideração as variações de rampas (entre 10% e 100%), seriam necessários muitos gráficos a serem apresentados no trabalho. Desta forma, uma pequena amostra será apresentada aqui, apenas para comprovar a capacidade de análise que o *Ramp Rate Analyzer* pode nos oferecer, a depender do objetivo.

4.1 COMPARATIVO MENSAL DA OCORRÊNCIA DE RAMPAS DE POTÊNCIA NO ANO DE 2020

As Figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 apresentam um comparativo do ano de 2020, mês a mês, da quantidade de rampas de potência com variação entre 10% e 20%, entre 20% e 30%, entre 30% e 40% e assim respectivamente, até as rampas com variação compreendida entre 90% e 100%.

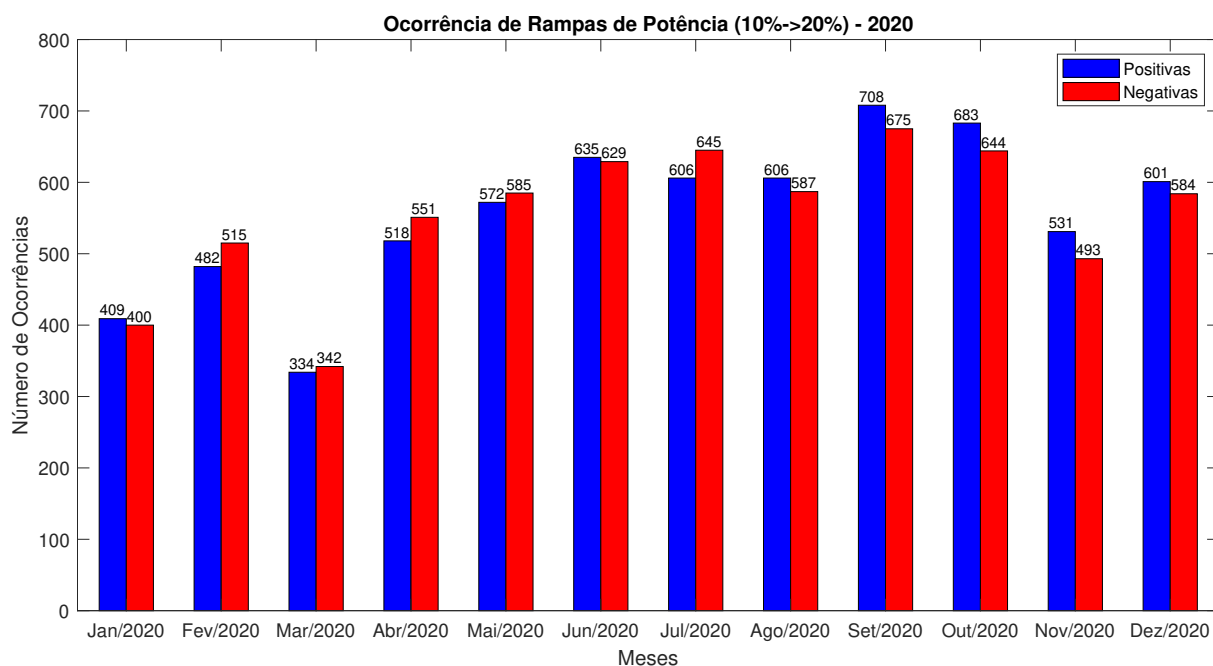


Figura 14 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 10% e 20% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

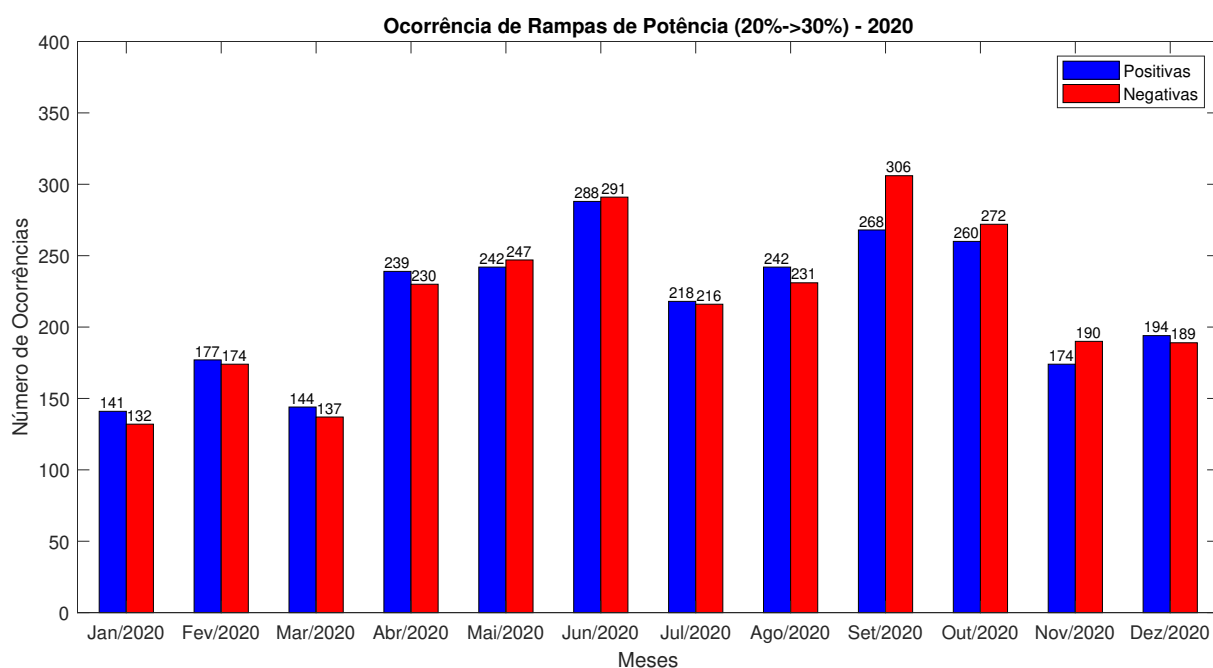


Figura 15 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 20% e 30% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

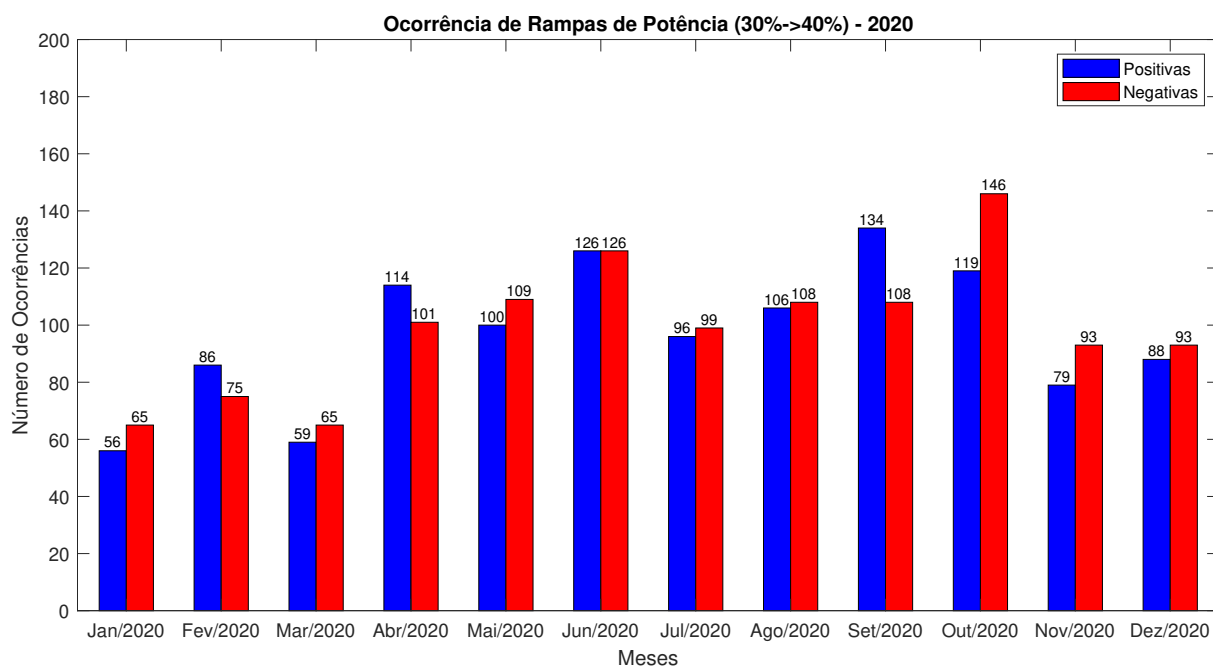


Figura 16 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 30% e 40% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

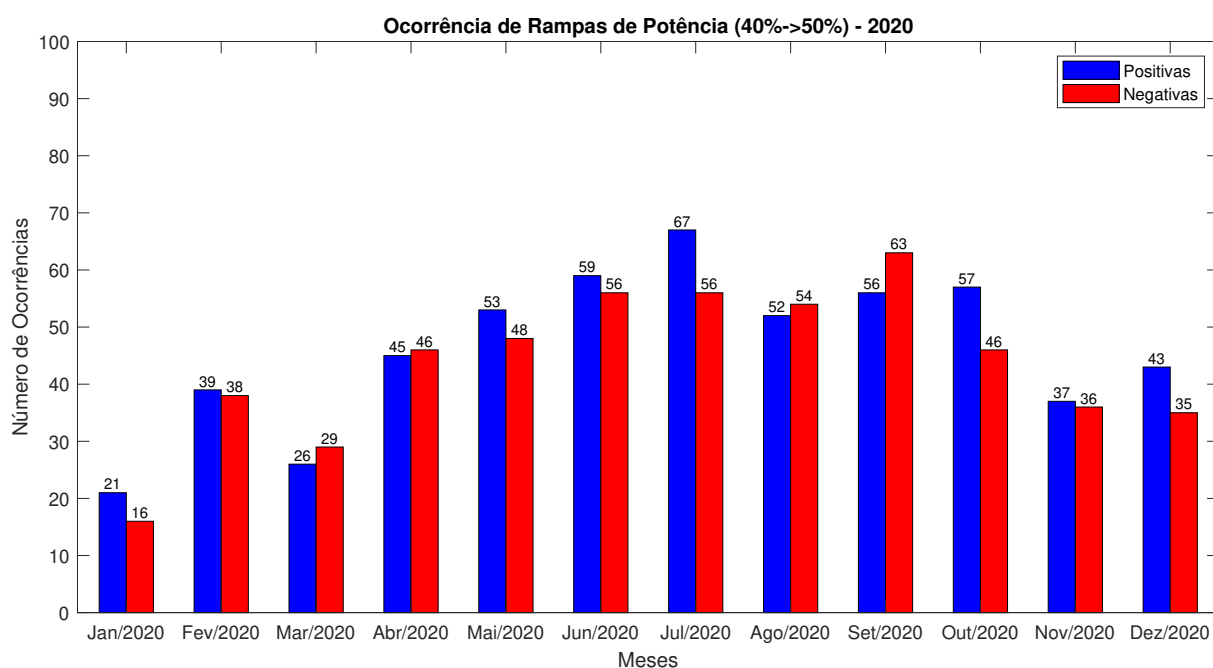


Figura 17 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 40% e 50% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

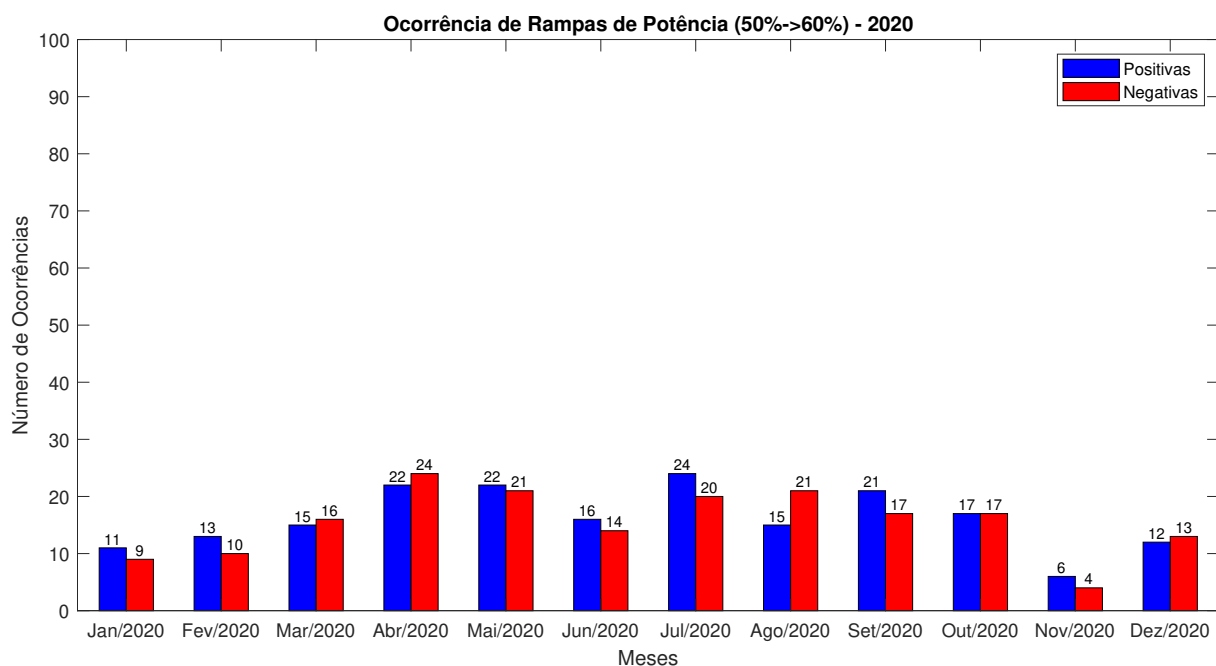


Figura 18 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 50% e 60% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

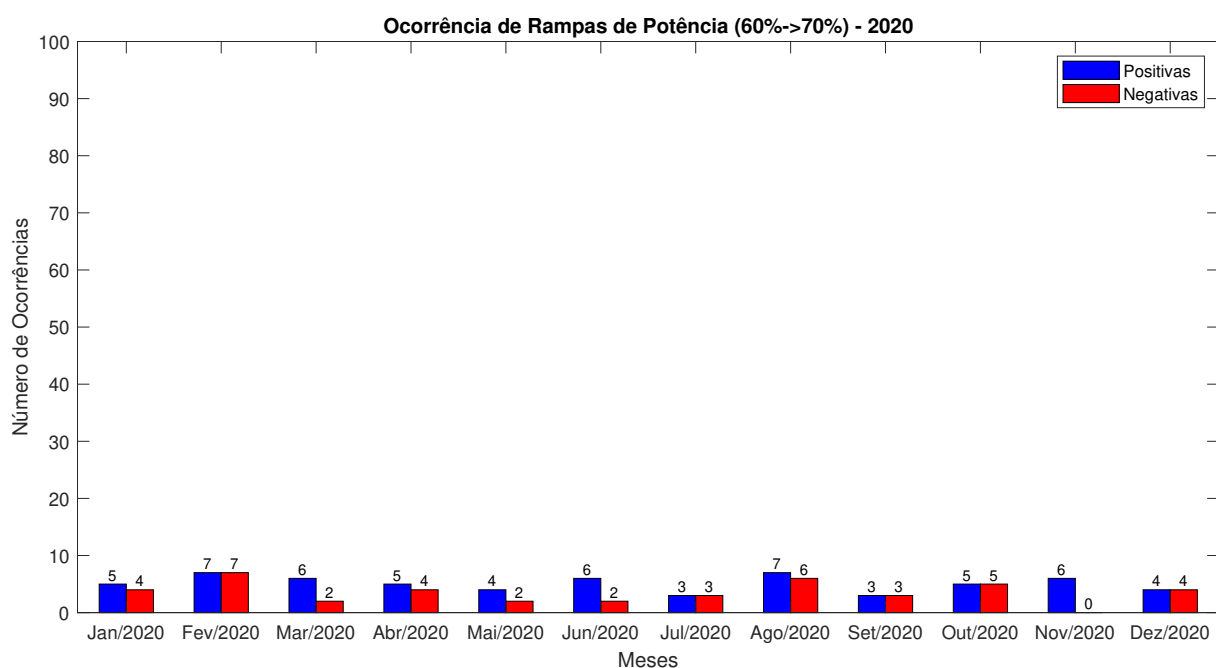


Figura 19 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 60% e 70% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

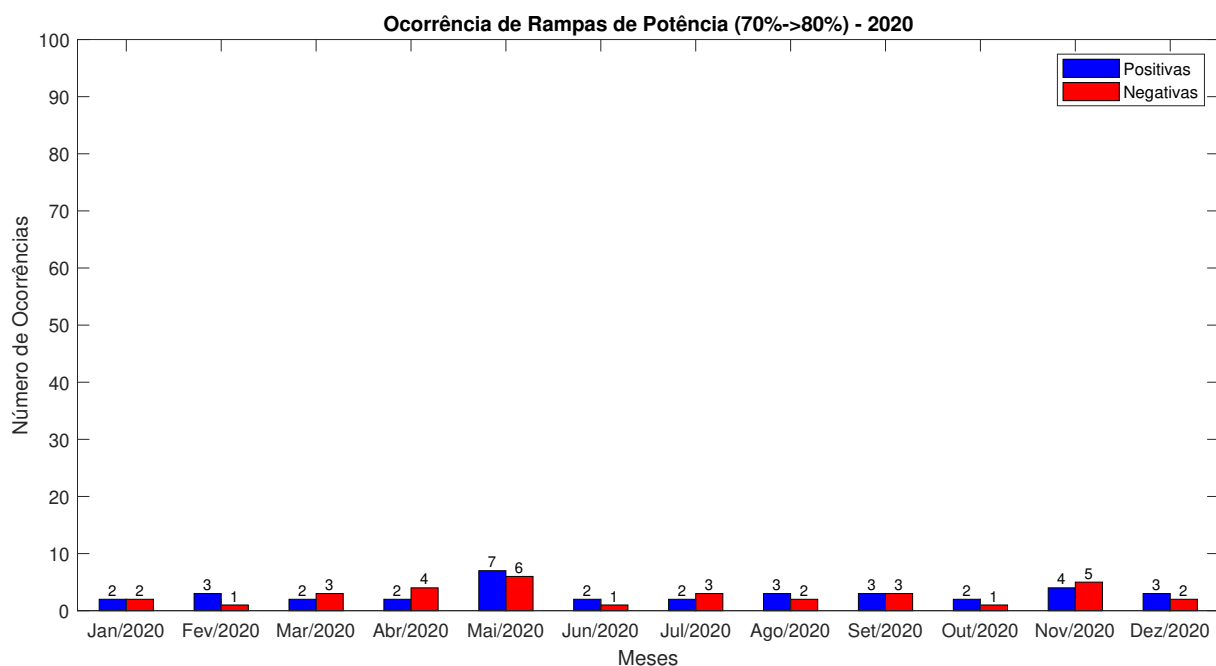


Figura 20 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 70% e 80% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

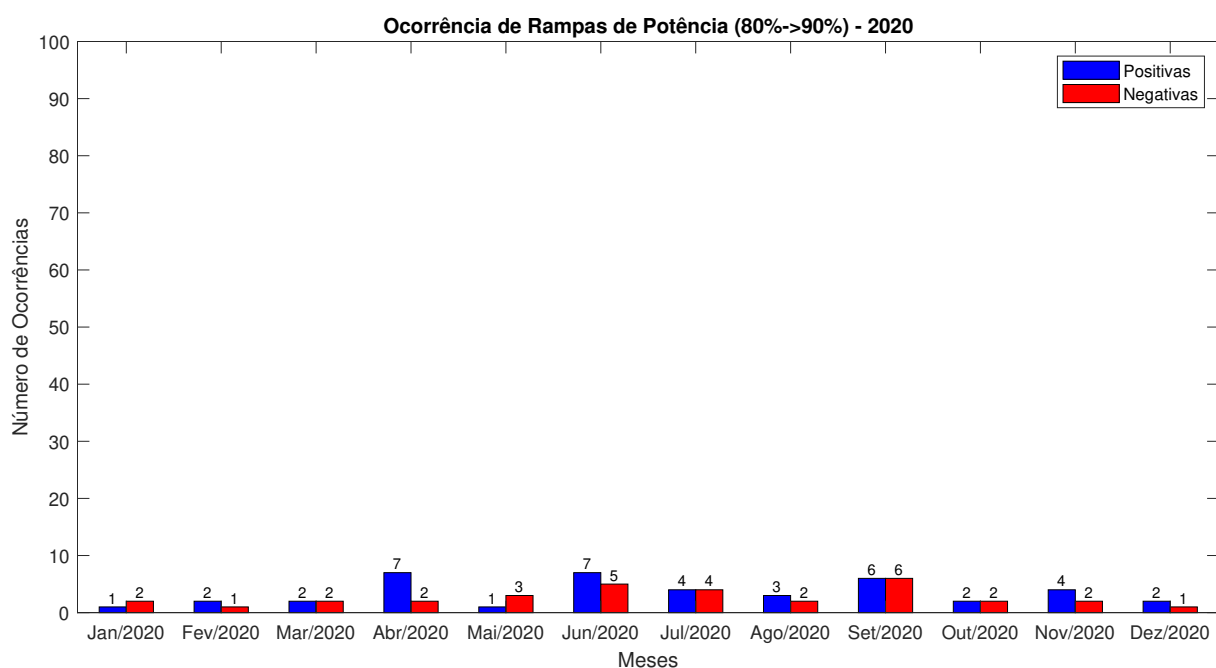


Figura 21 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 80% e 90% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

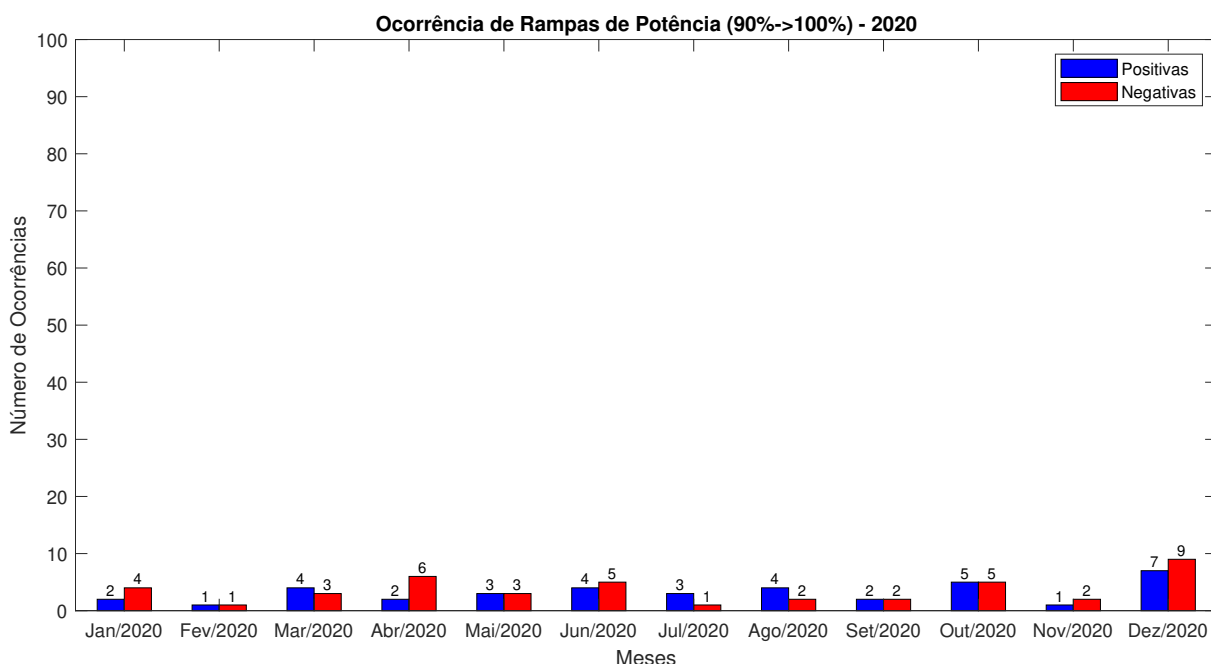


Figura 22 – Comparativo mensal da ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 90% e 100% no ano de 2020. Fonte: Autoria própria.

Como é possível perceber, quanto maior a variação rampas, menor são suas ocorrências. Por exemplo, na Figura 14, percebe-se que o mês de março de 2020 foi aquele em que ocorreram menos rampas entre 10% e 20%, comparando-se com o resto do ano, enquanto que o mês de setembro de 2020 foi um mês em que houve a ocorrência de muitas rampas com essa variação.

Se compararmos as rampas entre 20% e 40%, por exemplo, perceberemos que o mês de março ainda apresenta uma ocorrência menor de rampas com relação aos outros meses, enquanto que, para rampas maiores que 20%, os meses em que esta ocorrência é maior vão se alternando, a depender do intervalo de variação das rampas.

Nas Figuras que serão apresentadas a seguir (da Figura 23 até a Figura 46), é possível se ter uma visão dentro de cada mês da ocorrência das rampas. São apresentados 2 tipos de gráficos para cada mês, um gráfico de barras comum, que mostra em ordem decrescente a ocorrência de rampas positivas e negativas no determinado mês, partindo das rampas com variação entre 10% e 20%, até as com variações entre 90% e 100%, e outro gráfico de barras em forma de histograma, que apresenta a ocorrência de rampas positivas e negativas no determinado mês, mas

partindo das rampas com variação entre 90% e 100% negativas até as rampas com variação entre 90% e 100% positivas.

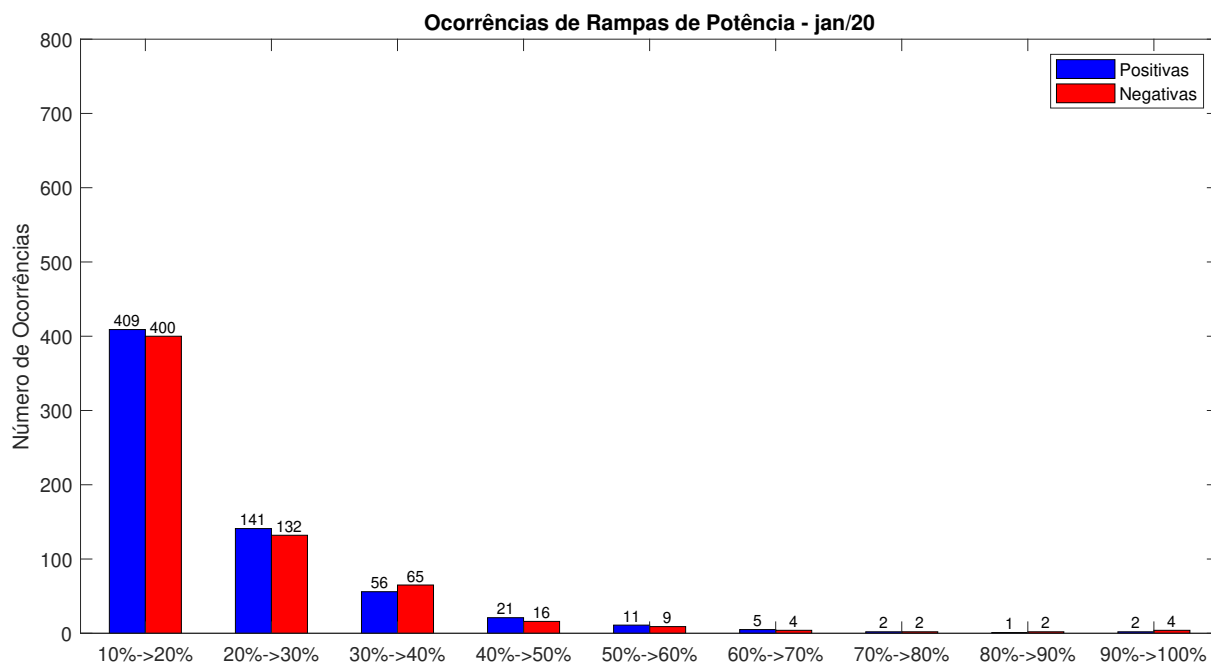


Figura 23 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Janeiro/2020. Fonte: Autoria própria.

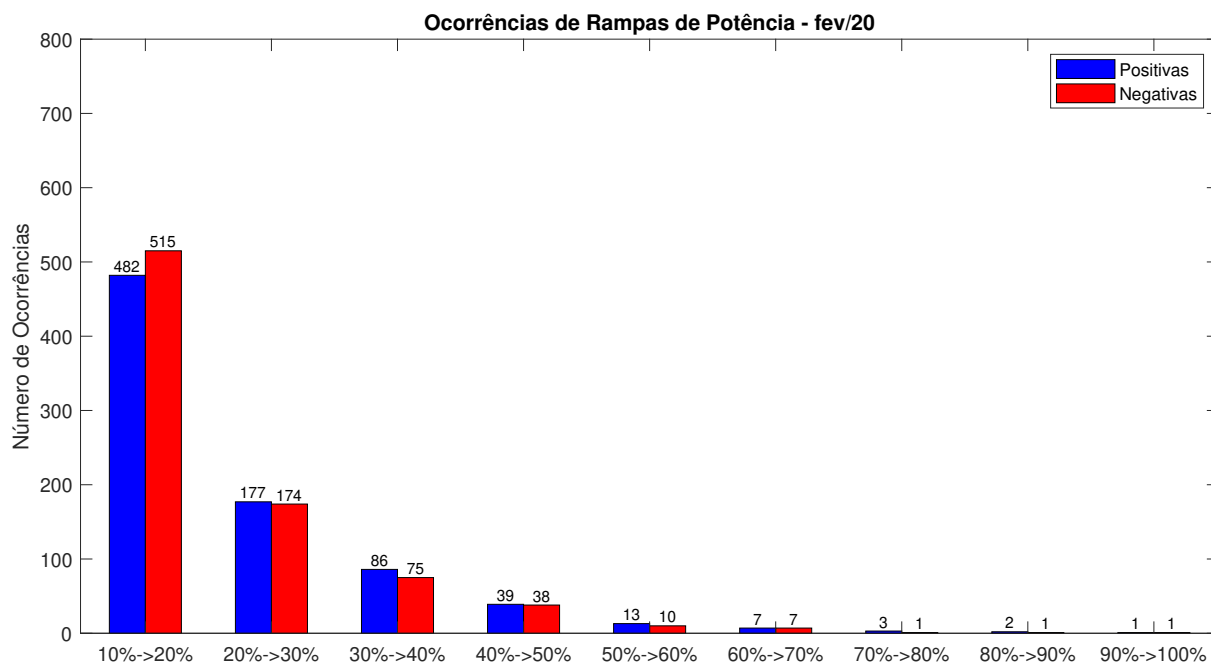


Figura 24 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Fevereiro/2020. Fonte: Autoria própria.

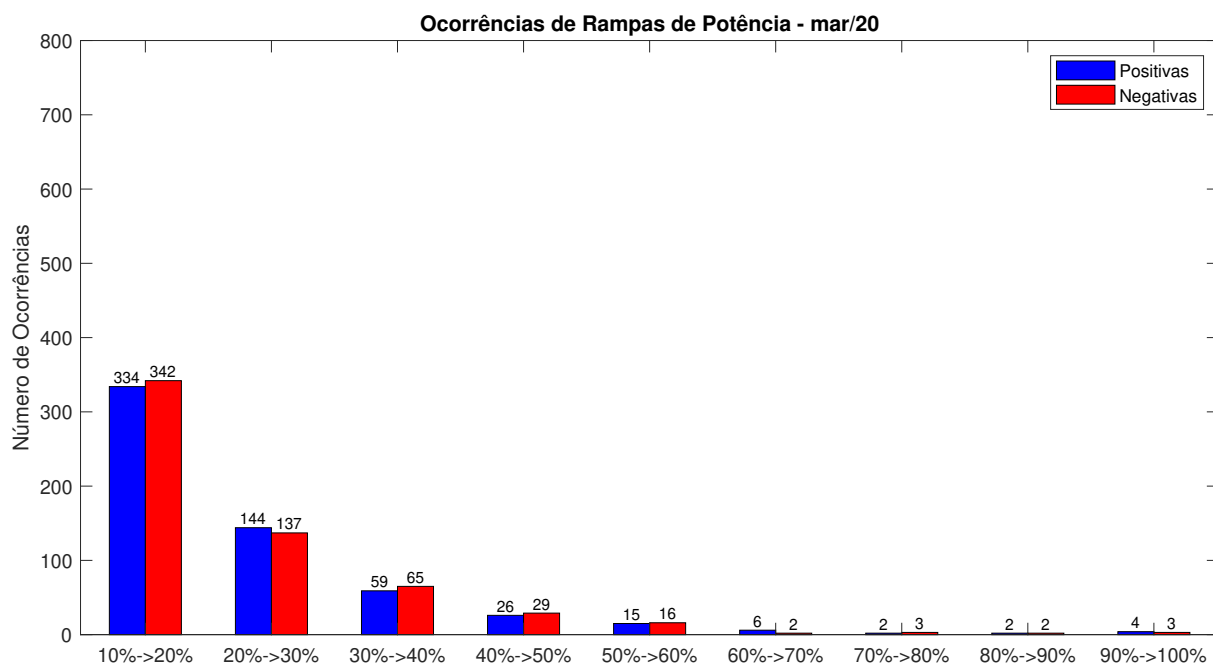


Figura 25 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Março/2020. Fonte: Autoria própria.

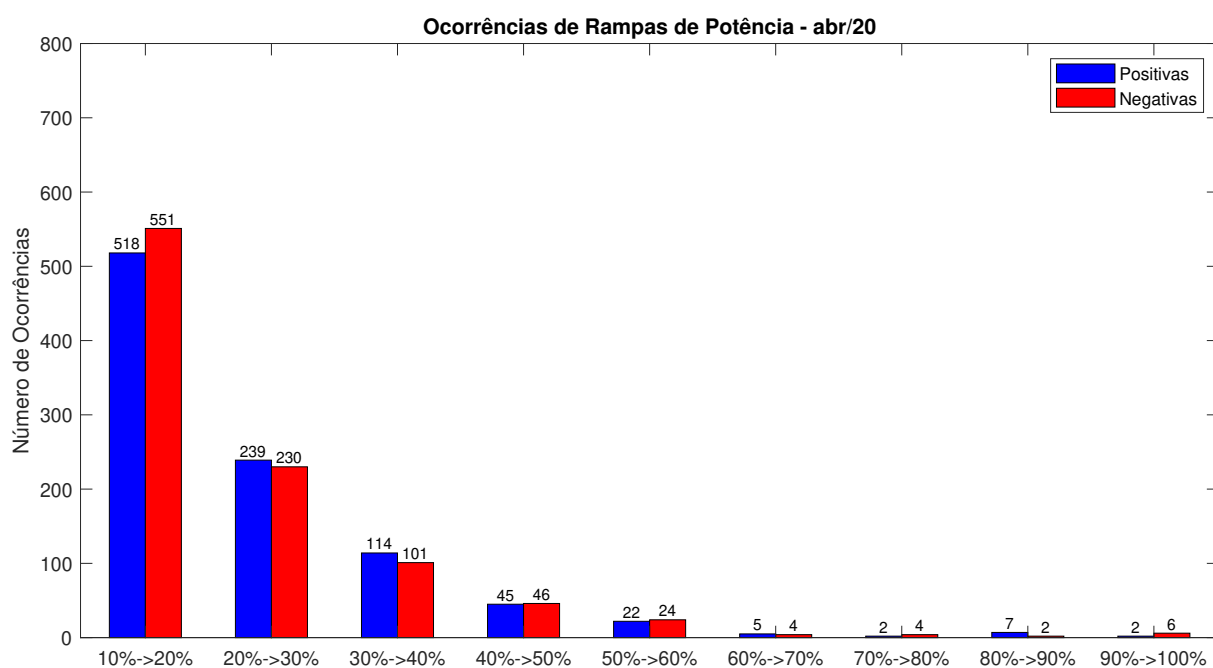


Figura 26 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Abril/2020. Fonte: Autoria própria.

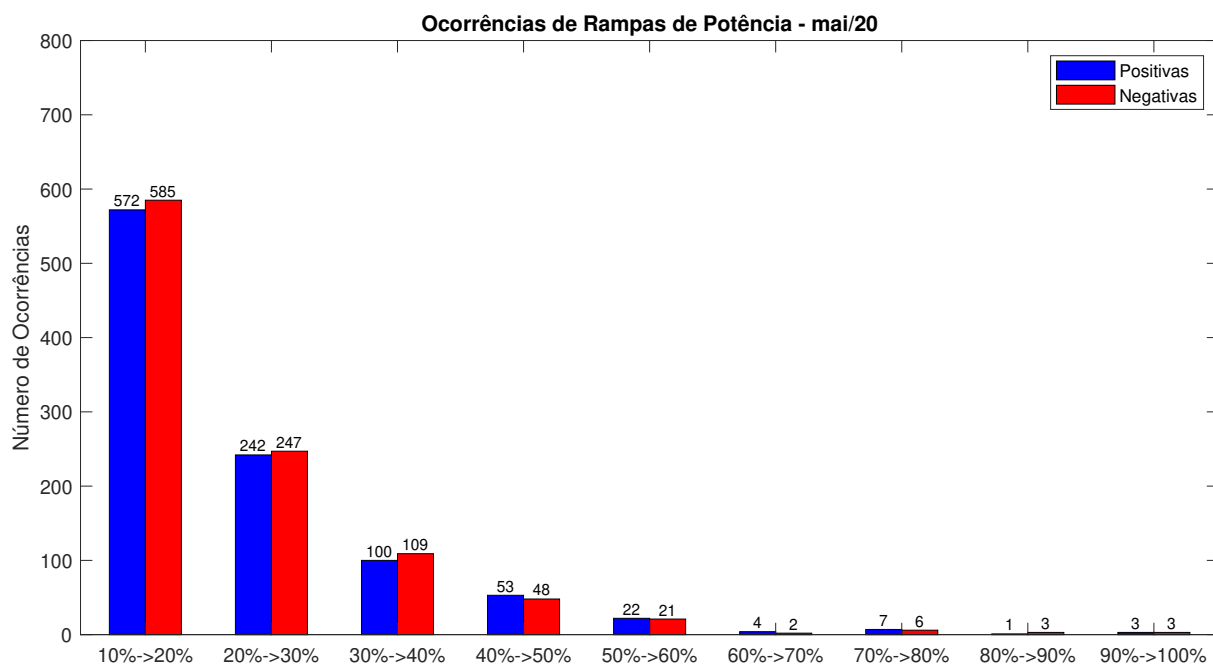


Figura 27 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Maio/2020. Fonte: Autoria própria.

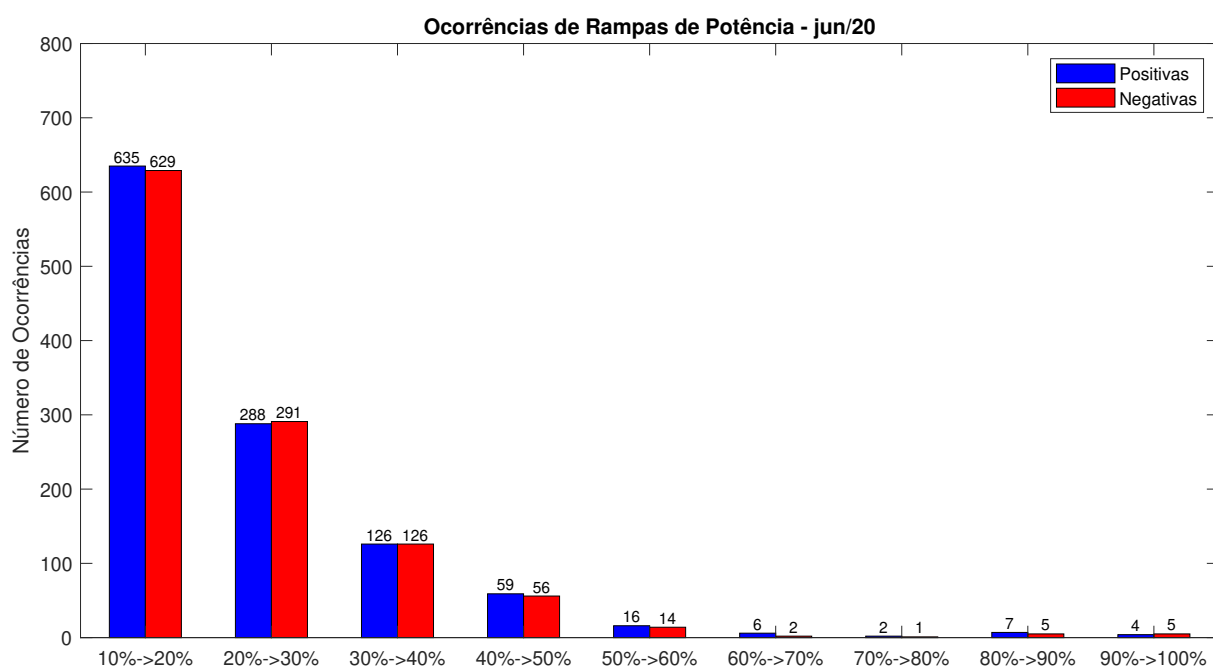


Figura 28 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Junho/2020. Fonte: Autoria própria.

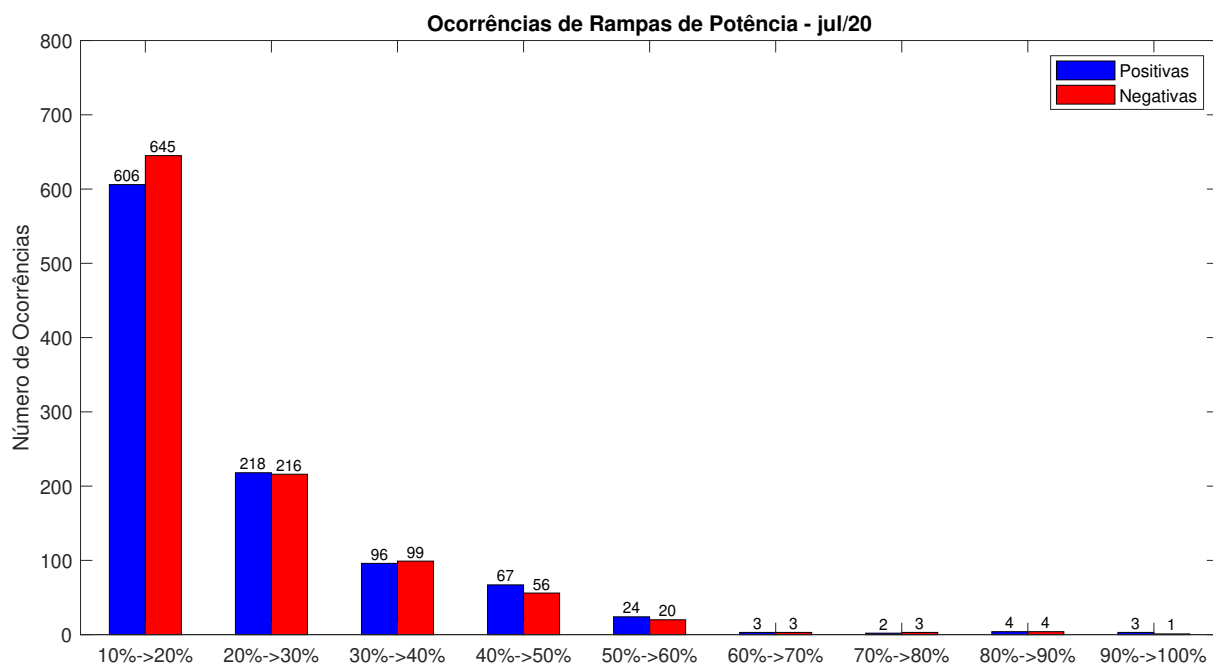


Figura 29 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Julho/2020. Fonte: Autoria própria.

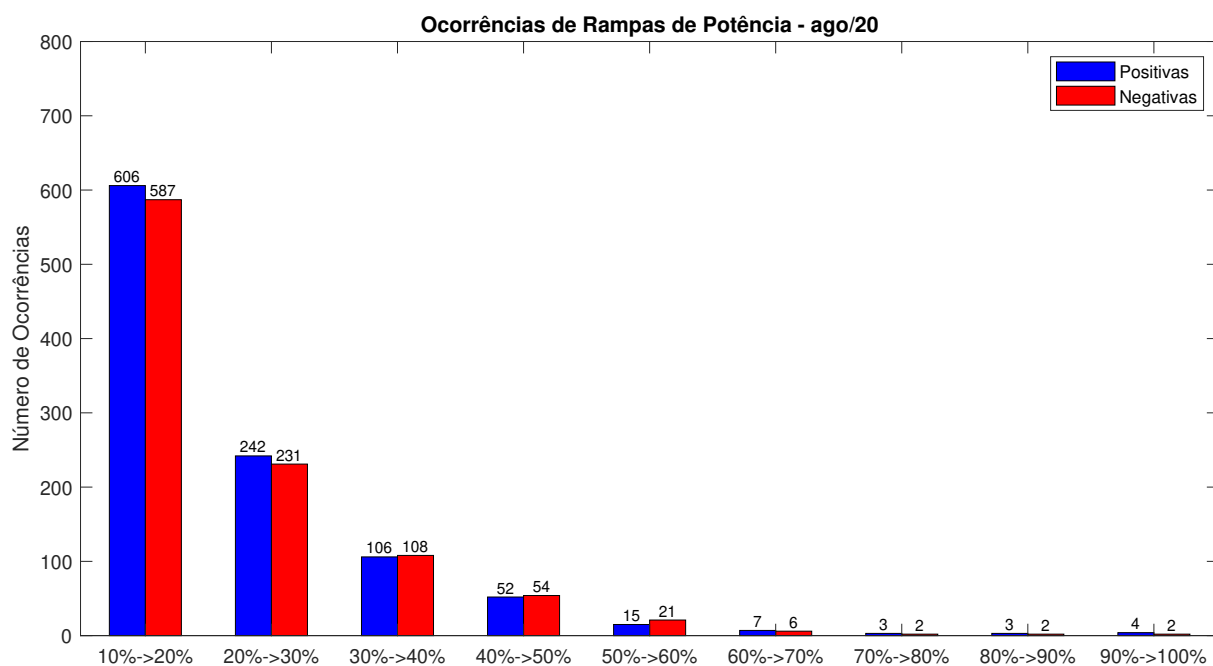


Figura 30 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Agosto/2020. Fonte: Autoria própria.

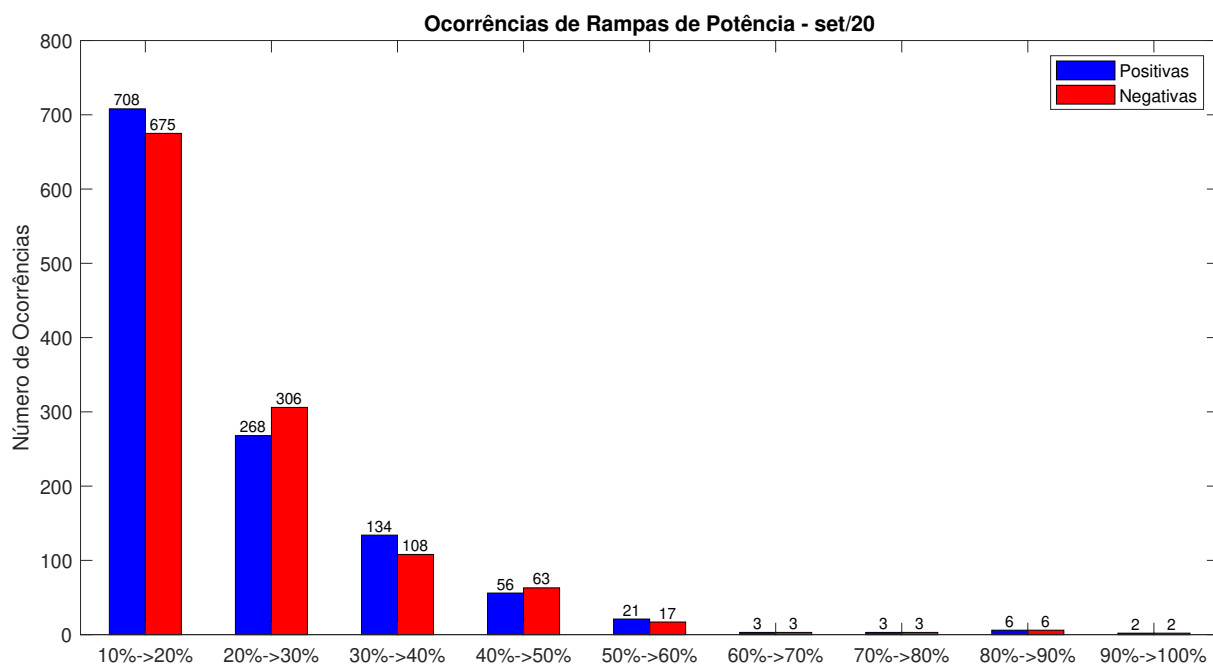


Figura 31 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Setembro/2020. Fonte: Autoria própria.

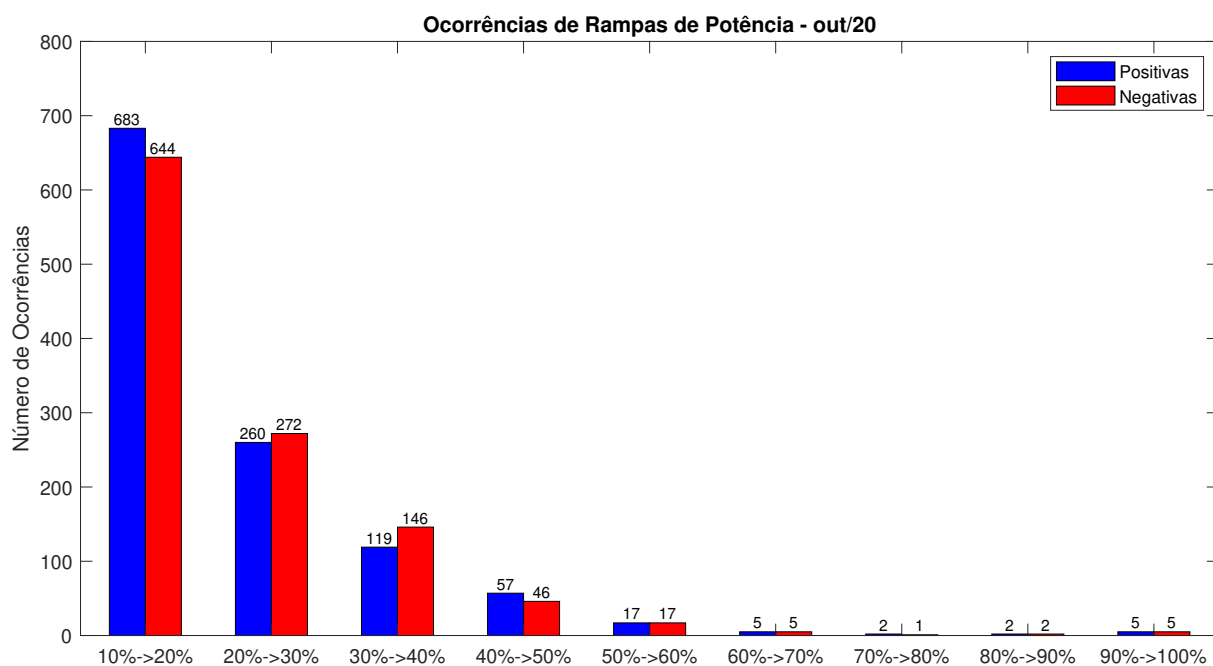


Figura 32 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Outubro/2020. Fonte: Autoria própria.

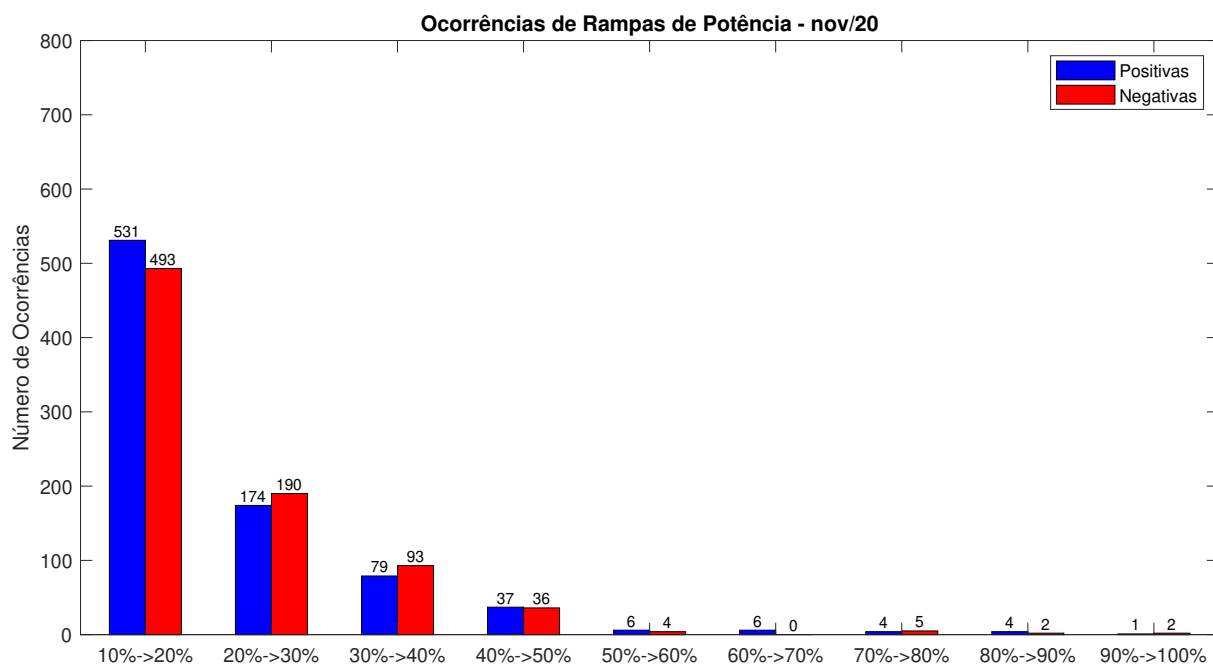


Figura 33 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Novembro/2020. Fonte: Autoria própria.

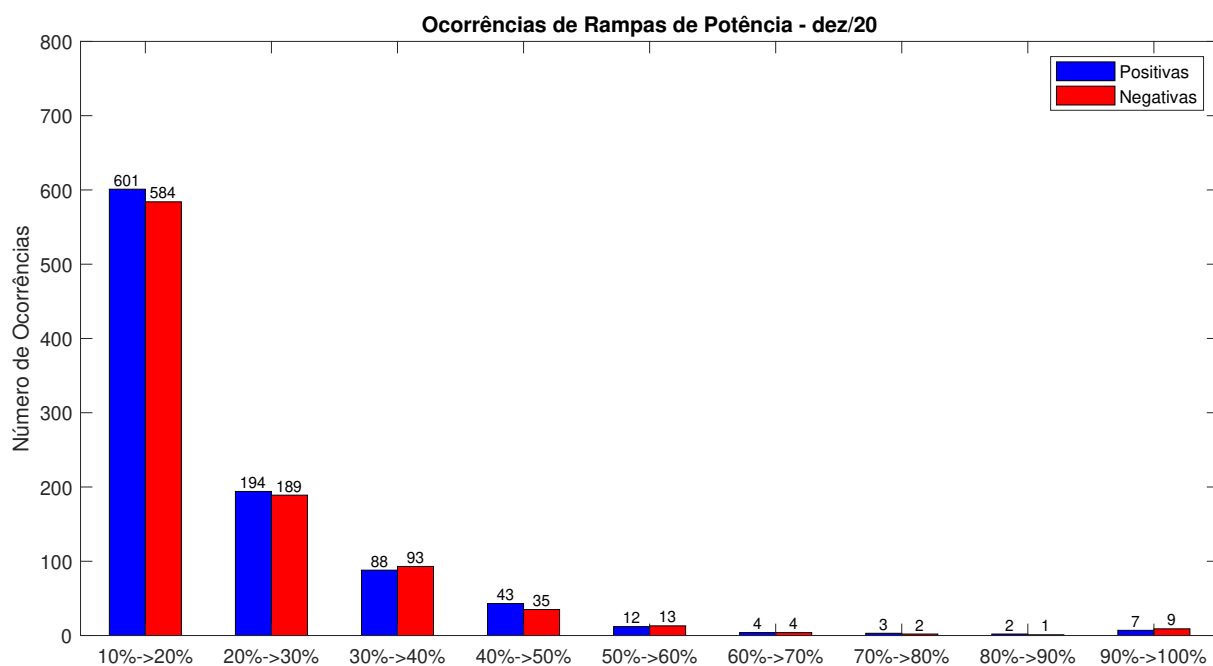


Figura 34 – Ocorrências de Rampas de Potência no mês de Dezembro/2020. Fonte: Autoria própria.

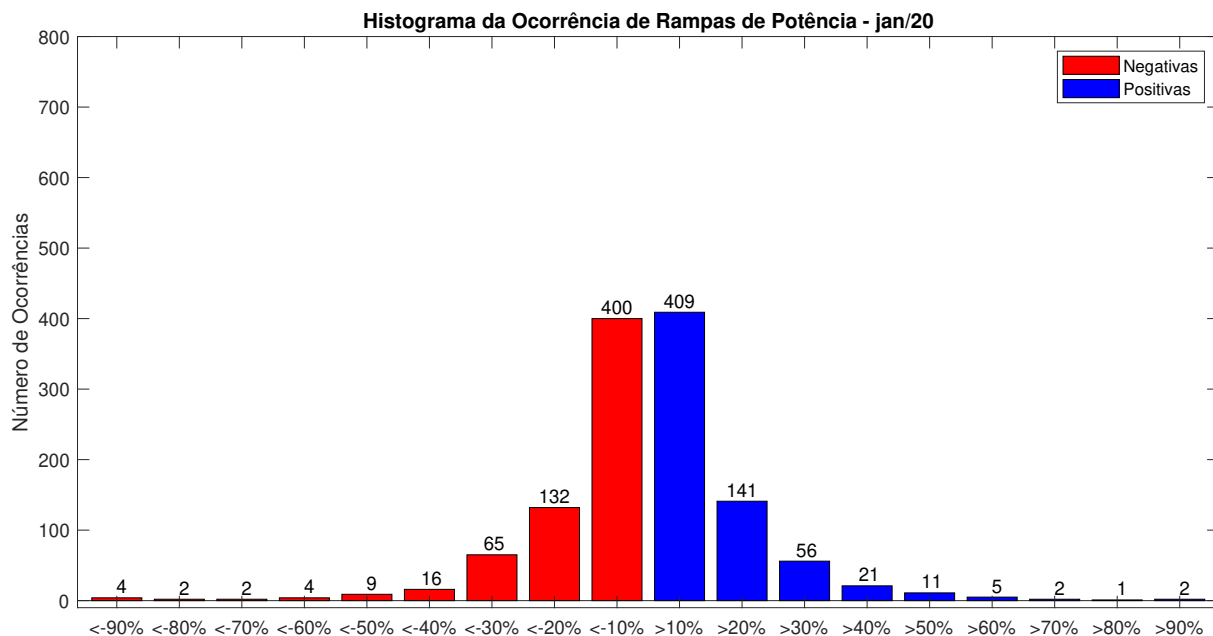


Figura 35 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Janeiro/2020. Fonte: Autoria própria.

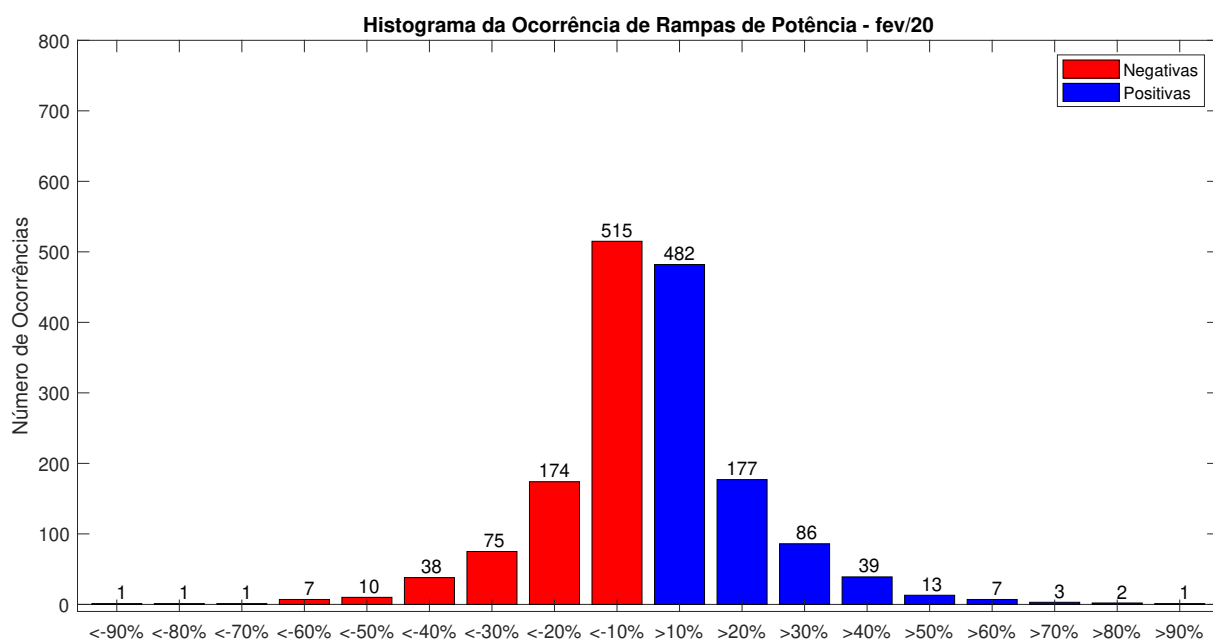


Figura 36 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Fevereiro/2020. Fonte: Autoria própria.

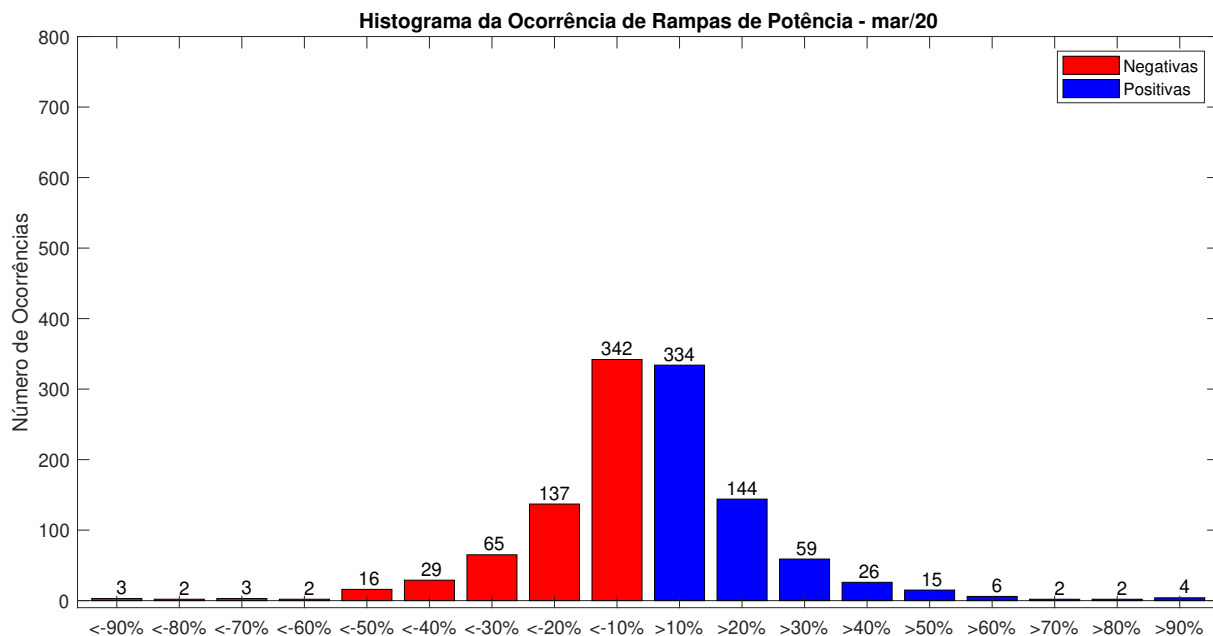


Figura 37 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Março/2020. Fonte: Autoria própria.

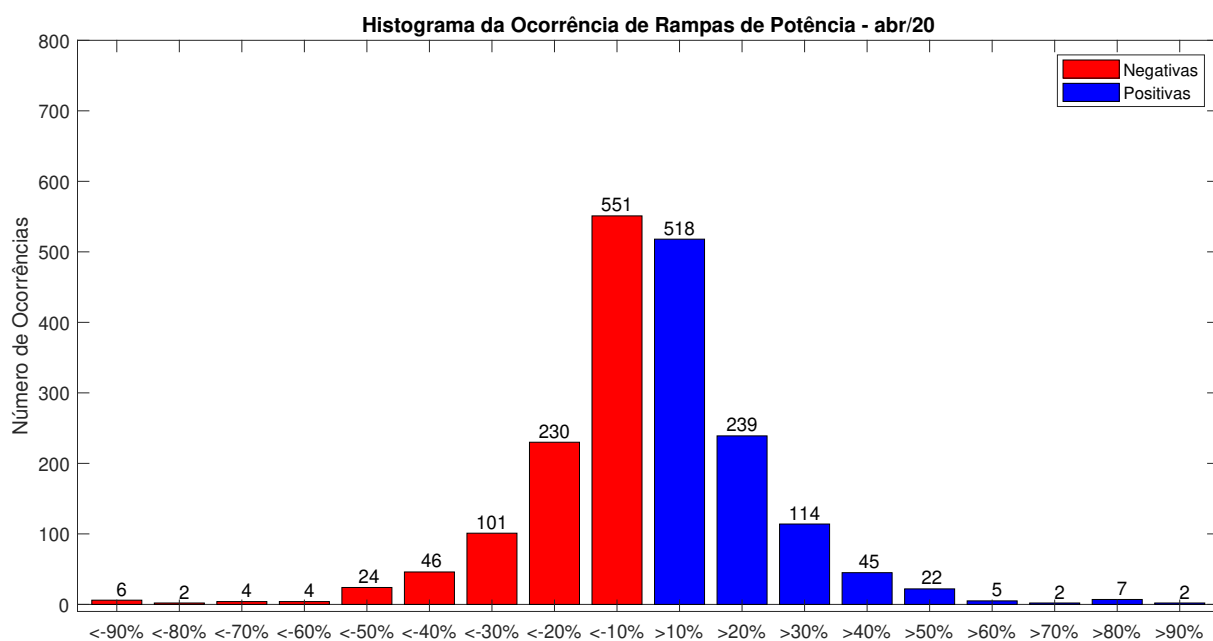


Figura 38 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Abril/2020. Fonte: Autoria própria.

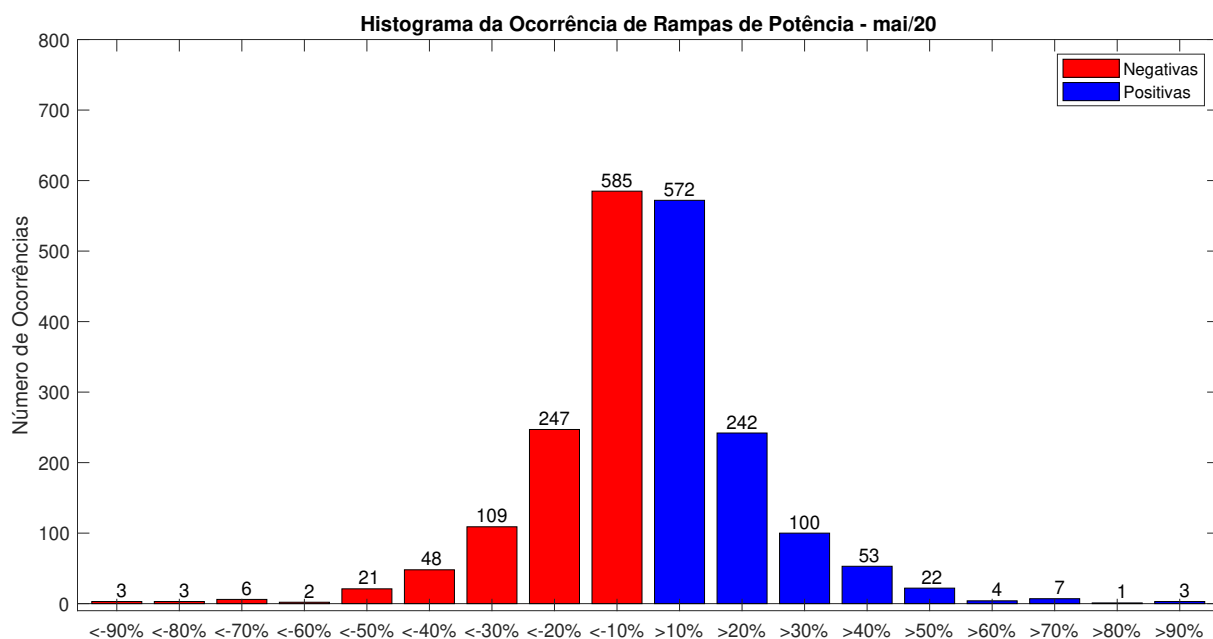


Figura 39 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Maio/2020. Fonte: Autoria própria.

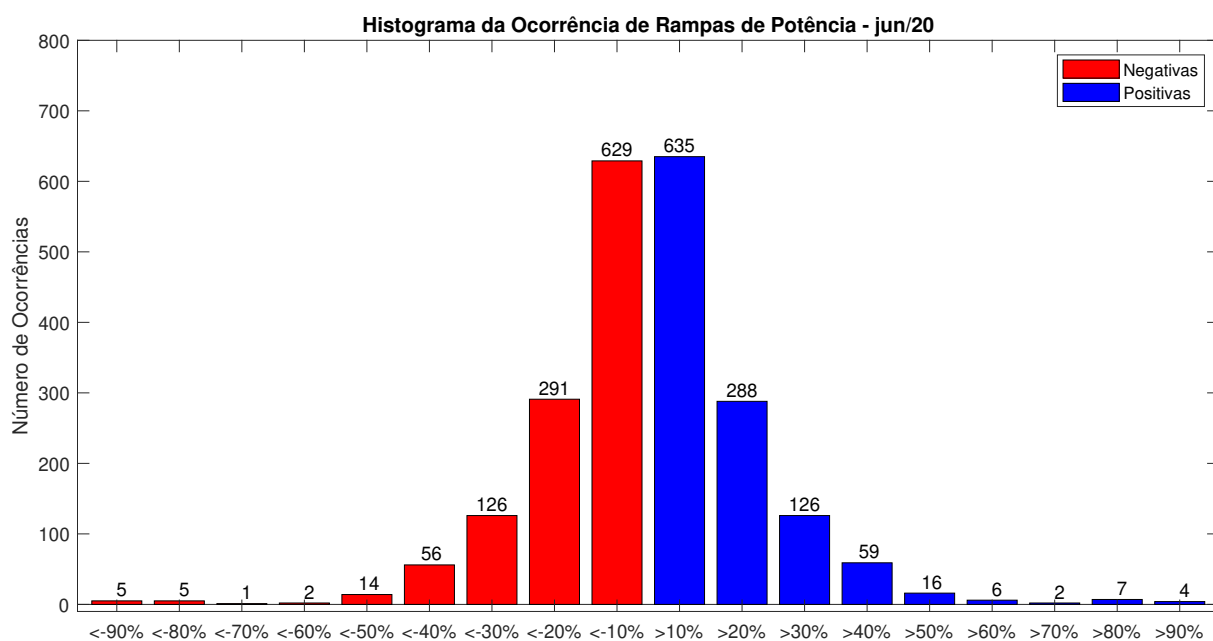


Figura 40 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Junho/2020. Fonte: Autoria própria.

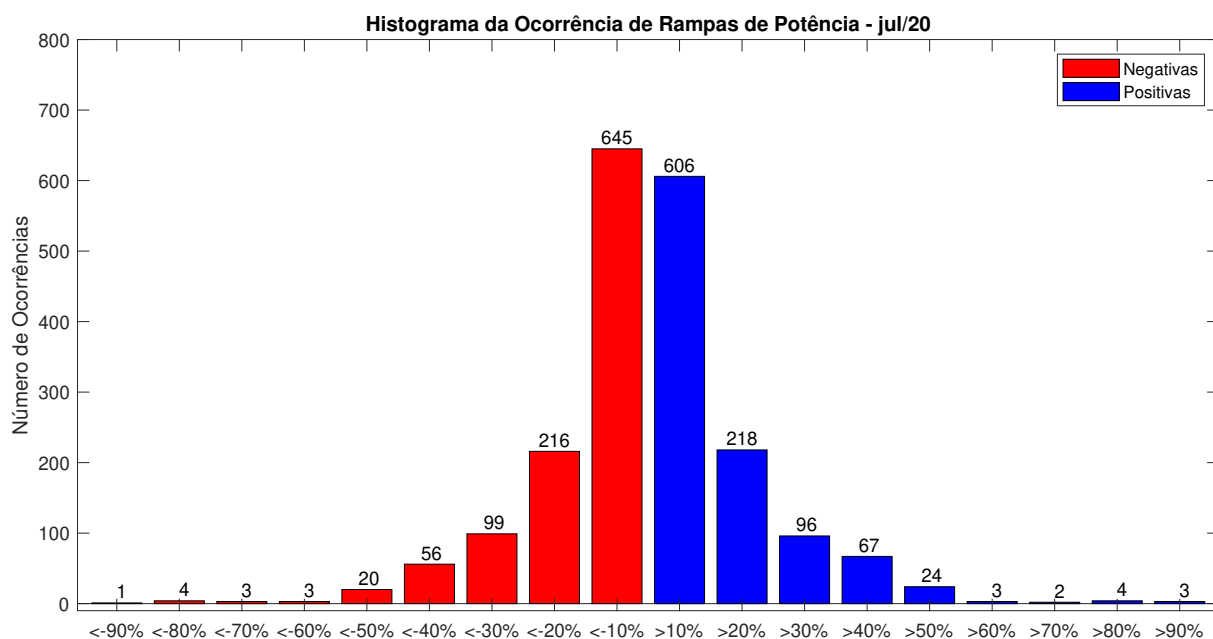


Figura 41 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Julho/2020. Fonte: Autoria própria.

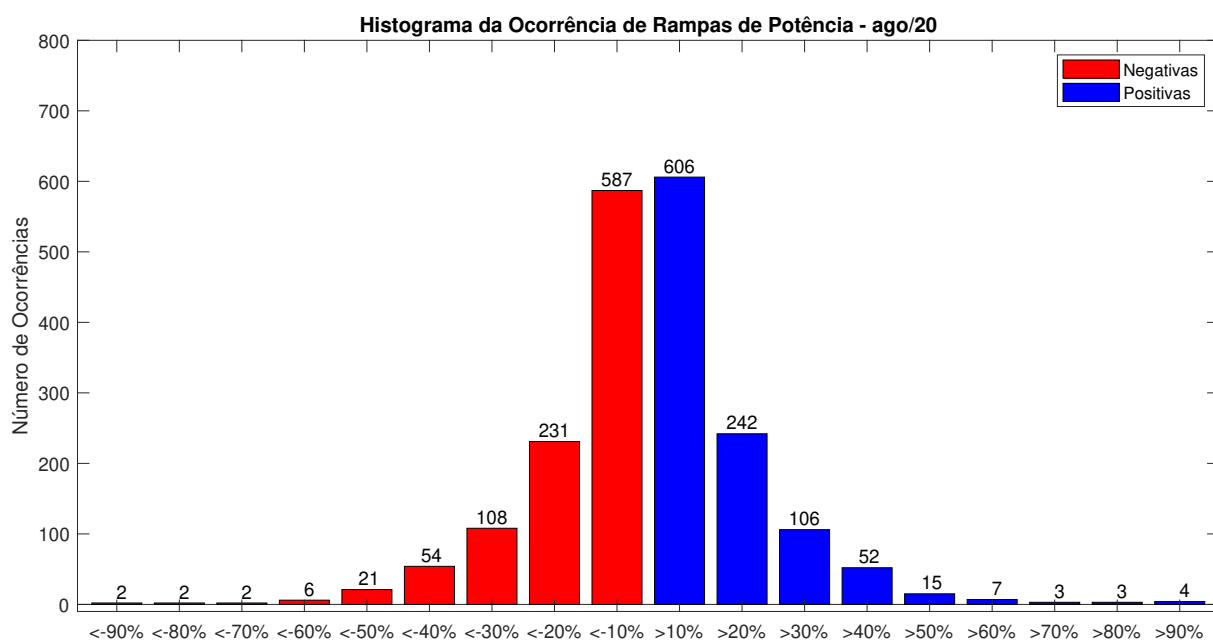


Figura 42 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Agosto/2020. Fonte: Autoria própria.

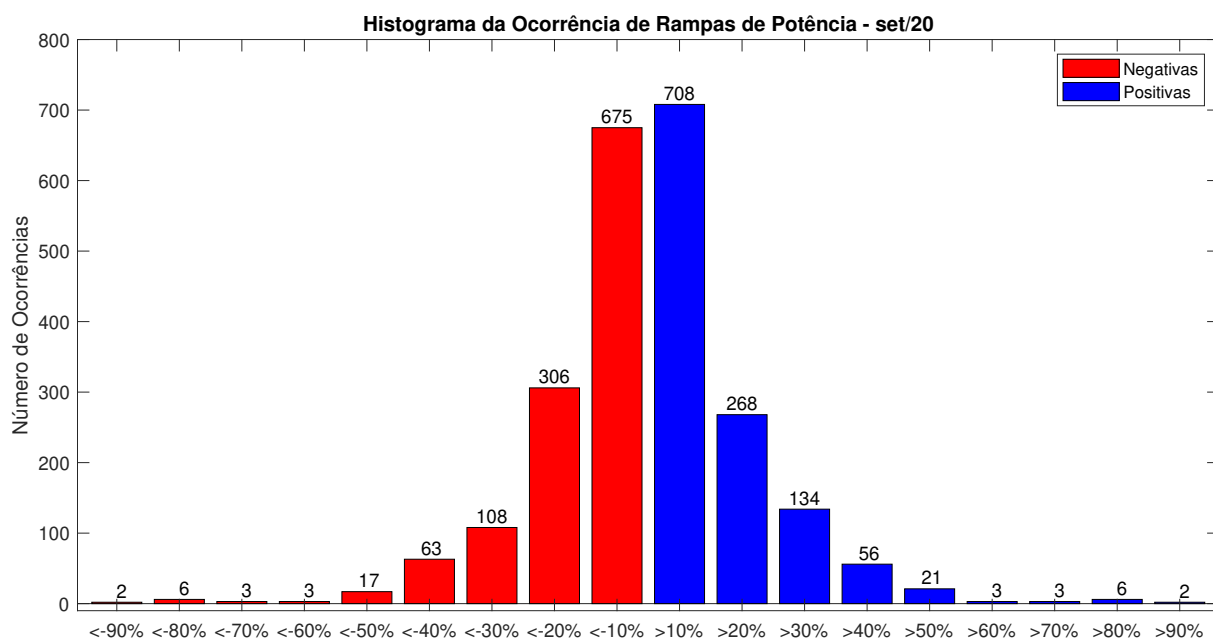


Figura 43 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Setembro/2020. Fonte: Autoria própria.

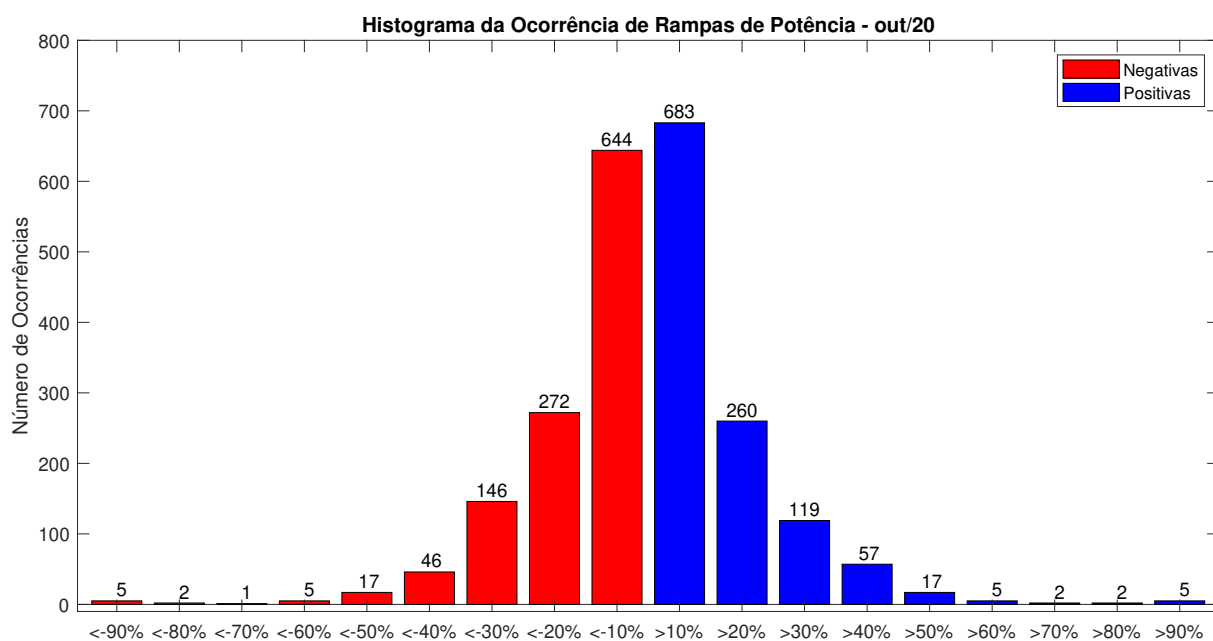


Figura 44 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Outubro/2020. Fonte: Autoria própria.

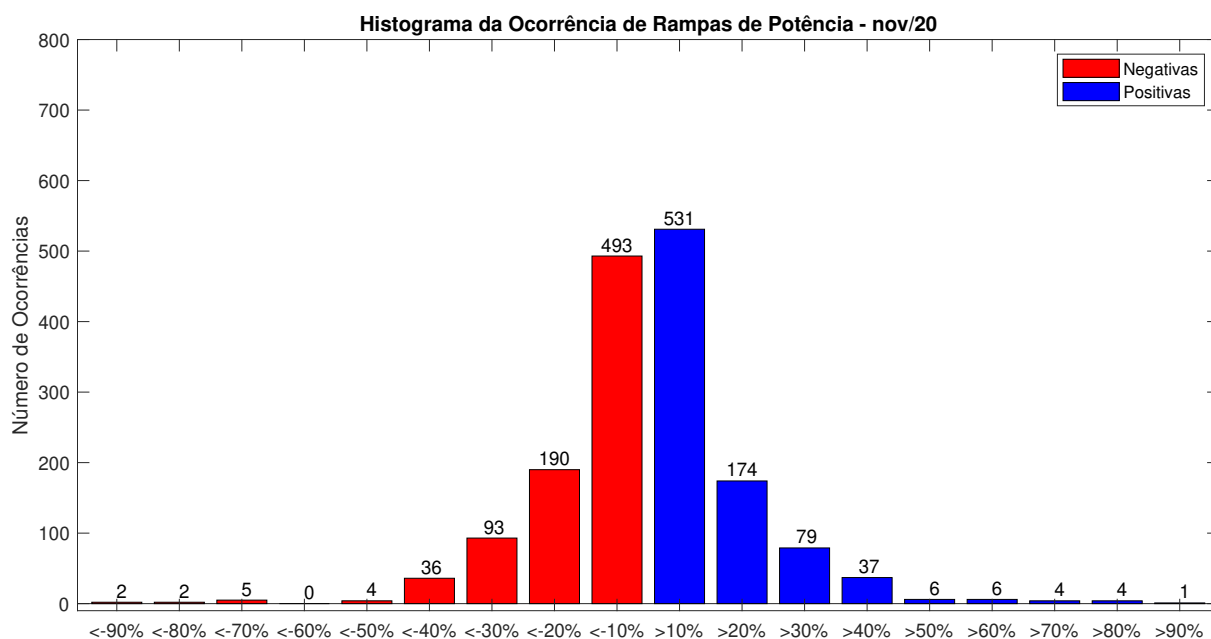


Figura 45 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Novembro/2020. Fonte: Autoria própria.

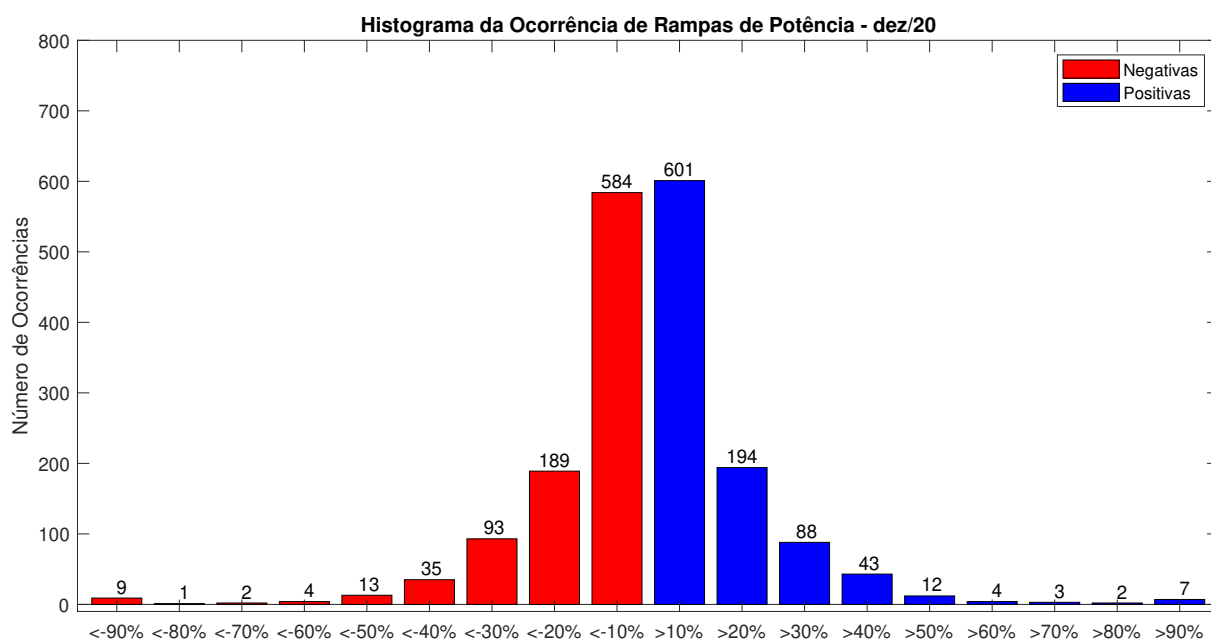


Figura 46 – Histograma da ocorrências de Rampas de Potência no mês de Dezembro/2020. Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE MENSAL DA OCORRÊNCIA DE RAMPAS DE POTÊNCIA

A título de amostra, são apresentados aqui o mês de setembro de 2020 (Figura 47), com variação de rampas entre 10% e 20%, e o mês de janeiro de 2020 (Figura 48), para rampas com variação entre 40% e 50%.

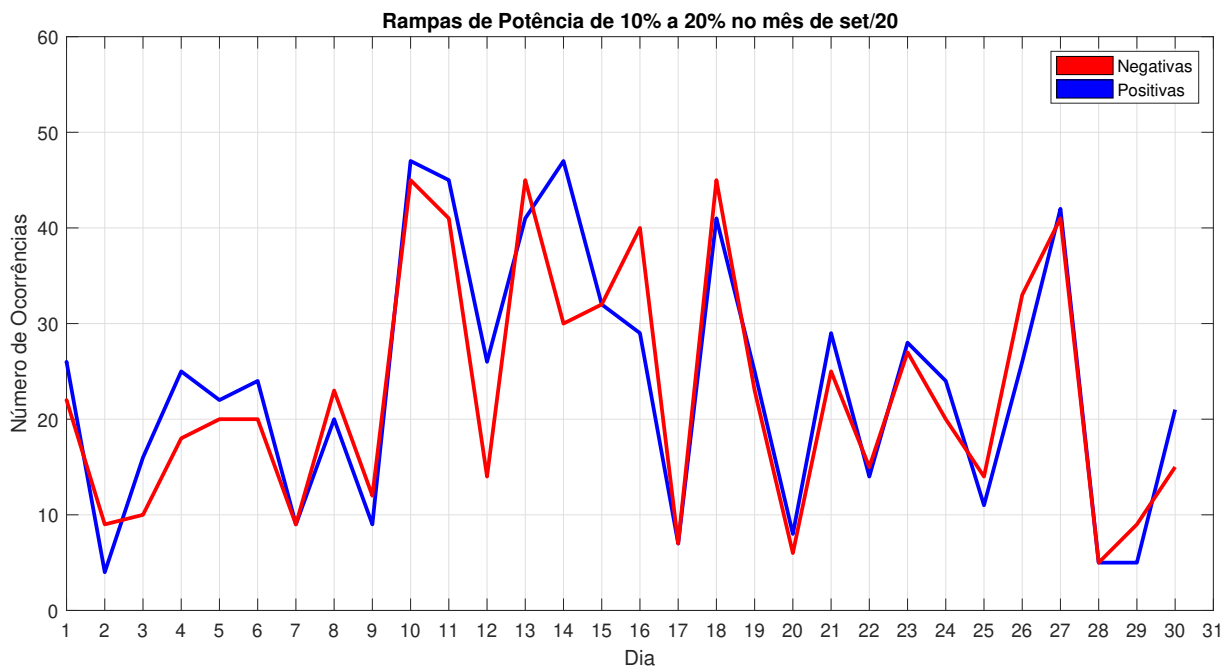


Figura 47 – Ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 10% e 20% no mês de setembro de 2020. Fonte: Autoria própria.

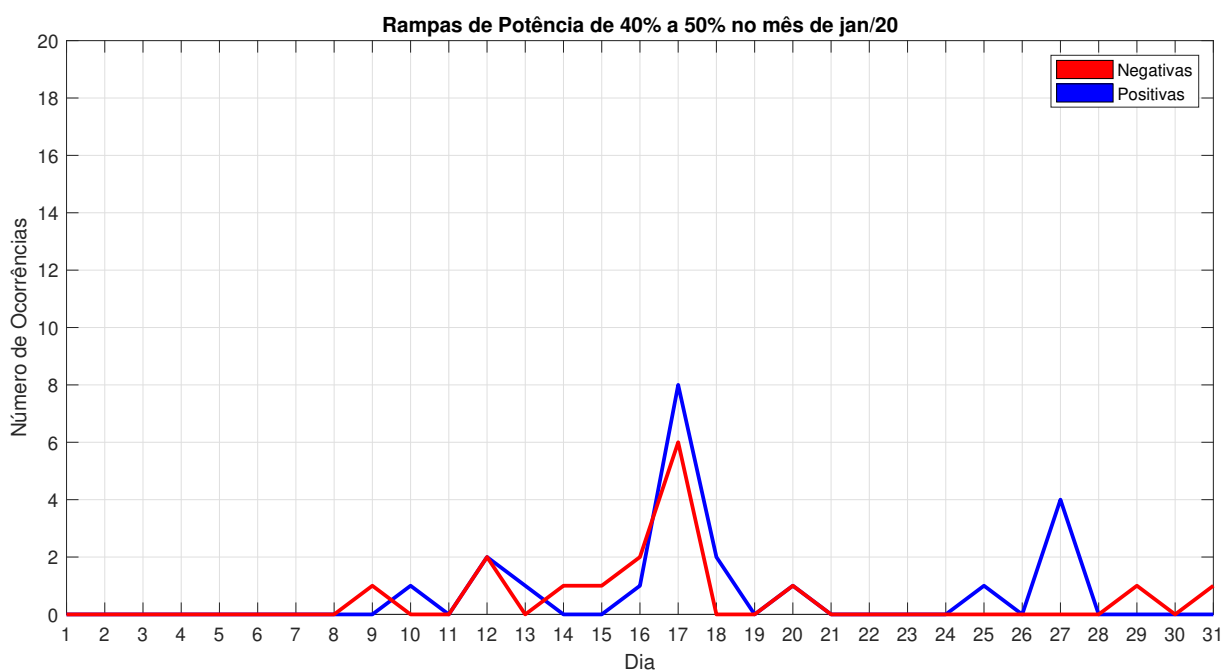


Figura 48 – Ocorrências de Rampas de Potência com variação entre 40% e 50% no mês de janeiro de 2020. Fonte: Autoria própria.

Esses gráficos mensais conseguem nos dar uma visão, dentro de cada mês, de como foi a ocorrência de rampas em cada dia. Por exemplo, percebe-se que na Figura 47, no dia 10 de setembro, houve a ocorrência de muitas rampas com variação entre 10% e 20%. Já no dia 28 de setembro não houve tantas ocorrências dessas rampas.

Já para rampas com variação entre 40% e 50% no mês de janeiro, como mostra a Figura 48, observa-se que o dia 17 de janeiro foi um dia com maior ocorrência de rampas com essa variação, enquanto que em vários outros dias desse mês não houve ocorrências de rampas com essa variação.

4.3 ANÁLISES DIÁRIA E HORÁRIA DA OCORRÊNCIA DE RAMPAS DE POTÊNCIA

Esses dias citados na seção anterior (17 de janeiro e 10 de setembro), bem como as variações de rampas também citadas, serão apresentados aqui para vermos como o *Ramp Rate Analyzer* é capaz de gerar os gráficos para que se possa fazer uma análise diária.

Como já citado e também possível de observar nos gráficos apresentados anteriormente, o mês de setembro de 2020 foi um mês com a ocorrência de muitas rampas de potência com variação entre 10% e 20%.

Na Figura 49 é possível ver como a curva de potência injetada diária, em intervalos de 1 minuto, se comporta variando bastante devido a intermitência da irradiância solar neste dia, ocasionando assim muitas rampas de potência, identificadas pelas bolinhas azuis e vermelhas, para rampas positivas e negativas, respectivamente, e suas magnitudes ao lado.

É possível realizar uma análise horária deste dia específico, através de intervalos de 1 minuto, como mostram as Figuras 50, 51 e 52, que apresentam o comportamento da curva de potência, bem como a ocorrência de rampas com variação entre 10% e 20%, nos intervalos entre 12h-13h, 13h-14h e 14h-15h, respectivamente.

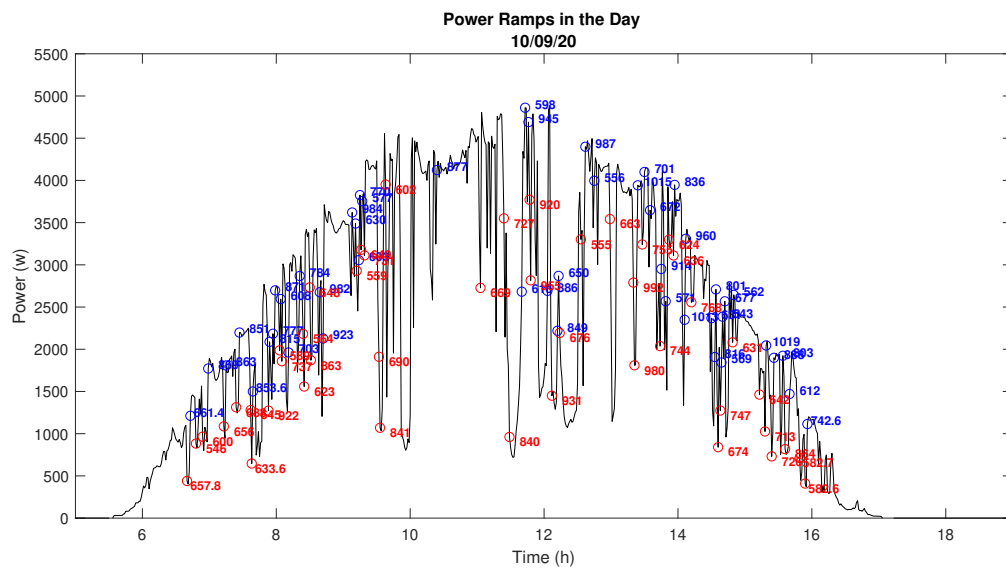


Figura 49 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 10/09/2020.
Fonte: Autoria própria.

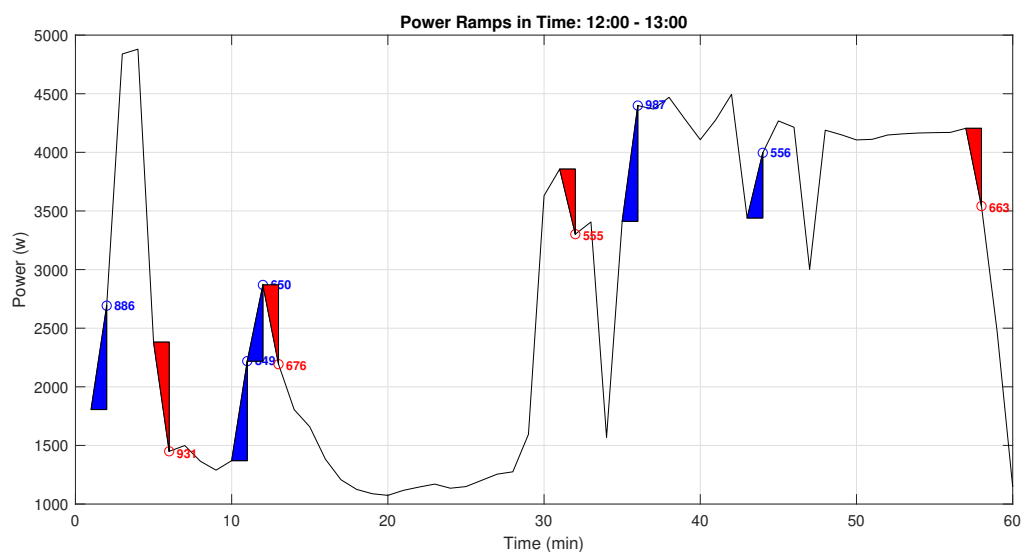


Figura 50 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 10/09/2020, no período entre 12h e 13h. Fonte: Autoria própria.

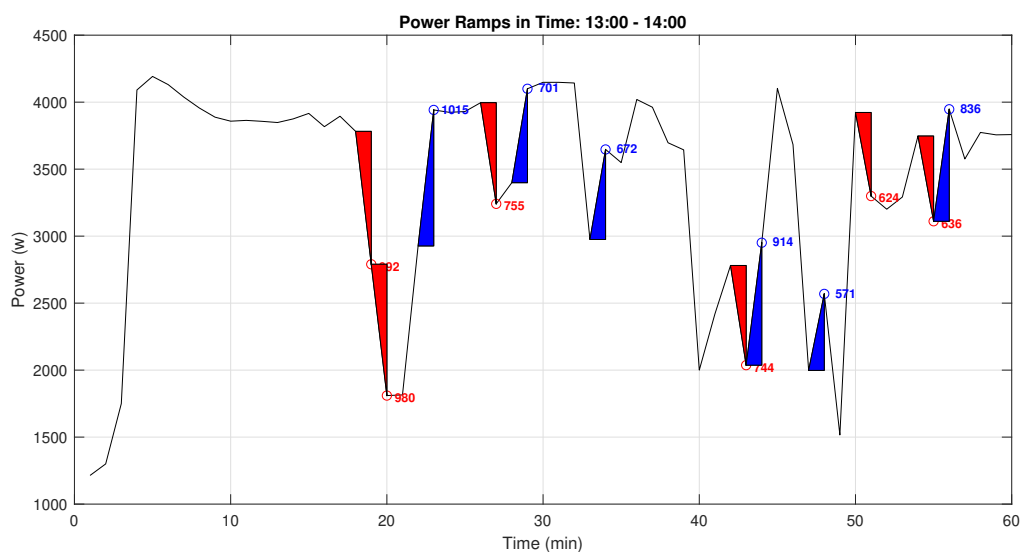


Figura 51 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 10/09/2020, no período entre 13h e 14h. Fonte: Autoria própria.

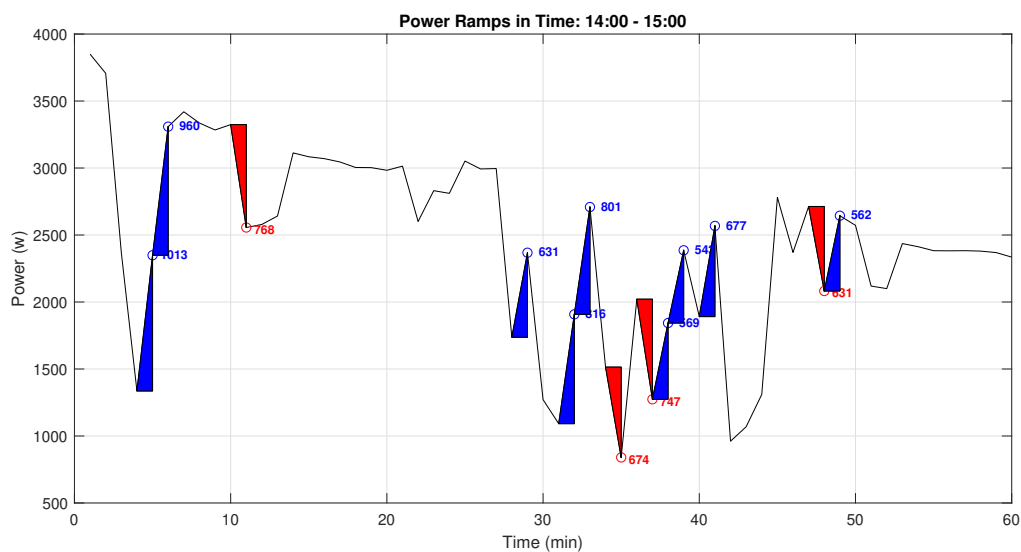


Figura 52 – Rampas de potência com variação entre 10% e 20% ocorridas no dia 10/09/2020, no período entre 14h e 15h. Fonte: Autoria própria.

Já na Figura 53 é possível ver como a curva de potência se comporta no dia 17 de janeiro de 2020, no entanto, para rampas com variação entre 40% e 50%, identificadas pelas bolinhas azuis e vermelhas, para rampas positivas e negativas, respectivamente.

Enquanto as Figuras 54, 55 e 56, apresentam o comportamento da curva de potência e ocorrência de rampas com variação entre 40% e 50%, nos intervalos entre 11h-12h, 12h-13h e 13h-14h, respectivamente, no dia 17 de janeiro de 2020.

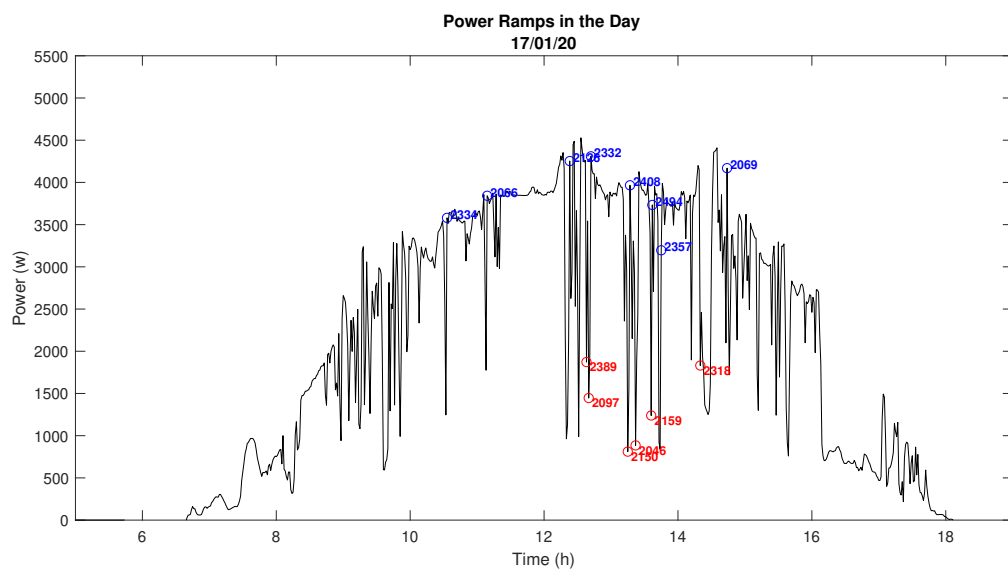


Figura 53 – Rampas de potência com variação entre 40% e 50% ocorridas no dia 17/01/2020.
Fonte: Autoria própria.

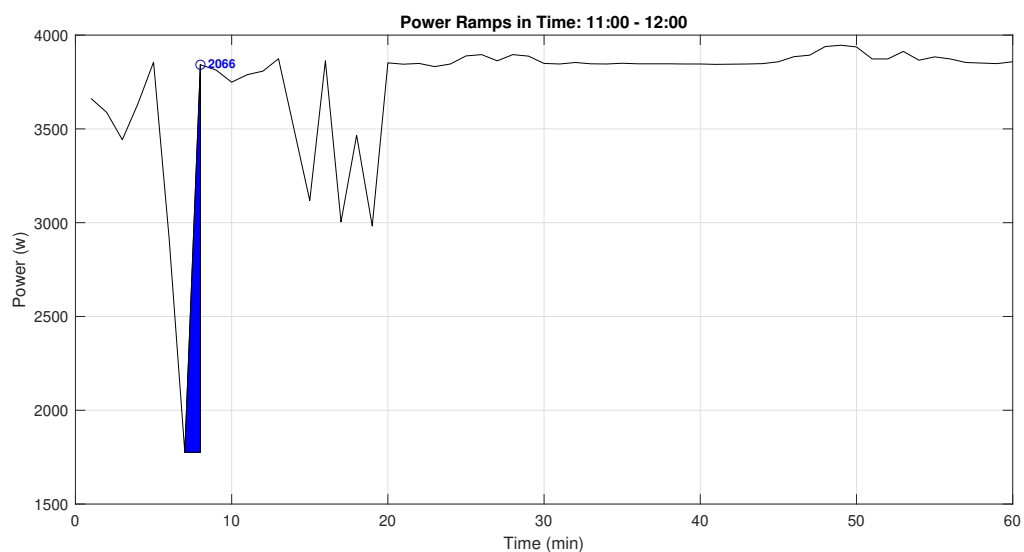


Figura 54 – Rampas de potência com variação entre 40% e 50% ocorridas no dia 17/01/2020, no período entre 11h e 12h. Fonte: Autoria própria.

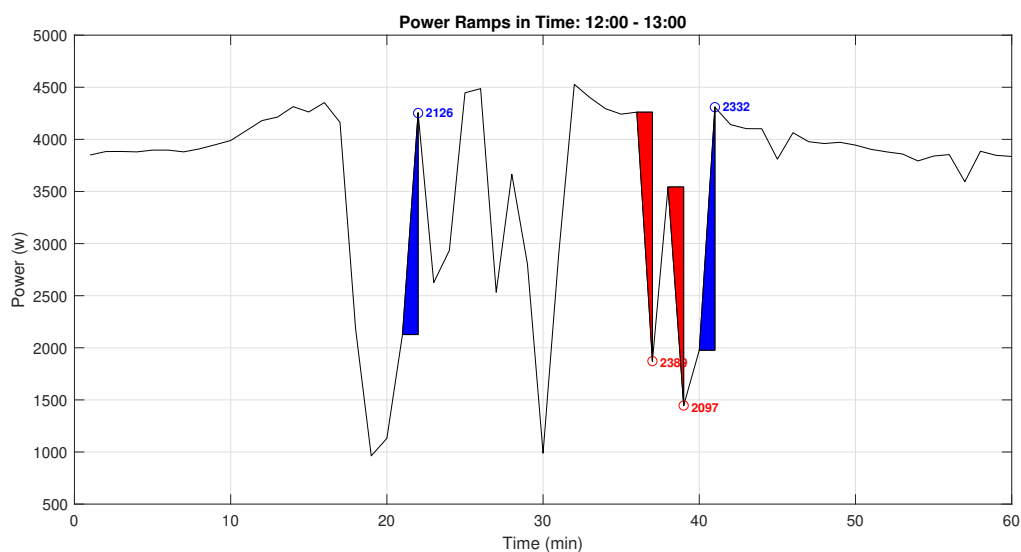


Figura 55 – Rampas de potência com variação entre 40% e 50% ocorridas no dia 17/01/2020, no período entre 12h e 13h. Fonte: Autoria própria.

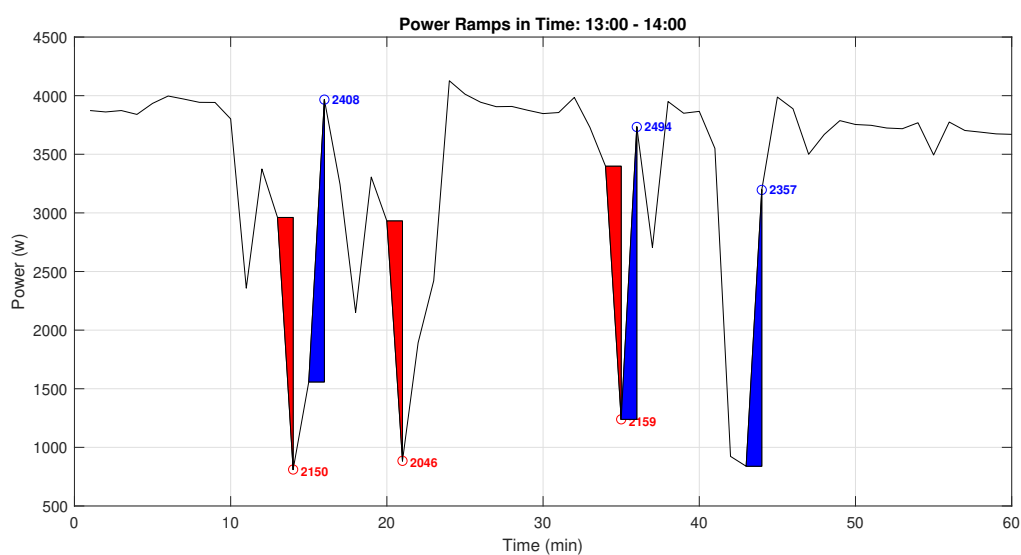


Figura 56 – Rampas de potência com variação entre 40% e 50% ocorridas no dia 17/01/2020, no período entre 13h e 14h. Fonte: Autoria própria.

Como já comentando anteriormente, o *Ramp Rate Analyzer* nos dá a possibilidade de analisar graficamente a variabilidade da potência, através da ocorrência de rampas em diversos espaços temporais. Para a análise realizada neste trabalho, seria possível gerar diversos gráficos diários e horários, alternando a variação das rampas de interesse.

As Tabelas 4, 5 e 6 abaixo apresentam um resumo do quantitativo da ocorrência de rampas positivas e negativas, de acordo com suas variações (10%-20%, 20%-30%

e assim sucessivamente) identificadas nos dados coletados pelo sistema SCADA e utilizados neste trabalho.

A Tabela 4 apresenta o resumo mês a mês, enquanto as Tabelas 5 e 6 apresentam o resumo dos meses utilizados como exemplo nesta seção (Janeiro e Setembro) respectivamente.

Tabela 4 – Quantitativo mensal da ocorrência de Rampas de Potência, mês a mês, entre Janeiro/2020 e Junho/2021. Fonte: Autoria própria.

MÊS	10%		20%		30%		40%		50%		60%		70%		80%		90%	
	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N
jan/20	409	400	141	132	56	65	21	16	11	9	5	4	2	2	1	2	2	4
fev/20	482	515	177	174	86	75	39	38	13	10	7	7	3	1	2	1	1	1
mar/20	334	342	144	137	59	65	26	29	15	16	6	2	2	3	2	2	4	3
abr/20	518	551	239	230	114	101	45	46	22	24	5	4	2	4	7	2	2	6
mai/20	572	585	242	247	100	109	53	48	22	21	4	2	7	6	1	3	3	3
jun/20	635	629	288	291	126	126	59	56	16	14	6	2	2	1	7	5	4	5
jul/20	606	645	218	216	96	99	67	56	24	20	3	3	2	3	4	4	3	1
ago/20	606	587	242	231	106	108	52	54	15	21	7	6	3	2	3	2	4	2
set/20	708	675	268	306	134	108	56	63	21	17	3	3	3	3	6	6	2	2
out/20	683	644	260	272	119	146	57	46	17	17	5	5	2	1	2	2	5	5
nov/20	531	493	174	190	79	93	37	36	6	4	6	0	4	5	4	2	1	2
dez/20	601	584	194	189	88	93	43	35	12	13	4	4	3	2	2	1	7	9
jan/21	391	397	118	105	27	26	14	17	11	9	0	2	5	1	3	2	4	5
fev/21	489	478	178	144	73	54	24	34	9	10	6	4	1	2	1	1	0	0
mar/21	540	518	206	229	105	92	36	39	18	13	6	5	4	1	1	1	4	3
abr/21	633	625	255	267	159	160	78	87	47	37	8	11	3	1	4	5	5	3
mai/21	720	746	297	324	141	149	76	59	38	25	9	9	5	3	4	5	1	3
jun/21	577	618	237	250	91	93	53	48	19	18	13	6	3	3	5	5	4	3

Tabela 5 – Quantitativo da ocorrência de Rampas de Potência no mês de Janeiro/2020. Fonte: Autoria própria.

Dia	10%		20%		30%		40%		50%		60%		70%		80%		90%	
	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N
1	8	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	23	24	4	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	20	22	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11	9	2	4	2	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
8	3	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	4	5	2	2	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	8	4	3	2	0	2	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
11	4	3	2	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	31	23	9	16	9	7	2	2	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
13	14	12	6	7	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	16	13	10	5	0	4	0	1	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0
15	13	7	4	4	2	2	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
16	16	20	7	1	2	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
17	35	30	14	12	9	10	8	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
18	36	28	27	20	8	18	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
19	28	27	7	11	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	21	27	8	7	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	6	3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
22	6	4	1	1	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23	8	13	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	10	12	6	4	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
25	13	23	3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	4	4	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
27	18	16	6	11	4	4	4	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1
28	20	23	3	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	3	4	4	2	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
30	11	12	1	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
31	15	12	6	3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	409	400	141	132	56	65	21	16	11	9	5	4	2	2	1	2	2	4

Tabela 6 – Quantitativo da ocorrência de Rampas de Potência no mês de Setembro/2020. Fonte: Autoria própria.

Dia	10%		20%		30%		40%		50%		60%		70%		80%		90%	
	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N
1	26	22	3	7	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
3	16	10	5	6	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	25	18	7	8	5	4	4	3	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
5	22	20	3	6	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	24	20	11	5	3	4	1	3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
7	9	9	4	3	2	2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	20	23	8	19	9	7	5	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	9	12	2	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	47	45	15	26	10	6	6	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	45	41	18	24	9	7	6	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12	26	14	15	12	4	5	2	3	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0
13	41	45	13	12	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	47	30	18	23	11	15	7	8	6	1	0	2	0	0	0	0	1	1
15	32	32	19	14	4	6	4	5	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
16	29	40	10	11	13	5	6	4	0	3	0	0	0	0	2	2	0	0
17	7	7	2	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	41	45	20	23	16	8	1	3	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
19	25	23	15	17	7	5	2	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
20	8	6	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	29	25	6	18	4	4	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	14	15	7	7	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
23	28	27	15	16	3	7	3	5	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0
24	24	20	10	14	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	11	14	5	7	6	3	2	2	0	2	1	0	0	0	2	2	0	0
26	26	33	15	6	4	2	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
27	42	41	8	9	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
29	5	9	3	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	21	15	10	7	1	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	708	675	268	306	134	108	56	63	21	17	3	3	3	3	6	6	2	2

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Rampas de potência é um tema que vem sendo estudado cada vez mais devido a sua importância na questão dos impactos causados nos sistemas de geração e distribuição quando ocorrem em tais sistemas. Essas rampas representam um reflexo da variabilidade da irradiância solar, geralmente ocasionada por nuvens em movimento, causando flutuações na geração de energia fotovoltaica, podendo impactar negativamente a estabilidade da rede.

Neste trabalho foi apresentado o *Ramp Rate Analyzer*, uma aplicação desenvolvida com o objetivo de identificar, analisar e classificar a ocorrência de rampas em um determinado período de tempo, através de uma base de dados coletada por um sistema de aquisição de dados de um sistema fotovoltaico real.

Com a flexibilidade que a aplicação apresenta, é possível perceber sua contribuição no sentido de classificar e apresentar de forma rápida, através de gráficos, a ocorrência de rampas de potência em um sistema fotovoltaico qualquer, variando apenas o tamanho do sistema, o intervalo de rampas e o período temporal que se deseja analisar.

5.1 PERSPECTIVAS FUTURAS

A variabilidade do recurso solar é um fator limitante para estimar a energia gerada, inviabilizando estudos mais profundos no contexto do sistema elétrico. No entanto, o estudo sobre rampas é capaz de abrir um leque de ideias para futuras pesquisas nessa temática.

Como proposta de trabalhos futuros pode-se pensar em capturar uma base de dados maior, algo em torno de 3 a 5 anos de medições, para então realizar um estudo da incidência de irradiância, e consequentemente da ocorrência de rampas de potência, sendo possível permitir a identificação dos dias, e dos horários mais críticos desses dias, considerando que as características meteorológicas e climatológicas tendem a ser semelhantes no mesmo período de cada ano.

Por exemplo, sabe-se que durante o inverno a ocorrência de dias nublados é bem maior do que no verão, então, a ocorrência de dias com alta variabilidade da incidência de irradiância e consequentemente rampas de potencia será maior. No entanto, apenas com uma base de dados grande será possível identificar se é confiável fazer algum tipo de previsão analisado apenas dados passados, desconsiderando o estado climatológico e meteorológico em tempo real. Sendo viável, pode-se pensar quais seriam as possíveis soluções a serem tomadas para evitar uma possível falta ou sobrecarga de energia na rede nesses períodos de tempo já conhecidos.

Além disso, pode-se pensar no desenvolvimento de um atlas solarimétrico qualitativo, capaz de estimar a qualidade do recurso solar através da análise das rampas identificadas, de acordo com uma base de dados mais robusta.

REFERÊNCIAS

- ABUELLA, M.; CHOWDHURY, B. Forecasting of solar power ramp events: A post-processing approach. **Renewable Energy**, v. 133, p. 1380–1392, 2019. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148118310681>>.
- ALAM, M. J. E.; MUTTAQI, K. M.; SUTANTO, D. A novel approach for ramp-rate control of solar pv using energy storage to mitigate output fluctuations caused by cloud passing. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 29, n. 2, p. 507–518, 2014.
- BIRD, L.; MILLIGAN, M.; LEW, D. **Integrating Variable Renewable Energy: Challenges and Solutions**. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/1097911>>.
- BLAABJERG, F.; SANGWONGWANICH, A.; YANG, Y. Chapter 6 - flexible power control of photovoltaic systems. In: YAHYAUI, I. (Ed.). **Advances in Renewable Energies and Power Technologies**. Elsevier, 2018. p. 207–229. ISBN 978-0-12-812959-3. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012812959300006X>>.
- CUI, M.; ZHANG, J.; FENG, C.; FLORITA, A. R.; SUN, Y.; HODGE, B.-M. Characterizing and analyzing ramping events in wind power, solar power, load, and netload. **Renewable Energy**, v. 111, p. 227–244, 2017. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117302975>>.
- CUNHA, P. H. **Severidade de Rampas de Geração Fotovoltaica de Grande Escala na Rede Convencional em Regiões com Alta Densidade de Oferta**. Dissertação (Mestrado) — Curso de Engenharia Elétrica, 2021.
- DEETJEN, T. A.; GARRISON, J. B.; RHODES, J. D.; WEBBER, M. E. Solar pv integration cost variation due to array orientation and geographic location in the electric reliability council of texas. **Applied Energy**, v. 180, p. 607–616, 2016. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916310984>>.
- DIAZ, V. N. S. **Avaliação de desempenho das estratégias de controle para suavização da potência ativa de sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2019. Disponível em: <<http://tede.unioeste.br/handle/tede/4632>>.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. 2nd ed.. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN 007138622X.
- ELLIS, A.; SCHOENWALD, D.; HAWKINS, J.; WILLARD, S.; ARELLANO, B. Pv output smoothing with energy storage. In: **2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 001523–001528.
- HOFF, T. E.; PEREZ, R. Quantifying pv power output variability. **Solar Energy**, v. 84, n. 10, p. 1782–1793, 2010. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10002380>>.

HUO, Y.; GRUOSSO, G. A novel ramp-rate control of grid-tied pv-battery systems to reduce required battery capacity. **Energy**, v. 210, p. 118433, 2020. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220315413>>.

KAKIMOTO, N.; SATOH, H.; TAKAYAMA, S.; NAKAMURA, K. Ramp-rate control of photovoltaic generator with electric double-layer capacitor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 24, n. 2, p. 465–473, 2009.

KANEHIRA, T.; TAKAHASHI, A.; IMAI, J.; FUNABIKI, S. A comparison of electric power smoothing control methods for the distributed generation system. In: **2013 IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 311–316.

KLEISSL, J.; LAVE, M.; STEIN, J. Quantifying and simulating solar-plant variability using irradiance data. In: _____. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9780123971777.

KOOHI-KAMALI, S.; RAHIM, N.; MOKHLIS, H. Smart power management algorithm in microgrid consisting of photovoltaic, diesel, and battery storage plants considering variations in sunlight, temperature, and load. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 562–582, 2014. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414003847>>.

KUMAR, D. S.; MAHARJAN, S.; ALBERT; SRINIVASAN, D. Ramp-rate limiting strategies to alleviate the impact of pv power ramping on voltage fluctuations using energy storage systems. **Solar Energy**, v. 234, p. 377–386, 2022. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X22000706>>.

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.

LOBO, F. X.; TORRES, I. C.; GOMES, C. C. C.; NEGREIROS, G. F.; TIBA, C. Avaliação das flutuações de potência provenientes de sistemas fotovoltaicos integrados a rede de distribuição. In: **Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**. [S.l.: s.n.], 2022.

MARCOS, J.; PARRA, I. De la; GARCÍA, M.; MARROYO, L. Control strategies to smooth short-term power fluctuations in large photovoltaic plants using battery storage systems. **Energies**, v. 7, n. 10, p. 6593–6619, 2014. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/7/10/6593>>.

MARCOS, J.; STORKEL, O.; MARROYO, L.; GARCIA, M.; LORENZO, E. Storage requirements for pv power ramp-rate control. **Solar Energy**, v. 99, p. 28–35, 2014. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13004672>>.

MARTINS, J.; SPATARU, S.; SERA, D.; STROE, D.-I.; LASHAB, A. Comparative study of ramp-rate control algorithms for pv with energy storage systems. **Energies**, v. 12, n. 7, 2019. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/7/1342>>.

MONAI, T.; TAKANO, I.; NISHIKAWA, H.; SAWADA, Y. A collaborative operation method between new energy-type dispersed power supply and edlc. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 19, n. 3, p. 590–598, 2004.

PASSEY, R.; SPOONER, T.; MACGILL, I.; WATT, M.; SYNGELLAKIS, K. The potential impacts of grid-connected distributed generation and how to address them: A review of technical and non-technical factors. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, p. 6280–6290, 2011. ISSN 0301-4215. Sustainability of biofuels. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511005519>>.

POURMOUSAVI, S.; SAHA, T. K. Evaluation of the battery operation in ramp-rate control mode within a pv plant: A case study. **Solar Energy**, v. 166, p. 242–254, 2018. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18302482>>.

RIQUELME-DOMINGUEZ, J. M.; GARCÍA-LÓPEZ, F. D. P.; MARTINEZ, S. Power ramp-rate control via power regulation for storageless grid-connected photovoltaic systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 138, p. 107848, 2022. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521010644>>.

ROCHA, V. R. da; GONCALVES, A. R.; COSTA, R. S.; PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; INACIO, C. O.; FONTENELE, L. F. A.; FERREIRA, P. H. F. Avaliação da variabilidade do recurso solar em território brasileiro. In: **VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar**. [S.l.: s.n.], 2020.

SANGWONGWANICH, A.; YANG, Y.; BLAABJERG, F. A cost-effective power ramp-rate control strategy for single-phase two-stage grid-connected photovoltaic systems. In: **2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–7.

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>>.

SUKUMAR, S.; MEKHILEF, S.; MOKHLIS, H.; KARIMI, M. Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (pv) sources – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 1170–1184, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000897>>.

TORRES, I. C. **Estratégia de mitigação para sobretensão de curto prazo diante da variabilidade da geração fotovoltaica em redes de distribuição secundária**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/42317>>.

WILLY, D.; DYRESON, A.; ACKER, T.; MORGAN, E.; FLOOD, R. Dead band method for solar irradiance and power ramp detection algorithms. In: **Proceedings of 43rd ASES National Solar Conference 2014, SOLAR 2014, Including the 39th National Passive**

Solar Conference and the 2nd Meeting of Young and Emerging Professionals in Renewable Energy. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1204–1211.

WU, X.; KERÉKES, T. Flexible active power control for pv-ess systems: A review. **Energies**, v. 14, n. 21, 2021. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/21/7388>>.

YANG, Y.; KIM, K. A.; BLAABJERG, F.; SANGWONGWANICH, A. 6 - flexible active power control of pv systems. In: YANG, Y.; KIM, K. A.; BLAABJERG, F.; SANGWONGWANICH, A. (Ed.). **Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion Systems**. Woodhead Publishing, 2019. p. 153–185. ISBN 978-0-08-102339-6. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081023396000063>>.

ZHANG, J.; CUI, M.; HODGE, B.-M.; FLORITA, A.; FREEDMAN, J. Ramp forecasting performance from improved short-term wind power forecasting over multiple spatial and temporal scales. **Energy**, v. 122, p. 528–541, 2017. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217301111>>.