

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS – CARVI  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA  
CURSO ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SAMUEL RICARDI**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA GERADA PELO  
SISTEMA HÍBRIDO PCH-SOLAR E PCH-EÓLICA NO RIO GRANDE DO  
SUL**

**BENTO GONÇALVES**

**2022**

**SAMUEL RICARDI**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA GERADA PELO  
SISTEMA HÍBRIDO PCH-SOLAR E PCH-EÓLICA NO RIO GRANDE DO  
SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado no Campus Universitário da Região dos Vinhedos (CARVI), da Universidade de Caxias do Sul (UCS), como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Tiago Cassol Severo

**BENTO GONÇALVES**

**2022**

**SAMUEL RICARDI**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA GERADA PELO  
SISTEMA HÍBRIDO PCH-SOLAR E PCH-EÓLICA NO RIO GRANDE DO  
SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado no Campus Universitário da Região dos Vinhedos (CARVI), da Universidade de Caxias do Sul (UCS), como requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Me. Tiago Cassol Severo

Aprovado em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**Banca Examinadora**

---

Prof. Me. Tiago Cassol Severo (Orientador)  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Me. Cícero Zanoni  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. André Bernardes Michel  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento.”

ALBERT EINSTEIN

## RESUMO

A fonte hídrica possui a maior participação da matriz elétrica brasileira, mas nos últimos anos teve sua geração impactada pelas condições climáticas, sendo necessário buscar outros tipos de fontes para suprir a demanda. A fonte solar e eólica vem apresentando grande crescimento pelo avanço tecnológicos e baixa custo de instalação e operação. Neste sentido, este trabalho pretende apresentar um estudo sobre os sistemas híbridos para as regiões serra, planalto, nordeste, central e centro leste do Rio Grande do Sul. Os sistemas híbridos analisados são compostos por PCH-solar e PCH-eólica, sendo a PCH como a base do estudo, pois tem uma quantidade significativa de usinas instaladas no estado e, devido ao tamanho dos reservatórios, tem sua geração afetada no período de estiagem. O estudo foi realizado utilizando os dados disponíveis pela Agência Nacional de Água para a vazão do rio, os dados de radiação no plano inclinado disponível pelo Laboratório de Modelagem e Estudo de Recursos Renováveis de Energia e os dados da velocidade do vento pelo Instituto Nacional de Meteorologia. Neste estudo utilizou-se a carga atendida pelo sistema híbrido no formato de contrato tipo *Flat*, negociado no mercado livre de energia, onde a carga possui um consumo mensal constante durante o período estabelecido. As simulações da energia geradas pelas PCHs foram realizadas a partir dos parâmetros de cada usina, já a usina solar e a eólica foram dimensionadas para gerarem a diferença entre o consumo da carga e o mínimo gerado pelas PCHs. Na análise da complementaridade da energia gerada pelas PCHs, a usina solar mostrou os melhores resultados, pois no período que a PCH possui a máxima geração, a solar tem a mínima geração e a usina eólica apresenta a máxima e mínima geração em momentos diferentes da PCH. A usina solar apresentou o menor custo por kWh em quatro das cinco regiões analisadas, somente na região da serra a usina eólica apresentou menor custo, devido as diferenças dos potenciais solar e eólico. Normalizando os dados das regiões analisadas, obteve-se que a usina solar tem os resultados mais satisfatórios de complementariedade na geração da PCH e o menor custo por kWh para o estado, tornando-se a opção mais indicada para ser instalada junto com a PCH e formação de um sistema híbrido.

**Palavras-chave:** Sistemas híbridos, PCHs, solar, eólico, complementariedade na geração.

## ABSTRACT

The hydroelectric source has the largest share of the Brazilian electricity matrix, but in recent years its generation has been impacted by climatic conditions, making it necessary to look for other types of sources to supply the demand. The solar and wind sources have shown great growth due to the technological advances and low cost of installation and operation. In this sense, this paper intends to present a study on hybrid systems for the mountain, plateau, northeast, central and east central regions of Rio Grande do Sul. The hybrid systems analyzed are composed by PCH-solar and PCH-wind, being the PCH the base of the study, because it has a significant number of plants installed in the state and, due to the size of the reservoirs, has its generation affected in the dry season. The study was conducted using data available from the National Water Agency for river flow, radiation data on the inclined plane available from the Laboratory for Modeling and Study of Renewable Energy Resources and wind speed data from the National Institute of Meteorology. In this study we used the load served by the hybrid system in the Flat type contract format, negotiated in the free energy market, where the load has a constant monthly consumption during the established period. The simulations of the energy generated by the PCHs were performed from the parameters of each plant, while the solar and wind power plants were dimensioned to generate the difference between the consumption of the load and the minimum generated by the PCHS. In the analysis of the complementarity of the energy generated by the PCHs, the solar plant showed the best results, because in the period that the PCH has the maximum generation, the solar plant has the minimum generation and the wind plant presents the maximum and minimum generation at different times from the PCH. The solar plant presented the lowest cost per kWh in four of the five regions analyzed, only in the mountain region did the wind plant present the lowest cost, due to the differences in solar and wind potentials. Normalizing the data of the analyzed regions, it was obtained that the solar plant has the most satisfactory results of complementary generation to the PCH and the lowest cost per kWh for the state, making it the most indicated option to be installed together with the PCH and forming a hybrid system.

**Keywords:** Hybrid systems, PCHs, solar, wind, complementarity in generation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz elétrica brasileira, base 01/05/2022, por fonte de geração elétrica.	14
Figura 2: Radiação solar incidente na Terra. ....	18
Figura 3: Evolução dos aerogeradores. ....	21
Figura 4: Etapas de conversão da energia cinética em elétrica. ....	22
Figura 5: Efeito esteira provocado por uma turbina.....	24
Figura 6: Comparativo dos recursos energéticos e demanda da região nordeste. ...	30
Figura 7: Fluxograma da metodologia do trabalho proposto. ....	32
Figura 8: Regiões geográficas do Rio Grande do Sul. ....	33
Figura 9: Fluxograma do potencial energético e sazonalidade. ....	34
Figura 10: Passos para o dimensionamento das usinas. ....	35
Figura 11: Representação da análise da geração.....	36
Figura 12: Representação dos parâmetros utilizados. ....	37
Figura 13: Localização geográfica da PCH Engenheiro Ernesto Jorge Dreher.....	39
Figura 14: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para região central. ....	40
Figura 15: Energia elétrica total gerada pelo sistema híbrido. ....	42
Figura 16: Localização geográfica da PCH Cotiporã.....	43
Figura 17: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para região da serra....	44
Figura 18: Energia elétrica do sistema híbrido para a serra.....	45
Figura 19: Localização geográfica da PCH Ouro. ....	47
Figura 20: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para região planalto. ...	48
Figura 21: Energia elétrica do sistema híbrido para o planalto.....	49
Figura 22: Localização geográfica da PCH Marcos Baldo. ....	50
Figura 23: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para região nordeste...51	
Figura 24: Energia elétrica do sistema híbrido para o nordeste. ....	52
Figura 25: Localização geográfica da PCH Linha Emília. ....	53
Figura 26: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para a região centro leste. .....	54
Figura 27: Energia elétrica total gerada pelo sistema híbrido centro leste. ....	55
Figura 28: Energia elétrica normalizada das PCHs analisadas no estado. ....	57
Figura 29: Energia elétrica normalizada do sistema híbrido PCH solar do estado....	58
Figura 30: Energia elétrica normalizada do sistema híbrido PCH eólico do estado. .	59

Figura 31: Custo por kWh das usinas solar e eólica por região, e média do estado.	61
Figura 32: Energia elétrica estimada pelo sistema híbrido PCH solar normalizado e comparando com o sistema já analisado. ....	62
Figura 33: Energia elétrica estimada pelo sistema híbrido PCH eólico normalizado e comparando com o sistema já analisado. ....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Perdas típicas em um sistema fotovoltaico. ....	20
Tabela 2: Comprimento da rugosidade Z. ....	23
Tabela 3: Comparativo dos resultados. ....	29
Tabela 4: Valores do custo de construção e operação para o cálculo do LCOE. ....	39
Tabela 5: Custo de operação das usinas durante 25 anos região central. ....	43
Tabela 6: Custo de operação das usinas durante 25 anos região serra. ....	46
Tabela 7: Custo de operação das usinas durante 25 anos da região planalto. ....	49
Tabela 8: Custo de operação das usinas durante 25 anos, região nordeste. ....	53
Tabela 9: Custo de operação das usinas durante 25 anos para região centro leste. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente alternada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CGHs	Centrais Geradoras Hidrelétricas
DC	Corrente contínua
EPE	Empresa Pesquisa Energética
FC	Fator de Capacidade
FD	Fator de Desempenho
HPS	Horas de Sol Pleno
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
LABREN	Laboratório de Modelagem e Estudo de Recursos Renováveis de Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SHEs	Sistemas Híbridos de Energia
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
RS	Rio Grande do Sul
TCC	Trabalho de conclusão de curso
UTES	Usinas Termelétricas
UHEs	Usinas Hidrelétricas
USF	Usina Solar Fotovoltaica

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DO TEMA .....	12
1.2	OBJETIVO GERAL.....	12
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
2.1	SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL E NO RIO GRANDE DO SUL.....	14
2.2	PCH – PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.....	15
<b>2.2.1</b>	<b>Potência gerada pela PCH .....</b>	<b>16</b>
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	17
<b>2.3.1</b>	<b>Dimensionamento da usina solar fotovoltaica.....</b>	<b>19</b>
2.4	ENERGIA EÓLICA .....	20
<b>2.4.1</b>	<b>Dimensionamento do parque eólico .....</b>	<b>22</b>
2.5	SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA .....	26
2.6	CUSTO NIVELADO DE ENERGIA .....	27
2.7	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>32</b>
3.1	ANÁLISE DAS PCHs.....	33
3.2	POTENCIAL ELÉTRICO E SAZONALIDADE .....	33
3.3	DIMENSIONAMENTO E GERAÇÃO DAS USINAS .....	35
3.4	ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	36
3.5	PARÂMETROS PARA REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES .....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>38</b>
4.1	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA REALIZAR AS ANÁLISES .....	38
4.2	ANÁLISES DA REGIÃO CENTRAL.....	39
<b>4.2.1</b>	<b>Energia gerada pelas usinas da região central.....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análise do sistema híbrido da região central .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Análise do custo de geração da região central.....</b>	<b>42</b>
4.3	ANÁLISES DA REGIÃO SERRA.....	43
<b>4.3.1</b>	<b>Energia gerada pelas usinas da região da serra.....</b>	<b>43</b>

4.3.2	<b>Análise do sistema híbrido da região serra</b>	45
4.3.3	<b>Análise do custo de geração da região serra</b>	46
4.4	<b>ANÁLISES DA REGIÃO PLANALTO</b>	46
4.4.1	<b>Energia gerada pelas usinas da região planalto</b>	47
4.4.2	<b>Análise do sistema híbrido da região planalto</b>	48
4.4.3	<b>Análise do custo de geração da região planalto</b>	49
4.5	<b>ANÁLISES DA REGIÃO NORDESTE</b>	50
4.5.1	<b>Energia gerada pelas usinas da região nordeste</b>	50
4.5.2	<b>Análise do sistema híbrido da região nordeste</b>	52
4.5.3	<b>Análise do custo de geração da região nordeste</b>	52
4.6	<b>ANÁLISES DA REGIÃO CENTRO LESTE</b>	53
4.6.1	<b>Energia gerada pelas usinas da região centro leste</b>	54
4.6.2	<b>Análise do sistema híbrido da região centro leste</b>	55
4.6.3	<b>Análise do custo de geração da região centro leste</b>	56
4.7	<b>COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS PARA O ESTADO</b>	56
4.7.1	<b>Normalização do sistema híbrido PCH solar</b>	57
4.7.2	<b>Normalização do sistema híbrido PCH eólica</b>	59
4.7.3	<b>Análise do custo por kWh para o estado</b>	60
4.7.4	<b>Simulação para estimar a geração de uma PCH</b>	61
5	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	64
5.1	<b>RECOMENDAÇÕES E ESTUDOS FUTUROS</b>	65
5.2	<b>PUBLICAÇÃO DE ARTIGO EM CONGRESSO</b>	65
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	66
	<b>ANEXO I – DADOS DO PAINEL UL-550M-144HV, INFORMADOS PELO FABRICANTE ULICA SOLAR (2021)</b>	71
	<b>ANEXO II – DADOS DO AEROGERADOR AGW 147/4.2, INFORMADO PELO FABRICANTE WEG (2021)</b>	72
	<b>APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA CONSULTA DOS DADOS DO POTENCIAL ENERGÉTICO E SAZONALIDADE</b>	73

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil vem apresentando um crescimento no consumo de energia elétrica causado, principalmente, pelo crescimento do setor industrial e comercial. O setor industrial impulsionou um crescimento no consumo de eletricidade de 0,4%, já o setor comercial teve um crescimento de 12,9% no mês de maio de 2022 quando comparado com o mesmo mês de 2021. No acumulado em 12 meses, o crescimento é de 1,2%, maior quando comparado com o período anterior (EPE, 2022).

A fonte hídrica é a principal forma de geração da matriz energética brasileira, sendo responsável por gerar 59,3% da energia consumida pelo país. Essas usinas não conseguirão sozinhas suprir o crescimento do consumo de energia elétrica, por não ter mais rios com potencial hídrico satisfatório e por sua geração ser impactada com a escassez de chuvas e os períodos prolongados de estiagem, principalmente no Sudeste e Centro-Oeste do país. Além disso, nessas regiões as hidroelétricas são responsáveis por armazenar, aproximadamente, 70,0% da água utilizada na geração de energia elétrica do país (BUBLITZ, 2021).

Durante o ano de 2021, os principais reservatórios ficaram abaixo de 20% de sua capacidade de operação, justificado pelos fenômenos climáticos recorrentes dos últimos 7 anos, como a baixa precipitação de chuvas e má distribuídas, afetando toda a matriz energética brasileira, devido ao Sistema Interligado Nacional, que faz a distribuição da energia gerada pelas usinas para todos os estados do Brasil (SIAS, 2021).

O Rio Grande do Sul possui a fonte hídrica como sua principal geradora de eletricidade. As Pequenas Centrais Hidrelétricas, (PCHs) possuem o maior número de empreendimentos em operação no estado e seu reservatório possui baixa capacidade de armazenamento de água, tendo sua geração afetada pela escassez de chuvas (VIGNA, 2021).

Para reduzir os impactos causados pelas condições climáticas em uma única fonte de energia, uma alternativa é transformar uma usina em um sistema híbrido. Os sistemas híbridos são compostos por duas ou mais fontes de geração de energia elétrica num mesmo espaço, local ou terreno. Devido as usinas estarem próximas é possível fazer o compartilhamento da estrutura de conexão e da rede de distribuição.

As usinas baseadas em sistemas híbridos de geração são compostas a partir de diferentes tipos de fontes de energia, sendo possível que elas se complementem na

geração média anual. Assim, os sistemas híbridos renováveis podem ser exemplificados pelas seguintes usinas: solar-eólica, hidroelétrica-solar, hidroelétrica-eólica e afins.

### 1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

O estudo é justificado por propor um aumento na garantia da geração elétrica em uma PCH convertendo-a em um sistema híbrido, aumentando a produção da energia elétrica entregue pelas usinas baseado em energia solar e eólica.

A energia gerada pela usina tende a acompanhar a sazonalidade da fonte e do local em que está instalada. Cada fonte de energia possui um comportamento de geração, baseado na sazonalidade climática do local, tornando cada usina com uma determinada característica na geração. Como o sistema híbrido é formado por duas ou mais usinas onde suas sazonalidades, quando bem conhecidas, se compensam entre si durante o período de um ano, há uma oportunidade de compensar a geração de energia elétrica.

Com isso, o sistema híbrido pode ter inclusive um aumento na geração de energia elétrica com a menor variação ao longo do ano, além de atender a carga com um consumo de energia constante pelo mesmo período.

### 1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar a variação na geração de energia elétrica das usinas PCHs, solar e eólica e comparar com a variação dos sistemas híbridos PCH-solar e PCH-eólico para o estado do Rio Grande do Sul.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Definir as PCHs que serão analisadas em cada região geográfica do estado do Rio Grande do Sul;
- b) Adquirir e analisar os dados de potencial energético dos recursos radiação solar, velocidade do vento e vazão dos rios de cada região escolhida;
- c) Estabelecer o consumo mensal da carga a partir da energia máxima gerada pela PCH;

- d) Dimensionar usinas solar e eólica para atender a carga;
- e) Comparar o custo de construção e operação por kWh da usina solar e eólica, durante o período de 25 anos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

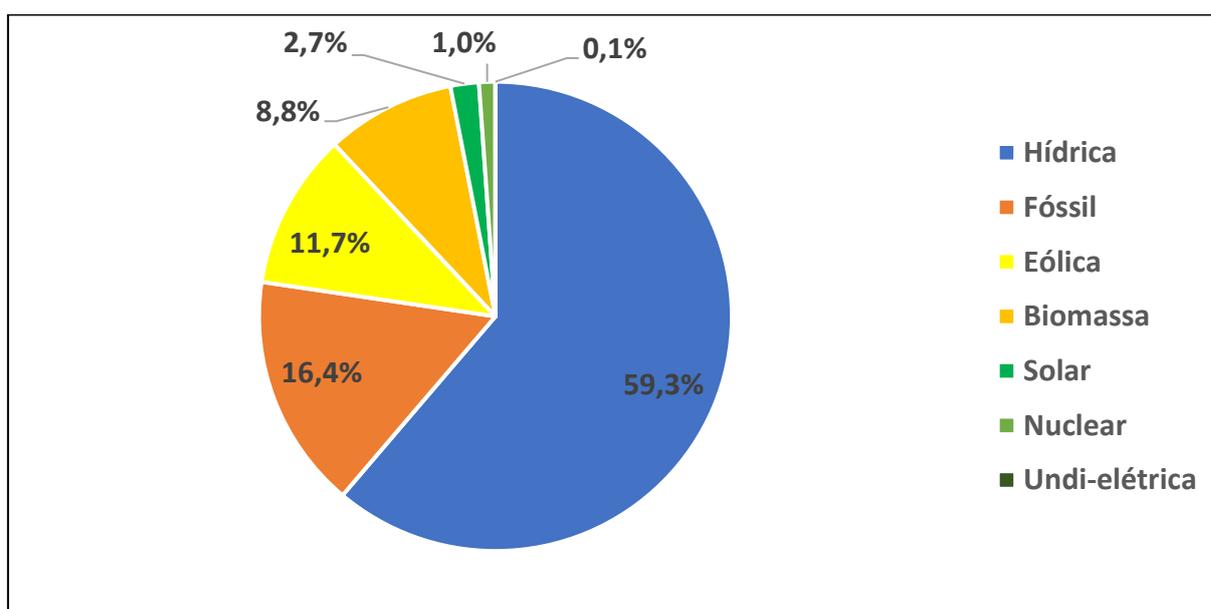
Neste capítulo do trabalho descreverá brevemente sobre a matriz energética do Brasil e do estado do Rio Grande do Sul, as fontes utilizadas para a realização das análises, o custo nivelado de energia e apresentando uma revisão bibliográfica utilizada como base do trabalho.

### 2.1 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL E NO RIO GRANDE DO SUL

De acordo com a ANEEL (2022), existem atualmente no Brasil 13.902 empreendimentos geradores de energia elétrica em operação, totalizando 184,66GW de potência instalada. Na figura 1 é apresentado a contribuição de cada tipo de fonte da matriz brasileira.

A matriz energética brasileira tem como predominante as fontes renováveis, sendo a geração hídrica a principal fonte, representando 59,3% da geração interna. As fontes renováveis representam aproximadamente 83,6% do total da energia elétrica produzida pelo país, sendo importantes para a diminuição dos impactos ambientais (ANEEL, 2022).

Figura 1: Matriz elétrica brasileira, base 01/05/2022, por fonte de geração elétrica.



Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2022)

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), na publicação do Relatório de 2021, com ano base de 2020, o Brasil apresentou um crescimento na potência instalada das usinas renováveis, onde a energia eólica apresenta um crescimento significativo ao longo dos anos. Em 2015 ultrapassou a geração nuclear, em 2019 ultrapassou a geração de biomassa e, em 2020, apresentou um crescimento de 1,9% comparado com 2019, totalizando 11,7% na matriz energética. A solar apresentou um crescimento de 61,5% entre 19/20 na potência instalada, sendo responsável por 2,7% da matriz energética brasileira (EPE, 2021).

O estado do Rio Grande do Sul tem sua matriz energética formada por 358 usinas, com diversas fontes de geração em operação, totalizando uma potência instalada de 9,6 GW instalada, sendo que 57,9% é energia gerada através da fonte hídrica (UHes – Usinas Hidrelétricas, PCHs – Pequenas Centrais Hidrelétricas e CGHs – Centrais Geradoras Hidrelétricas), 22,9% por usinas termoeletricas (UTES – Usinas Termoeletricas movidas a combustível fóssil ou a biomassa), 19,2% pela eólica, e 0,1% pela energia solar. As usinas que utilizam a fonte hídrica para geração, se destacam as PCHs por possuírem o maior número de empreendimentos em operação, sendo o estado o terceiro com a maior potência instalada do Brasil (ANEEL, 2022).

## 2.2 PCH – PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Até a década de 1990, o país procurou implantar centrais geradoras de grande porte devido ao benefício de geração em maior escala. Entretanto, com o aumento da demanda energética brasileira, as Pequenas Centrais Hidrelétrica (PCH) mostraram ser uma solução para suprir essa demanda, devido à redução do tempo de construção e, conseqüentemente, para entrada mais rápida em operação, gerando menores impactos ambientais quando comparada com as grandes centrais geradoras. Sua principal desvantagem está relacionada com o reservatório hídrico, por ter baixa capacidade de regularização (CLEMENTE, 2001).

De acordo com a resolução normativa Nº 875 de 10 de março de 2020, para uma usina hidrelétrica se enquadrar como PCH, necessita ter uma potência instalada superior a 5 MW e menor ou igual a 30 MW e seu reservatório deve ter uma área de até 13 km<sup>2</sup> excluindo a calha do leito regular do rio (MME, et al., 2020).

As PCHs possuem três subdivisões referente a capacidade de regulação do reservatório.

- A Fio d' Água;
- De acumulação, com Regularização Diária do Reservatório;
- De acumulação, com Regularização Mensal do Reservatório.

O modelo de PCH a fio d'água é utilizado quando as vazões do rio em períodos de estiagem são iguais ou maiores que a descarga necessária para atender a demanda máxima prevista da potência a ser instalada. Neste caso, o volume do reservatório é desprezado, pois a barragem é construída com uma altura reduzida, pois sua função é desviar a água do rio para o circuito de adução, resultando num aproveitamento parcial do recurso energético e o vertedouro funcionará na maior parte do tempo (PINHO, 2008).

As PCHs de acumulação, com regularização diária do reservatório, são utilizadas quando a vazão do rio em períodos de estiagem não atende a descarga necessária para fazer a geração da demanda máxima prevista, com isso o reservatório fornecerá o adicional para fazer a geração da energia. Sendo utilizado quando o rio possui variação de vazão ao longo do dia, armazenando durante o período de maior vazão para compensar no período de menor vazão durante um dia. (ROSA, 2007)

Já para as PCHs de acumulação, com regulação mensal do reservatório, o projeto considera os dados de vazões médias mensais do período de estiagem, com isso o reservatório é dimensionado para atender a regularização mensal das vazões médias diárias, para atender a demanda máxima do projeto, ou seja, a variação da vazão do rio não é significativa durante o mês, podendo ser considerado a média diária igual a média mensal para o dimensionamento do reservatório (NETO, et al., 2021).

### 2.2.1 Potência gerada pela PCH

Os principais fatores que influenciam diretamente na potência das hidrelétricas é a altura da queda d'água, entre a barragem e a casa de máquinas e a vazão da água passando pelas turbinas. É determinada pela equação 1:

$$P = \rho * g * H * Q * \eta \quad (1)$$

$\rho$  = densidade [kg/m<sup>3</sup>];

$g$  = gravidade [m/s<sup>2</sup>];

$H$  = altura entre a casa de máquinas e o reservatório [m];

$Q$  = vazão do rio [m<sup>3</sup>/s];

$\eta$  = rendimento do gerador.

O rendimento está relacionado com a transformação da energia mecânica em energia elétrica pelo gerador, para ocorrer essa transformação de energia precisa-se de equipamentos como a turbina, o gerador elétrico e o eixo para fazer a ligação. Esses equipamentos possuem perdas mecânicas relacionadas ao atrito provocado pelos mancais, pelo sistema de ventilação, pelo atrito nas escovas do sistema de excitação, além dessas perdas, o gerador elétrico apresenta perdas provocadas pela histerese e correntes de Foucault, que é a variação da densidade de fluxo magnético no entreferro do gerador e por efeito Joule nas bobinas, ocasionado pela passagem da corrente elétrica. Os geradores utilizados, atualmente, apresentam rendimentos que variam de 88% a 96% da sua capacidade de conversão. (ROSA, 2007)

O rendimento do gerador é dado pela potência elétrica útil ( $P_u$ ) fornecida ao circuito externo e sua potência total do conjunto ( $P_T$ ), calculada pela equação 2.

$$\eta = \frac{P_u}{P_T} \quad (2)$$

$\eta$  = rendimento do gerador;

$P_u$  = Potência elétrica útil [W];

$P_T$  = Potência total [W].

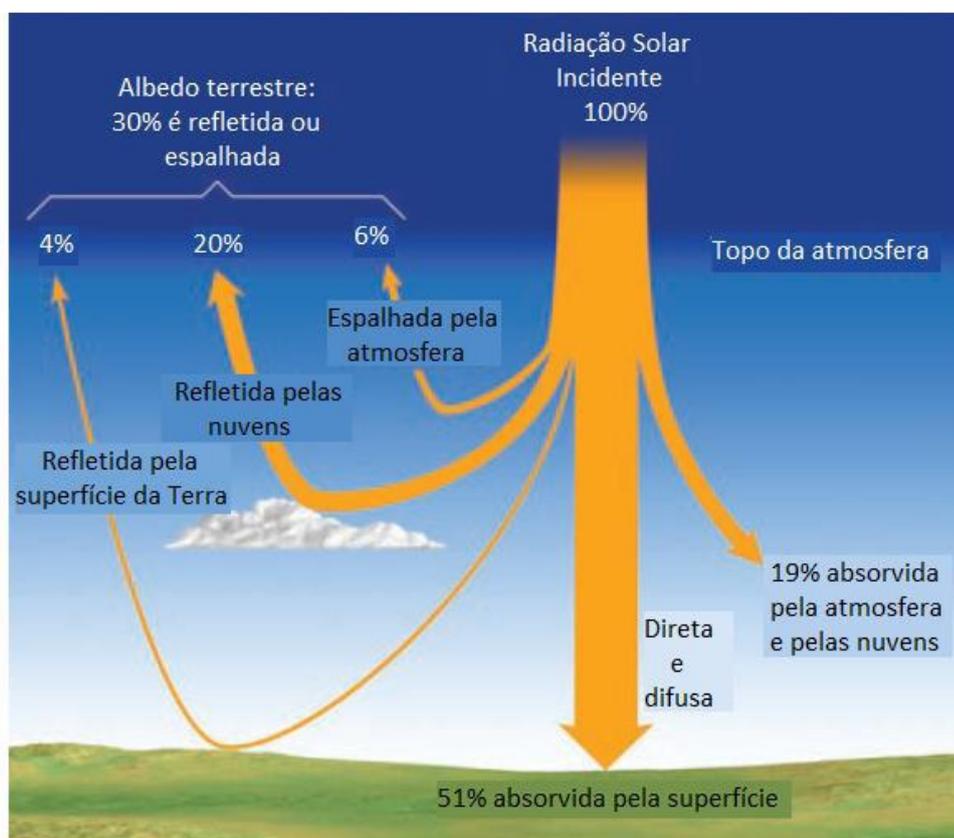
### 2.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar é uma fonte de energia inesgotável e sendo essencial, indiretamente, para a geração dos outros tipos de energia, sejam elas a eólica, biomassa, hídrica e, até mesmo, os combustíveis fósseis. A radiação solar é a energia emitida pelo Sol em formas de ondas eletromagnéticas, sendo intermitente no tempo e variável no espaço, devido a sua relação com as condições climáticas locais, como a cobertura das nuvens, concentração de gases na atmosfera e fatores associados aos movimentos orbital e de rotação da Terra (SILVA, 2018).

A radiação que atinge a atmosfera terrestre não chega totalmente à superfície,

devido aos diversos processos na atmosfera. Uma parte é refletida pelos gases presentes na atmosfera e absorvida pelas nuvens, resultando em, aproximadamente, 51% da radiação total chegando à superfície na forma direta e difusa, conforme mostrado na figura 2.

Figura 2: Radiação solar incidente na Terra.



Fonte: (SILVA, 2018)

A radiação solar pode ser convertida diretamente em energia elétrica através das células fotovoltaicas, que são produzidas em substratos de materiais semicondutores, aproveitando a sua conversão pelo efeito fotovoltaico. Esse efeito ocorre quando a radiação eletromagnética atinge um material semicondutor como o silício, causando a separação das cargas positivas e negativas, assim criando uma diferença de potencial e resultando numa corrente elétrica contínua quando uma resistência é associada. Esse efeito foi observado pelo físico Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, e somente depois de mais um século da sua descoberta foi utilizada para a geração de energia a partir do Sol (REIS, 2017).

Os semicondutores possuem bandas de energia com a presença de elétrons,

sendo denominadas banda de valência e banda de condução, entre elas possui um gap ou banda vazia onde não tem a presença de elétrons, assim criando uma diferença de potencial. No entanto, a quantidade de elétrons presente no silício é pequena, para ser possível utilizá-lo na geração é necessário realizar o processo de dopagem, que consiste na adição de outros elementos, geralmente utilizado boro e fósforo, assim conseguindo gerar um campo elétrico permanente no material e resultando numa corrente elétrica permanente quando exposto a radiação solar (TOLMASQUIM, 2016).

### **2.3.1 Dimensionamento da usina solar fotovoltaica**

O fator determinante na geração da energia elétrica é a radiação solar incidente sobre os módulos fotovoltaicos, geralmente expressa através do número de Horas de Sol Pleno (HSP), ao longo de um dia. Representado o número de horas em que a radiação solar permanece constante e igual a 1 kWh/m<sup>2</sup>, resultando na energia acumulada para o dia no local analisado (MOREIRA, 2021).

Para determinar a potência gerada pelo sistema fotovoltaico é necessário levar em consideração suas perdas, que são causadas pela condição climática, pelos equipamentos utilizados como o inversor, transformador, queda de tensão no lado DC e no lado AC e outras perdas são apresentadas na tabela 1 (MIRANDA, 2014).

São apresentadas as respectivas variações e valores esperados das perdas para a usina solar no estado do Rio Grande do Sul, na tabela 1, assim proporcionando, o cálculo da potência gerada o mais próximo da realidade. O somatório das perdas apresentado na tabela 1 é de 15%, ou seja, a usina consegue converter 85% da radiação solar em eletricidade.

Tabela 1: Perdas típicas em um sistema fotovoltaico.

Tipos de perdas	Variação (%)	Valor considerado (%)
Desvio no rendimento nominal do módulo	0 a 10	2,00
Temperatura no Módulo	0 a 6	1,70
Perdas nos condutores no lado DC	1 a 3	1,20
Perdas nos condutores no lado CA	0,7 a 2	0,80
<i>Mismatch</i> no MPPT	1,5 a 3	1,75
Sombreamento	0 a 100	0,05
Diodos e conexões	0,3 a 1	0,50
Transformadores (como os de isolamento no inversor, por exemplo)	2 a 4	2,00
Degradação na incidência solar inicial	1 a 10	1,50
Sujeira nos módulos	2 a 25	2,00
Perda referente a Inclinação do Arranjo em relação ao relevo	-	1,50
Total de perdas		15,00

Fonte: Adaptado (MIRANDA, 2014)

Para a determinação da potência gerada pela usina é utilizada a equação 3, que leva em consideração a potência instalada, a radiação média mensal no plano inclinado referente ao local da instalação e o Fator de Desempenho (FD). O FD está relacionado com a eficiência do sistema, isto é, o quanto da radiação incidente é transformada em energia elétrica.

$$E = Pfv \cdot H_{tot} \cdot n \cdot FD \quad (3)$$

$Pfv$  = Potência instalada [Wp];

$H_{tot}$  = Média mensal da radiação no plano inclinado [kWh/m<sup>2</sup>/mês];

$FD$  = Fator de desempenho;

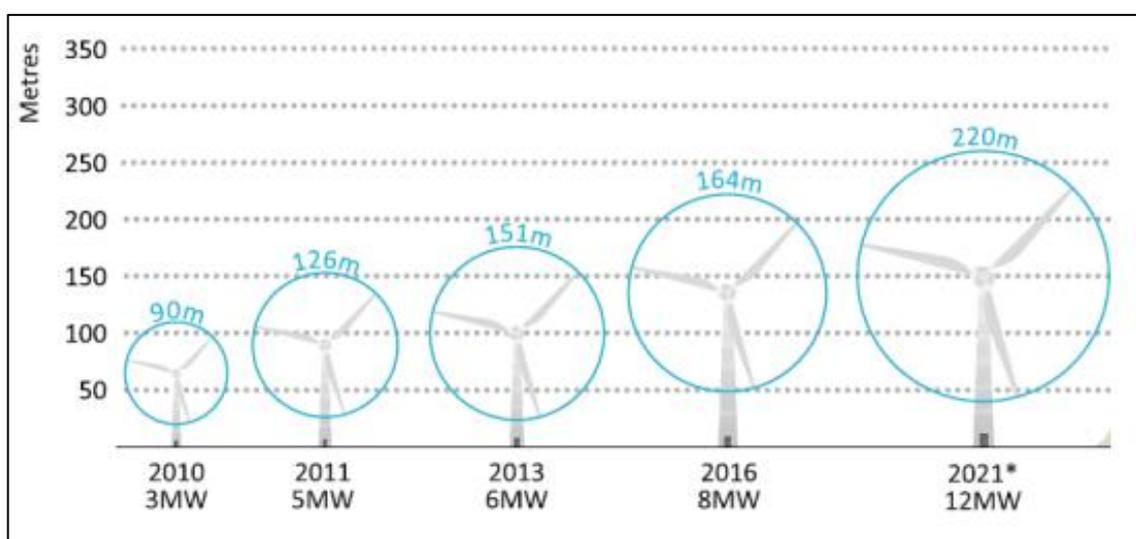
$n$  = Número de dias no mês [dias].

## 2.4 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é obtida através do deslocamento das massas de ar com velocidades variáveis. Este fenômeno é provocado pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, pela rotação e translação da Terra e pelo relevo da superfície. (MOREIRA, 2021)

Essa energia já era utilizada desde os primórdios da civilização, sendo utilizada como energia mecânica, para o deslocamento de barcos a velas e nos moinhos de vento, para o bombeamento de água, na moagem de grãos e entre outras aplicações. No final do século XIX, começou a ser utilizada para a geração de eletricidade, atualmente é uma das fontes que mais cresce em potência instalada, devido aos avanços tecnológicos, redução de custos e do baixo impacto ambiental causado, podendo ser observada a evolução através da figura 3. (VIAN, 2021)

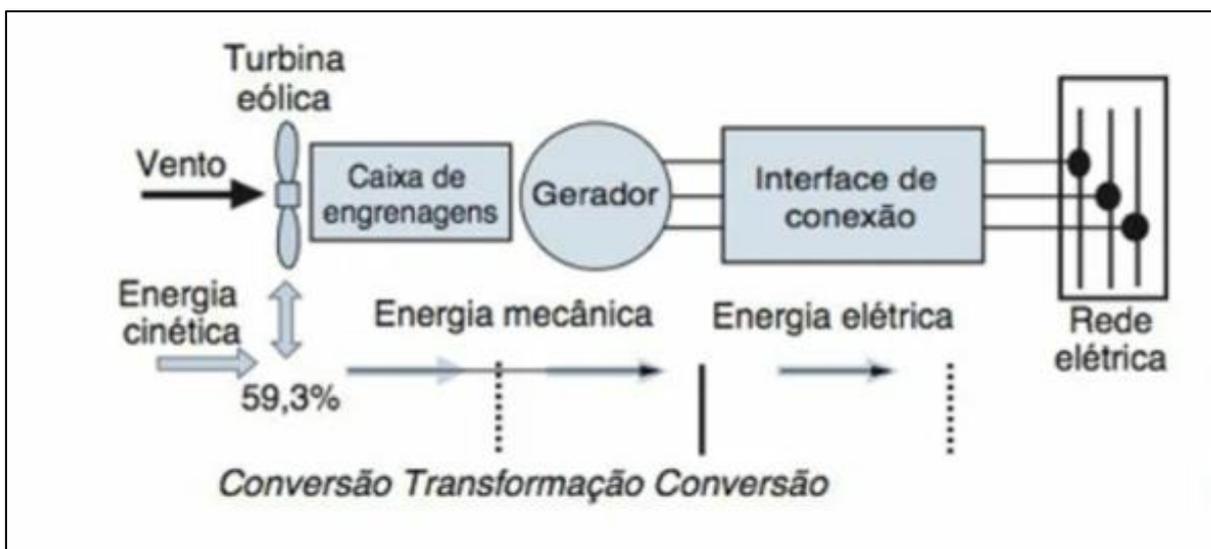
Figura 3: Evolução dos aerogeradores.



Fonte: (EPE, 2018)

As turbinas eólicas são responsáveis em fazer a conversão da energia cinética em energia elétrica. A conversão de energia começa quando o vento atinge as hélices do aerogerador, fazendo as hélices girarem resultando num torque no eixo do gerador que é o responsável por gerar a energia elétrica. Essas etapas podem ser vistas na figura 4. (PINTO, 2013)

Figura 4: Etapas de conversão da energia cinética em elétrica.



Fonte: (PINTO, 2013)

### 2.4.1 Dimensionamento do parque eólico

Para o mesmo local, a velocidade do vento varia conforme a altura em relação ao solo, essa diferença causa impactos no recurso energético eólico e no projeto da turbina eólica, se a altura da medição da velocidade do vento for diferente da altura do gerador necessita-se a correção da velocidade do vento, para se obter o melhor aproveitamento energético do local. O aproveitamento energético dos ventos pode ser calculado a partir de dois modelos matemáticos: a Lei de Potência e a Lei Logarítmica. (MOREIRA, 2021)

A Lei de Potência apresenta um método simplificado, aplicado para uma topografia plana e possui uma baixa precisão. A Lei logarítmica é utilizada para terrenos complexos, que apresentam uma topografia acentuada e aerogeradores com altura maiores que 50 metros. Para estimar a velocidade do vento na altura de referência é utilizado a equação (4).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\ln\left(\frac{H_1}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_2}{Z_0}\right)} \quad (4)$$

$H_1$  = altura desejada [m];

$H_2$  = altura de referência [m];

$V_1$  = velocidade do vento na altura desejada [m/s];

$V_2$  = velocidade do vento na altura de referência [m/s];

$Z_0$  = comprimento da rugosidade do local [m].

A rugosidade da superfície é determinada pelo tamanho e a distribuição dos elementos que compõem o terreno, resultando na altura em que a velocidade do vento é igual à zero. Conforme a descrição do terreno é predeterminada a altura  $Z_0$ , conforme a tabela 2. (MOREIRA, 2021)

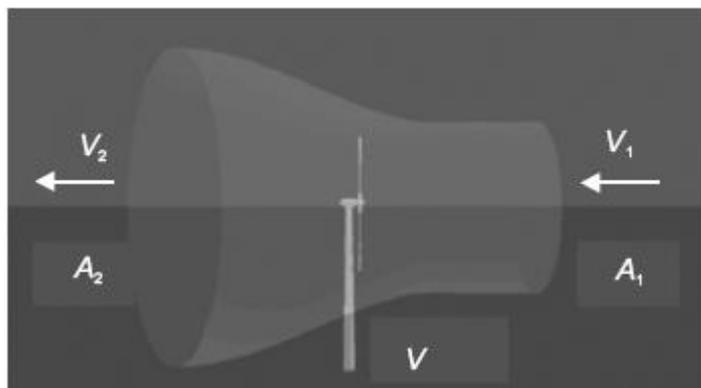
Tabela 2: Comprimento da rugosidade  $Z_0$ .

Descrição do terreno	$Z_0$ (mm)
Liso, gelo, lama	0,01
Gramado	8,00
Campo em declive	30,00
Cultivado	50,00
Poucas árvores	100,00
Muitas árvores, pouco edifícios, cercas	250,00
Florestas	500,00
Zonas urbanas com edifícios altos	3000,00

Fonte: Adaptado de (MOREIRA, 2021)

A energia elétrica gerada pelos aerogeradores está diretamente relacionada com a transformação da energia cinética em torque no eixo do gerador, onde somente uma parte desta energia é aproveitada. Quando o fluxo de ar passa pelas hélices do gerador, a energia cinética cria um movimento de rotação, por causa do movimento de rotação das hélices é formado uma turbulência na massa de ar após passar pelas hélices, que é conhecido como efeito esteira. O efeito esteira tende a desaparecer conforme se afasta da turbina, devido à massa de ar tender a se estabilizar novamente, conforme mostrado na figura 5. (PINTO, 2001)

Figura 5: Efeito esteira provocado por uma turbina.



Fonte: (MOREIRA, 2021)

Para calcular a energia extraída pelo rotor é necessário calcular as velocidades causada pelo efeito esteira. Para isso é utilizado a equação 5.

$$V = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \quad (5)$$

$V$  = Velocidade resultante [m/s];

$V_1$  = velocidade do vento na altura desejada [m/s];

$V_2$  = velocidade do vento na altura de referência [m/s].

Para a determinação do gerador utilizado é necessário calcular a potência disponível do local de instalação, pela equação 6.

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (6)$$

$P_{disp}$  = Potência disponível do vento [W];

$\rho$  = Densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$A$  = Área varrida pelo rotor [m<sup>2</sup>];

$V_1$  = Velocidade do vento [m/s].

A potência gerada pelos aerogeradores está diretamente relacionada com a densidade do ar que impulsiona o rotor. Os fabricantes geralmente utilizam a densidade do ar padrão, ou seja, a densidade do ar ao nível do mar de 1,225 kg/m<sup>3</sup> e temperatura de 15°C. Para isso é necessário fazer a correção da potência gerada para

o local de instalação, que é dado pela equação 7. (SCHUBERT, 2014)

$$\rho_{resl} = \frac{352,98 * \left(1 - \frac{Z}{45271}\right)^{5,2624}}{273,1 + T} \quad (7)$$

$\rho_{resl}$  = Densidade do ar resultante [kg/m<sup>3</sup>];

T = Temperatura [°C];

Z = Altitude [m].

Através da equação 6 é possível obter a potência teórica da energia gerada pelos aerogeradores e, devido aos aerogeradores possuírem perdas, utiliza-se uma correção baseada na lei de Betz. Betz calculou que uma turbina eólica ideal reduziria a velocidade inicial do vento em 2/3, ou seja, limitando a potência capturada pelo aerogerador em aproximadamente 59%. Na prática, o aproveitamento é ainda menor podendo ter uma redução de 80% do valor teórico nas melhores condições, assim os aerogeradores conseguem converter até 47% da potência contida no vento em potência no eixo do gerador. Com o acréscimo do coeficiente de potência ( $C_p$ ) na equação 6 é obtido a equação 8. (PINTO, 2001)

$$P_{gerada} = \frac{1}{2} C_p \rho A V_m^3 \quad (8)$$

$P_{gerada}$  = Potência gerada pelo aerogerador [W];

$C_p$  = Coeficiente de potência [%];

$\rho$  = Densidade do ar [kg/m<sup>3</sup>];

A = Área varrida pelo rotor [m<sup>2</sup>];

$V_m$  = Velocidade do vento [m/s].

O fator determinante para a geração de energia elétrica é a velocidade do vento, já que na equação da potência a velocidade está ao cubo. Para os projetos dos parques eólicos é utilizada a velocidade média de um determinado período, sendo definido pela equação 9. (PINTO, 2001)

$$V_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (9)$$

$V_m$  = velocidade média [m/s];

$N$  = número de medições;

$V_i$  = velocidade instantânea [m/s].

## 2.5 SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA

Os sistemas híbridos de energia (SHEs) são compostos por duas ou mais fontes de diferentes tipos em um mesmo local, compartilhando a mesma infraestrutura de conexão e transmissão. A configuração dos sistemas híbridos varia conforme o projeto e a disponibilidade das fontes do local de instalação das usinas (NETO, et al., 2021).

Os primeiros SHE foram implementados na década de 1980, a energia gerada era feita por geradores a diesel principalmente em comunidades isoladas, pois fornecem uma maior confiabilidade, tem uma geração constante independente das condições climáticas e fácil armazenamento de combustível para a geração. Para diminuir a utilização dos combustíveis fósseis e aumentar a geração, começou-se a instalar fontes de energia renováveis junto com os geradores, assim formando os SHE. As combinações eram feitas conforme as características do local de instalação, podendo ser diesel-eólica, diesel-solar e diesel-eólica-solar. Atualmente os sistemas eólicos-solar vem apresentando resultados positivos para a substituição dos sistemas que utilizam o diesel como uma das fontes. (NETO, et al., 2021)

A geração das usinas que compõem os SHE pode ser controlada ou não. No sistema sem controle, as usinas que compõem o sistema híbrido geram todas ao mesmo tempo, com isso toda a energia gerada é injetada diretamente na rede de distribuição. Os sistemas híbridos com controle são utilizados quando uma das fontes do sistema é possível armazenar o recurso para que seja utilizado posteriormente, que é o caso das hidrelétricas, num sistema composto por solar-hidrelétrica, a usina solar geraria energia durante o dia e neste período seria possível armazenar a água no reservatório para que no período da noite, sendo possível gerar sem interrupção e tendo uma geração de energia constante. (GARCIA, 2018)

No Brasil, a ANEEL abriu em 21/10/2020 a primeira fase da consulta pública 061/2020 para debater com a sociedade sobre a normatização das usinas híbridas e associadas, modificando as emissões das outorgas de geração e outros assuntos relacionados. Recentemente, a ANEEL aprovou o primeiro projeto de um parque híbrido no Brasil, composto pelas fontes solar-eólica, o empreendimento é da *Joint*

*Venture VTRM*. A usina solar será implementada junto ao parque eólico Ventos do Piauí para aumentar a geração de energia. (RODRIGUES, 2021)

O método utilizado para o dimensionamento do SHE varia de acordo com o propósito do sistema. Normalmente, os sistemas são dimensionados a partir da potência estabelecida, onde as usinas que compõem o sistema são dimensionadas de forma separadas para atender a potência estabelecida para o sistema. Outro método é através da complementariedade da geração, onde as usinas são dimensionadas de modo a satisfazer a demanda, para sistemas sem a presença de gerador a diesel. Podem ser criados outros métodos para o dimensionamento desses sistemas, desde que atenda a demanda necessária ou a potência estabelecida para o sistema (CANEPPELE, 2007).

## 2.6 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA

O custo nivelado de energia (LCOE – *Levelized Cost of Energy*) foi estruturado com a função de comparar o custo da energia produzida por diferentes fontes de geração de energia. O propósito é compreender qual fonte seria capaz de gerar energia mais competitiva em um determinado projeto: solar, eólica, térmica ou hídrica (LAZARD,2020).

O LCOE é determinado a partir da divisão dos custos totais do projeto pela energia total gerada durante um determinado período. O custo total é a soma do capital investido na construção (Capex) e o custo operacional da usina durante o período analisado (Opex), resultando na equação 10. (LAZARD,2020)

$$LCOE = \frac{CT}{EP} \quad (10)$$

LCOE = Valor da energia gerada [R\$/kWh];

CT = Custo total da usina [R\$];

EP = Energia total produzida [kWh]

Onde o CT é calculado pela equação 11.

$$CT = Capex + Opex \quad (11)$$

Capex = Capital investido [R\$];

Opex = Custo operacional [R\$].

O LCOE não pode ser usado para determinar o valor de energia para o consumidor, devido ao seu método. O resultado é significativo para os investidores determinarem qual fonte de energia ou comparação entre modelos de equipamentos utilizados possui o menor custo para a implantação do projeto. (LAZARD,2020)

## 2.7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a autora WEIGERT (2018), apresenta um estudo sobre o aumento do fator de capacidade da Usina Hidrelétrica Foz do Areia, realizado com a inclusão de uma Usina Solar Fotovoltaica. A energia gerada é injetada na rede e utilizada no bombeamento de água para o reservatório. (WEIGERT, 2018)

Inicialmente, o artigo apresenta um estudo qualitativo do potencial solar e potencial hidrológico sobre o local da usina hídrica, para formar o banco de dados utilizou os dados disponíveis no atlas solar e os dados fornecido pela ONS. A partir do sistema de bombeamento foi dimensionado para ter uma capacidade de bombear 25% da água consumida pelas unidades geradoras, assim sendo possível determinar a potência do sistema e seus equipamentos necessários. O sistema fotovoltaico foi dimensionado para conseguir suprir a energia utilizada no sistema de bombeamento e a conexão direta a rede de distribuição. (WEIGERT, 2018)

A análise dos resultados foi feita com base nas simulações dos anos de 2014 e 2017, que estão representados na tabela 3. Através dos resultados obtidos, observa-se que teve um aumento no fator de capacidade (FC) foi de 0,01 sendo pouco significativo para o sistema de bombeamento, e é possível perceber pela energia gerada pelo sistema de bombeamento e pela energia injetada na rede o ano de 2017 teve um período de estiagem maior que no ano de 2014. (WEIGERT, 2018)

Tabela 3: Comparativo dos resultados.

<b>Parâmetros</b>	<b>Cenário 1 – 2017</b>	<b>Cenário 2 – 2014</b>
$FC_{pre}$	0,3244	0,4447
$FC_{pos}$	0,3341	0,4540
$\Delta FC$	0,0097	0,0093
$\Delta$ Energia (SFV-Bombas)	142,57 GWh	136,82 GWh
$\Delta$ Energia (SFV-Rede)	3,18 GWh	11,97 GWh
$\Delta$ Energia (Total)	145,76 GWh	148,80 GWh
$\Delta$ Energia média/dia	398,24 MWh	403,57 MWh

Fonte: (WEIGERT, 2018)

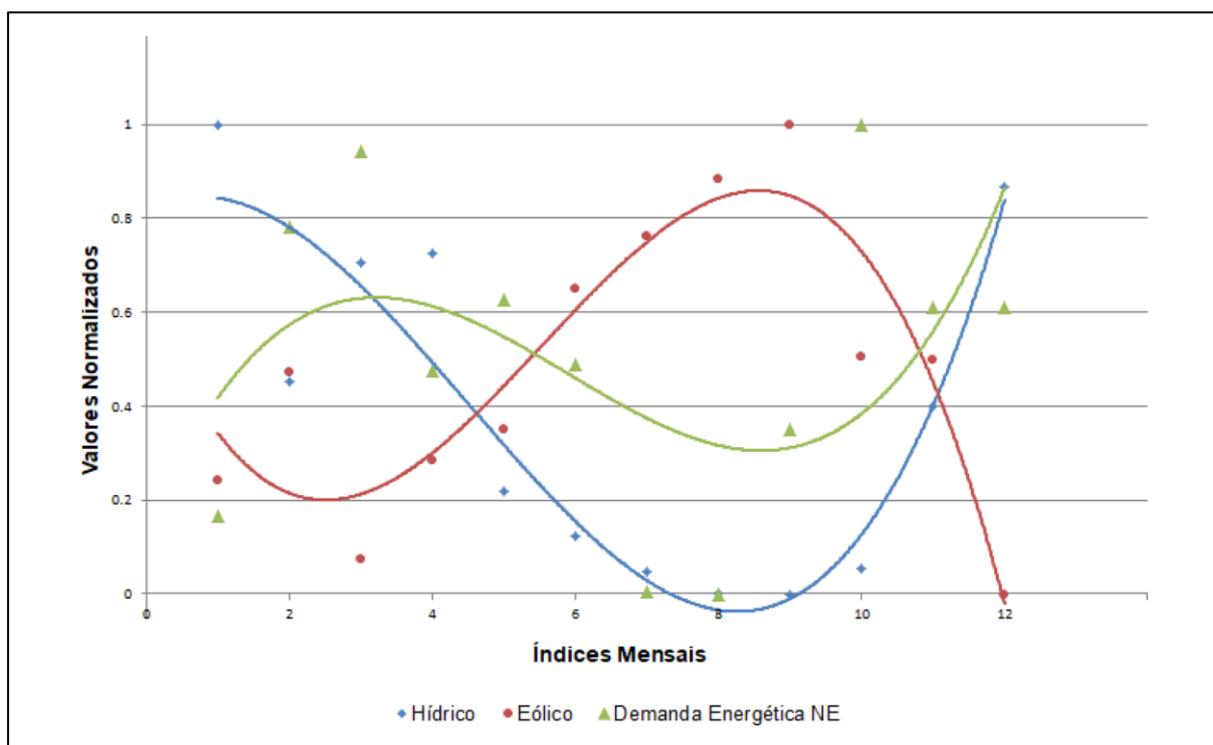
Os autores SILVA, et al. (2020) analisam os períodos de estiagem no Nordeste do Brasil, que está afetando a produção de energia elétrica das usinas hidrelétricas, o artigo propõe transformar uma usina hidrelétrica localizada no Vale do Submédio São Francisco em um sistema híbrido para avaliar a complementariedade na geração de energia elétrica proporcionada pela fonte eólica e, assim, analisar a relação energética entre o sistema hídrico-eólico. (SILVA, et al., 2020)

Para estimar a energia gerada utilizou os dados da sazonalidade de 2007 a 2010, pois eram os únicos disponíveis para a região em análise, com o princípio de comparar o desempenho dos dois recursos e quanto são complementares entre si. O método utilizado consiste em calcular os três índices de complementariedade parciais e o índice total, para isso são necessários os dados normatizados, ou seja, estabelecer uma linha de tendência para eliminar os eventos esporádicos. (SILVA, et al., 2020)

Os índices parciais são: o índice de complementariedade no tempo utilizado para avaliar os valores máximos da disponibilidade das fontes de energia. Já o índice de complementariedade de energia analisa a relação entre as médias da disponibilidade energética e o índice de complementariedade entre amplitudes, utilizado para avaliar os valores máximos e mínimos entre as fontes geradoras. (SILVA, et al., 2020)

Os resultados obtidos no período de 2007 a 2010 mostram uma complementariedade de aproximadamente 75% com valores maiores de 0,5 e apenas 25% inferiores para os índices de complementariedade. Na figura 6 é apresentado os índices normalizados do ano de 2010 e comparando com a demanda energética da região, é possível observar como as fontes se complementam ao longo do período de um ano. No primeiro semestre, a energia gerada pela fonte hídrica consegue atender a demanda, mas no segundo semestre não é mais possível, mas a fonte eólica teria capacidade de conseguir atender a demanda. (SILVA, et al., 2020)

Figura 6: Comparativo dos recursos energéticos e demanda da região nordeste.



Fonte: (SILVA, et al., 2020)

O autor ZANONI, (2018) utilizou o software HOMER® analisar a viabilidade técnica, ambiental e econômica na implantação de um sistema híbrido de geração de energia elétrica. O sistema híbrido é composto por gerador movido a biogás/biodiesel e uma usina solar, para a produção do biogás é utilizado os dejetos provenientes da criação de suínos. (ZANONI, 2018)

Inicialmente, o artigo aborda a caracterização do local levando em consideração a topologia e a quantidade de animais para o dimensionamento do biodigestor. Para o dimensionamento da usina solar é estabelecido uma potência fixa para o sistema, e foi determinado um conjunto de baterias para armazenar o excedente de energia gerada. As avaliações do sistema híbrido como o dimensionamento, otimização, manutenções, custo de depreciação são realizados utilizando o software HOMER®, assim permitindo realizar diferentes combinações para o sistema híbrido. (ZANONI, 2018)

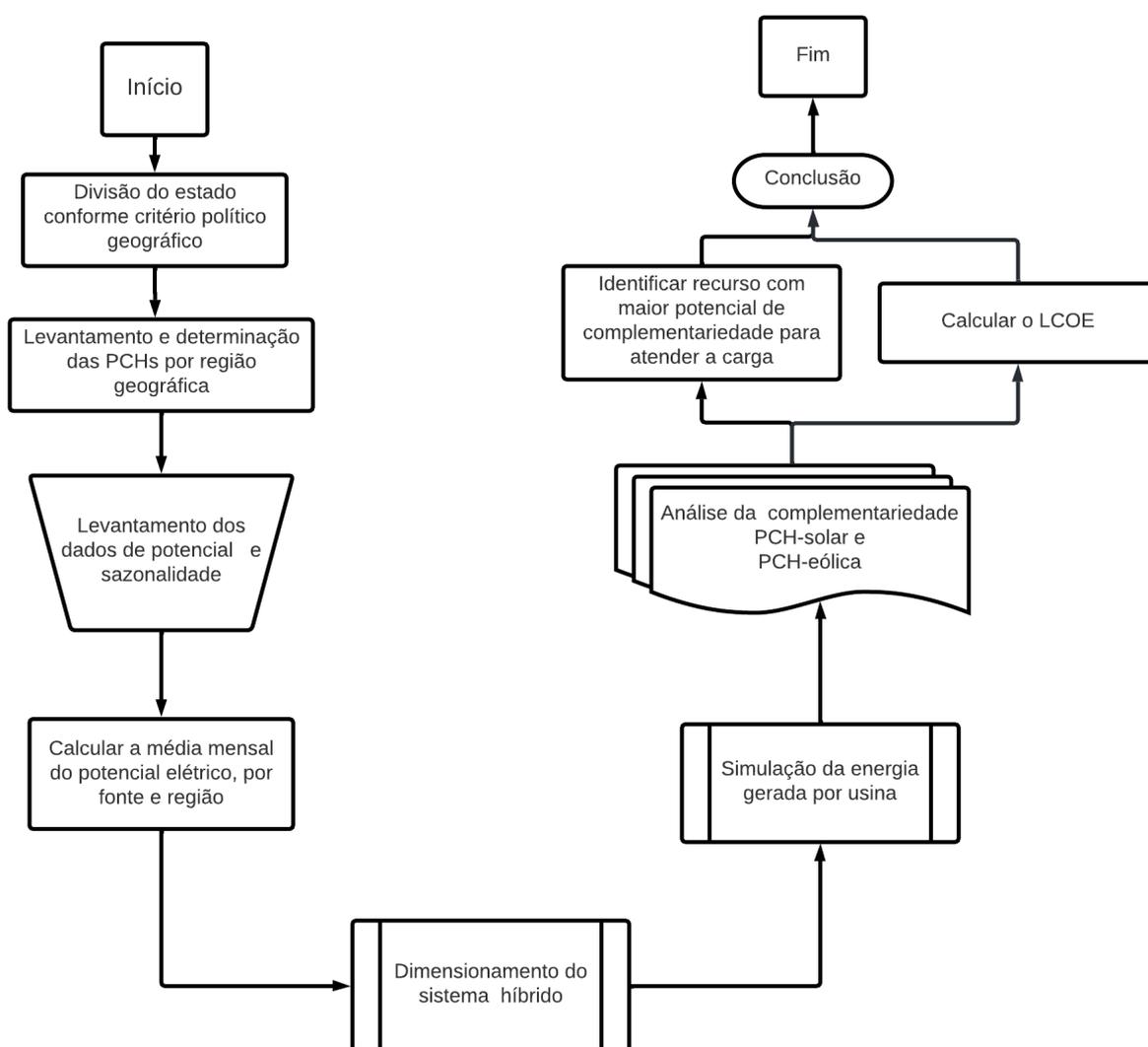
Os resultados obtidos estão divididos em duas análises, a viabilidade econômica e técnica do sistema híbrido e a viabilidade ambiental do sistema. Na análise da viabilidade ambiental do sistema híbrido, os resultados foram significativos para a

sistema de 330kW sendo 49% de biogás e 51% fotovoltaica, nesta configuração obteve-se uma redução de 291,4 t/ano de CO<sub>2</sub>, 1,9 t/ano de H<sub>2</sub>S e 0,5 t/ano de NO<sub>x</sub>. Na viabilidade econômica o sistema híbrido com melhor desempenho possui um gerador de biogás de 55kW e a usina solar com 172,4kW de potência instalada tendo uma *payback* simples do retorno do investimento de 7,5 anos. (ZANONI, 2018)

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada na realização do trabalho. A análise aborda a complementariedade das usinas e o custo de operação da usina solar e eólica, durante o período de um ano. Os passos necessários para o desenvolvimento da metodologia deste trabalho são apresentados no fluxograma, da figura 7.

Figura 7: Fluxograma da metodologia do trabalho proposto.



Fonte: (O AUTOR, 2021)

### 3.1 ANÁLISE DAS PCHs

O estado do Rio Grande do Sul possui, atualmente, 53 PCHs em operação no seu território, localizadas em diferentes regiões geográficas com características distintas referente ao potencial energético e sazonalidade. Assim, adotou-se uma divisão para verificar o aproveitamento energético voltado a geração de energia elétrica através dos sistemas híbridos de energia. A divisão das regiões está representada na figura 8.

Figura 8: Regiões geográficas do Rio Grande do Sul.



Fonte: (FEPAN, 2021)

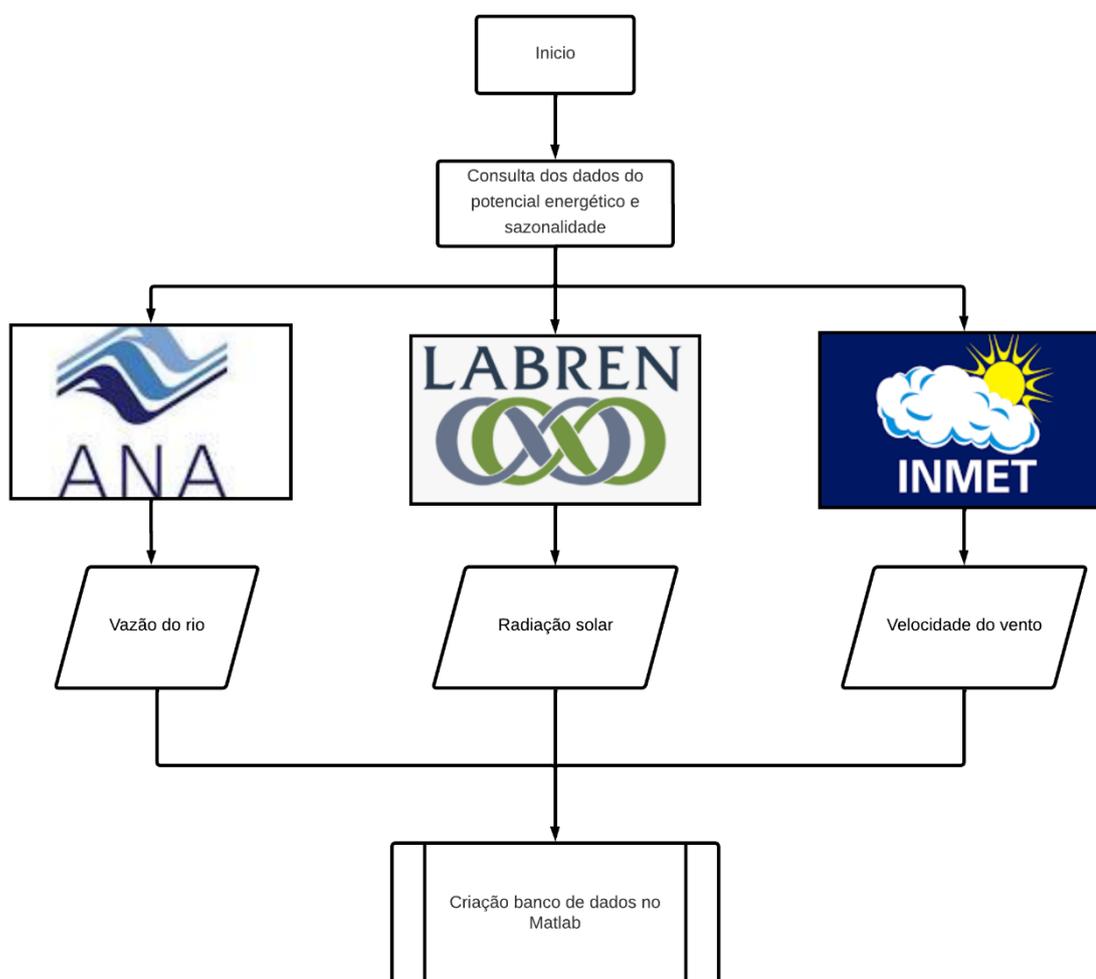
Para determinar as PCHs a serem analisadas utilizou-se os seguintes parâmetros: regiões com PCHs em operação, ter uma potência instalada entre 5 MW e 30 MW conforme determinado pela ANEEL na resolução normativa Nº 875 e a potência instalada deve ser semelhante entre as regiões Central, Centro Leste, Nordeste, Planalto e Serra.

### 3.2 POTENCIAL ELÉTRICO E SAZONALIDADE

Para a realização das simulações e do dimensionamento das usinas que

compõem o sistema híbrido foram levantados os dados de potencial do recurso elétrico e sua sazonalidade, para que seja possível analisar a quantidade de recurso disponível por região e se esses recursos são suficientes para fazer a complementação na geração elétrica da PCH. Na figura 9 está representado o fluxograma para a obtenção dos dados necessários, sendo repetido esse processo para cada região.

Figura 9: Fluxograma do potencial energético e sazonalidade.



Fonte: (O AUTOR, 2021)

Os dados de vazão do rio foram obtidos no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) através da Rede Hidrometeorológica Nacional, que avalia a disponibilidade hídrica e o regime hidrológico das oito bacias hidrográficas brasileiras e sub-bacias continentais. Os dados de radiação solar estão disponíveis no banco de

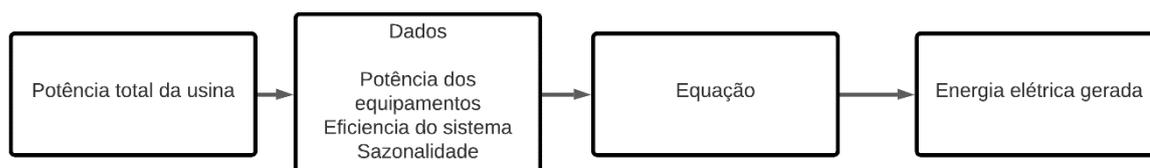
dados do Laboratório de Modelagem e Estudo de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) que é uma divisão do Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE) que realiza atividades de pesquisa, monitoramento e coleta de dados para a aplicação no setor de energia. Os dados da velocidade do vento foram obtidos no bando de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que está sobre a responsabilidade do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Os dados de vazão do rio, da radiação solar e da velocidade do vento são registrados a cada hora pela estação responsável pela medição e esses dados são armazenados em seus respectivos bancos de dados. Com os valores é possível criar um banco de dados no software Matlab®, para realizar as análises de geração das usinas de forma diária durante o período de um ano, assim podendo ser observado o comportamento em todas as estações do ano.

### 3.3 DIMENSIONAMENTO E GERAÇÃO DAS USINAS

O dimensionamento das usinas foi realizado de forma individual para cada fonte e cada região com PCH em operação. Os passos para a realização do dimensionamento de cada usina são apresentados na figura 10.

Figura 10: Passos para o dimensionamento das usinas.



Fonte: (O AUTOR, 2021)

Devido as PCHs estarem em operação não será necessário fazer seu dimensionamento, pois seus parâmetros já estão definidos. Assim, foi calculado a geração de energia elétrica e estabelecido a carga. A carga tem um consumo de energia constante, sendo esse consumo igual a energia máxima gerada pela PCH. As usinas solar e eólica foram dimensionadas para gerar a diferença entre o menor mês da energia gerada pela PCH e o consumo da carga. Para determinar a geração de energia elétrica da usina solar fotovoltaica foi utilizado a equação 3 e a geração da

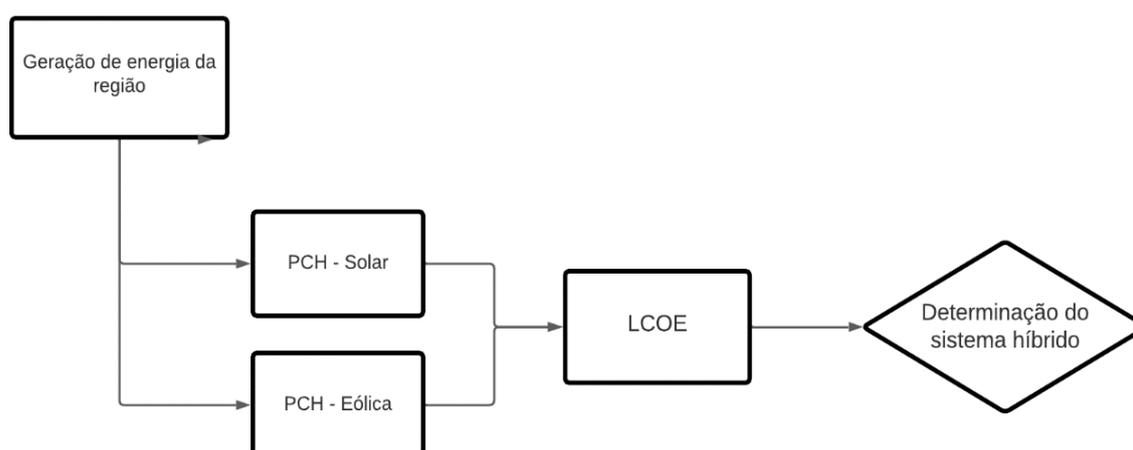
usina eólica foi determinada pela equação 8.

### 3.4 ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA

As análises serão realizadas para as regiões: Central, Centro Leste, Nordeste, Planalto e Serra por possuírem PCHs em funcionamento, para este TCC, foi escolhido que a energia gerada pelo sistema híbrido será negociada no mercado livre de energia e adotado o tipo de contrato Flat. O contrato Flat tem a compra de um volume constante de energia elétrica durante sua duração, ou seja, a usina é responsável por entregar todos os meses a mesma quantia de energia para a carga até o fim do contrato. Assim a determinação da carga para a realização das análises será igual a energia máxima gerada pela PCH.

As análises serão feitas através do sistema híbrido PCH-Solar e PCH-Eólico, para atender a carga do tipo flat com a menor variação, a energia gerada à mais pelo sistema híbrido não será considerada nas análises. Para determinar a escolha do sistema híbrido da região será analisado os seguintes parâmetros: a complementariedade da energia gerada pelas usinas para atender a carga e o custo da geração de energia feita através do LCOE, representado na figura 11.

Figura 11: Representação da análise da geração.

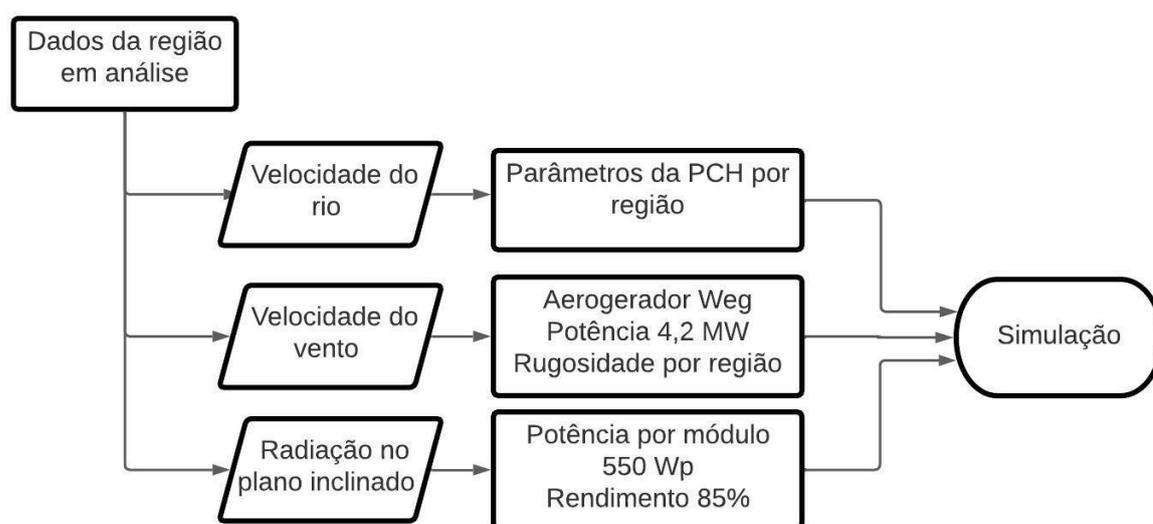


Fonte: (O AUTOR, 2021)

### 3.5 PARÂMETROS PARA REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES

Na figura 12 está apresentado os parâmetros utilizados na realização dos cálculos da geração de energia para as regiões central, serra, planalto, nordeste e centro oeste, sendo utilizado o Matlab® para a realização das simulações.

Figura 12: Representação dos parâmetros utilizados.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Para a PCH utilizou-se os dados horários da série histórica, disponibilizada pela ANA, da velocidade do rio para cada ano do intervalo de 2016 a 2021. Assim, calculou-se a energia média mensal gerada e os dados foram normalizados para visualizar o comportamento temporal durante o período de 12 meses.

Para realizar a análise da usina eólica buscou-se também para cada região os dados horários da série histórica da velocidade do vento para cada ano do intervalo de 2016 a 2021, que são disponibilizados pelo INMET. O comprimento da rugosidade é determinado através da tabela 2, para cada região, analisando a localidade e topografia do terreno em que a usina será instalada. Para realizar a simulação da energia gerada foi escolhido um único modelo de aerogerador para todas as regiões, o modelo escolhido foi o AGW 147/4.2 da Weg, com uma potência de 4,20 MW e com capacidade de varrer uma área de 16,972 m<sup>2</sup>. Mais informações sobre a turbina eólica utilizada consultar anexo II.

Na usina solar utilizou-se os dados de radiação no plano inclinado disponível no

banco de dados do LABREN, para cada região analisada. Já os módulos fotovoltaicos e as perdas serão as mesmas para todas as regiões. Os módulos fotovoltaicos têm uma potência de 550Wp e as perdas foram estabelecidas na tabela 1, assim resultando num rendimento de conversão de energia de 85%. Mais informações sobre o módulo utilizado podem ser consultadas no anexo I.

As análises do custo de geração realizado através do LCOE, foi realizado utilizando uma vida útil de 25 anos, para os módulos fotovoltaicos e os aerogeradores. Para realizar o cálculo do custo de operação da usina solar foi levado em consideração a realização de duas vezes por ano a limpeza dos módulos, manutenção dos equipamentos e operação da usina. Já para a usina eólica foi considerado os custos de operação da usina e manutenção preventiva e corretiva dos aerogeradores, devido a utilização de um único modelo de aerogerador nas análise pode impactar nos cálculos do Capex e Opex devido que em algumas regiões a usina pode ficar subdimensionada.

## **4 RESULTADOS**

Nas próximas subseções são apresentados os resultados da energia gerada de cada usina, do sistema híbrido para atender a carga e o custo de geração da usina solar e eólica para cada região. Posteriormente, conclui-se realizando a normalização dos sistemas híbridos e apresenta-se o custo por kWh médio para o estado.

### **4.1 PARÂMETROS UTILIZADOS PARA REALIZAR AS ANÁLISES**

Os valores de investimento inicial e custo de operação são apresentados na tabela 4, para todas as regiões. Devido a PCH ser a mesma para os dois sistemas híbrido, não têm necessidade de determinar o custo de geração, e adotou-se que a usina já se pagou o custo inicial de investimento, assim não impactar na análise final.

Tabela 4: Valores do custo de construção e operação para o cálculo do LCOE.

Usina	Capex (R\$/kW)	Opex (R\$/kW ano)
Solar	4204,60	45,50
Eólica	5500,00	100,00

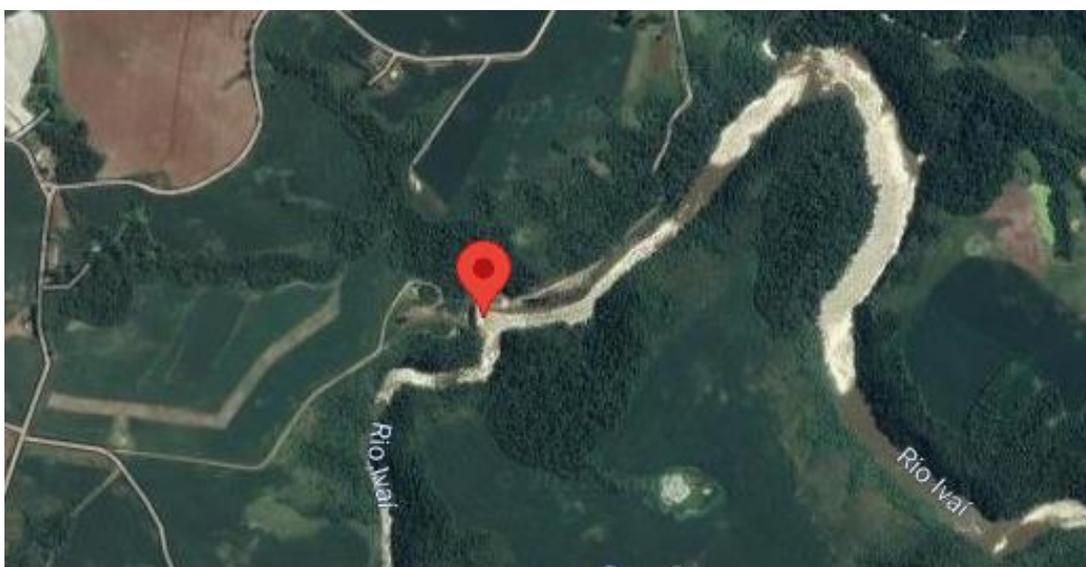
Fonte: (O AUTOR, 2022)

Ao passar dos anos os módulos fotovoltaicos, aerogeradores e equipamentos sofrem depreciação, ou seja, reduzem sua eficiência no processo de converter o recurso da fonte em eletricidade. Para os equipamentos da usina solar utilizou-se 0,8% no primeiro ano de operação e para os próximos 24 anos uma depreciação de 0,3%. Os aerogeradores utilizaram-se uma depreciação média de 5% ao ano (CUSTÓDIO, 2010).

#### 4.2 ANÁLISES DA REGIÃO CENTRAL

A região central do estado tem cinco PCHs instaladas. Como estabelecido anteriormente, são comparadas essas usinas com as usinas das outras regiões para definir qual possui a potência mais próxima. Assim, foi escolhida a PCH Engenheiro Ernesto Jorge Dreher, com uma potência instalada de 17,87 MW localizada no rio Ivaí entre os municípios de Júlio de Castilho e Salto do Jacuí, conforme representado na figura 13.

Figura 13: Localização geográfica da PCH Engenheiro Ernesto Jorge Dreher.



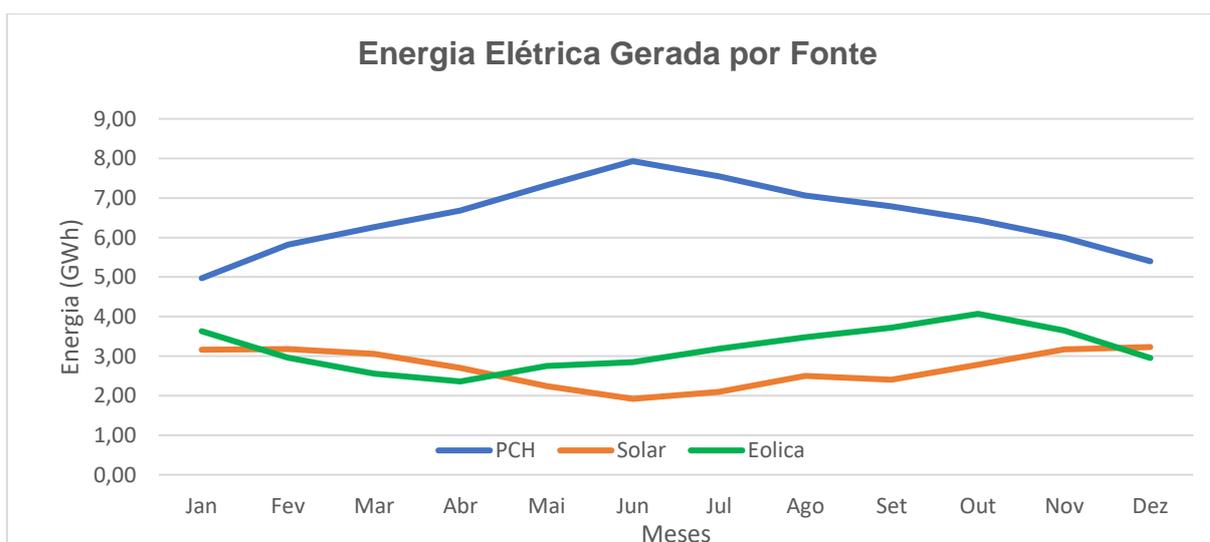
Fonte: (GOOGLE EARTH, 2022)

#### 4.2.1 Energia gerada pelas usinas da região central

Primeiramente, realizou-se a simulação da energia gerada pela PCH conforme apresentado na figura 14. É observado que a geração não é linear, ou seja, ela tem uma geração sazonal apresentando uma variação de 59,6% entre o valor mínimo e máximo da energia gerada. Com esta variação, não se torna possível atender uma carga do tipo flat. Assim, dependendo da forma que é realizado o contrato, seria necessário comprar energia de outras usinas para atender a carga nos meses com menor geração ou estabelecer um contrato a partir do mínimo gerado pela PCH e deixando de aproveitar parte do recurso disponível, para não ter gastos com a compra de energia.

Então, para aproveitar o potencial dos recursos do local em que a PCH Engenheiro Ernesto Jorge Dreher está instalada e reduzir a variação na geração, apresenta-se a combinação com as fontes de energia renováveis solar e a eólica. Para a realização das análises do sistema híbrido se estabeleceu uma carga constante, que foi definido para este TCC sendo igual ao máximo gerado pela PCH. Neste caso, a carga consome 7,93 GWh por mês, para isso a usina solar e eólica terá que gerar no mínimo de 2,96 GWh no mês de janeiro para ser possível atender a carga.

Figura 14: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para região central.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Sabendo que a usina solar tem que gerar no mínimo 2,96 GWh no mês de janeiro,

então utilizou-se os 2,96GWh para realizar o dimensionamento da usina. A usina solar necessita ter uma potência instalada de 22,08 MW para conseguir atender a carga, a geração da usina é apresentada na figura 14, onde é possível verificar uma variação de 68,3% entre a máxima e a mínima energia gerada durante o período de 12 meses.

Na figura 13, observa-se que o local em que está instalada a usina possui áreas cultivadas e áreas com plantas, assim utilizou-se uma rugosidade de 100,00 mm indicada na tabela 2, para região com poucas árvores. Realizando as simulações para atender os 2,96 GWh obteve-se que seria necessários 6 aerogeradores, que resulta numa potência total da usina de 25,20 MW, a energia gerada está representada na figura 13, apresentando uma variação na geração de 72,5%, resultando na maior variação obtida entre as três usinas. Estas variações são causadas pela sazonalidade de cada fonte e estando relacionadas com as condições climáticas locais.

Comparando os gráficos da PCH e solar é possível observar, a máxima geração da PCH, ocorre no mês de junho e neste mesmo mês ocorre a menor geração da usina solar devido ao período chuvoso do inverno. Analisando o período de 12 meses é possível verificar que a sazonalidade da PCH é inversa da fonte solar. Quando analisado a sazonalidade da PCH em relação a eólica, o máximo e mínimo de geração das duas usinas ocorre em períodos diferentes, concluindo que a PCH e a solar apresenta melhor complementariedade do que a PCH e eólica.

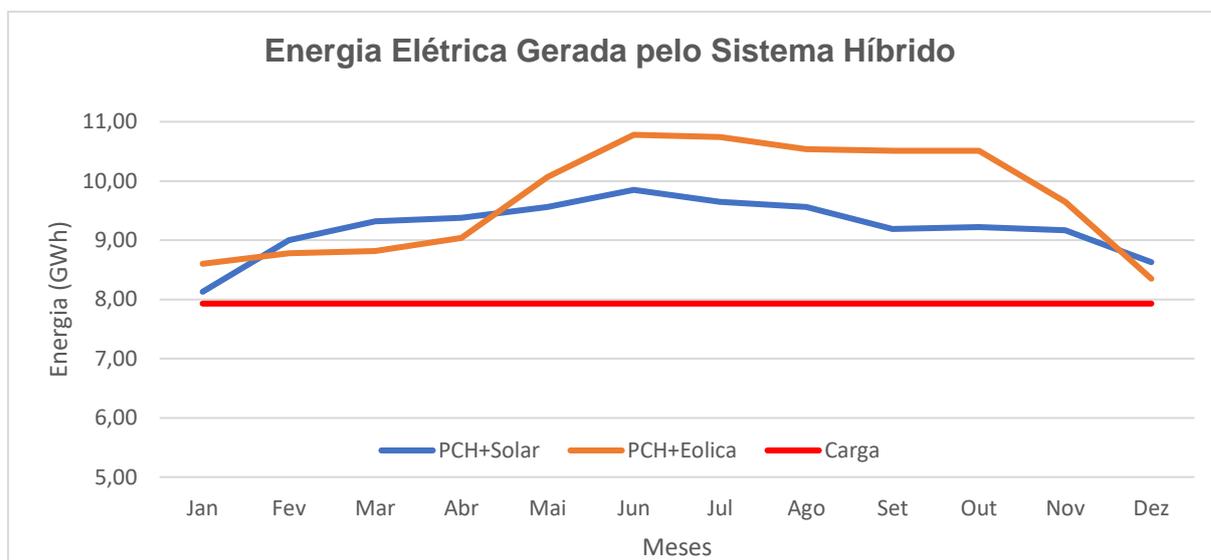
#### **4.2.2 Análise do sistema híbrido da região central**

Somando a energia gerada pela PCH e solar é possível obter um sistema híbrido de geração, representado na figura 15 para atender a carga de 7,93 GWh de forma constante, para a região central durante o período de 12 meses. Para atender a carga proposta é necessário que a usina hídrica gere aproximadamente 70,7% e 29,3% seja proveniente dos módulos fotovoltaicos, totalizando uma capacidade instalada de 39,95 MW. Esta configuração representa uma variação de apenas 21,2%, resultando numa redução da variação da geração de 47,1% em relação à PCH e de 38,4% comparada com a usina solar.

Na figura 15 é apresentada a energia gerada pelo sistema híbrido PCH e eólico para atender a carga da região central, este sistema apresenta uma variação de 29,1% entre a energia máxima e mínima gerada. A contribuição dos aerogeradores é de 32,8% e 67,2% é proveniente das turbinas da usina hídrica para atender a carga,

representando uma capacidade instalada de 43,07 MW. O sistema híbrido comparado com a PCH apresentou uma redução de 30,5% e para a usina eólica uma redução de 43,4%, mostrando a confiabilidade do sistema híbrido em relação a uma única usina.

Figura 15: Energia elétrica total gerada pelo sistema híbrido.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Pelas análises da complementariedade da energia, conclui-se que o sistema híbrido PCH-solar apresenta melhor complementariedade quando comparada com o sistema PCH-eólico devido ao potencial solar possuir a sazonalidade invertida com a PCH, ou seja, enquanto uma usina aumenta sua geração a outra diminui. Isso então faz com que este conjunto, apresente a menor variação do sistema híbrido.

#### 4.2.3 Análise do custo de geração da região central

Aplicando a depreciação estipulada anteriormente para a usina solar é possível obter um total de 775,58 GWh gerados durante o período de 25 anos. Para o período de 25 anos a usina eólica consegue gerar 862,34 GWh de energia. Os valores de Capex e Opex são apresentados na tabela 4. Somando os dois valores e dividindo pela energia total gerada durante os 25 anos, obteve-se o LCOE que representa o custo de operação, apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Custo de operação das usinas durante 25 anos região central.

Usina	Capex (R\$)	Opex (R\$)	CT (R\$)	LCOE (R\$/kWh)
Solar	92.837.568,00	25.116.000,00	117.953.568,00	0,1519
Eólica	138.600.000,00	63.000.000,00	201.600.000,00	0,2338

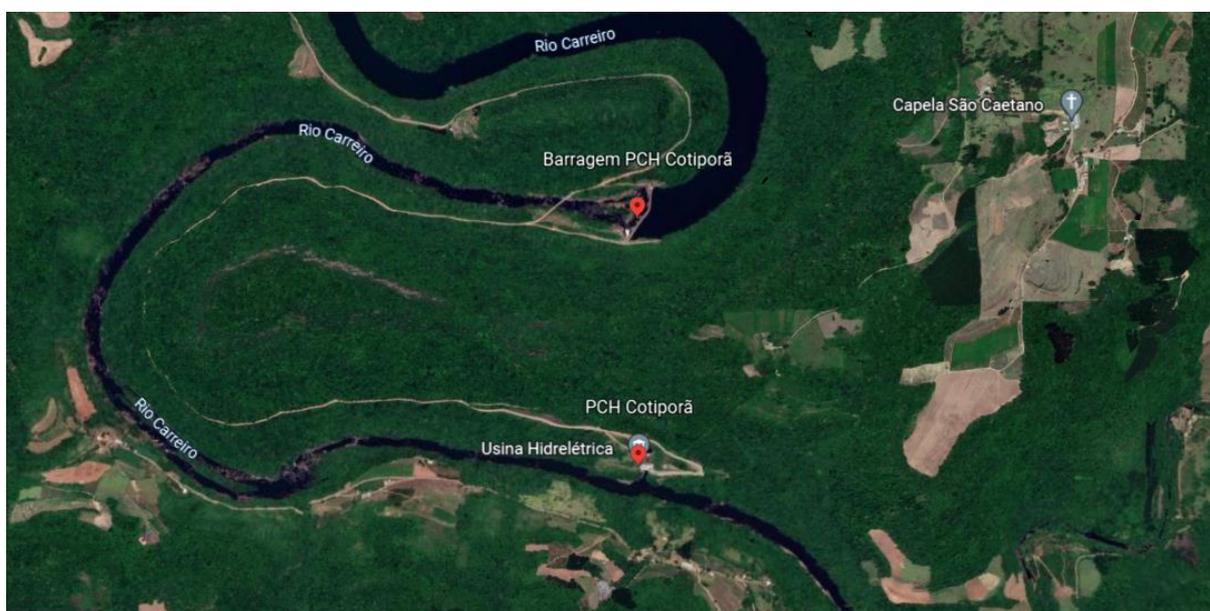
Fonte: (O AUTOR, 2022)

Com todas as análises realizadas é possível concluir através da figura 15 e tabela 5 que o sistema híbrido PCH solar possui a melhor complementariedade na geração e o menor custo por kWh durante os 25 anos de operação, quando comparado com o sistema PCH eólico.

#### 4.3 ANÁLISES DA REGIÃO SERRA

Para a potência da PCH da serra ser próxima da região central e das demais regiões, escolheu-se a PCH Cotiporã, com uma potência instalada de 19,50 MW, localizada no rio Carreiro que faz a divisão dos municípios de Dois Lajeados e Cotiporã, sendo representado geograficamente na figura 16.

Figura 16: Localização geográfica da PCH Cotiporã.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2022)

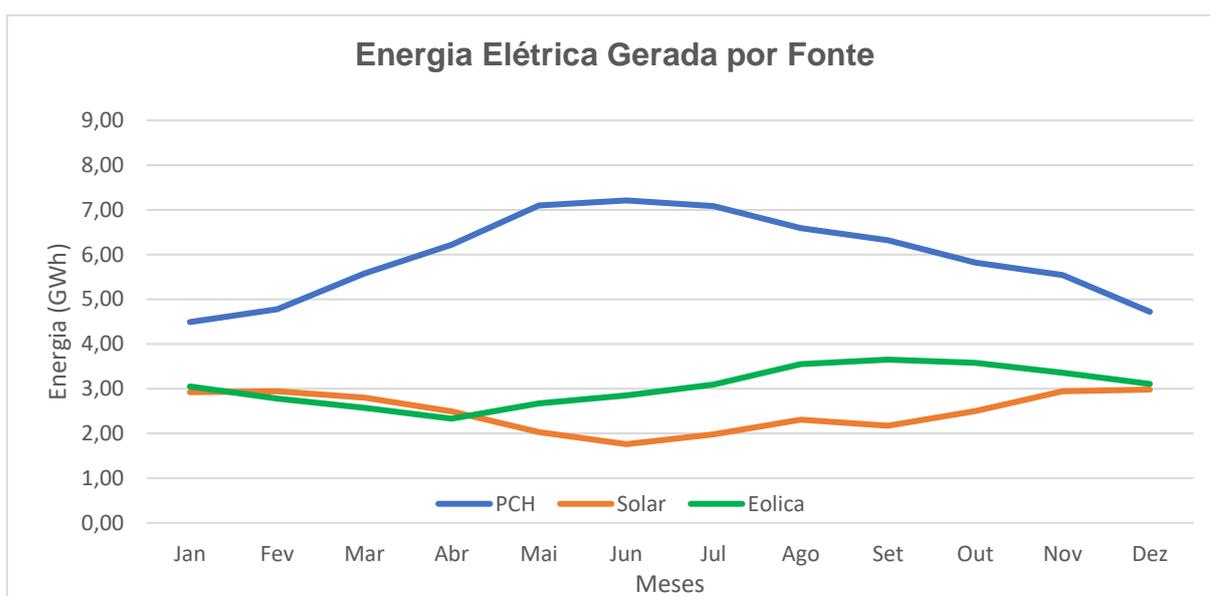
##### 4.3.1 Energia gerada pelas usinas da região da serra

Na figura 17 é apresentado o resultado das simulações realizadas para a região da serra, representado a sazonalidade na geração referente a PCH, solar e eólica.

Analisando a sazonalidade na geração da PCH, nos meses de maio a julho possuem pouca variação devido ao período chuvoso da região. Para o período de 12 meses apresenta uma variação de 60,6%. Devido a sazonalidade na geração da PCH não é possível atender um dos objetivos do trabalho, suprir a demanda da carga que tem um consumo igual a máxima energia gerada pela usina.

A energia máxima gerada pela PCH Cotiporã é no mês de junho, sendo 7,21 GWh que é igual ao consumo mensal de energia, estabelecido para a carga. As usinas que compõem o sistema híbrido são responsáveis por gerar, no mínimo, 2,71 GWh no mês de janeiro, para atender a carga estabelecida.

Figura 17: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para região da serra.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Comparando a característica da região em que a PCH está instalada, com a tabela 2, escolheu-se a rugosidade para a regiões de floresta. Com todos os parâmetros definidos realizou-se a simulação, resultando numa usina com potência de 12,60 MW. Na figura 17 é apresentada a energia gerada pela usina eólica, sendo obtido uma variação de 56,7% na geração da usina.

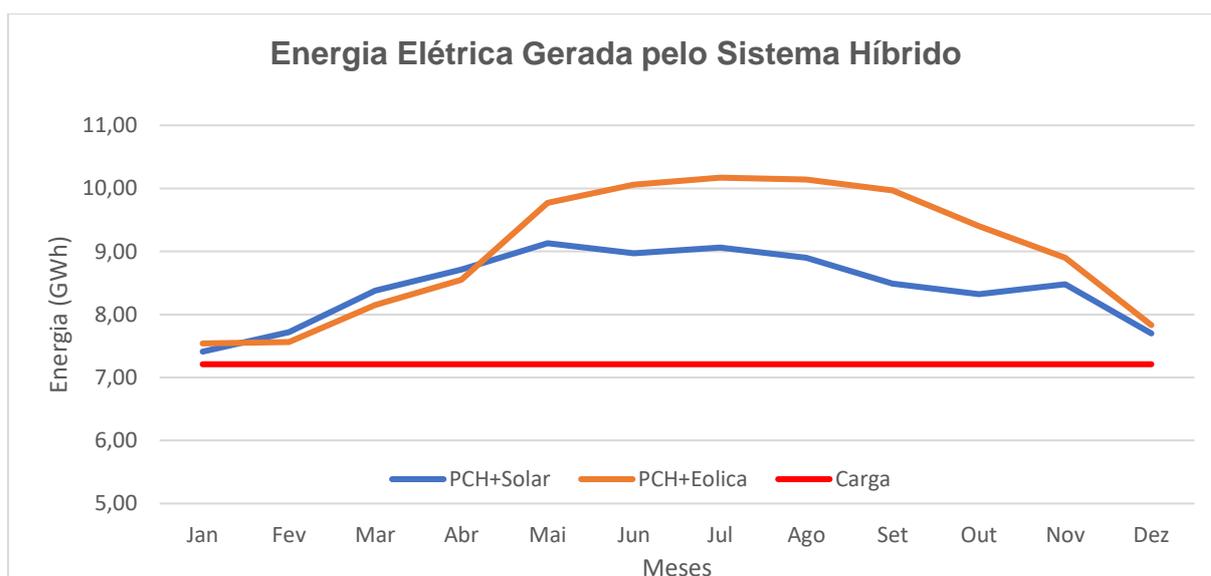
É necessário que a usina solar tenha uma potência instalada de 20,95 MW para gerar 2,71 GWh no mês de janeiro. A energia gerada pela usina apresenta uma variação de 69,3%, sendo a usina com maior variação para a região da serra.

Analisando a complementariedade entre PCH e Eólica, entre os meses de janeiro e abril observa-se uma complementariedade na geração, pois PCH está aumentando a geração e a eólica diminuindo. A partir de abril a eólica começa a aumentar a geração até o mês de setembro, neste mesmo período ocorre a geração máxima da PCH e a partir de setembro as duas usinas apresentam diminuição na geração, assim não tendo uma complementariedade na geração. Nos meses de maio a julho a solar apresenta a menor geração e para a PCH é o período de máxima geração, ou seja, uma usina diminui a geração em quanto a outra aumenta, apresentando uma complementariedade melhor que a PCH eólica.

#### 4.3.2 Análise do sistema híbrido da região serra

A potência total do sistema híbrido PCH solar da região da serra é de 40,45 MW com uma variação de 23,2% na geração, no período apresentado na figura 18. Para este sistema a contribuição da PCH é de 70,6% e de 29,4% da usina solar, para atender uma carga com o consumo mensal de 7,21 GWh. Comparando a variação entre o sistema híbrido e a PCH apresenta uma redução de 37,4% e com a solar essa redução é maior, sendo de 46,1%.

Figura 18: Energia elétrica do sistema híbrido para a serra.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Na figura 18 também é apresentada a geração do sistema híbrido PCH-eólico,

neste caso a variação do sistema é de 34,9%. Comparando com a variação da PCH houve uma redução de 25,7% e de 21,8%, em relação a solar. A potência total do sistema é de 32,10 MW para atender a carga, a usina eólica contribui com 33,9% e a PCH com 66,1% na geração de energia para atender a carga.

### 4.3.3 Análise do custo de geração da região serra

Inicialmente, calculou-se a energia gerada pela usina solar e eólica, obtendo 713,52 GWh para a usina solar no período de 25 anos, no mesmo período foi obtido 979,19 GWh para a usina eólica. O Capex e o Opex são apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Custo de operação das usinas durante 25 anos região serra.

Usina	Capex (R\$)	Opex (R\$)	CT (R\$)	LCOE (R\$/kWh)
Solar	88.086.370,00	23.830.625,00	111.916.995,00	0,1566
Eólica	69.300.000,00	31.500.000,00	100.800.000,00	0,1029

Fonte: (O AUTOR, 2022)

Na região da serra, o sistema híbrido PCH-solar apresenta menor variação na geração devido a complementariedade entre as usinas. Já o sistema PCH-eólico apresenta o menor custo por kWh. O menor custo é causado pela maior velocidade do vento para a região da serra, assim necessitando de menos aerogeradores para gerar a energia necessária. Portanto, o sistema híbrido PCH-eólica apresenta a melhor opção de instalação economicamente para a região da serra mesmo não apresentando a melhor complementariedade.

## 4.4 ANÁLISES DA REGIÃO PLANALTO

A região planalto do estado possuem seis PCH em operação, com potência instalada entre 5 MW a 30 MW. Das 6 usinas, a que possui potência instalada mais próxima das regiões já analisadas e das regiões que vão ser analisadas posteriormente é a PCH Ouro. A PCH Ouro possui uma potência instalada de 16 MW, construída no rio Marmeleiro, no município de Barracão, a topografia do terreno é representada na figura 19.

Figura 19: Localização geográfica da PCH Ouro.



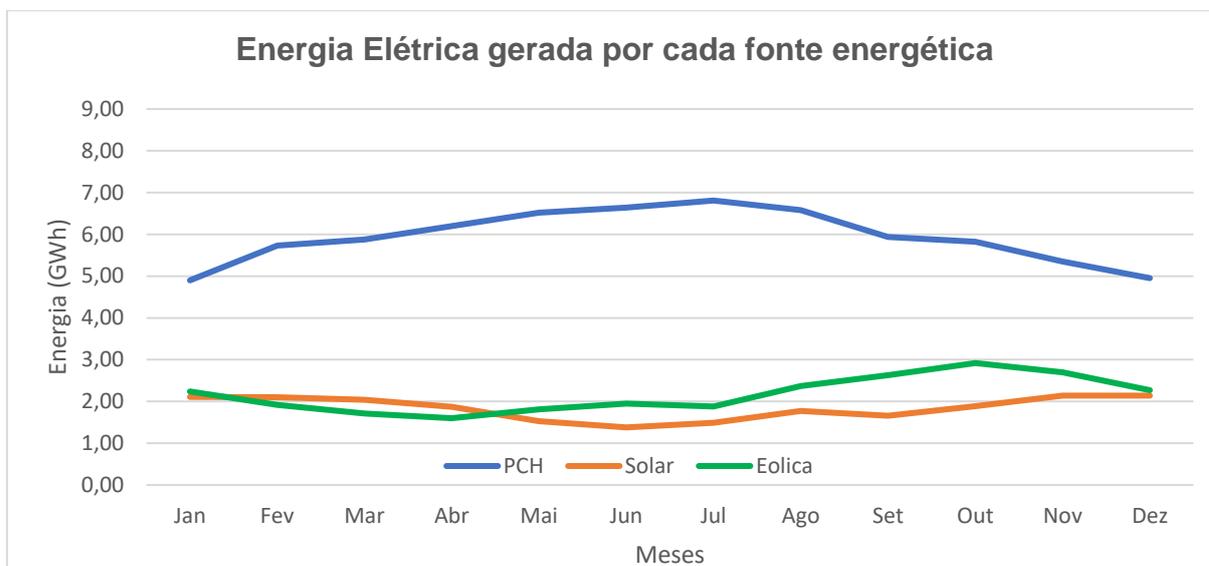
Fonte: (GOOGLE EARTH, 2022)

#### 4.4.1 Energia gerada pelas usinas da região planalto

A partir dos dados da velocidade do rio, da altura entre a barragem e a casa de máquinas e da vazão das turbinas realizou-se a simulação da energia gerada pela PCH Ouro. A carga a ser atendida pelo sistema híbrido desta região tem um consumo mensal de 6,81 GWh que é igual a máxima energia gerada pela PCH. Apresentando uma variação na geração de 39,0% para o período representado na figura 20, ou seja, devido a sazonalidade na geração, a PCH não consegue atender a carga de forma constante. Para isso, é necessário que a usina solar e a eólica gerem no mínimo 1,91 GWh no mês de janeiro, para atender a carga de forma constante.

A usina solar necessita ter uma potência de 15,01 MW para gerar energia suficiente para atender a carga no mês de janeiro. A energia gerada para o período de 12 meses é apresentada na figura 20, sendo possível observar uma variação de 55,1%. Para a usina eólica foi utilizada uma rugosidade de 500,0 mm baseada na figura 19. Para atender o consumo da carga no mês de janeiro são necessários 6 aerogeradores, totalizando 25,2 MW de potência instalada. Na simulação da geração da usina apresentou uma variação de 82,5%, entre o máximo e mínimo gerado pela usina eólica, representado na figura 20.

Figura 20: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para região planalto.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Para o período de janeiro a julho a PCH apresenta um crescimento na geração, já a usina solar apresenta uma redução na sua geração para o mesmo período, apresentando uma complementariedade entre a energia gerada pelas duas usinas. A usina eólica apresenta um aumento na geração que ocorre de abril a outubro. Neste mesmo período, a PCH apresenta um aumento na geração atingindo o máximo da geração em julho e nos meses posteriores ocorre a diminuição na geração das duas usinas, assim as duas usinas apresentam comportamento parecidos e não apresentam uma boa complementariedade.

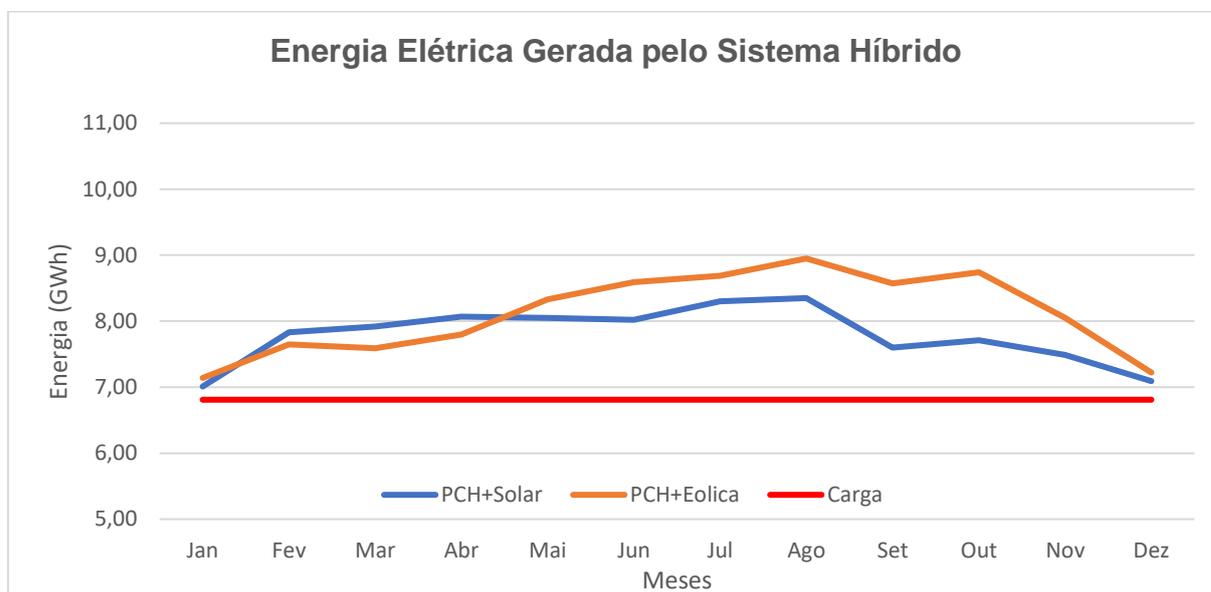
#### 4.4.2 Análise do sistema híbrido da região planalto

Na figura 21 é apresentado a geração dos sistemas híbrido PCH-solar e PCH-eólica. No sistema híbrido PCH solar a geração é composta por 76,3% proveniente da PCH e 23,7% da usina solar, realizando a soma da potência das duas usinas é obtido uma potência total de 31,01 MW com uma variação de 19,1% na geração. Apresenta uma diminuição na variação de 36,0% em relação a usina solar e de 19,9%, quando comparada com a PCH.

O sistema híbrido PCH-eólico é composto pela soma da energia gerada pelas duas usinas, resultou numa variação de 25,4%, que é menor que a variação obtida na simulação da PCH de 39,0% e da eólica 82,5%. A potência total do sistema é de 41,20

MW, resultado da soma da potência das duas usinas.

Figura 21: Energia elétrica do sistema híbrido para o planalto.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

#### 4.4.3 Análise do custo de geração da região planalto

Utilizando a energia total gerada pela usina solar e eólica para o período de 12 meses e aplicando a depreciação dos equipamentos, que já foi estipulada anteriormente, obtém-se o total de 528,93 GWh para a usina solar e para a usina eólica é de 595,56 GWh, para o período de 25 anos. Os demais valores utilizados no cálculo e o valor do LCOE são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Custo de operação das usinas durante 25 anos da região planalto.

Usina	Capex (R\$)	Opex (R\$)	CT (R\$)	LCOE (R\$/kWh)
Solar	63.111.046,00	17.073.875,00	80.184.921,00	0,1514
Eólica	138.600.000,00	63.000.000,00	201.600.000,00	0,3385

Fonte: (O AUTOR, 2022)

Analisando os resultados obtidos na complementariedade da geração e o cálculo do LCOE, conclui-se que o melhor sistema híbrido é composto pela PCH e a usina solar, pois apresentou a menor variação no período de 12 meses e o menor custo por

kWh gerado.

#### 4.5 ANÁLISES DA REGIÃO NORDESTE

Na região nordeste do estado, a PCH com a potência mais próxima das outras regiões é a PCH Marcos Baldo, com 16,75 MW de potência instalada. Ela explora o potencial hidroelétrico do rio Turvo, localizado entre os municípios de Campo Novo e Braga, sendo representada geograficamente na figura 22.

Figura 22: Localização geográfica da PCH Marcos Baldo.



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2022)

##### 4.5.1 Energia gerada pelas usinas da região nordeste

Com os dados da velocidade do rio, radiação no plano inclinado e a velocidade do vento para a região nordeste, realizou-se para a PCH, usina solar e a usina eólica a simulação da energia necessária para atender a carga estipulada, sendo representado na figura 23.

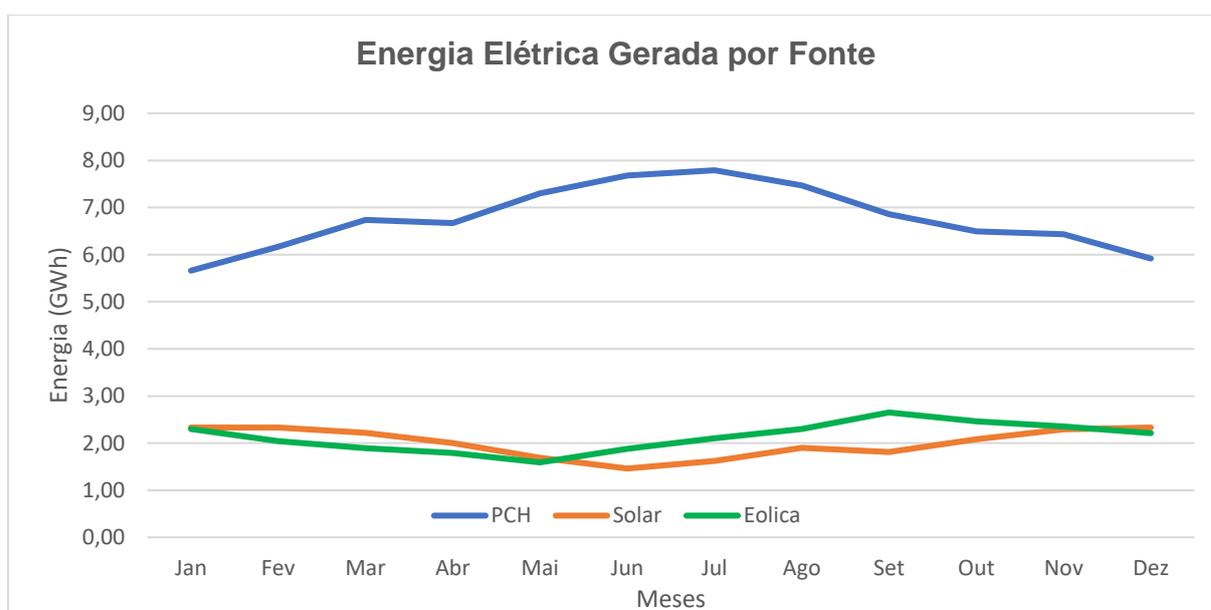
Na simulação da energia gerada pela PCH, obteve-se uma variação de 37,6% entre os valores máximos e mínimos, mostrando uma instabilidade na geração causada pelas condições climáticas da região. Como definido no objetivo deste trabalho, em que a carga tem um consumo igual ao máximo gerado pela PCH, assim resultando num consumo de 7,79 GWh mensal. A usina solar e eólica foi

dimensionada para gerar a diferença entre o consumo da carga e a mínima energia gerada pela PCH, resultando numa geração de mínima de 2,13 GWh para o mês de janeiro.

A partir da figura 22 determinou-se a rugosidade de 100,0 mm utilizadas para regiões com poucas plantas. Realizou-se a simulação para atender a geração mínima de 2,13 GWh no mês de janeiro. Para isso são necessários 5 aerogeradores totalizando 21,00 MW de potência instalada, na simulação foi obtida uma variação de 66,7%, mostrando a inconsistência na geração pela fonte.

Para a usina solar atender o consumo da carga no mês de janeiro é necessário que tenha uma potência instalada de 16,20 MW, sua geração apresenta uma variação de 59,6%. Nos meses de maio a julho apresentam o período com menor geração e para a PCH é o período de maior geração, resultando em uma boa complementariedade entre as duas usinas. A usina eólica apresenta complementariedade com a PCH nos meses de janeiro a maio, pois uma está aumentando a geração e a outra diminui. Para os meses de maio a setembro as duas usinas apresentam aumento na geração, assim não tem complementariedade e sim uma soma da energia gerada.

Figura 23: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para região nordeste.

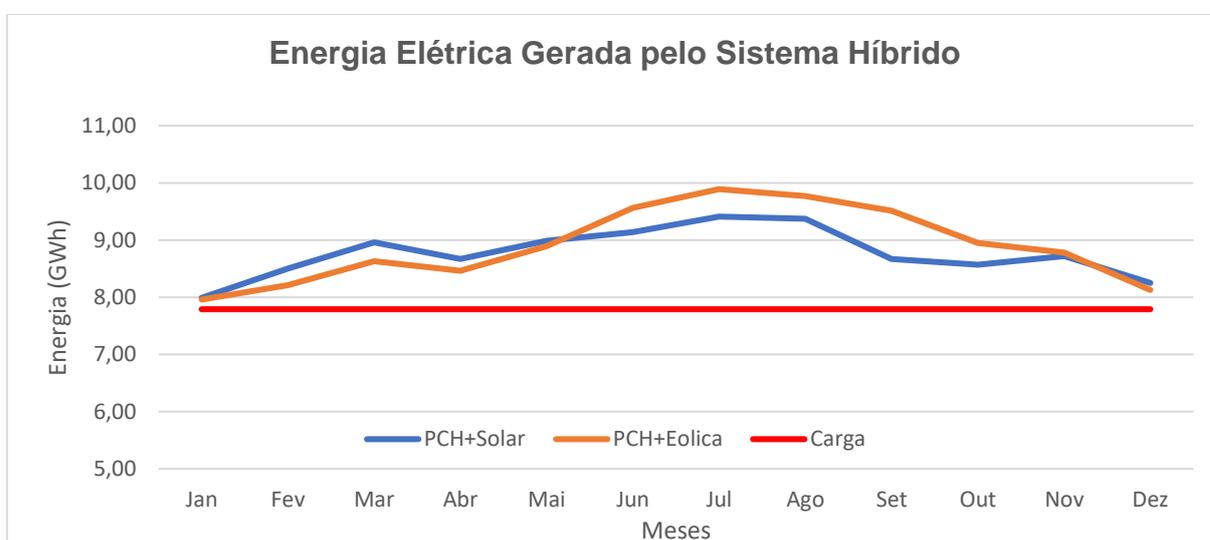


Fonte: (O AUTOR, 2022)

#### 4.5.2 Análise do sistema híbrido da região nordeste

A potência total do sistema híbrido PCH-eólico para a região nordeste é de 37,70 MW com uma variação de 24,2% na geração, para o período representado na figura 24. A contribuição na geração feita pela PCH é de 76,1% e de 23,9% pela usina eólica, para que seja possível atender a carga de forma constante. O sistema híbrido apresenta uma redução de 13,4% comparada com a PCH e comparando com a usina eólica a redução foi maior, de 42,4%.

Figura 24: Energia elétrica do sistema híbrido para o nordeste.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Na figura 24 está representado o sistema híbrido PCH Solar que é o resultado da soma das duas usinas, neste sistema é apresentada uma variação de 17,8%. Comparando com a variação da fonte solar identifica-se uma redução de 41,8% e comparando com a PCH, a redução na variação foi de 19,9%. A potência total do sistema híbrido é de 32,72 MW para atender a carga de forma constante, onde a PCH é responsável por gerar 77,1% e 22,9% é fornecido pelos módulos fotovoltaicos.

#### 4.5.3 Análise do custo de geração da região nordeste

A usina solar consegue gerar 575,01 GWh para o período de 25 anos, com uma depreciação dos equipamentos de 0,8% para o primeiro ano e de 0,3% para os demais anos de operação. No mesmo período e com uma depreciação de 5% ao ano, a usina

eólica tem uma geração de 585,66 GWh. O custo de construção e o custo de operação durante o período estabelecido são apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Custo de operação das usinas durante 25 anos, região nordeste.

Usina	Capex (R\$)	Opex (R\$)	CT (R\$)	LCOE (R\$/kWh)
Solar	67.357.692,00	18.222.750,00	85.580.442,00	0,1487
Eólica	115.500.000,00	52.500.000,00	168.000.000,00	0,2869

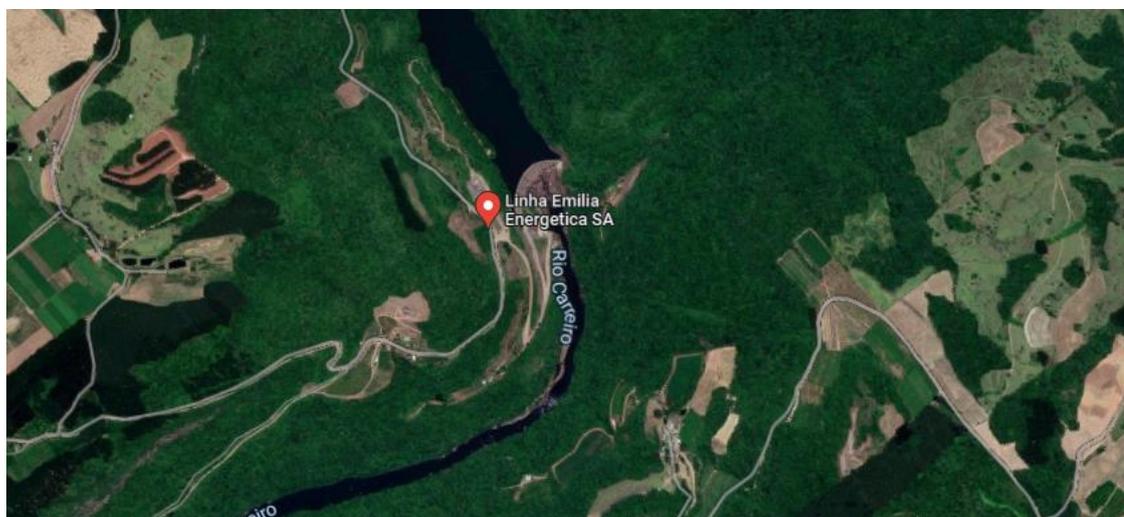
Fonte: (O AUTOR, 2022)

Nas análises realizadas para a região nordeste, o sistema híbrido PCH-solar apresentou a melhor complementariedade e a menor variação na geração, comparado com o sistema híbrido PCH-eólica. No custo de operação a usina solar apresentou menor custo por kWh, conclui-se que a usina solar é a mais indicada para ser instalada junto a PCH, na região nordeste.

#### 4.6 ANÁLISES DA REGIÃO CENTRO LESTE

A região centro leste possui 3 usinas, a partir dos parâmetros estabelecidos anteriormente, escolheu-se a PCH Linha Emília que tem uma potência instalada de 19,5 MW, localizada no rio Carreiro entre os municípios de Dois Lajeados e Fagundes varela, representado na figura 25.

Figura 25: Localização geográfica da PCH Linha Emília.

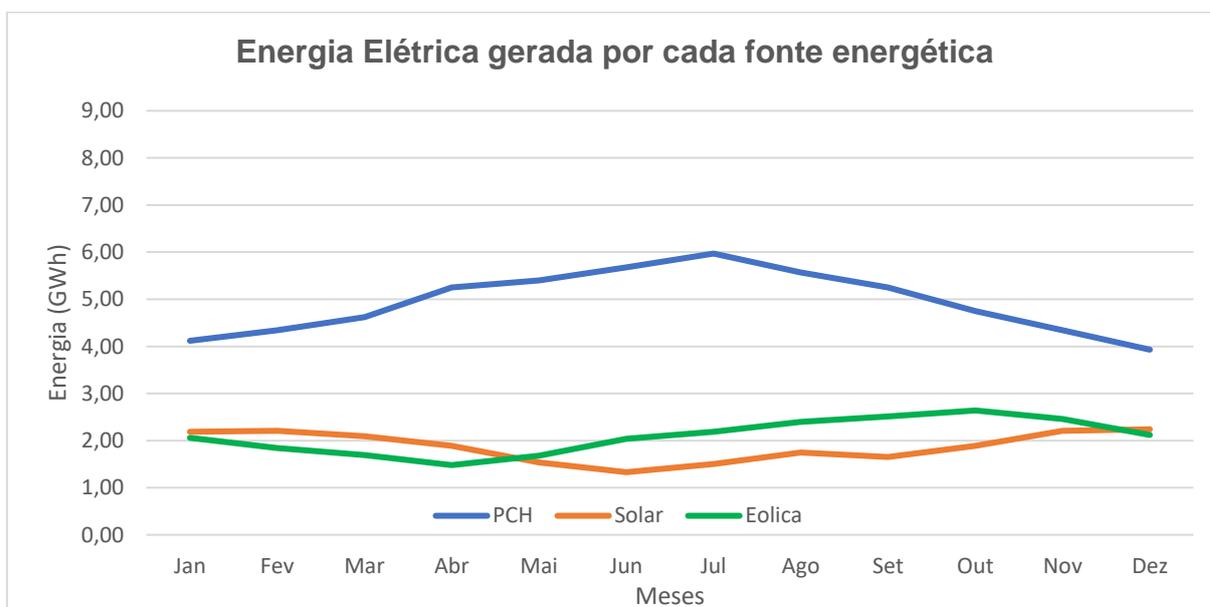


Fonte: (O AUTOR, 2022)

#### 4.6.1 Energia gerada pelas usinas da região centro leste

Realizando a simulação para a PCH Linha Emília, obteve-se uma variação de 51,9% na geração para o período representado na figura 26. Neste período, a geração máxima foi de 5,97 GWh no mês de julho, sendo igual ao consumo mensal da carga para o período estabelecido pelo contrato flat, que o sistema híbrido deve atender. Sabendo o consumo da carga mensal menos a menor energia gerada pela PCH, obtém-se 2,04 GWh no mês de dezembro, que é a energia mínima que a usina solar e eólica tem que gerar para atender a carga.

Figura 26: Energia elétrica gerada pela PCH, solar e eólica para a região centro leste.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Sabendo a quantidade necessária que a usina solar necessita gerar no mês de dezembro, realizou-se as simulações que resultou numa usina com 15,74 MW de potência instalada. A sazonalidade na geração, ao longo do período apresentado na figura 26 é de 68,4%, mostrando como a fonte possui instabilidade na geração de energia.

Com base na figura 25, comparou-se com as opções da tabela 2 para definir a rugosidade a ser utilizada nas simulações da usina eólica, assim definindo a rugosidade de 100,0 mm para regiões com poucas árvores. Para suprir a demanda

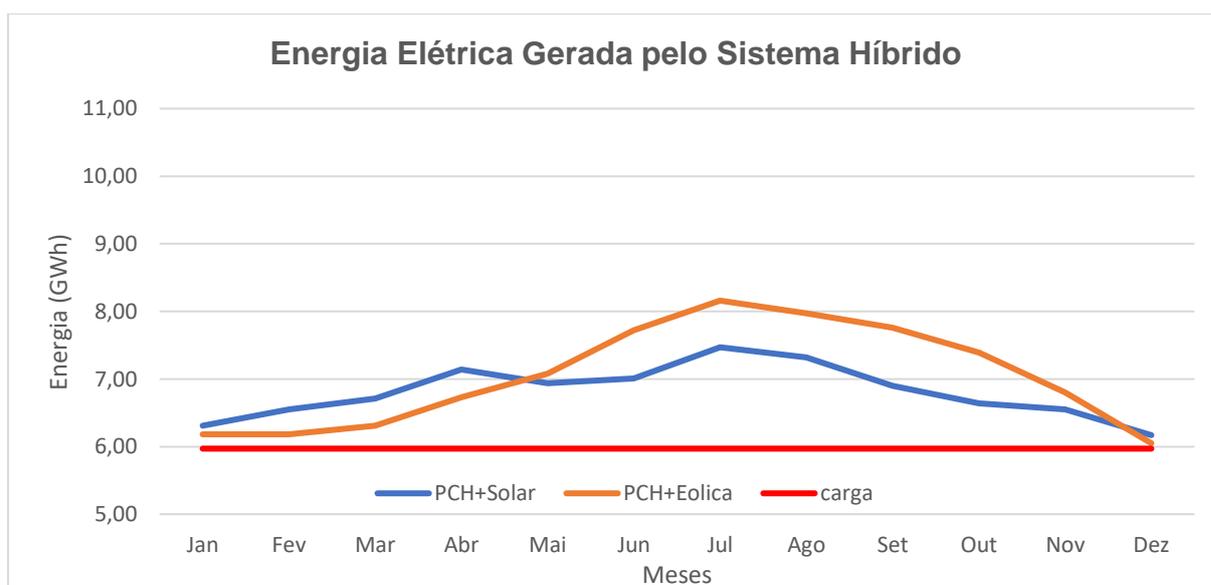
da carga é necessário que a usina tenha uma potência de 16,80 MW, formada por 5 aerogeradores da Weg. A variação na geração é de 78,4%, entre o máximo e mínimo apresentados na figura 26.

A complementariedade na geração entre a PCH e eólica ocorre nos meses de janeiro a abril e de julho a outubro, onde uma usina aumenta e a outra diminui sua geração e para os demais meses não ocorre a complementação, pois as duas estão aumentando sua geração ou reduzindo devido as condições climáticas. Já para a complementariedade entra a PCH e solar ocorre praticamente em todo o período representado na figura 26, tendo uma diferença de um mês entre o máximo e mínimo das duas usinas.

#### 4.6.2 Análise do sistema híbrido da região centro leste

O sistema híbrido composto pela PCH e a usina eólica possui uma potência total de 36,30 MW para atender a carga, sendo que a contribuição da eólica é de 29,8% e a PCH contribui com 70,2%. Este sistema híbrido apresenta uma variação na geração de 34,9%, a mesma representada na figura 27. Comparando está variação com a PCH, apresenta uma redução de 17,0% e de 43,5% com a usina eólica.

Figura 27: Energia elétrica total gerada pelo sistema híbrido centro leste.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Na figura 27 está representada a geração do sistema híbrido, composto pela PCH

e solar, com uma variação de 21,1% entre os valores máximo e mínimo, sendo menor quando analisado as usinas de forma separada. A diminuição é de 47,4% para a solar, e de 30,8% quando comparada com a variação da PCH. A soma da potência das duas usinas resulta em 35,24 MW de potência total do sistema híbrido, sendo que a solar tem uma contribuição de 27,5% e de 72,5% a contribuição da PCH, para atender a carga de 5,97 GWh de forma constante.

#### 4.6.3 Análise do custo de geração da região centro leste

Para realizar a análise do custo por kWh é necessário determinar a energia gerada para o período estabelecido de 25 anos. Neste período, a usina solar possui uma geração de 538,16 GWh e a usina eólica apresenta uma geração de 575,41 GWh. O Capex e o Opex são apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Custo de operação das usinas durante 25 anos para região centro leste.

Usina	Capex (R\$)	Opex (R\$)	CT (R\$)	LCOE (R\$/kWh)
Solar	66.180.404,00	17.904.250,00	84.084.654,00	0,156
Eólica	92.400.000,00	42.000.000,00	134.400.000,00	0,2336

Fonte: (O AUTOR, 2022)

Com todas as análises realizadas para a região centro leste é possível determinar que a usina solar possui a melhor complementariedade com a PCH e o menor custo por kWh comparando com a usina eólica.

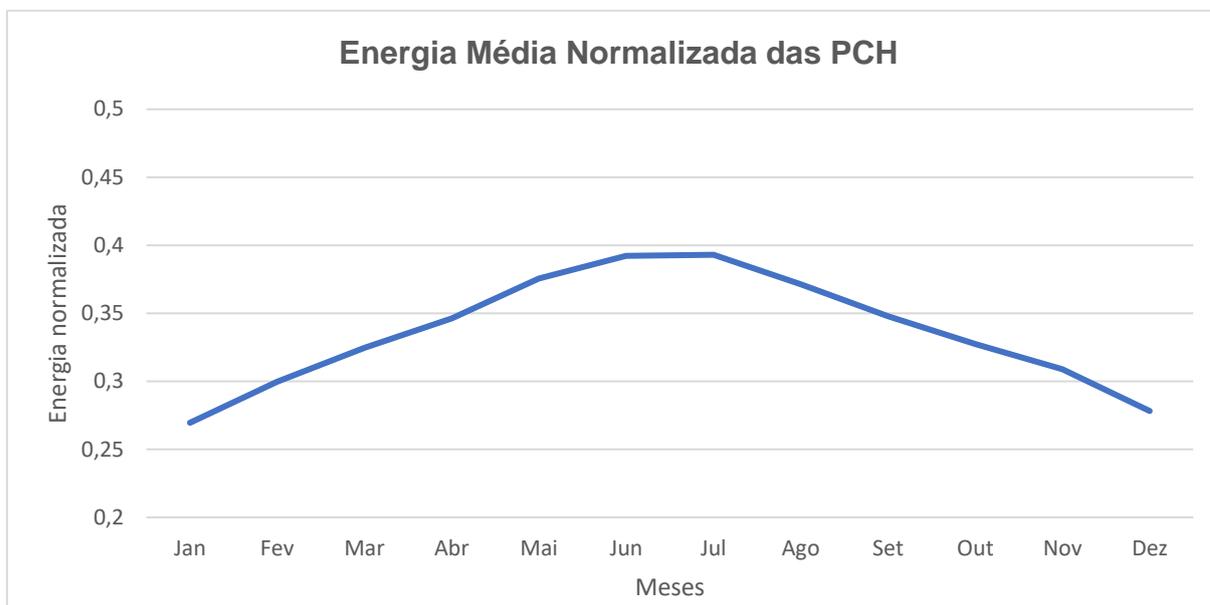
#### 4.7 COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS PARA O ESTADO

Nas análises realizadas utilizou-se uma PCH para cada região, em que a potência variou entre 16,00 MW a 19,50 MW. Devido ao estado possuir outras PCHs com potência instalada entre as que foram analisadas ou igual, assim realizou-se a normalização em relação a energia gerada, estabelecendo uma equação de comportamento para o estado do Rio Grande do Sul, podendo realizar previsões da energia gerada para cada mês do sistema híbrido.

Nas análises, observou-se que o comportamento da sazonalidade do sistema híbrido PCH-solar é diferente do comportamento do sistema híbrido PCH eólica, assim

realizou-se uma equação para cada sistema. Os dados normalizados da PCH são iguais para os dois sistemas híbridos, sendo representados na figura 28.

Figura 28: Energia elétrica normalizada das PCHs analisadas no estado.



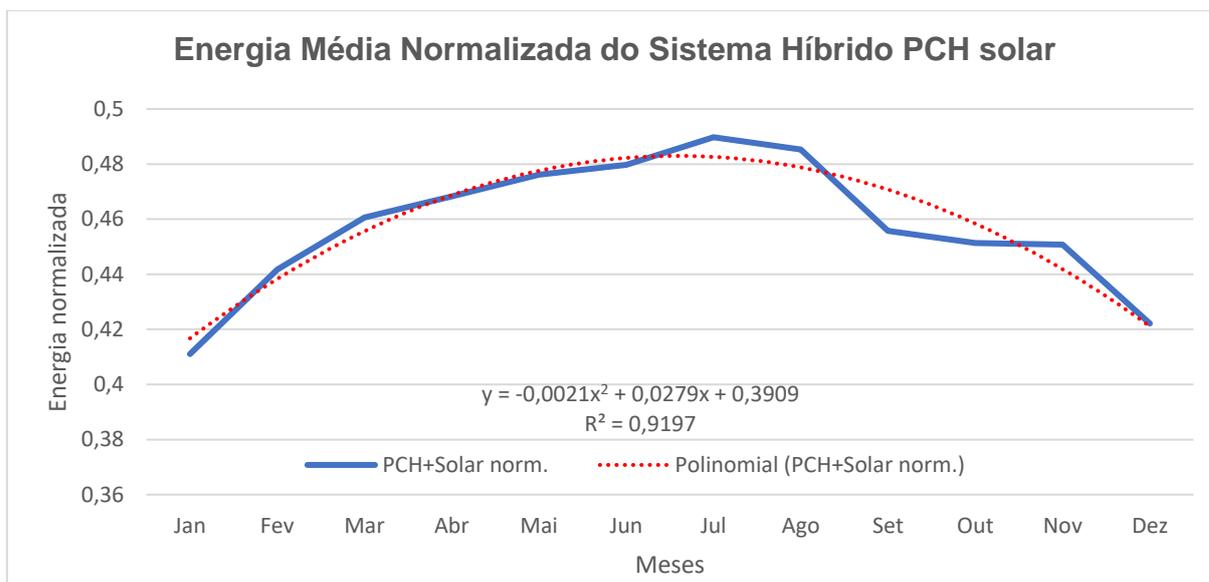
Fonte: (O AUTOR, 2022)

A normalização foi realizada para cada PCH analisada, de forma separada, após realizou-se a média de cada mês, assim obtendo os dados mostrados na figura 28. Com isso, criou-se um padrão das vazões dos rios que resulta na padronização da sazonalidade, podendo ser aplicada para outras PCHs com potência entre o valor mínimo e máximo da potência analisada neste trabalho.

#### 4.7.1 Normalização do sistema híbrido PCH solar

Para gerar a equação do comportamento do sistema híbrido PCH solar referente ao estado RS é necessário realizar a normalização da energia gerada pela usina solar. A normalização foi realizada para cada usina de forma separada, posteriormente realizado a média de cada mês entre as usinas. Somou-se com os dados apresentados na figura 28 e obteve-se os dados normalizados para o sistema híbrido PCH solar, sendo apresentados na figura 29.

Figura 29: Energia elétrica normalizada do sistema híbrido PCH solar do estado.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Para os dados normalizados apresentados na figura 29, observou-se que a equação polinomial de ordem 2 representa da melhor forma o comportamento do sistema, pois apresenta uma aproximação de 91,9% com os dados normalizados. A equação 12 obedece a uma proporção de 73,5% gerada pela PCH e de 26,5% gerada pela usina solar.

$$Y_{PCHsolar} = -0,0021x^2 + 0,0279x + 0,3909 \quad (12)$$

$Y_{PCHsolar}$  = Energia gerada por mês pelo sistema híbrido;

$x$  = Mês do período analisado.

Para ser possível obter a energia gerada para diferentes sistemas híbridos PCH-solar, somente alterando a potência da PCH, é necessário estabelecer uma relação com os valores obtidos pela variável  $Y$ . Como os dados foram normalizados é necessário levar em consideração a relação entre a potência da PCH e da usina solar, neste caso a relação é de 0,974. Realizando o acréscimo nos valores obtidos na equação 12, do coeficiente de relação de potências ( $C_{PCHsolar}$ ) e a variável ( $P_{PCH}$ ) referente a potência da PCH a ser analisada, é obtido a equação 13.

$$SH_{PCHsolar} = P_{PCH}Y_{PCHsolar}C_{PCHsolar} \quad (13)$$

$SH_{PCHSolar}$  = Energia gerada pelo sistema híbrido PCH solar [GWh];

$P_{PCH}$  = Potência da PCH a ser analisada [MW];

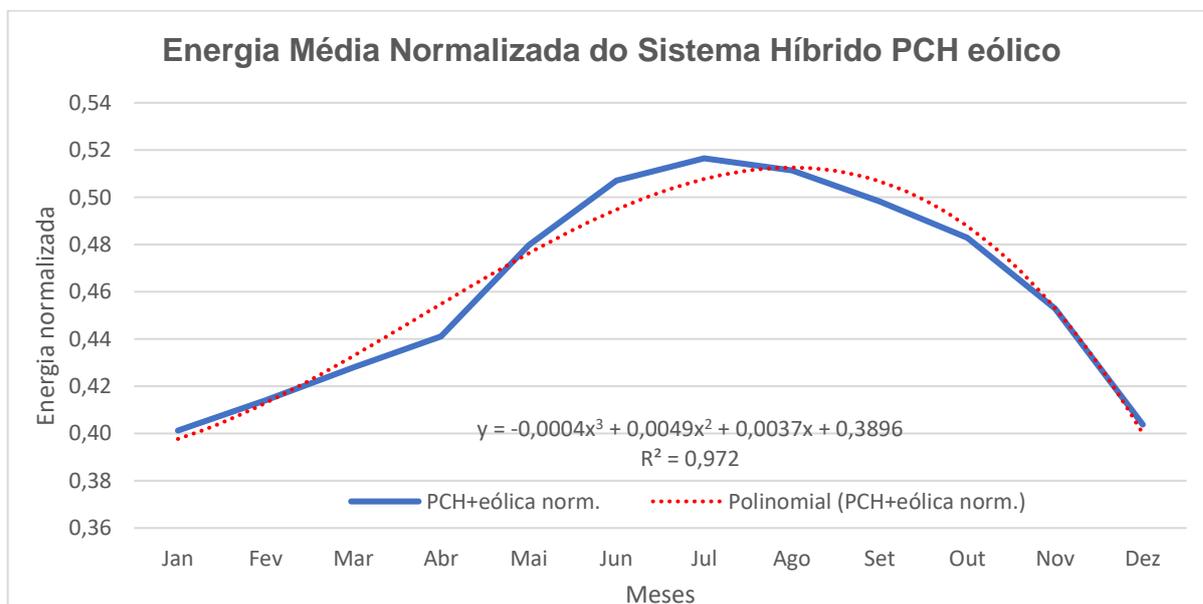
$Y_{PCHsolar}$  = Energia gerada por mês pelo sistema híbrido;

$C_{PCHSolar}$  = Coeficiente de relação entre PCH e solar [0,974].

#### 4.7.2 Normalização do sistema híbrido PCH eólica

Para realizar previsões da energia gerada de cada mês do sistema híbrido PCH-eólico, realizou-se a normalização da energia gerada de cada usina eólica de forma separada e posteriormente a média de cada mês. O resultado obtido somou-se com os dados apresentados na figura 28, assim obtendo o sistema híbrido PCH eólico normalizado para o estado, representado na figura 30.

Figura 30: Energia elétrica normalizada do sistema híbrido PCH eólico do estado.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

A equação que melhor representa o comportamento da sazonalidade é a equação polinomial de terceira ordem, sendo comprovada a escolha através do  $R^2$ , que representa o quão próximo os dados normalizados estão da linha de tendência, neste caso a aproximação é de 97,2%. Os resultados da geração mensal obtido pela equação 14 respeita a proporção de 72,9% PCH e 27,1% eólica.

$$Y_{PCH\text{Eolico}} = -0,0004x^3 + 0,0049x^2 + 0,0037x + 0,3896 \quad (14)$$

$Y_{PCH\text{Eolico}}$  = Energia gerada por mês pelo sistema híbrido;

$x$  = Mês do período analisado.

Para estimar a energia gerada a partir da potência da PCH é necessário fazer o acréscimo da variável ( $C_{PCH\text{Eolico}}$ ), que representa a relação de potência entre a PCH e a usina eólica, a variável ( $P_{PCH}$ ) que é a potência da PCH a ser analisada. Estas variáveis são acrescentadas no resultado obtido pela equação 14, assim obtendo a equação 15.

$$SH_{PCH\text{Eolico}} = P_{PCH}Y_{PCH\text{Eolico}}C_{PCH\text{Eolico}} \quad (15)$$

$SH_{PCH\text{Eolico}}$  = Energia gerada pelo sistema híbrido PCH solar [GWh];

$P_{PCH}$  = Potência da PCH a ser analisada [MW];

$Y_{PCH\text{Eolico}}$  = Energia gerada por mês pelo sistema híbrido;

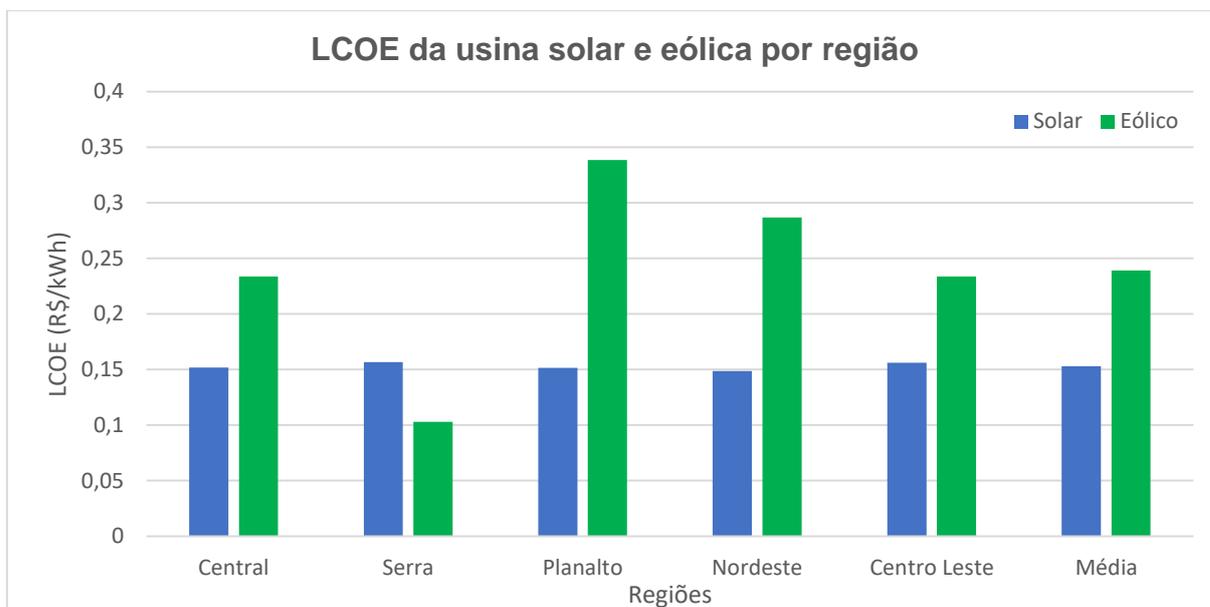
$C_{PCH\text{Eolico}}$  = Coeficiente de relação entre PCH e solar [0,889].

#### 4.7.3 Análise do custo por kWh para o estado

Como o LCOE foi realizado para todas as regiões analisadas, é possível estabelecer o custo médio por kWh gerado pelas usinas solar e eólica para o estado do Rio Grande do Sul. O custo de cada região e a média está representado na figura 31, o LCOE da usina solar apresentou a menor variação e o menor custo por kWh gerada em quatro regiões analisadas, somente na região da serra a usina eólica apresentou o LCOE menor que a Solar.

A usina eólica apresentou o menor LCOE na região da serra devido as condições climáticas, onde se observou-se que nesta região a velocidade do vento é maior que as demais regiões analisadas, reduzindo a quantidade de aerogeradores instalados e consequentemente reduz o custo de instalação e operação da usina.

Figura 31: Custo por kWh das usinas solar e eólica por região, e média do estado.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

A partir das regiões analisadas, a usina solar apresentou na média o menor custo por kWh gerado para o estado, já a usina eólica apresentou na média um custo de 56,4% maior por kWh gerado quando comparado com a usina solar. O custo maior de geração é causado pela baixa velocidade do vento e por utilizar um único modelo de aerogerador para realizar as análises, sendo que, em algumas regiões poderia ser utilizado aerogerador com diferentes potências para atender o consumo da carga. Assim, a energia gerada pela usina eólica fica próxima da energia necessária para que o sistema híbrido atenda a carga e diminuindo o valor do LCOE.

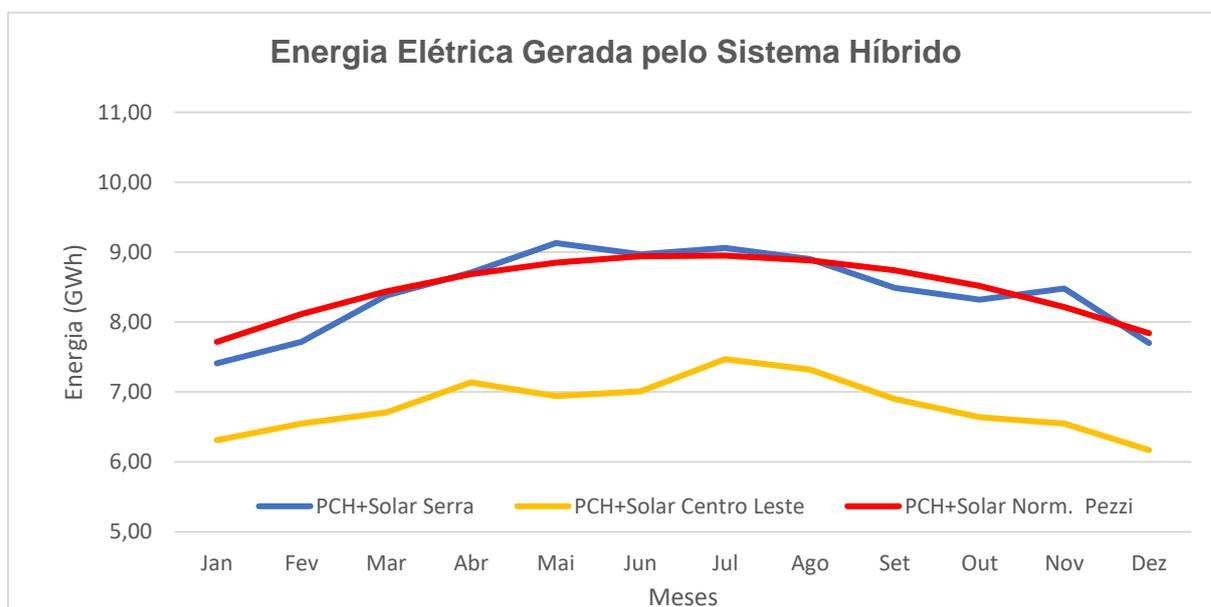
#### 4.7.4 Simulação para estimar a geração de uma PCH

Para verificar se as equações obtidas, para comprovar que os dados normalizados possuem uma relação válida com os sistemas já analisados, foi realizada a estimativa da energia gerada a partir da potência da PCH. Para isso, utilizou-se a PCH Pezzi, localizada na região da serra com potência instalada de 19,00 MW, entre os municípios de Bom Jesus e Jaquirana, no Rio das Antas.

Com a PCH a ser analisada já definida, estimou-se a energia gerada pelo sistema híbrido PCH-solar através da equação 13, onde os valores estão representados na figura 32 e a energia gerada pelo sistema híbrido da serra e centro leste, pois a

potência instalada é próxima entre as PCHs.

Figura 32: Energia elétrica estimada pelo sistema híbrido PCH solar normalizado e comparando com o sistema já analisado.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

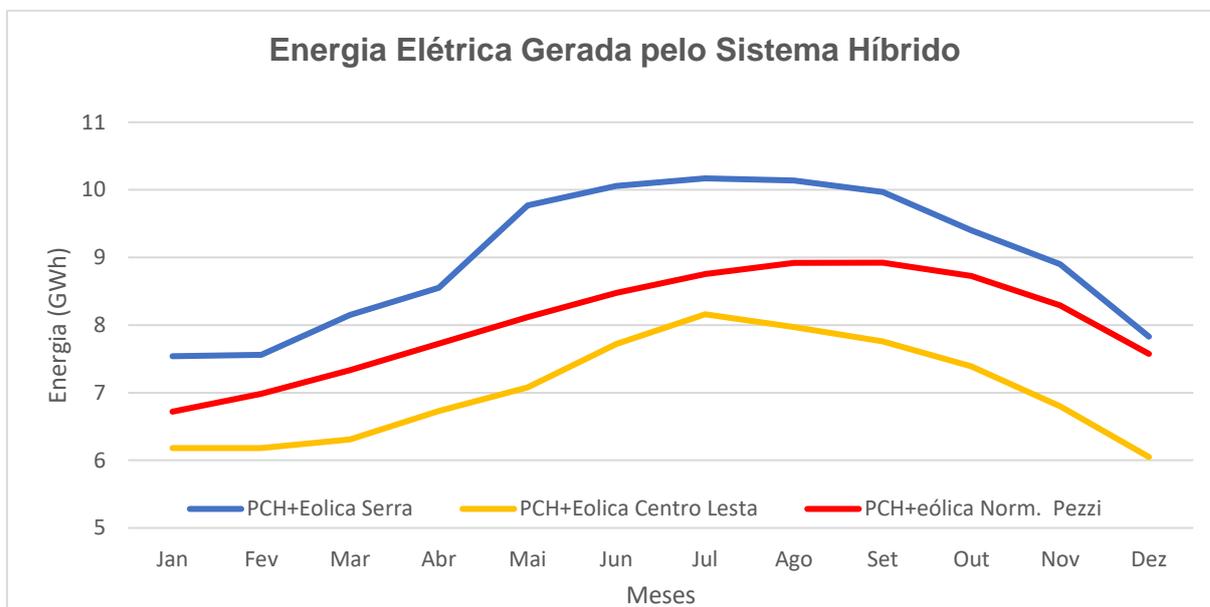
A partir dos valores apresentados na figura 32, pode-se observar que a equação obtida através da normalização dos dados das usinas, consegue-se reproduzir o comportamento do sistema híbrido PCH solar para o estado, onde ocorre o aumento da geração entre os meses de janeiro a julho e posteriormente a diminuição da geração. Este comportamento também ocorre para nos sistemas das regiões da serra e centro leste.

Na representação do sistema híbrido da PCH Pezzi não apresenta oscilações na geração, como ocorre nas análises das regiões, pois a normalização cria uma linha de tendência que reduz a atenuação da sazonalidade. Para este sistema híbrido, a região Centro Leste possui menor geração que as demais regiões, assim a estimativa da energia gerada a partir da PCH em análise tende a ficar mais próxima da região da serra, que pode ser observado neste caso na figura 32.

Na estimativa do sistema híbrido PCH-eólico utilizou-se a equação 15, na variável  $P_{PCH}$  utilizou-se a potência de 19,00 MW referente a potência da PCH Pezzi. Os valores da energia estimada para este sistema são apresentados na figura 33, juntamente com os valores gerado pelo mesmo sistema das regiões da serra e centro

leste para comparações.

Figura 33: Energia elétrica estimada pelo sistema híbrido PCH eólico normalizado e comparando com o sistema já analisado.



Fonte: (O AUTOR, 2022)

Observa-se a partir dos dados apresentados na figura 33, que a equação normalizada da geração reproduz o comportamento do sistema híbrido para o estado, quando comparando com os sistemas híbrido das regiões. Nos meses de janeiro a julho ocorre o aumento na geração de forma mais acentuada, pois as duas usinas possuem aumento na geração neste período.

Nos meses de julho a setembro a PCH diminui a geração, mas na média entre as regiões a eólica atinge o máximo de geração em setembro, assim ocorre uma estabilidade na geração pois as duas se complementam e depois de setembro a eólica começa a diminuir a geração, apresentando queda na geração do sistema híbrido. Todos esses fatores são causados pela sazonalidade das fontes.

No sistema híbrido PCH-eólico da serra apresenta a maior geração de energia e o centro leste a menor geração, assim o comportamento do sistema para o estado fica entre a geração dessas regiões. Este comportamento pode ser observado na figura 32, simulado para PCH Pezzi.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho, verificou-se que através dos sistemas híbridos consegue-se diminuir a sazonalidade de uma única usina PCH, pois a geração está diretamente relacionada com a sazonalidade da fonte e as condições climáticas do local onde estão instaladas. O sistema híbrido PCH-solar apresentou os resultados mais satisfatórios de complementariedade para o estado do Rio Grande do Sul, pois as usinas possuem o comportamento de geração opostos, isto é, quando uma está aumentando a sua geração a outra está diminuindo.

O sistema híbrido PCH-solar apresentou a menor variação na geração, resultando numa variação de 17,8% na região Nordeste. Na média, a variação foi de 9,2% maior para o sistema híbrido PCH eólico. Quando analisado a geração de energia elétrica durante um ano, entre o sistema híbrido e as usinas isoladas, observa-se uma redução significativa na variação, comprovando que os sistemas híbridos apresentam maior confiabilidade na geração de energia elétrica, principalmente voltada aos contratos flat do mercado livre.

A usina solar apresentou o menor custo por kWh gerado em quatro regiões analisadas, somente na região da serra a usina eólica apresentou o menor custo. Na região da serra a velocidade do vento é maior em comparação as demais regiões, assim necessita um número menor de aerogeradores para atender a carga. Um fator que influenciou no custo maior do LCOE da usina eólica é a utilização de um único modelo de aerogerador, sendo que em algumas regiões poderia ser utilizado dois modelos de aerogeradores com potência diferentes para atender de maneira mais eficaz a carga. Outro fator de principal influência é o custo do Capex e Opex da usina eólica, sendo de 30,8% o Capex e de 119,7% o Opex, maiores que o custo da usina solar.

Para o estado do Rio Grande do Sul, a usina solar apresenta um LCOE médio de 0,153 R\$/kWh e a usina eólica tem um custo médio de 0,239 R\$/kWh. A partir dos dados normalizados do sistema híbrido PCH-solar apresentou uma variação média na geração 19,1% e de 28,7% a no sistema híbrido PCH-eólica. A menor variação do sistema PCH solar é devido que a sazonalidade da geração da usina solar é invertida da geração da PCH, ou seja, quando uma usina aumenta sua geração a outra diminui, devido as condições climáticas do estado. Já o sistema híbrido PCH-eólica foi maior devido que o período de menor e maior geração das usinas ocorrem em períodos

diferentes. Pode-se concluir que a usina solar é a opção mais indicada para fazer a complementariedade com a energia gerada pela PCH no Rio Grande do Sul.

### 5.1 RECOMENDAÇÕES E ESTUDOS FUTUROS

Como este trabalho foi limitado as análises de complementariedade entre os dois sistemas híbridos e uma análise prévia do custo de geração e a normalização dos sistemas híbridos, sugere-se que em estudos futuros sejam realizados a partir das equações de normalização, com detalhamento para entender a contribuição de cada usina na equação, a relação com os dados da fonte e a estimativa de geração com diferentes proporções de contribuição entre as usinas do sistema híbrido.

Analisar o *payback* dos sistemas híbridos, sem controle e com controle na geração. Na geração sem controle, toda energia gerada é entregue a rede, já na geração controlada é verificado o custo de geração por usina e despachando a usina com menor custo de geração para atender a carga e avaliar o custo de operação dos dois modos de geração.

Outra sugestão é analisar outras configurações de sistemas híbridos para o estado do Rio Grande do Sul, levando em consideração as fontes renováveis disponíveis para a localidade e posteriormente o comportamento destes sistemas para o estado de forma geral. Podendo ser utilizados outros tipos de fontes como base do estudo, como as usinas eólicas que vem apresentando grande crescimento no estado.

Por fim sugere-se desenvolver as mesmas análises deste trabalho para as 53 PCHs do estado, para a usina eólica realizar o dimensionamento utilizando modelos de aerogeradores menores ou mais de um modelo, para verificar o impacto sobre o LCOE e realizar análises estatísticas.

### 5.2 PUBLICAÇÃO DE ARTIGO EM CONGRESSO

A partir dos resultados obtidos no TCC I, este trabalho foi apresentado em forma de um artigo no IX Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS 2022, realizado em Florianópolis – SC no período de 23 a 27 de maio de 2022. O artigo apresentando tem o seguinte título: **DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DA VIABILIDADE ENERGETICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO PCH-SOLAR NO RIO GRANDE DO SUL.**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Assessoria institucional da diretoria**: Consulta pública para regulamentar usinas híbridas entra em segunda fase. Disponível em: <https://bit.ly/3ma18Tk>. Acesso em 18 ago. 2021

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Sistema de informação de geração da ANEEL SIGA.SCG - Superintendência de Concessões de Geração, 2021**. Disponível em: <https://bit.ly/2IGf4Q0>. Acesso em 1 ago. 2021

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução normativa Nº 875, DE 10 DE MARÇO DE 2020**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-n-875-de-10-de-marco-de-2020-248070610>. Acesso em: 03 out. 2021.

ARAÚJO, Ana Paula C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. 2017. 42 f. TCC (Graduação) - Engenharia Química. Universidade Federal de Uerlândia. 2017

ARAÚJO, Maria Isabel do Bú; JÚNIOR, Adalício Uzêda Antunes; LIMA, Fernanda Siqueira; NETO, José Mariano da Silva. **Dimensionamento de Biodigestores Indiano para a cidade de Campina Grande**. p. 1059-1068. In: Anais do V Encontro Regional de Química & IV Encontro Nacional de Química [=Blucher Chemistry Proceedings]. São Paulo: Blucher, 2015. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/dimensionamento-de-biodigestores-indiano-para-a-cidade-de-campina-grande-22164>. Acesso em 20 ago. 2021

BUBLITZ, Juliana. Apagão e racionamento de energia: quais são os impactos da crise hídrica no país e no RS. GauchaZH, 18 jun. 2021. Economia. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/noticia/2021/06/apagao-e-acionamento-de-energia-quais-sao-os-impactos-da-crise-hidrica-no-pais-e-no-rs-ckq2vswsm002v01803th8kx4i.html>. Acesso em: 06 set. 2021.

CANEPPELE, Fernando de Lina. **Desenvolvimento de um modelo Fussy para otimização da energia gerada por um sistema híbrido (solar fotovoltaico e eólico)**. 2007. Trabalho de Conclusão de curso (Mestrado em Ciências Agrônomicas). Universidade Estadual Paulista " Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2007. p. 117. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90712/caneppele\\_fl\\_me\\_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90712/caneppele_fl_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 17 out. 2021.

CLEMENTE, Leonardo. **Seleção da potência instalada ótima de PCHs no contexto de mercados competitivos**. Trabalho de Conclusão de curso ( Mestrado em Engenharia Hidráulica). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2001. p. 295. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876412/Dissertacao\\_Leonardo\\_Clemente.pdf/d346ca52-1034-4b5e-8798-bba9412c3807](https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876412/Dissertacao_Leonardo_Clemente.pdf/d346ca52-1034-4b5e-8798-bba9412c3807). Acesso em: 12 ago. 2021.

COELHO, Suani Teixeira. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo : Synergia, 2018.

DEGANUTTI, Roberto, et al. **Biogestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. São Paulo, Bauru. p. 5. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores\\_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf). Acesso em: 20 out. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Resenha mensal do mercado de energia elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-624/resenha-maio.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **BEN Relatório Síntese 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 03 out. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR\\_RecursosEnergeticos%202050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR_RecursosEnergeticos%202050.pdf). Acesso em: 04 out. 2021.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER - FEPAM. **Institucional**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/institucional/regionais.asp#>. Acesso em 30 out. 2021.

GARCIA, Lenin Domingues. **Sistema híbrido gerador de energia elétrica para sustentação de estação de bombeamento**. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Hidráulica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2018. p. 85. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/197710/001095355.pdf?sequence=1>. Acesso em 17 out. 2021.

GASPAR, Rita M. B. Lene. **Utilização de biogestores em pequenas e médias propriedades rurais, com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na Região de Toledo-PR**. Trabalho de Conclusão de curso (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. p. 119. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/85585>. Acesso em: 6 out. 2021.

JÚNIOR, José M. de A. Wendling. **Análise de Viabilidades Técnica e Econômica de Sistema Híbrido aplicado a Setor Sucroalcooleiro: uso de Biogás de Vinhaça e Energia Fotovoltaica**. Trabalho de Conclusão de curso (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Guaratinguetá. 2020. p. 83. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/192005>. Acesso em: 6 out. 2021.

KAREKEZI, Stephen, LATA, Kusum, COELHO, Suani Teixeira. **Traditional Biomass Energy Improving its Use and Moving to Modern Energy Use.** Secretariat of the International Conference for Renewable Energies,, 2004. p. 60.

LAZARD. **Lazard's levelized cost of energy analysis-version 14.00.** 2020. p.21. Disponível em: <https://www.lazard.com/media/451419/lazards-levelized-cost-of-energy-version-140.pdf>. Acesso em 9 out. 2021.

MAGALHÃES, Agenor P. T. **Biogás: um projeto de saneamento urbano.** São Paulo : Nobel, 1986. p. 120.

MIRANDA, Arthur B. C. M. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede.** Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014. p. 98. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010504.pdf>. Acesso em: 9 out. 2021.

MOREIRA, José Roberto Simões. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.** v.2. Rio de Janeiro : LTC, 2021. p. 481.

NETO, Manuel A. R. B.; CARVALHO, Paulo. **Geração de Energia Elétrica – Fundamentos.** v.1. Saraiva, 2021.

OLIVER, André de P. M. **Manual de treinamento em biodigestão.** v. 2. Salvador. Instituto Winrock, 2008.

PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos Solução Energéticas para a Amazônia.** Ministério de Minas e energia. 2008.

PINTO, Agostinho P. F. **Projecto e Operação de Parques Eólicos com Exedente de Potência Instalada.** Trabalho de Conclusão de curso (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade do Porto. 2001. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11447/2/Texto%20integral.pdf>. Acesso em: 20 set. 2021.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de Energia Eólica.** Rio de janeiro : LTC, 2013.

REIS, Lineu Belico. **Geração de Energia Elétrica.** v 3. Baueri : Manole, 2017.

RODRIGUES, Robson. **União faz a força: Projetos híbridos crescem no Brasil.** *Canal Energia.* Disponível em: <http://www.apine.com.br/site/archives/Noticias/25.06%20-%20Reportagem%20especial%20-%20Uni%C3%A3o%20faz%20a%20for%C3%A7a%20-%20projetos%20h%C3%ADbridos%20crescem%20no%20Brasil%20-%20CanalEnergia.pdf>. Acesso em: 22 set. 2021

ROSA, Luiz Pinguelli. **Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear.** 2007. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ea/a/4LQNgbc9vfRTqRFgtVsyK5Q/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 28 set. 2021

SCHUBERT, Camargo. **Atlas eólico: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre : Optagraf, 2014.

SIAS, Estael. **Ou chove ou vai faltar luz**. METSUL Meteorologia. Disponível em: <https://metsul.com/ou-chove-ou-vai-faltar-luz/#:~:text=Ou%20chove%2C%20onde%20precisa%2C%20ou%20vai%20faltar%20luz.&text=As%20perspectivas%20de%20curto%20e,energia%20dispon%C3%ADvel%20crescentemente%20no%20limite>. Acesso em: 09 set. 2021.

SILVA, Fabricyo V. V.; JÚNIOR, Claudemiro de Lima. **Estudo da complementariedade dos recursos hídrico e eólico na região vale do submédio São Francisco**. Trabalho de Conclusão de curso (Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade de Pernambuco. 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.11137/2020\\_4\\_451\\_459](https://doi.org/10.11137/2020_4_451_459). Acesso em: 15 out. 2021.

SILVA, Lúcia Maria Rosa. **Dimencionamento de sistema híbrido de energias renováveis para geração de energia elétrica em estação elevatória de esgoto**. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/179914>. Acesso em: 15 out. 2021.

SILVA, Silvio Silvério. **Biofuels in Brazil: fundamental aspects, recent developments, and future perspectives**. ANUJ KUMAR CHANDEL. s.l. : Springer, 2014. p. 435.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro : Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

UNICA SOLAR, Leading in technology. Disponível em: <http://www.ulicasolar.com/pro1.asp?webmu=1>. Acesso em: 10 ago. 2021.

VIAN, Ângelo. **Energia Eólica Fundamentos Tecnológicos e Aplicações**. São Paulo : Blucher, 2021. p. 147.

VIGNA, RAFAEL. 2021. **Onze de 15 hidrelétricas no RS estão com geração abaixo do programado**. Gaúcha ZH, 05 set. 2021. Economia. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/noticia/2021/09/onze-de-15-hidreletricas-no-rs-estao-com-geracao-abaixo-do-programado-ckt7u587b005m0193leqa3yd5.html>. Acesso em: 20 out. 2021.

WEG, Aerogeradores - AGW 147 / 4.2. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Aerogeradores/Aerogeradores--AGW147-4-2/Aerogeradores---AGW147-4-2/p/MKT\\_WEN\\_WIND\\_AGW147](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Aerogeradores/Aerogeradores--AGW147-4-2/Aerogeradores---AGW147-4-2/p/MKT_WEN_WIND_AGW147). Acesso em: 18 out. 2021.

WEIGERT, Gabriela Rosalee. **Produção híbrida de energia: estudo do aumento do fator de capacidade de usina hidrelétrica através de sistemas fotovoltaicos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em:

<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11889>. Acesso em: 8 out. 2021.

WEREKO-BROBBY, CHARLES Y.; HAGEN, ESSEL B. **Biomass conversion and technology.** New York : John Wiley & Sons, 2000.

ZANONI, Naubert. **Análise da viabilidade da implantação de um sistema híbrido para geração de energia elétrica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/11338/3827>. Acesso em: 8 set. 2021.

## ANEXO I – DADOS DO PAINEL UL-550M-144HV, INFORMADOS PELO FABRICANTE ULICA SOLAR (2021)

### MONO UL-540 | 545 | 550M-144HV



#### ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical Parameters Standard Test Conditions

Module Type		UL-540M-144HV	UL-545M-144HV	UL-550M-144HV	
Power Output	P <sub>max</sub>	W	540	545	550
Power Tolerance	ΔP <sub>max</sub>	W		0/+5W	
Module Efficiency	η <sub>m</sub>	%	20,84	21,09	21,28
Voltage at P <sub>max</sub>	V <sub>m</sub>	V	41,7	41,8	41,9
Current at P <sub>max</sub>	I <sub>m</sub>	A	12,95	13,04	13,13
Open-Circuit Voltage	V <sub>oc</sub>	V	49,8	49,9	50,0
Short-Circuit Current	I <sub>sc</sub>	A	13,60	13,65	13,75

STC:1000w/m<sup>2</sup> irradiance,25C module temperature,AM1.5

#### THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal Operating Cell Temperature	NOCT	°C	43±2
Temperature Coefficient of P <sub>max</sub>	γ	%/°C	-0.360
Temperature Coefficient of V <sub>oc</sub>	β <sub>voc</sub>	%/°C	-0.290
Temperature Coefficient of I <sub>sc</sub>	α <sub>isc</sub>	%/°C	+0.049

#### OPERATING CONDITIONS

Max.System Voltage	DC1500V
Max.Series Fuse Rating	25A
Operating Temperature Range	-40°C~85°C
Max static snow load	5400Pa
Max static wind load	3800Pa
Application Class	A

#### CONSTRUCTION MATERIALS

Front Cover(material/type/thickness)	low-iron tempered glass/3.2mm
Cell(quantity/material/type/dimension)	144/monocrystalline/182X91mm
Encapsulant(material)	ethylene vinyl acetate(EVA)
Frame(material/anodization color)	anodized aluminum alloy/silver or black
Junction Box(protection degree)	IP68
Cable(length/cross-sectional area)	400mm(or Customized Length)/4mm <sup>2</sup>
Plug Connector	MC4 compatible

#### GENERAL CHARACTERISTICS

Dimension(L/W/H)	2279/1134/35mm
Weight	28.3kg

#### PACKING CONFIGURATION

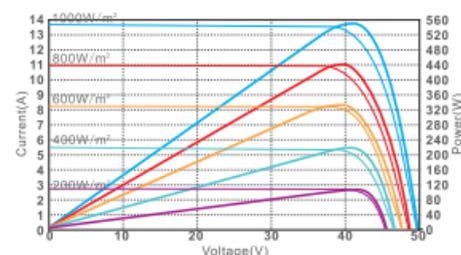
Pallet Size(L/W/H)	2325/1120/2550mm
Pallet Weight	1887kg
Pieces per Pallet	62pcs
Pieces per Container	620pcs

#### INTERNATIONAL CERTIFICATES

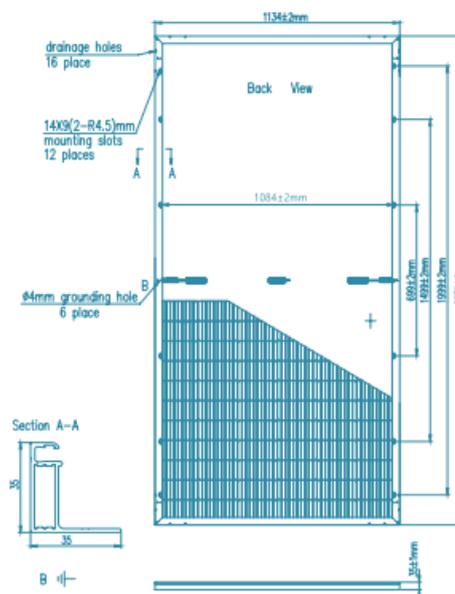
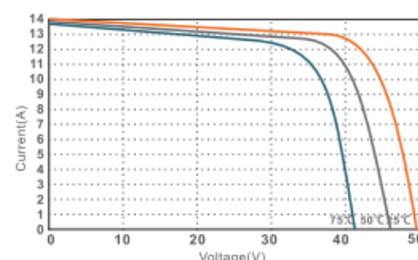
IEC 61215, IEC 61730  
 ISO 9001: 2015(Quality management systems)  
 ISO 14001: 2015 (Environmental management systems)  
 OHSAS 18001: 2015 (Occupational health and safety)

#### I-V CURVE

I-V characteristics at different irradiances



I-V characteristics at different temperature



Please read the instruction entirely before handling, installing and operating Ulica Solar modules.

Due to continuous research and development, the specification is subject to change without prior notice.

## ANEXO II – DADOS DO AEROGERADOR AGW 147/4.2, INFORMADO PELO FABRICANTE WEG (2021)

### Aerogeradores com Acoplamento Direto e Ímãs Permanentes

#### Dados Operacionais

Modelo	AGW 147 / 4.2
Potência nominal	4.200 kW
Classe de vento (IEC)	S ( $V_{m1} = 9,0 \text{ m/s} / I_{m1} = 0,14 / V_{m3} = 52,5 \text{ m/s}$ )

#### Rotor

Diâmetro	147 m
Área varrida	16.972 m <sup>2</sup>
Controle de potência	Velocidade variável com controle de passo por acionamento elétrico (independente por pá)

#### Gerador

Tipo	Síncrono de ímãs permanentes
Acoplamento mecânico	Direto (sem caixa de engrenagem)
Conexão à rede	Conversor de potência plena
Resfriamento	Fluido térmico
Impregnação do estator	VPI (Vacuum Pressure Impregnation)

#### Conversor

Tipo	Conversor de potência plena, tipo 4 (IEEE)
Frequência	50 Hz ou 60 Hz
Fator de potência <sup>1)</sup>	0,95 IND - 0,95 CAP
Resfriamento	Fluido térmico

#### Nacelo

Sistema de posicionamento	Ativo, acionado por motorreduzidores elétricos
Freio principal	Aerodinâmico
Freio secundário	Eletromecânico
Freio auxiliar	Pino trava eletromecânico
Ventilação	Aberta (padrão), para atmosfera comum Fechada (opcional), para atmosfera marítima

#### Transformador

Tensão de saída	33 kV ou 34,5 kV
Resfriamento	Ar, passivo

#### Torre

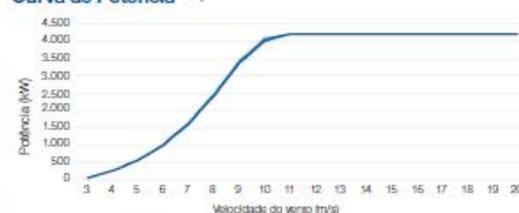
Altura do cubo	125 m
Construção	Tubular cônica em concreto
Acesso à nacelo	Escada e elevador de serviço (opcional)

#### Informações Adicionais

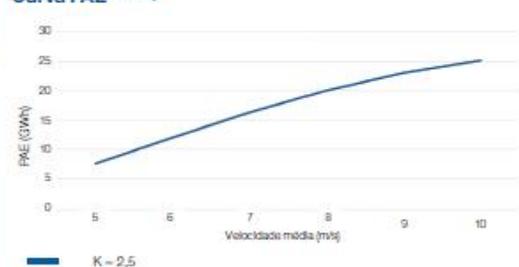
Vida útil de projeto <sup>2)</sup>	20 anos
Sistema de controle	CLP programável e UPP
Sistema SCADA	Wind Power SCADA
Proteção contra descargas atmosféricas	Integrada nas pás, rotor e torre, em conformidade com a IEC 61400-24
Códigos de rede	Em conformidade com os Procedimentos de Rede, submódulo 3.6, do ONS, versão 2017
Opcional	50/60 Hz, ambiente marítimo, proteção contra poeira, baixas temperaturas, sinalização aérea (pintura e iluminação), faixa estendida de fator de potência, sistema de monitoramento contínuo (CMS)

Notas: 1) Fator de potência definido nos terminais de baixa tensão do transformador elevador do próprio aerogerador.  
2) Prazos de vida útil de projeto superior a 20 anos sob consulta.

#### Curva de Potência A,B)



#### Curva PAE A,B,C,D)



Notas: A) Aerogeradores com 100% de disponibilidade e 0% de perdas.  
B) Fator de forma Weibull,  $k = 2,5$ .  
C) Densidade do ar padrão,  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ .  
D) Velocidade média anual na altura de cubo.



Grupo WEG - Unidade Energia  
Jaraguá do Sul - SC - Brasil  
Telefone: (47) 3276-4000  
[energia@weg.net](mailto:energia@weg.net)  
[www.weg.net](http://www.weg.net)  
[www.youtube.com/wegvideos](http://www.youtube.com/wegvideos)  
[@weg\\_wr](https://www.instagram.com/weg_wr)



## APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA CONSULTA DOS DADOS DO POTENCIAL ENERGÉTICO E SAZONALIDADE

Para a obtenção dos dados de vazão do rio foi acessado o site <http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/serieHistorica.aspx>, na página é apresentado cinco caixas de seleção, na caixa de seleção do **Estado** foi selecionado a opção *RS*. Na caixa de seleção **Origens** marcou-se a opção *3 - Setor Elétrico*, na caixa de seleção **Bacias e Sub-bacias** foi selecionado a opção *0 - <todos>*, e na caixa **Estações** escolheu-se a PCH de cada região e posteriormente o período dos dados de 01/01/2016 a 31/12/2021.

Os dados de radiação solar utilizados no trabalho estão disponíveis no site [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017\\_RS.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017_RS.html). Acessando o site tem a representação do mapa do estado do Rio Grande do Sul dividido em células, sendo que cada célula possui um ID. Para a região central escolheu-se a célula com o ID 1856, na região da serra o ID 1942, região do centro leste o ID 2013, na região nordeste o ID 2839 e para a região do planalto escolheu-se a célula com o ID 2927 que representam a localidade em que a PCH está instalada. Após isso, selecionou-se a Irradiação no Plano Inclinado, que abre uma nova tabela, no campo de busca foi inserido um ID por vez, assim obtendo a radiação de cada região.

Os dados da velocidade do vento estão disponíveis no site <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>, onde os dados estão separados por ano. No trabalho utilizou-se os dados de 2016 a 2021, nem todas as cidades tem estação meteorológica, assim utilizou-se a estação mais próxima da PCH. Para a região Central utilizou-se os dados da estação meteorológica localizada na cidade de Cruz Alta, para a região centro leste utilizou-se os dados da cidade de Teutônia, na região nordeste utilizou-se os dados da cidade de Santo Augusto, para a região do planalto utilizou-se os dados da cidade de Lagoa Vermelha e para a região da serra utilizou-se os dados meteorológicos da cidade de Serafina Correa.