

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

JONAS LAEDSON MARINHO DA SILVA SANTOS

**Avaliação da Integração de Processos de Geração de Energia Elétrica: Fontes  
Renováveis e Convencionais**

São Paulo

2021

JONAS LAEDSON MARINHO DA SILVA SANTOS

**Avaliação da Integração de Processos de Geração da Energia Elétrica: Fontes  
Renováveis e Convencionais**

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para a  
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração Engenharia Química

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Rita Maria de Brito  
Alves

Co-orientadora: Dra. Alessandra de Carvalho  
Reis

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 12 de agosto de 2021

Assinatura do autor: Jonas Laedson Jr da S Santos

Assinatura do orientador: Roberto de Brito Alves

### Catálogo-na-publicação

Santos, Jonas Laedson Marinho da Silva

Avaliação da Integração de Processos de Geração de Energia Elétrica: Fontes Renováveis e Convencionais / J. L. M. S. Santos -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

93 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Energia 2.Sustentabilidade 3.Integração Energética 4.Fontes Renováveis I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

Nome: SANTOS, Jonas Laedson Marinho da Silva

Título: Avaliação da Integração de Processos de Geração da Energia Elétrica: Fontes Renováveis e Convencionais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em Ciências. Área de concentração Engenharia Química.

Aprovado em 22 de junho de 2021

#### BANCA EXAMINADORA

Profª. Drª.:	Rita Maria de Brito Alves
Instituição:	Escola Politécnica – USP
Julgamento:	<u>APROVADO</u>

Dr.:	Douglas Castillo Mariani
Instituição:	Soteica do Brasil
Julgamento:	<u>APROVADO</u>

Dr.:	José Antônio Rossi
Instituição:	Hytron Tecnologia
Julgamento:	<u>APROVADO</u>

*Dedico este trabalho a DEUS, aos meus pais, LAELSON DA SILVA SANTOS e MARGARET MARINHO DA SILVA SANTOS, a minha avó materna, MARIA MARINETE MARINHO e a minha esposa SABRINA COSTA SILVA, por todo amor, esforço, e apoio em cada momento de minha vida*

## AGRADECIMENTOS

A Deus que traçou desde a eternidade um caminho excelente e me segurou em suas mãos me fazendo caminhar, mesmo quando não tinha mais forças. A Ele seja toda honra, toda glória e todo louvor por todas as conquistas da minha vida!

Aos meus pais, por todo amor, dedicação e por todos os investimentos e sacrifícios feitos com o intuito de me conceder uma educação de qualidade. Algo que jamais poderei pagar.

À minha avó materna, Maria Marinete Marinho, que me apoiou em todos os momentos inclusive nos mais difíceis com muito amor e dedicação me ensinando sempre. Estando a todos os familiares que me apoiaram e participaram do processo de alguma maneira com meus tios, minhas irmãs e meus sogros.

À minha esposa Sabrina Costa por todo amor, companheirismo, apoio, auxílio, motivação e votos que “fique rico logo” durante esta jornada. Houve dias que pensei que não conseguiria, mas sempre acreditou que poderia ir mais além e me trouxe motivação para isso.

Aos amigos que tive o prazer de conhecer durante esses anos, pelo apoio nos estudos e pela alegria que me proporcionaram dentro e fora da universidade.

Por último, porém não menos importante, à minha orientadora, Professora Dra. Rita Maria de Brito Alves, e coorientadores Dra. Alessandra de Carvalho Reis e Dr. Antônio Esio Bresciani pelo apoio, oportunidade de trabalhar em projetos e pela paciência. Vocês fizeram parte da minha formação e serão sempre lembrados.

*“Bendito o Senhor, rocha minha, que  
adestra as minhas mãos para batalha e  
os dedos para a guerra”.*

*Salmos 144.1*

## RESUMO

SANTOS, J. L. M. S. **Avaliação da Integração de Processos de Geração da Energia Elétrica: Fontes Renováveis e Convencionais**. 2021. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

A preocupação com as mudanças climáticas e os efeitos da alta concentração na atmosfera dos gases do efeito estufa tem sido abordada em diversos trabalhos de pesquisa. A queima de combustíveis fósseis resulta diretamente em emissão de óxidos de carbono ( $\text{CO}_x$ ), entre outros. Nesse contexto, as fontes de geração de energia a partir de combustíveis fósseis devem ser evitadas, a fim de cumprir o compromisso de redução de gases poluentes e contribuir com a busca pela sustentabilidade ambiental. Como solução, surgem as fontes de energia renováveis, sendo sua utilização isenta de impactos ambientais. Essas fontes de geração têm como característica benéfica principal a matéria-prima inesgotável e abundante, permitindo sua ampla utilização. Apesar de possuírem vantagens consideráveis, as fontes renováveis possuem algumas desvantagens, sendo as mais graves a intermitência e a baixa previsibilidade destas fontes. Com a tendência crescente em adotar práticas sustentáveis, será mais difícil ajustar as curvas de produção e demanda de energia elétrica devido a intermitência. O trabalho tem como objetivo a análise da integração entre processos de geração de energia a partir de fontes renováveis e convencionais, interligados a possíveis sistemas de armazenamento a fim de adequar demanda e oferta de energia. Foram consideradas duas abordagens: anual e diária. Os resultados apresentados apontam que há uma complementaridade entre as fontes renováveis em ambas as abordagens. Na abordagem anual foi apontado como solução a modificação das quantidades de geração da fonte hídrica ao longo do ano e o armazenamento de volume de água na represa, o que se traduz como altura da cota de água no reservatório. No caso da abordagem diária, foi sugerido utilizar a vazão vertida como método inicial de armazenamento para deslocar parte da energia produzida pela geração hídrica do horário de maior produção das outras fontes de energia para horário de menor geração. Um método secundário utilizado foi um conjunto de baterias de 520 MW de potência e 2500 MWh de capacidade de armazenamento. Por fim, é possível afirmar que existem mecanismos de armazenamento com uma eficiência interessante que podem ser utilizados para ajustar as curvas de consumo e geração de energia a partir de fontes renováveis.

**Palavras-chave:** Fontes renováveis, Geração eólica, Geração solar, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

SANTOS, J. L. M. S. **Evaluation of the Integration of Electricity Generation Processes: Renewable and Conventional Sources.** 2021. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

The concern with climate change and the effects of high concentration in the atmosphere of greenhouse gases have been addressed in several research works. The burning of fossil fuels directly results in the emission of carbon oxides (CO<sub>x</sub>), among others. In this context, sources of energy generation from fossil fuels must be avoided to fulfill the commitment to reduce polluting gases and contribute to the search for environmental sustainability. As a solution, renewable energy sources appear, and their use is exempt from environmental impacts. These sources of generation have as their main beneficial characteristic the inexhaustible and abundant raw material, allowing its wide use. Despite having considerable advantages, renewable sources have some disadvantages, being the most serious the intermittency and low predictability of these sources. With the growing tendency to adopt sustainable practices, it will be more difficult to adjust the production and demand curves of electricity due to intermittency. The work aims to analyze the integration between energy generation processes from renewable and conventional sources, interconnected to possible storage systems to adjust energy demand and supply. Two approaches were considered: annual and daily. The results presented show that there is a complementarity between renewable sources in both approaches. In the annual approach, the modification of the generation quantities of the water source throughout the year and the storage of the volume of water in the dam was pointed out as a solution, which translates as the height of the water level in the reservoir. In the case of the daily approach, it was suggested to use the flow rate as an initial storage method to move part of the energy produced by water generation from the time of greatest production from the other sources of energy to the time of least generation. A secondary method used was a battery pack of 520 MW of power and 2500 MWh of storage capacity. Finally, it is possible to state that there are storage mechanisms with efficiency that can be used to adjust the consumption and energy generation curves from renewable sources.

**Keywords:** Renewable sources, Wind generation, Solar generation, Sustainability

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fluxo energético na matriz energética considerando todos os setores de consumo e produção de energia.....	26
<b>Figura 2.</b> Fontes de geração de energia elétrica nos anos de 2017 a 2020 e total de energia elétrica produzida.....	27
<b>Figura 3.</b> Curva da Carga de consumo de energia elétrica no Brasil ao longo do ano...28	
<b>Figura 4.</b> Fontes de geração de energia elétrica em produção até novembro de 2019...33	
<b>Figura 5.</b> Fontes de geração de energia elétrica em produção até junho de 2021.....	34
<b>Figura 6.</b> Comparativo do fator de capacidade do Brasil com os demais países.....	36
<b>Figura 7.</b> Evolução da Exportação de energia eólica para o SIN.....	36
<b>Figura 8.</b> Composição de aerogeradores.....	37
<b>Figura 9.</b> Diagrama de ação das grandezas relacionadas ao movimento das pás.....	38
<b>Figura 10.</b> Potencial eólico brasileiro.....	39
<b>Figura 11.</b> Geração eólica do SIN nos anos de 2016 a 2018 em periodicidade mensal e fator de capacidade médio a cada mês.....	39
<b>Figura 12.</b> Geração eólica média horária no SIN nos últimos 6 meses de 2018.....	40
<b>Figura 13.</b> Complementariedade entre hidrelétrica e eólica em 2017.....	40
<b>Figura 14.</b> Crescimento da geração fotovoltaica no SIN.....	42
<b>Figura 15.</b> Irradiação solar ao longo do Brasil em $Wh/m^2 dia$ .....	43
<b>Figura 16.</b> Geração de energia por fonte fotovoltaica em $MW_{médio}$ de 2016 a 2018.....	44
<b>Figura 17.</b> Geração de energia por fonte fotovoltaica em $MW_{médio}$ em dezembro de 2017 a maio de 2018.....	44
<b>Figura 18.</b> Composição de módulos fotovoltaicos.....	45
<b>Figura 19.</b> Utilidades das tecnologias de armazenamento de energia e respectiva definição.....	47
<b>Figura 20.</b> Esquema de um sistema de volante inercial.....	56
<b>Figura 21.</b> Esquema do tipo de abordagem de integração das fontes renováveis e convencionais.....	60
<b>Figura 22.</b> Algoritmo de resolução do problema entre consumo e geração na abordagem anual.....	64
<b>Figura 23.</b> Algoritmo de resolução do problema entre consumo e geração na abordagem diária.....	70

<b>Figura 24.</b> Geração de energia elétrica pela usina de Sobradinho em GWh.....	72
<b>Figura 25.</b> Geração de energia elétrica a partir de fonte solar e eólica em GWh.....	73
<b>Figura 26.</b> Geração de energia elétrica a partir de fonte eólica, solar e hidrelétrica em GWh. ....	74
<b>Figura 27.</b> Geração e consumo em GWh do sistema apresentado.....	75
<b>Figura 28.</b> Geração hídrica real e proposta para solucionar o problema de armazenamento.....	76
<b>Figura 29.</b> Cota de altura real e proposta para o reservatório de Sobradinho.....	78
<b>Figura 30.</b> Geração de energia hidrelétrica em Sobradinho em função horária.....	79
<b>Figura 31.</b> 5% do consumo de energia da região Nordeste do Brasil.....	79
<b>Figura 32.</b> Geração de energia Solar fotovoltaica ao longo do dia através do mês.....	80
<b>Figura 33.</b> Geração de energia Eólica ao longo do dia através do mês.....	81
<b>Figura 34.</b> Integração entre as fontes de energia (Geração) e consumo ao longo do dia nos meses.....	82
<b>Figura 35.</b> Resultado da otimização utilizando a variação da geração de energia hidrelétrica.....	83
<b>Figura 36.</b> Resultado da otimização utilizando a variação da geração de energia hidrelétrica.....	84
<b>Figura 37.</b> Armazenamento de energia através de baterias ao longo do dia em diferentes meses.....	85
<b>Figura 38.</b> Potência de armazenamento através de baterias ao longo do dia em diferentes meses.....	86

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Leilões de Energias Renováveis em $MW_{\text{médio}}$ através dos anos.....	33
<b>Tabela 2.</b> Os 10 maiores países com geração solar fotovoltaica.....	41
<b>Tabela 3.</b> Empreendimentos de fontes de energia solar fotovoltaica.....	41
<b>Tabela 4.</b> Classificação das tecnologias de armazenamento.....	48
<b>Tabela 5.</b> Vantagens e desvantagens dos principais tipos de baterias estacionárias. ....	49
<b>Tabela 6.</b> Dados do consumo de energia elétrica no Brasil e na região Nordeste em GWh.....	61
<b>Tabela 7.</b> Dados de geração da usina de Sobradinho (BA) em GWh.....	62
<b>Tabela 8.</b> Dados considerados para a geração eólica.....	63
<b>Tabela 9.</b> Dados de coeficiente aerodinâmico, velocidade do vento e horas de sol pico em Sobradinho.....	63
<b>Tabela 10.</b> Dados de consumo de energia elétrica do Nordeste conservando a mesma fração de 5%.....	65
<b>Tabela 11.</b> Dados do potencial solar (HSP) em Sobradinho durante o dia.....	66
<b>Tabela 12.</b> Dados do potencial eólico ( $v$ ) em Sobradinho durante o dia.....	67
<b>Tabela 13.</b> Geração de energia elétrica real na usina hidrelétrica em Sobradinho durante o dia.....	68
<b>Tabela 14.</b> Geração de energia elétrica proposta na usina hidrelétrica em Sobradinho durante o dia.....	69
<b>Tabela 15.</b> Balanço energético com consumo e geração.....	74
<b>Tabela 16.</b> Proposta de geração hídrica para equilíbrio de consumo e geração anual....	76
<b>Tabela 17.</b> Níveis reais e propostos para o reservatório da hidrelétrica ao longo do ano.....	77

## NOMENCLATURA

A	Área varrida pelo aerogerador
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
AEAC	Armazenamento de Energia a Ar Comprimido
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
C	Capacitância
$C_{aer}$	Coefficiente aerodinâmico do aerogerador
CCEE	Câmara de Comércio de Energia Elétrica
$Cons_{i,j}$	Consumo no horário $i$ no mês $j$
CVaR	Condition Value at Risk
E	Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
$\eta_{ag}$	Eficiência do aerogerador
$\eta_s$	Eficiência do gerador solar fotovoltaico
$G_{i,j}^{eólica}$	Geração Eólica no horário $i$ no mês $j$
$G_{i,j}^{hídrica}$	Geração Hídrica no horário $i$ no mês $j$
$G_{Proposta,i}^{hídrica}$	Geração Hídrica proposta no horário $i$ no mês $j$
$G_{real,i}^{hídrica}$	Geração Hídrica real no horário $i$ no mês $j$
$G_{i,j}^{solar}$	Geração Solar no horário $i$ no mês $j$
GHG	Green House Gases (Gases do efeito estufa)
GNS	Gás Natural Sintético
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt hora
$h$	hora
HSP	Horas de Sol Pico
IPEA	Instituto de Pesquisas Espaciais e Atmosféricas

MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
MWh	Megawatt hora
MWh/h	Megawatt hora por hora
MWmed	Megawatt médio
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Potência
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PROINFRA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
$\rho_{ar}$	Densidade do Ar
$S_{ij}$	Armazenamento no horário $i$ no mês $j$
SIN	Sistema Integrado Nacional
TUST/TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão/Distribuição
TWh	Terawatt hora
U	Energia Potencial
$v$	Velocidade do vento
V	Tensão elétrica
VPL	Valor Presente Líquido
W	Watt
Wh	Watt hora

## SUMÁRIO

RESUMO .....	8
ABSTRACT .....	9
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
4. MATRIZ ENERGÉTICA ELÉTRICA .....	25
4.1. DESENVOLVIMENTO DE FONTES ALTERNATIVAS .....	27
4.2. TIPOS DE FONTES RENOVÁVEIS .....	34
4.2.1. Eólica.....	34
4.2.2. Solar Fotovoltaica.....	40
4.3. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .....	45
4.3.1. Armazenamento de Energia Eletroquímica.....	47
4.3.2. Armazenamento de Energia Elétrica.....	49
4.3.3. Armazenamento de Energia Mecânica.....	52
4.3.4. Armazenamento de Energia Química.....	55
4.3.5. Armazenamento de Energia Térmica .....	57
5. MÉTODOS.....	59
5.1. MODELO: ABORDAGEM ANUAL .....	60
5.2. MODELO: ABORDAGEM DIÁRIA.....	63
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
6.1. ABORDAGEM ANUAL.....	71
6.2. ABORDAGEM DIÁRIA.....	77
7. CONCLUSÕES .....	86
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS .....	89

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com as mudanças climáticas e os efeitos da alta concentração na atmosfera de gases denominados gases do efeito estufa (GHG – *greenhouse gases*) tem sido abordada em diversos trabalhos de pesquisa e discussões. A sociedade moderna possui diversos hábitos onde a utilização de energia é indispensável e o desenvolvimento econômico de um país está diretamente ligado a produção/consumo energético. Assim, a tendência natural é de crescimento do consumo de energia *per capita* que, aliado ao crescimento populacional, implica em aumento nas emissões anuais de CO<sub>2</sub> equivalente e de aumento de sua concentração na atmosfera.

Diversas ações de políticas globais buscam controlar as emissões globais de gases de efeito estufa por parte dos países desenvolvidos e, a partir dessas, houve uma maior preocupação com modo de produção e o consumo outrora desenfreado a fim de mitigar as emissões dos gases poluentes. Em 1972, ocorreu em Estocolmo, na Suécia, a primeira grande reunião de chefes de estado que recebeu o nome de Conferência de Estocolmo, a qual foi organizada pela ONU (Organização das Nações Unidas) para tratar das questões relacionadas à degradação do meio ambiente. As discussões contribuíram para compromissos como a Agenda 21 assinada na conferência conhecida como Rio 92 e, posteriormente, a assinatura do Protocolo de Kyoto que ocorreu em 1997, na cidade japonesa que deu nome ao documento. O Acordo de Paris, assinado em 12 de dezembro de 2015, durante a COP21, estabelece como limite máximo o aumento de 2°C (preferencialmente 1.5°C) na temperatura média da atmosfera, até 2020, em relação ao padrão pré-revolução industrial.

Dentre as fontes de energia amplamente utilizadas existem fontes a partir da queima de combustíveis fósseis como petróleo, carvão mineral e gás natural. Essas fontes têm aplicação na geração de energia elétrica nas centrais de geração chamadas termoelétricas e na mobilidade através de automóveis, navios e aviação. A queima desses combustíveis resulta diretamente em geração e emissão de óxidos de carbono (CO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e agrava ainda mais a alta concentração de gases do efeito estufa (GHG) na atmosfera. Esse acúmulo resulta em alteração dos padrões climáticos e causa desequilíbrio de ecossistemas, culminando com desastres naturais como terremotos, maremotos, tsunamis, ciclones, furacões, etc.

Nesse contexto, as fontes consolidadas de geração de energia a partir de combustíveis fósseis devem ser evitadas a fim de cumprir o compromisso de redução de GHG e contribuir com a busca pela sustentabilidade ambiental.

Como solução apontada para esta demanda urgente, surgem as fontes de energia renováveis ou alternativas. Algumas das tecnologias existentes trazem impactos ambientais mínimos em sua utilização e, em outros casos, só há impacto na construção de equipamentos, sendo sua utilização isenta de impactos.

Dentre as fontes renováveis para geração de energia elétrica podem ser destacadas fontes a partir da captação da luz solar denominada de energia solar, a partir de matéria orgânica de origem animal e vegetal que é a queima ou gaseificação de biomassa, a partir da conversão de velocidade de vento em quantidade de movimento mecânico que é a energia eólica e a partir de pequenas centrais hidrelétricas chamadas de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).

Dentro do tema de utilização e geração de energia através de fontes alternativas e renováveis, o Brasil é um país com grande potencial quando comparado a outros, uma vez que possui uma biodiversidade capaz de prover alternativas de geração por vários meios, incluindo as fontes de energia renováveis, como a hidrelétrica. Além dessa, não pode ser esquecida a busca pelo desenvolvimento de fontes alternativas como a produção de energia através da biomassa, para produção de combustíveis renováveis, a exemplo do álcool, do biodiesel, e, mais recentemente, o H-bio (AGRONEGÓCIOS..., 2006).

Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2019), o sistema elétrico brasileiro é um sistema de produção e transmissão de grande porte formado, majoritariamente, por hidrelétricas, termelétricas e usinas eólicas, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional (SIN) é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a grande parte da região Norte. Apenas o estado de Roraima e uma parte da região Norte não são integrados ao SIN e são denominados de sistemas isolados.

A conexão dos sistemas elétricos, através da transmissão, torna possível a transferência de energia entre os subsistemas, além de permitir explorar a diversidade entre os regimes fluviais das bacias e permite ganhos por efeitos sinérgicos. É através de recursos de transmissão e geração que é possível o atendimento do mercado consumidor com segurança e economicidade.

A composição do SIN tem como potência de geração instalada uma composição com base em usinas térmicas, hidrelétricas, eólicas e solar fotovoltaica; porém a grande maioria é baseada em hidrelétricas conectadas em dezesseis bacias hidrográficas em diferentes subsistemas do país. Recentemente, a instalação de usinas eólicas apresentou um crescimento considerável com localização em sua maioria nas regiões Nordeste e Sul. As usinas térmicas na atual configuração do sistema têm um papel estrategicamente muito relevante, pois estão instaladas próximas dos centros de carga contribuindo para a segurança do SIN. A utilização dessas usinas, no atual contexto, está atrelada as condições hidrológicas vigentes, contribuindo para uma melhor gestão dos reservatórios das usinas hidrelétricas e sempre visando assegurar um atendimento futuro. Para integrar as diferentes fontes de geração de energia e possibilitar o suprimento do mercado consumidor, são utilizados os sistemas de transmissão, formando uma malha com a distribuição.

Dentro do contexto de demanda energética, há alguns desafios consideráveis, a exemplo da variação das condições climáticas (condições de vento ou sombreamento por nuvens) ao longo do dia. As atividades diárias de uma população determinam um padrão de consumo de energia elétrica que não é constante nesse período. A dificuldade reside no fato de que a energia elétrica só pode ser armazenada de forma eficiente através de baterias, as quais possuem um custo elevado. Por esse motivo, há um importante fator chamado simultaneidade que relaciona geração e consumo instantâneo de energia elétrica.

Fontes renováveis de geração de energia, como solar (térmica e/ou fotovoltaica), eólica, geotérmica e maremotriz, têm sido apontadas como estratégias viáveis no âmbito ambiental e econômico (MATHIESEN, 2011). Essas fontes de geração têm como característica benéfica principal a matéria-prima inesgotável e abundante, permitindo sua ampla utilização.

Segundo o relatório síntese publicado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) no balanço energético nacional 2019, as fontes eólica e solar (fotovoltaica) cresceram 14,4% e 316,2%, respectivamente, entre 2017 e 2018, em participação na matriz energética (EPE, 2019). Segundo a ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar), a geração fotovoltaica corresponde a 1,13% e a geração eólica a 8,6% da geração total de energia elétrica no Brasil (ABSOLAR, 2019). A previsão para a energia fotovoltaica é de franca expansão devido aos incentivos governamentais recebidos pelo setor e à disponibilidade de altos índices de radiação solar em todo território.

Apesar de possuírem vantagens consideráveis, como baixo impacto ambiental e fontes inesgotáveis de energia, as usinas de geração eólica e solar fotovoltaica possuem algumas desvantagens em relação às fontes tradicionais. Dentre os problemas, os mais graves são a intermitência e a baixa previsibilidade dessas fontes.

As fontes de energia tradicionais, como hidrelétrica e termoelétrica, têm a vantagem de ser possível controlar o quanto de energia é produzida; mas para as fontes de energia renováveis, como eólica e solar, não é possível tal controle. No caso das usinas hidrelétricas, por exemplo, o controle é feito através das vazões que passam pelas turbinas que por sua vez são reguladas pela abertura das comportas. Tratando-se das termoelétricas, esse controle é realizado controlando quantidades de combustíveis gasosos ou líquidos que, por sua vez, controlam o torque nos geradores.

As usinas eólicas produzem energia de acordo com as velocidades dos ventos que passam pelas pás dos rotores. Por mais que existam registros anemométricos de algumas regiões, os ventos possuem velocidades imprevisíveis e que variam muito, mesmo em períodos curtos. O mesmo problema ocorre com a geração de energia fotovoltaica, já que não se pode prever com exatidão e com que frequência a incidência de raios solares sobre os painéis será bloqueada ou reduzida por nuvens e, na ausência de luz, não há produção de energia nesse tipo de usina.

Com o aumento da participação da geração de energia elétrica através de fontes eólica e solar, o sistema interligado nacional (SIN) só tem capacidade suficiente para absorver a sazonalidade inerente a essas fontes renováveis, se suportado por termelétricas que possam trabalhar auxiliando na sua regulação. No entanto, essa prática de dependência de usinas térmicas com geração direta de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) não está alinhada com o futuro sustentável que vem sendo discutido. No atual cenário, se essas fontes de energia forem conectadas diretamente no SIN e não for utilizada uma técnica de regulação para absorver as intermitências, poderá haver dificuldades com controle de pico de demanda e estabilidade de rede (An *et al.*, 2015).

É uma tendência cada vez mais latente o aumento da participação das fontes eólicas e fotovoltaica na geração de energia elétrica brasileira ou mundial, contribuindo, assim, para a redução na emissão de CO<sub>2</sub> equivalente. No entanto, se houver a inserção dessas fontes sem uma mitigação dos efeitos de intermitências, acabará agravando a dificuldade em ajustar as curvas de produção e demanda de energia elétrica.

Esses fatores justificam um aprofundamento de estudos para a integração entre as diversas fontes de geração e sistemas de armazenamento, de modo a ter

continuamente uma perfeita adequação entre as curvas de produção e consumo de energia elétrica.

## 2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo a análise da integração entre processos de geração de energia a partir de fontes renováveis e fontes convencionais, interligados a possíveis sistemas de armazenamento, a fim de adequar demanda e oferta de energia no SIN. Essa integração possibilita o aumento na participação das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica, o que contribui para a redução nas emissões de dióxido de carbono para a atmosfera sem descuidar da confiabilidade para o seu consumo.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar os métodos de armazenamento de energia;
- Levantar as curvas de sazonalidade na geração de energia elétrica através de energia eólica e energia fotovoltaica;
- Avaliar a integração de sistemas de geração através de fontes renováveis e tradicionais na perspectiva do SIN.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Há poucos estudos com foco na integração das fontes renováveis e seus efeitos benéficos para sistemas como o SIN. A maior parte dos estudos referem-se a cálculos de atratividade econômica e deixam de abordar o problema de ajuste entre demanda e geração. Isso se baseia no fato da complexidade do tema, na falta de uma abordagem com perspectiva universal sobre o tema e o despertar de linhas de pesquisa que envolvem o tema ser recente.

Dias e Ramos (2007) elaboraram um trabalho voltado a integração entre uma PCH (Pequena Central Hidrelétrica) e uma termelétrica com queima de bagaço de cana, como biomassa, tendo como objetivo mostrar que era possível ter um mecanismo de proteção contra riscos financeiros para empreendimentos de geração de energia. O estudo teve uma finalidade puramente econômica, buscando uma complementaridade entre os perfis de geração das duas fontes de energia como forma de garantir uma geração mínima.

O trabalho considerou duas usinas com potências balanceadas e duas possibilidades que são rápidas mudanças e a sazonalidade dentro das perspectivas de ter períodos secos e úmidos do SIN. O principal resultado foi a constatação de que a associação das fontes de energia tem como efeito um retorno financeiro maior do que as fontes quando analisadas separadamente e isto faz com que o preço não seja tão impactado por sazonalidades de períodos secos ou úmidos.

Marinho e Ramos (2011) exploraram a integração entre PCH, biomassa e geração eólica. A busca do trabalho em questão foi realizada através da combinação das fontes de geração para alcançar a maior receita para o investidor com aceitação de um risco determinado. Para a geração eólica e através de biomassa, utilizaram-se dados determinísticos, mas dados reais de vazão para geração hídrica foram utilizados. Uma simulação importante realizada foi a de contrato sazonal, o qual destina percentuais divergentes ao contrato de longo prazo para épocas com pouca ou muita chuva.

Reda e Ramos (2011) estudaram a integração entre PCH e usina eólica, com a consideração de incertezas no cenário de geração futura. As possibilidades consideradas na simulação foram o risco de exposição e os diversos cenários de receita. É importante dizer que esse estudo teve um maior destaque na energia eólica com curva de potência para uma determinada turbina e dados de medição diária. A complementaridade

mostrada fez com que a conclusão do trabalho indicasse uma situação em que a PCH fornece segurança para a geração eólica.

Guarnier, Camargo e Ramos (2012) avaliaram como a comercialização no mercado livre da energia proveniente de PCHs e geração eólica pode responder à previsibilidade de receita dentro do curto prazo. O trabalho considera a integração energética entre as diferentes usinas e indica fatos que podem nortear o investidor na formação de um portfólio diversificado, otimizando a receita e diminuindo a possibilidade de perda.

Os resultados mostraram que a utilização de fatores médios na simulação pode mascarar os riscos aos quais o investidor está exposto. O trabalho expôs conjuntamente estudos de um mecanismo de minimização de risco que é próximo aos utilizados para as usinas hídricas. Uma importante conclusão do trabalho é a formação de uma sinergia, como forma de blindagem contra risco com o portfólio misto.

Parcerias feitas entre instituições como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e CESP (Companhia Energética do Estado de São Paulo) são importantes, pois permitem trabalhos de PD&I (Pesquisa Desenvolvimento e Inovação), como o de Ramos *et al* (2013). Nesse trabalho, os autores observaram as características das fontes intermitentes no Brasil para construção de uma carteira mista, fazendo uso de algoritmos genéticos.

Ramos *et al* (2013) também realizaram uma análise financeira do custo de cada fonte de geração envolvida (biomassa, PCH e eólica) a fim de otimizar o Valor Presente Líquido (VPL), com base na vida útil dos empreendimentos com uma depreciação já determinada. Foram avaliados diferentes cenários, variando as fontes e o tipo de contrato de venda a fim de encontrar uma maior similaridade com eventos reais em geração e gestão de perdas.

Camargo *et al* (2013) apresentaram um modelo de negócio para mostrar a empresas que têm em seu portfólio hidrelétricas que era possível investir em geração eólica e biomassa, como forma de correr menos riscos de negociação no mercado de energia brasileiro evidenciado pelo sinergismo.

A contribuição principal do trabalho foi mostrar que empresas com diversidade de portfólio complementar possuem um fluxo de caixa mais próximo de constante e, por consequência, têm menores taxas de juros em novas contratações de capital para construção e operação de usinas centralizadas.

O trabalho usou o CAPEX (sigla em inglês para Despesas de Capital) do investimento e o tempo de utilização dos projetos para estimar a receita anual já depreciada no tempo, utilizando um valor de recuperação de capital fixo.

Assim, como nos trabalhos anteriores, o portfólio acrescido de geração através de fonte eólica e biomassa à geração hídrica tem o melhor desempenho financeiro.

Street *et al* (2009) verificaram diminuição do risco em mercado com participação de fontes de energia hídrica e térmica, a exemplo do SIN. O trabalho apresentou um análise baseada em modelo estocásticos, com foco em aumentar a receita e fugir das sazonalidades no fluxo de caixa. Os autores calcularam, através da linearização do CVaR (Condition Value at Risk) com uma confiabilidade de entre 0,95 e 0,99 (bem próximas de 1), a aversão ao risco. Baseado nesse procedimento, foram avaliados dois casos: 1- geração através de biomassa e fonte hídrica; e 2- utilização apenas de biomassa e o resultado mostrou que os valores de CVaR foram maiores para o caso de uma única fonte de geração.

Uma contribuição em relação ao trabalho anterior foi a inserção de fonte eólica no estudo, através da análise do risco (CVaR), para uma combinação entre todas as fontes que até então atuavam no mercado nacional, preservando as características de cada fonte. Essa avaliação, feita por Ralston *et al* (2010), utilizou uma base de dados para a fonte eólica de uma usina na região nordeste do país simulando vários cenários.

Em 2011, Street *et al* analisaram a contenção dos riscos mercadológicos, usando a diversidade de fonte renováveis (biomassa, eólica e PCH). Programação linear foi utilizada como ferramenta para busca de uma resposta à maximização de lucro dentro de um risco aceitável. A conclusão dos autores é baseada no fato dos resultados apresentarem maiores retornos e menores riscos quando duas ou mais fontes foram combinadas em um portfólio, enquanto, naturalmente, os maiores riscos estão ligados a portfólios contendo apenas uma fonte. Comparativamente, Street *et al.* (2009) demonstraram que em ambos os estudos, os retornos mais significativos estão relacionados a carteiras contendo apenas geração através de biomassa, embora esses também apresentem riscos mais elevados. Esse resultado deve-se ao fato que esse perfil de geração, típico de usina hidrelétrica, possui períodos de safra e, por consequência, coincidem com o período de seca no país, o que, historicamente, apresenta preços mais elevados no mercado de energia.

Todavia, o mercado é submetido a grande incerteza nos preços e rápidas mudanças, e pode não haver a concretização de alta nos preços, expondo o agente que

utiliza apenas geração térmica a um risco alto, inviabilizando o negócio. A teoria dos jogos foi usada para simular a diversidade do portfólio com um jogador representando uma fonte de geração. Foram consideradas duas possibilidades para cada jogador que tinha uma garantia física determinada. Ele poderia vender sua energia através de um contrato com preço fixo ou deixar uma parcela de sua garantia física descontratada aguardando maiores ganhos no MCP (Mercado de Curto Prazo). A fim de diminuir o risco, os jogadores poderiam formar alianças, tendo como garantia física a soma simples das garantias. As alianças, quando formadas por jogadores com garantias complementares, tornam-se mais fortes que alianças por jogadores com garantias menos complementares. A utilização de geração eólica e hídrica tem uma complementaridade maior do que biomassa e eólica e têm menor risco.

Ramos *et al* (2013) utilizaram o método de Monte Carlo para simular de forma probabilística a geração de cenários eólicos. Baseou-se para tal em dados de vento obtidos do modelo de meso escala WRF3.3 (Weather Research and Forecasting Model), do NCEP (National Center for Environmental Prediction), junto com dados históricos advindos da região de estudo do Brasil. Como resultado, obtiveram-se dados que puderam ser usados com a série histórica de vento, os quais que unidos à curva de geração de uma turbina padrão, fornecem os cenários de geração.

Martins, Pereira e Azevedo (2018) estudaram a integração entre as gerações solar e hidrelétrica, tendo a usina de Sobradinho como um estudo de caso. O estudo foi desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (IPEA) e avaliou a operação de um sistema híbrido de geração de eletricidade, combinando as fontes solar e hídrica na área da UHE (Usina Hidrelétrica) de Sobradinho, de modo a aproveitar o recurso solar disponível na região e a infraestrutura do SIN disponível no local. Os resultados indicam que instalar plantas fotovoltaicas contribuiria para o aumento da capacidade de geração em Sobradinho com uma mitigação de gases do efeito estufa na atmosfera por parte de usinas térmicas em tempos de seca, com bônus de acúmulo de água no reservatório. Como principal resultado, o trabalho apresentou valores de 11% a 91% para um incremento na geração de eletricidade, a depender da potência instalada no período de 2006-2015 na usina de Sobradinho.

Gonçalves *et al* (2018) apresentaram uma revisão sobre as projeções de crescimento da participação das fontes solar e eólica na matriz elétrica brasileira. Foram apresentados dados do setor elétrico e da disponibilidade e custo das fontes de energia, além de uma breve discussão sobre a inserção de fontes intermitentes no sistema

elétrico. Os autores apontaram que são necessários mais estudos para averiguar alternativas devido aos problemas de intermitência e para compensar esses problemas, atualmente, seriam necessários uma entrada de mais de 10 GW de potência de termelétrica frente à projeção de pouco mais de 25% da matriz ser eólica e solar.

Luz (2019) realizou um estudo, utilizando modelo multiobjetivo, visando estrategicamente a expansão da geração, com objetivo de garantir o atendimento da demanda, sem deixar de lado as metas governamentais, reduzindo a dependência hídrica e tomando proveito dos benefícios da complementaridade. A contribuição desse trabalho foi a avaliação da correlação entre as fontes renováveis como biomassa e eólica junto a hidrelétrica, observando o quanto são complementares e testando diferentes graus de combinações entre elas. Os autores também propuseram um modelo que poderia quantificar o crescimento da utilização da geração fotovoltaica em pequenos produtores e a contribuição de programas de eficiência energética com uso de baterias.

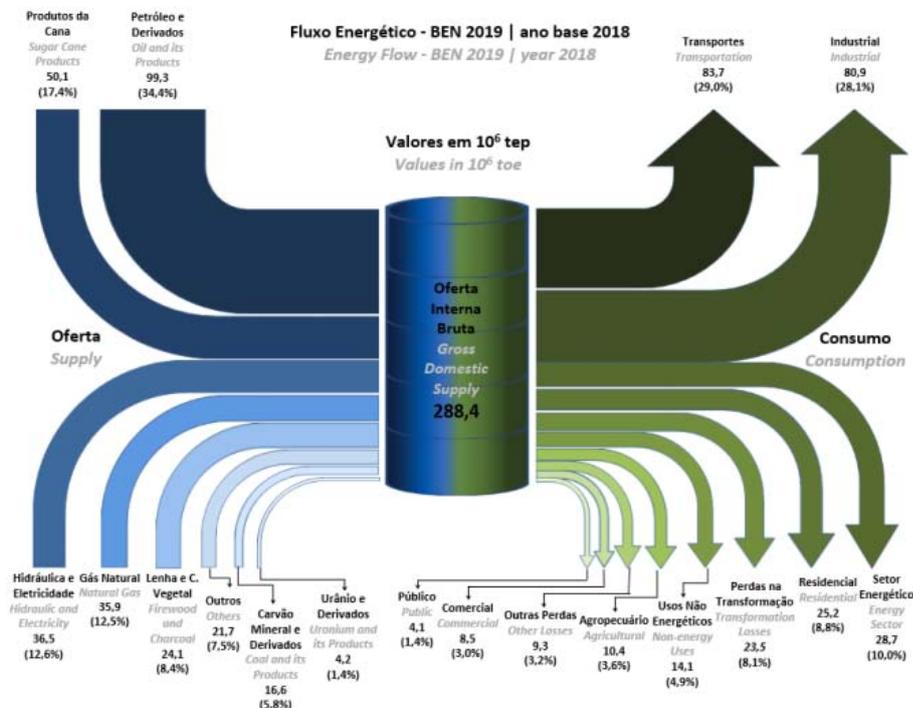
Luz (2019) apresentou uma possibilidade em que, mesmo enfrentando uma seca extrema por 3 anos consecutivos, haveria condições de atender a demanda sem prejuízo e sem novos empreendimentos hidrelétricos grandes. O cenário contaria com a participação de 15% de energia solar, 39,1% de energia eólica, 4,2% de biomassa, 40% de hidroeletricidade e 1,7% de ajustes do ACL (Ambiente de Livre Comércio).

As contribuições que evidenciam a complementaridade das fontes renováveis trazem um indicativo de que é possível utilizar diferentes fontes dentro da matriz energética e ter o atendimento mínimo da demanda. Com base nos trabalhos descritos, é possível afirmar que a integração de fontes de energias renováveis com o consumo, na perspectiva do SIN, é viável e pode ser entendida como um passo significativo na política de descarbonização do planeta.

#### 4. MATRIZ ENERGÉTICA ELÉTRICA

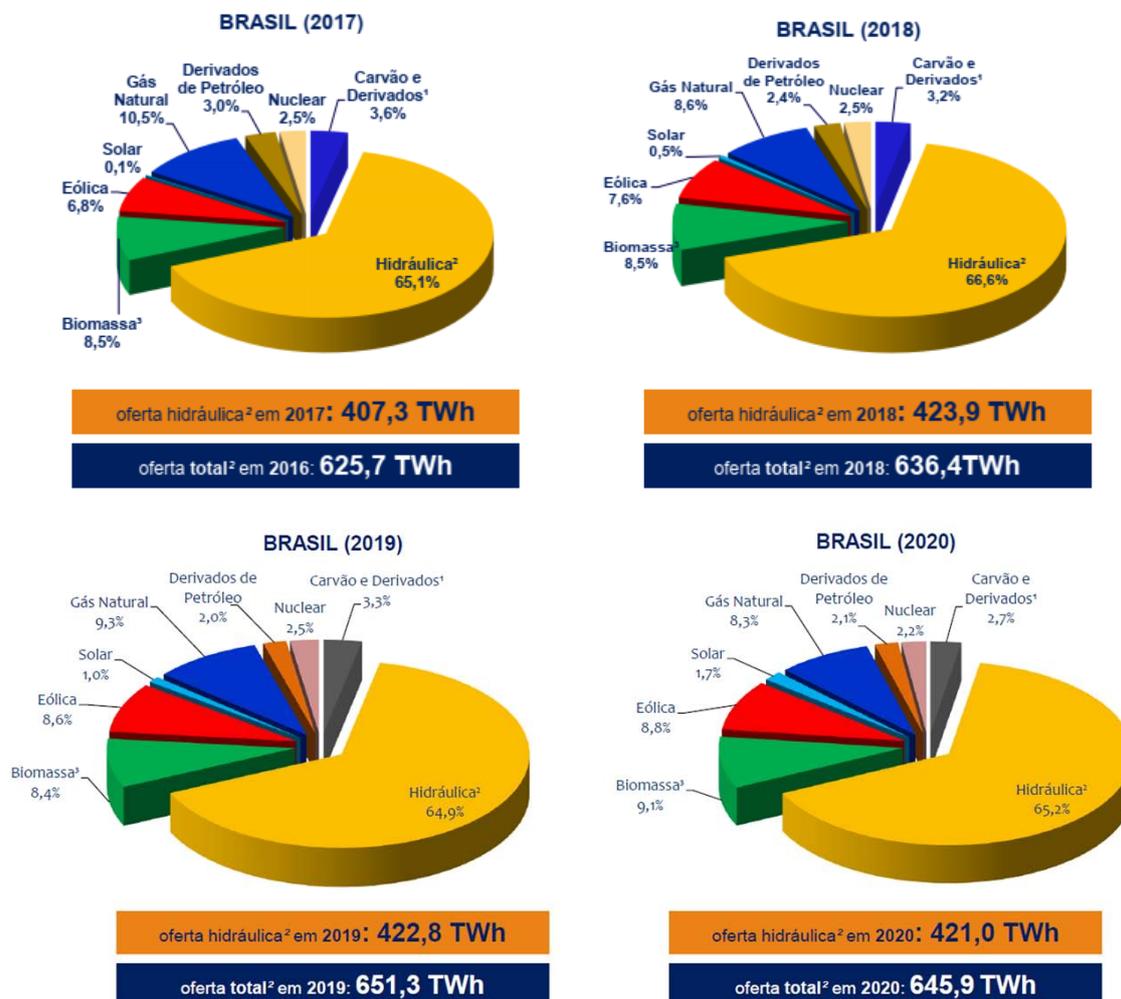
A análise da matriz energética faz parte do planejamento estratégico de um país para o setor energético, o qual tem a responsabilidade de garantir a produção e uso adequado da energia. Considerando essa análise, dentre todas as informações obtidas, a mais importante é a quantidade e alocação adequada dos recursos naturais para que sejam utilizados de forma racional e aproveitados de forma eficiente.

O Balanço Energético Nacional (EPE, 2019) tem como referência os anos de 2017 e 2018 mostrando as oscilações tanto na produção como no consumo energético brasileiro. A figura 1 mostra o fluxo energético, onde o lado esquerdo retrata as fontes primárias e o lado direito mostra os setores consumidores, em porcentagens, sendo perceptível a comparação percentual entre as correntes de fluxo energético. Nota-se que a maior produção é proveniente de petróleo e seus derivados, e que o maior consumo se refere aos setores de transportes e industrial. O uso de combustíveis fósseis no Brasil atinge 52.7% do total das fontes primárias de energia, valor menor que a média mundial apontada pela BP (British Petroleum) para o ano de 2018, que é de 84.7%.



**Figura 1.** Fluxo energético na matriz energética considerando todos os setores de consumo e produção de energia. Fonte: EPE, 2019.

Observando o mesmo balanço e o balanço subsequente publicado em 2021, pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), apenas para energia elétrica, na figura 2, é possível identificar as fontes de geração de energia elétrica.



**Figura 2.** Fontes de geração de energia elétrica nos anos de 2017 a 2020 e total de energia elétrica produzida. Fonte: EPE, 2019 e 2021.

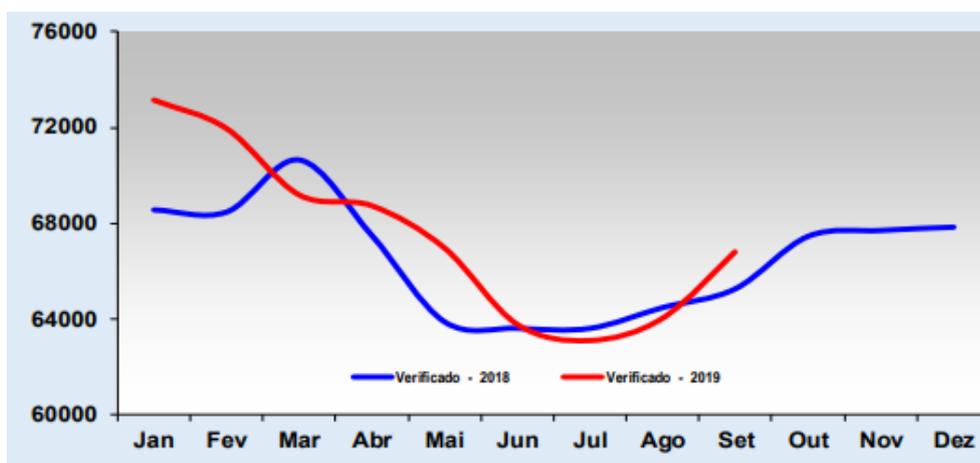
No Brasil, a geração de energia elétrica a partir de gás natural, derivados de petróleo e carvão teve queda na sua participação dentro da matriz energética. Em 2017, a participação de derivados de petróleo era 3,0% e caiu para 2,1%, em 2020. Em contrapartida, fontes renováveis como solar, por exemplo, saíram de 0,1% para 1,7% de participação na geração de energia no mesmo período. O aumento de geração por fontes mais limpas como eólica, solar, hidráulica e biomassa tem contribuído para a diminuição de geração de energia a partir de combustíveis fósseis e esse crescimento

sustentável pode ser visto principalmente nas fontes eólica e solar fotovoltaica no Brasil.

O total de energia elétrica ofertado ao mercado brasileiro, em 2017, foi de 625,7 TWh, houve aumento para 636,4 TWh, em 2018 e para 651,3 TWh, em 2019 com uma leve estagnação na casa de 645,9 TWh, em 2020. É preciso evidenciar que, em 2020, o Brasil foi atingido por uma pandemia mundial, o que gerou impacto no modo de produção e, por consequência, no consumo/oferta de energia elétrica.

A fonte de maior participação na matriz energética para geração de energia elétrica é a hidráulica, fruto das grandes hidroelétricas existentes, incluindo Itaipu, inaugurada em maio de 1984, em acordo bilateral entre Brasil e Paraguai.

A curva de consumo de energia descrito pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2019), até setembro de 2019, como mostrada na figura 3, está em vermelho, enquanto a do ano anterior está em azul. As curvas mostram o consumo em MW<sub>médio</sub> ao longo do ano e é possível visualizar que os meses de menor consumo são de maio a agosto no ano de 2018, mas, em 2019, estão entre junho e agosto. Os meses com maior consumo de energia estão entre dezembro e abril e recebem influência do clima que tornam sistemas de refrigeração mais utilizados nesta época do ano.



**Figura 3.** Curva da Carga de consumo de energia elétrica no Brasil ao longo do ano.

Fonte: ANEEL, 2019.

#### 4.1. DESENVOLVIMENTO DE FONTES ALTERNATIVAS

As energias renováveis são aquelas que não se utilizam de recurso natural perene, na perspectiva humana, ou seja, são todas as fontes, exceto petróleo, gás natural,

carvão mineral e elementos usados na geração via nuclear. Essa classificação refere-se à fonte primária para a geração antes de qualquer transformação. Dessa forma, a energia elétrica gerada usando combustível fóssil ou nuclear não é renovável, enquanto a energia elétrica gerada através de fontes como biomassa, eólica, solar, geotérmica, hídrica ou oscilações das ondas do mar (maremotriz) é classificada como renovável.

Na Europa, a expectativa é substituir 20% da geração atualmente de combustíveis fósseis por fontes renováveis (KALTSCMITT *et al*, 2007), enquanto na China a estimativa é de 15% de energia renovável no mesmo horizonte (KROZER, 2013).

O destaque tem sido a busca por introdução de parques eólicos e fotovoltaicos em larga escala, em virtude de pressões exercidas por órgãos ambientais internacionais, uma vez que a energia eólica tem sido percebida como a melhor alternativa para atingir a meta de redução de CO<sub>2</sub> (AMERICAN WIND POWER, 2012). Tendo essa tendência mundial como referência e, dadas algumas condições político-econômicas específicas, o Brasil tem investido em medidas de incentivo à introdução de fontes renováveis no país, para atender ao aumento na demanda de energia elétrica e como alternativa às tradicionais usinas termelétricas de grande porte, as quais usam combustíveis fósseis.

As principais fontes exploradas, em escala comercial, com as características de serem renováveis não convencionais são as pequenas centrais hidrelétricas (PCH), as usinas térmicas movidas à biomassa (BIO), as centrais eólicas (EOL) e a energia solar (SOL). Essa última apresentou um crescimento substancial pelo fato de que seu custo de produção caiu significativamente.

Pensando na economicidade, um parque gerador hidrelétrico e interligado deve dispor de um despacho centralizado que preze pelo atendimento a carga, utilizando a capacidade de produção sempre próxima do ponto ótimo, ou seja, de forma a maximizar o uso da água ao menor custo global. Esse é o caso do Brasil que utiliza o Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS), o qual tem a preocupação não só de verificar condições imediatas, mas também a capacidade de atendimento à demanda futura. Isso deve ser observado por haver uma grande variação na energia produzida ao longo do tempo devido a sazonalidade das afluições em tempos de escassez e de excesso de chuva.

Com base nesse fato, as usinas geradoras via queima, seja biomassa ou combustíveis fósseis, representam um papel importantíssimo no contexto de fontes com

disponibilidade sazonal e tem a finalidade de complementar a disponibilidade de energia em situações em que a sazonalidade está presente. Isso garante um suprimento energético em épocas de escassez e integralização da potência desejada.

Todavia, a utilização de usinas térmicas como alternativa às fontes hidrelétricas existentes no país significa, além de uma geração mais cara, caminhar no sentido oposto das políticas ambientais e energéticas atuais adotadas no mundo.

Apesar das usinas térmicas terem uma função importante de garantir segurança no fornecimento da real carga necessitada, a expansão da matriz deve prezar pela sustentabilidade ambiental.

A geração a partir de parques eólicos e fotovoltaicos apresenta menor impacto ambiental, mas a exploração desse tipo de fonte requer arranjos elétricos e energéticos que compensem o fato de serem totalmente inflexíveis, tais como complementação com fontes de geração que apresentem sazonalidade oposta e reserva girante, culminando com a confiabilidade da operação do sistema.

A primeira introdução de uma fonte de energia alternativa na matriz energética nacional foi conseguida através da instituição do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFRA), criado pela Lei Federal 10.438, de 26 de abril de 2002. A primeira etapa do programa previa a entrada de 3.300 MW de capacidade instalada até 30 de dezembro de 2006, distribuídos igualmente entre as fontes PCH, BIO e EOL. A Empresa Centrais Elétricas Brasileiras S/A (ELETROBRÁS) seria a responsável pela celebração dos contratos de 20 anos e representação da energia perante o mercado.

Em virtude de atrasos ocasionados por problemas de licenciamento ambiental e de financiamento, o programa precisou ser revisado algumas vezes, postergando a data limite para entrada em operação dos projetos para 30 de dezembro de 2008. As usinas que foram instaladas totalizaram 2.911 MW, aquém do planejamento inicial.

A energia gerada a partir desses empreendimentos é rateada entre todos os agentes consumidores participantes, através de cotas proporcionais ao montante consumido. O pagamento é também feito de forma proporcional e é aplicado um encargo na Tarifa pelo Uso do Sistema de Transmissão/Distribuição (TUST/TUSD), de forma compulsória.

Através de um decreto de 27 de fevereiro de 2007, a união passou a regulamentar o setor de energia elétrica, através da ANEEL, pelo decreto 6.048 de forma diferente do decreto 5.163/2004 que estava em vigor com relação à contratação de fontes alternativas no Ambiente de Comércio Regulado (ACR). A mudança referia-

se à possibilidade de a ANEEL promover leilões de compra de energia proveniente de fontes alternativas, independentemente da data de outorga, a fim de cumprir a obrigação de atendimento da totalidade da demanda dos agentes de distribuição (concessionárias).

O primeiro leilão exclusivo de fontes alternativas de energia foi em junho de 2007 e o início de fornecimento dos empreendimentos foi em 1º de janeiro de 2010. Decidiu-se, nesse leilão, fazer uma divisão em empreendimentos de fonte hídrica e a partir de outras fontes. Para empreendimentos com fonte hídrica venderam exclusivamente PCHs e para as demais fontes teve a participação de usinas de bagaço de cana e uma usina a biomassa de criadouro avícola. O montante negociado foi de 186 MWmed (MegaWatt médio) com representatividade de 140 MWmed por parte de geração por biomassa e completado com PCHs.

O leilão posterior de fontes alternativas aconteceu apenas em 2010, mas, durante o intervalo entre os leilões, a contratação de energia de reserva fomentou o crescimento da energia renovável no Brasil.

O primeiro leilão contou com a contratação de 509 MWmed, iniciando o suprimento de energia em, no máximo, 2 anos a frente e tendo contrato de 15 anos de duração, contados do início de funcionamento. Esse leilão de Energia de Reserva (LER) aconteceu em 2008.

Até então, o acervo de dados históricos de velocidade de vento era escasso e havia incertezas somadas a riscos de produção, mas, em 2009, a mudança em como isso era levado em consideração permitiu que o segundo leilão de Energia de Reserva contasse com 441 projetos inscritos em leilão puramente de fonte eólica. Foram negociados 753 MWmed em contratos de 20 anos de operação com 100% de garantia física habilitada pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) para o certame, não podendo utilizar nada para o ACL (Ambiente de Comércio Livre). O leilão foi considerado um sucesso pelo governo e por outros participantes do setor e foi considerado muito importante para balizar os acontecimentos seguintes para a fonte eólica no país.

O 3º Leilão de Energia de Reserva e o 2º Leilão de Fontes Alternativas aconteceram em 2010 e habilitou as fontes eólica, hídrica de pequeno porte e biomassa com possibilidade de cadastramento dos proponentes nos dois leilões. A determinação da época para a concorrência estabelecia que se o empreendimento ganhasse a concessão no leilão de Reserva estaria automaticamente desabilitado para o leilão de fontes alternativas.

Existia uma aparente separação por tipo de fonte negociada, mas a quantidade total de demanda no certame agregava todos os tipos de geração, ou seja, não havia distinção entre as fontes com graus de competitividade e tecnologias diferentes. O valor do MWh teto imposto pelo governo, na época, também ajudou para que a quantidade de energia negociada a partir de fontes como PCH e biomassa fosse pequeno, pois os proponentes consideraram baixo, comparando com a fonte eólica dentro da mesma chamada.

Uma baixa atratividade pelas fontes PCH e BIO aconteceu nesse leilão com apenas 21.7 MW<sub>méd</sub> e 74.2, 31.4 e 262.1 MW<sub>méd</sub>, enquanto a fonte eólica teve um 255.1 MW<sub>méd</sub>. No total, o 3º LER trouxe um acréscimo de 445,10 MW<sub>méd</sub> de energia alternativa à matriz nacional.

A tabela 1 relaciona os leilões de energia renováveis e a participação das fontes ao longo de cada leilão através dos anos. Entre as fontes renováveis, a que mais tardou a se desenvolver foi a solar fotovoltaica que só teve participação a partir de 2014. Do outro lado da balança, a primeira fonte a participar da inserção na matriz elétrica foi a Biomassa. Esse fator é composto, principalmente, pelo setor sucroenergético que utiliza restos da moagem de cana-de-açúcar como combustível a ser queimado para geração de energia elétrica.

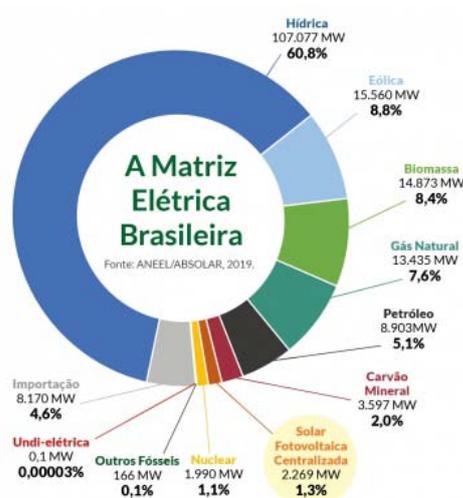
O compromisso com a mitigação de gases do efeito estufa foi o principal responsável pela busca por uma matriz cada vez mais renovável e limpa no Brasil, uma vez que o país está de acordo com um planejamento mais voltado a sustentabilidade e sempre participa dos eventos e conferências que buscam debater o tema, encontrando alternativas e colocando metas para descarbonização mundial.

Os dados relativos a 2019 foram publicados pela ABSolar em parceria com a ANEEL de acordo com a figura 4 e torna possível verificar que a participação da energia fotovoltaica se tornou mais expressiva.

**Tabela 1.** Leilões de Energias Renováveis em MW<sub>médio</sub> através dos anos.

Fonte	Tipo	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Biomassa	LEE	0	1	1	0	0	0	1	160	0	0
	LEN	35	10	0	36	0	459	309,7	99,2	81,5	111,2
	LER	592	0	445,9	38,3	0	0	0	0	0	0
	LFA	0	0	22,3	0	0	0	0	67,2	0	0
	PROINFA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eólica	LEE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	LEN	0	0	0	452,4	151,6	1322,1	680,7	237,8	0	727,4
	LER	0	753	255,1	422,1	0	675,5	333,2	262,6	0	0
	LFA	0	0	643,9	0	0	0	0	29,7	0	0
	PROINFA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PCH	LEE	0	0	0	0	0	0	0	286	0	239
	LEN	0	1	39	0	0	194	23,7	126	82,9	76,3
	LER	0	0	21,7	0	0	0	0	0	867,6	0
	LFA	0	0	6,24	0	0	0	0	0	0	0
	PROINFA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOLAR	LEE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	LEN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	290,9
	LER	0	0	0	0	0	0	202,1	476,8	0	0
	LFA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	PROINFA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

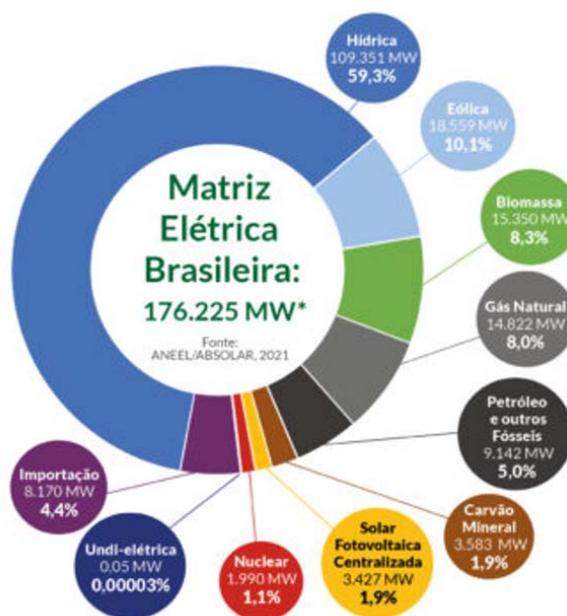
Fonte: ANEEL, 2018.

**Figura 4.** Fontes de geração de energia elétrica em produção até novembro de 2019.

Fonte: ABSolar e ANEEL, 2019

As fontes renováveis apresentam importante crescimento na geração centralizada, principalmente as fontes solar, fotovoltaica e eólica. Isso contribui para a diminuição de carga de fontes, como termelétricas abastecidas com combustíveis fósseis e com a administração das reservas hídricas. Essas duas fontes juntas somam 17.829 MW de potência instalada e em operação e há contratações para entrarem em operação nos próximos anos (EPE, 2019). Além das contratações, estão agendados os leilões chamados A-4 e A-6 de energia nova que visa a contratação de novos empreendimentos de fontes de energia específicas com preferência das fontes renováveis.

Em 2021, a ABSolar, novamente através da parceria com a ANEEL, publicou o infográfico em junho deste ano descrevendo a potência instalada por geração e é visível o crescimento das fontes eólica e solar fotovoltaica.



**Figura 5.** Fontes de geração de energia elétrica em produção até junho de 2021.

Fonte: ABSolar e ANEEL, 2021.

Aliado ao crescimento na geração centralizada, há outro tipo de geração que é denominada geração distribuída. Neste tipo de geração, são criados pequenos geradores, podendo ser diretamente ligado a carga de consumo ou não, e interligadas ao SIN. Na geração distribuída, a potência do gerador pode ser de até 5 MW por empreendimento, mas, em sua maioria, são minigeradores na ordem de kW para abastecer residências e empresas.

Essa modalidade de geração é regulada pela ANEEL através das regulamentações 482/2012 e 687/2015 e prevê um sistema de compensação para a utilização da rede de transmissão dentro da área de concessão na qual o gerador está inserido. De acordo com a ANEEL e ABSolar (2019), a capacidade instalada naquele ano era de 1.493,5 MW de mini e micro geradores no Brasil e atualmente (2021) é de 6.024,1 MW e esse mercado tem crescido de forma acelerada.

## 4.2. TIPOS DE FONTES RENOVÁVEIS

### 4.2.1. Eólica

No Brasil, o primeiro aerogerador instalado foi no arquipélago de Fernando de Noronha, no mesmo ano que acontecia a conferência da ONU sobre mudanças climáticas conhecida como RIO 92. Na época, não havia políticas de incentivo e o custo da tecnologia ainda era elevado, o que fez a geração a partir de fonte eólica crescer muito pouco nos 10 anos seguintes.

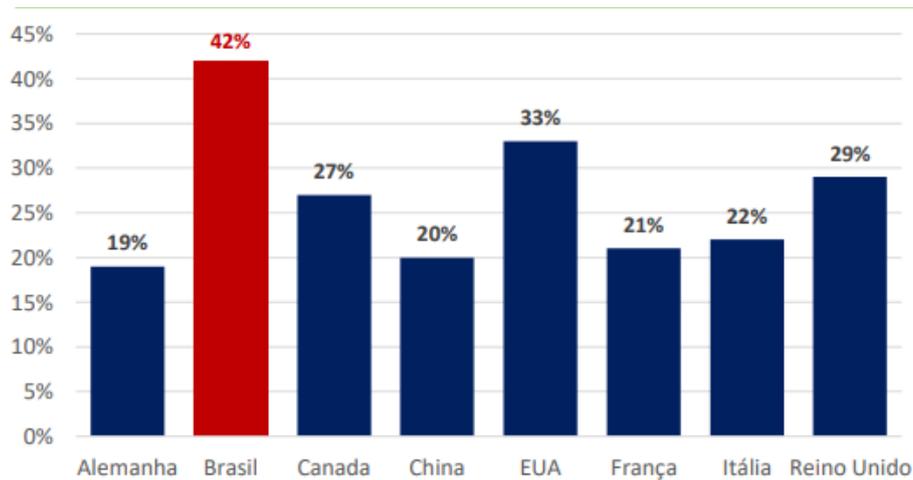
Muitos crescimentos são impulsionados por medidas em meio a crises e, em 2001, houve a tentativa de aumentar a utilização dessa fonte de energia através do Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA) no Brasil. Na perspectiva do programa, poderiam ser contratados 1.050 MW de projetos de energia eólica até o final do segundo ano e seria interessante essa contratação por já se saber da existência da complementaridade com a fonte hídrica. Não houve resultados satisfatórios nesse programa e ele foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA.

Durante o PROINFA, em 2004, uma barreira enfrentada era o custo da tecnologia que ainda era muito cara e ainda não havia tecnologia nacional, corroborando para que a participação competitiva em leilões só viesse mais tarde.

Foram necessários incentivos para estimular o crescimento desta fonte de geração, mas, após esses incentivos, a energia eólica tem vivenciado um crescimento de mercado. Os fatores que contibuem para isso são os bons ventos sem mudanças bruscas de velocidade e direção, as melhorias técnicas ao longo do tempo e a queda dos preços dos aerogeradores aliado ao baixo custo de operação.

Quando comparado com os países do mundo, em relação a energia eólica, percebe-se que o Brasil tem um elevado fator de capacidade e é considerado o maior do mundo. O fator de capacidade é a razão entre a produção efetiva da usina em um

período de tempo e a capacidade máxima, nesse mesmo período. Utilizando os dados da ABEEólica em parceria com o MME (Ministério de Minas e Energia, 2016), é possível comparar o fator de capacidade do Brasil com os demais países através da figura 6.



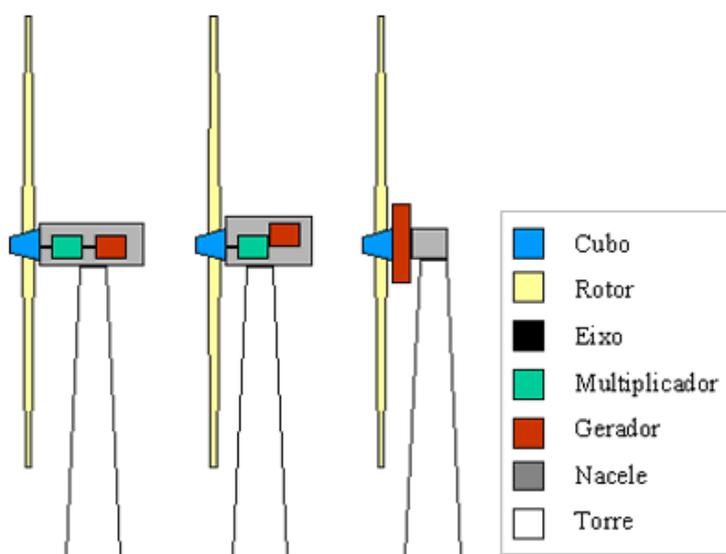
**Figura 6.** Comparativo do fator de capacidade do Brasil com os demais países.  
Fonte: MME, 2018.

Diante do novo cenário para a geração eólica, com uma maior contratação no mercado regulado (ACR) e do mercado livre (ACL), os níveis de geração aumentaram mais de 600% entre os anos de 2013 a 2017, segundo dados da CCEE (de Câmara de Comércio Energia Elétrica, 2019). Também foi significativo o aumento na participação da oferta interna de energia do país, saltando de 1% em 2013 para 8% em 2017, como pode ser visto na figura 7.



**Figura 7.** Evolução da participação de energia eólica para o SIN.  
Fonte: CCEE, 2018.

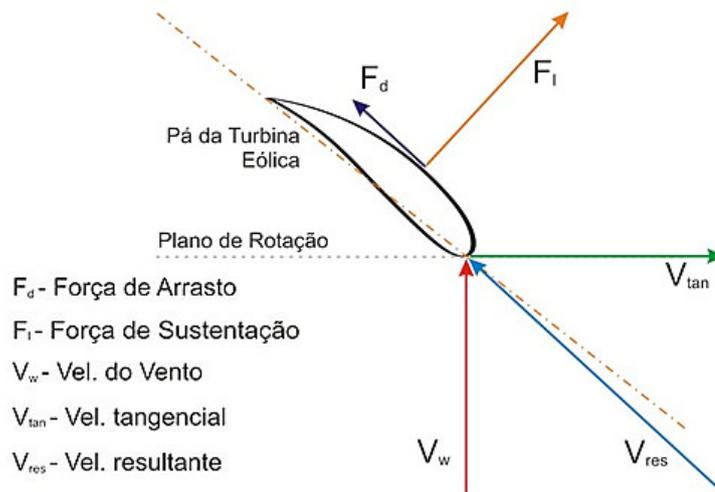
Em alguns meses do ano, a participação da geração eólica tem atingido até 10% da matriz elétrica brasileira e isso é devido ao comportamento sazonal dos ventos. Os ventos têm maior variação na intensidade e duração entre os períodos de julho a dezembro, fazendo com que esse período represente um acréscimo de geração comparado ao outro semestre. A geração de energia elétrica através da fonte eólica é fundamentada na conversão da energia cinética em quantidade de movimento nas pás do aerogerador, o que causa sua rotação. A potência mecânica é, então, transmitida ao gerador que, através de um processo de conversão eletromecânica, produz uma potência elétrica de saída. A figura 8 tem uma ilustração que exhibe as partes de um aerogerador e como estão conectados para transferir quantidade de movimento e converter em energia elétrica.



**Figura 8.** Composição de aerogeradores.

Fonte: Atlas eólico, 2001.

Durante os anos, houve um grande avanço na aerodinâmica das pás de modo que as máquinas modernas são dispositivos otimizados com perfis especialmente desenvolvidos para as pás. Essa parte dos aerogeradores é equivalente às asas dos aviões, as quais funcionam pelo princípio físico da sustentação. A figura 9 descreve as forças aerodinâmicas vistas no corte de uma pá de aerogerador.



**Figura 9.** Diagrama de ação das grandezas relacionadas ao movimento das pás.

Fonte: Atlas eólico, 2011.

A força de sustentação forma um ângulo de  $90^\circ$  com a normal do fluxo do vento resultante ( $V_{res}$ ) e esta é fruto da subtração vetorial das velocidades do vento incidente ( $V_w$ ) e tangencial da pá ( $V_{tan}$ ), conforme a equação (1).

$$\overline{V_{res}} = \overline{V_w} - \overline{V_{tan}} \quad (1)$$

Onde  $V_{tan}$  é produto da velocidade angular do rotor ( $w_{rotor}$ ) pelo raio do rotor na equação 2:

$$V_{tan} = \overline{w}_{rotor} \times Raio \quad (2)$$

O arrasto tem mesma direção e sentido da velocidade resultante ( $V_{res}$ ). A força de sustentação e de arrasto tem uma resultante que é o torque ( $T_{mec}$ ) e a potência mecânica ( $P_{mec}$ ) pode ser encontrada através do produto entre a velocidade angular do rotor e o torque, conforme a equação 3.

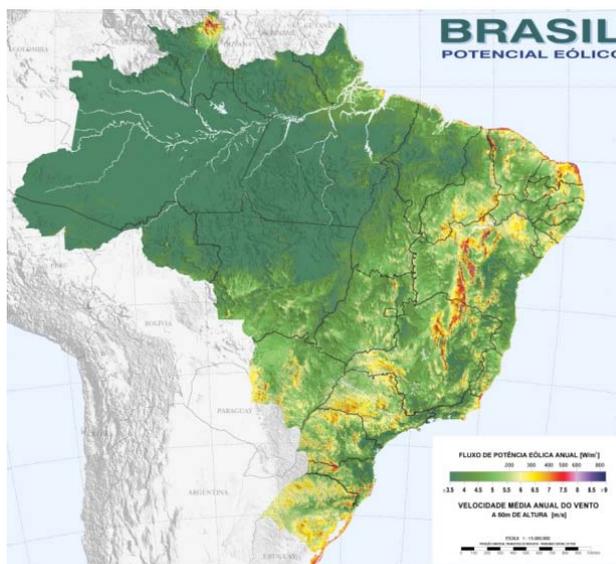
$$P_{mec} = T_{mec} \times \overline{w}_{rotor} \quad (3)$$

A equação resultante que relaciona a velocidade do vento e a potência entregue pela turbina pode ser expressa pela equação 4:

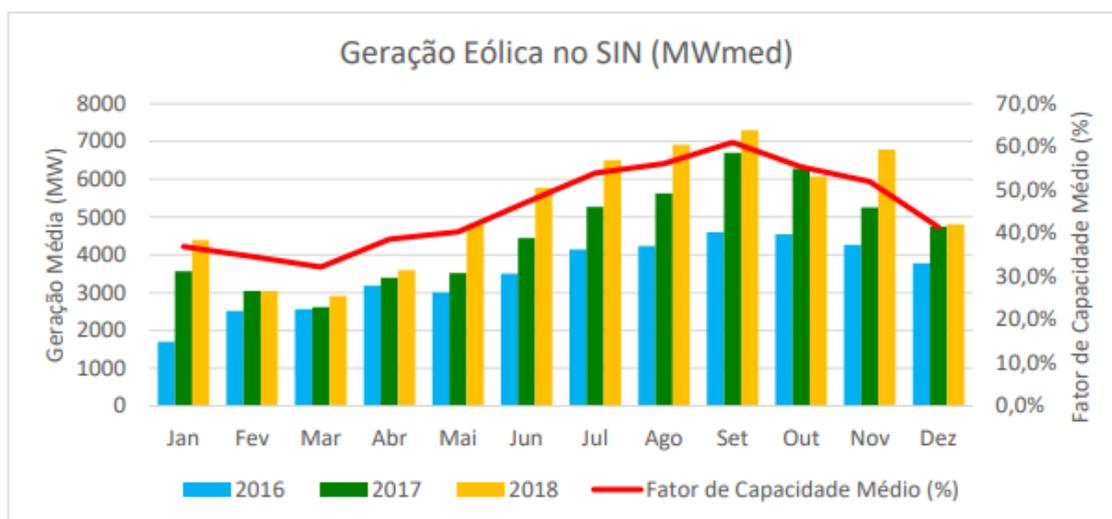
$$P = 0,5 A \eta \rho C_p V^3 \quad (4)$$

Sendo P a Potência (W) entregue, A a área varrida pelo rotor  $\pi r^2$  ( $m^2$ ),  $\eta$  o rendimento do conjunto turbina – gerador,  $\rho$  a densidade do ar (usualmente  $1,225 \text{ kg/m}^3$ ),  $C_p$  o coeficiente de desempenho aerodinâmico e V a velocidade do ar (m/s).

O potencial eólico do Brasil pode ser visto na figura 10 medido pelo fluxo de potência anual dado em  $w/m^2$ .

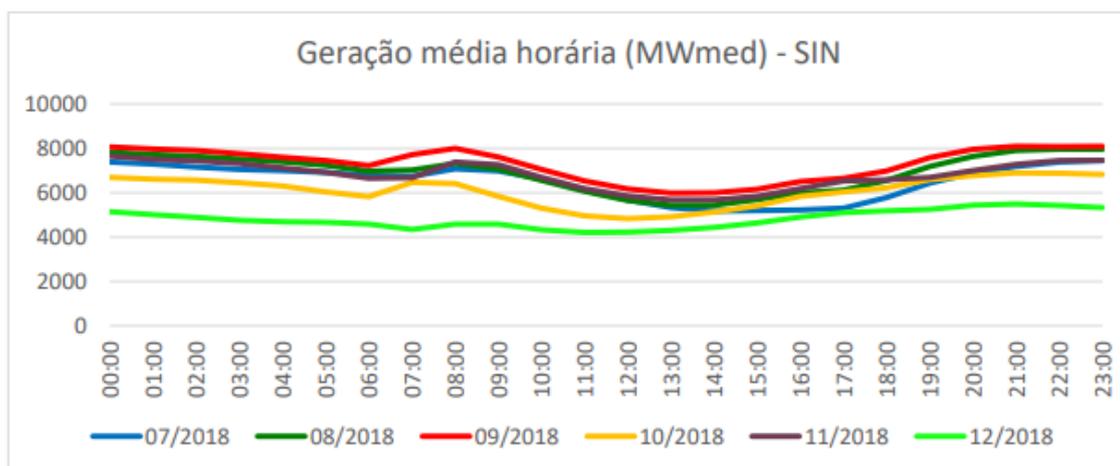


**Figura 10.** Potencial eólico brasileiro. Fonte: Atlas eólico, 2001.



**Figura 11.** Geração eólica do SIN nos anos de 2016 a 2018 em periodicidade mensal e fator de capacidade médio a cada mês. Fonte: ONS, 2018.

Tomando como base o segundo semestre do ano de 2018, na figura 12, é possível verificar a geração em MW médio despachada para o SIN durante o dia. A menor produção média diária ocorre no período das 11h às 16h.

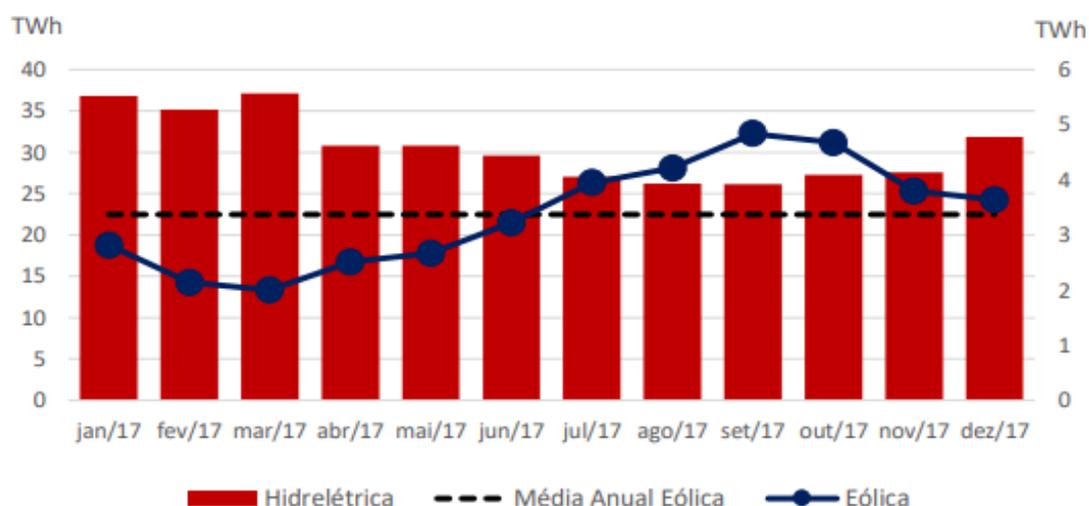


**Figura 12.** Geração eólica média horária no SIN nos últimos 6 meses de 2018.

Fonte: ONS, 2018.

De acordo com dados da CCEE de 2017 e 2018, a energia entregue ao sistema no segundo semestre através da geração eólica representou pouco mais de 60% da produção total anual. Isso indica a importância dessa fonte para o sistema já que nesse período há meses de estiagem.

A figura 13 mostra a geração de energia em 2017 das fontes hidrelétricas e eólicas, segundo dados da CCEE (2017).



**Figura 13.** Complementaridade entre energias hidrelétrica e eólica em 2017.

Fonte: CCEE, 2018.

É facilmente notado através das figuras 11, 12 e 13 que o Brasil possui um grande potencial para geração eólica e, quando associadas as outras fontes como hídrica, por exemplo, é possível complementar a fim de atender uma demanda específica.

#### 4.2.2. Solar Fotovoltaica

Os empreendimentos fotovoltaicos figuram entre as alternativas mais promissoras para a segurança energética mundial. Dados mundiais mostram ganhos significativos e a redução de custos para os investidores. A tabela 2 mostra os 10 países com maior capacidade instalada de geração fotovoltaica (MME, 2019).

A China é a líder em capacidade instalada, mas os países com maior representatividade da fonte solar em relação a demanda são Itália e Alemanha. O fato deve-se, principalmente, a grande dimensão do sistema elétrico Chinês.

O Brasil, segundo dados da ABSolar em parceria com a ANEEL (2019), conforme visto na tabela 3, possui 2,2 GW de capacidade instalada e representa apenas 1,4% da matriz, sem contar com os empreendimentos que estão em construção. Esse valor é baixo quando considerado o potencial solar do Brasil que possui altos níveis de insolação, com médias relativamente altas em todo o território.

**Tabela 2.** Os 10 maiores países com geração solar fotovoltaica.

Países	Geração (TWh)	Potência Instalada (GW)
1. China	66,2	78,07
2. Estados Unidos	56,8	40,3
3. Japão	49,5	42,7
4. Alemanha	38,2	41,3
5. Itália	22,2	19,3
6. Espanha	13,2	5,5
7. Índia	11,9	9,0
8. Reino Unido	10,3	11,7
9. França	8,3	7,1
10. Austrália	7,2	5,5

Fonte: MME (Ministério de Minas e Energia), 01/2019.

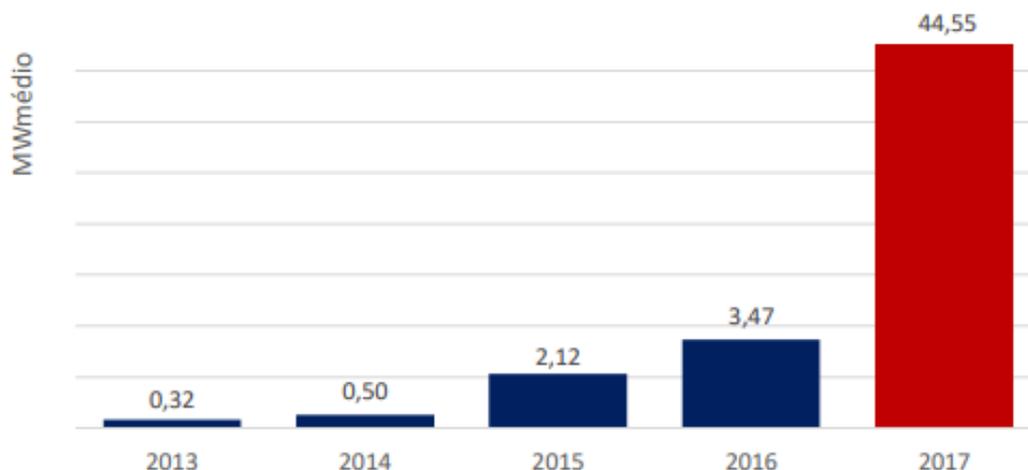
**Tabela 3.** Empreendimentos de fontes de energia solar fotovoltaica no Brasil.

Empreendimentos Fotovoltaicos		
Fase	Quantidade	Potência (GW)
Operação	2.257	1,4
Construção	29	0,79
Total	2286	2,19

Fonte: ANEEL, 2019.

Outra vantagem do Brasil para o crescimento da geração solar fotovoltaica reside no fato de grande parte do território está localizado relativamente próximo da linha do Equador, de forma que se observam altos índices de radiação. Essas condições favorecem os investimentos em energia solar fotovoltaica em todo o país.

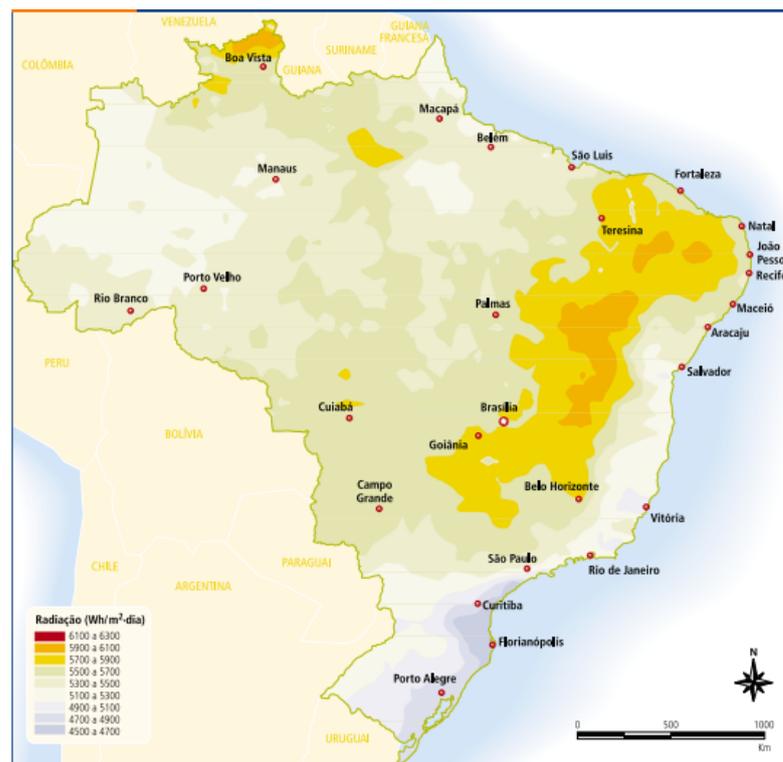
Os empreendimentos fotovoltaicos podem comercializar energia tanto no mercado regulado (ACR) e do mercado livre (ACL), assim como as demais. Embora ainda com uma participação modesta, verificou-se, em 2017, um crescimento significativo da geração solar injetada no SIN, o que se deve, principalmente, ao início da operação da energia contratada por essa fonte no leilão de energia reserva (LER) que aconteceu em 2014, como pode ser visto na tabela 2. Os níveis de geração entre os anos de 2013 a 2017, segundo dados de injeção CCEE (2019), podem ser vistos na figura 14.



**Figura 14.** Crescimento da geração fotovoltaica no SIN.

Fonte: CCEE, 2019.

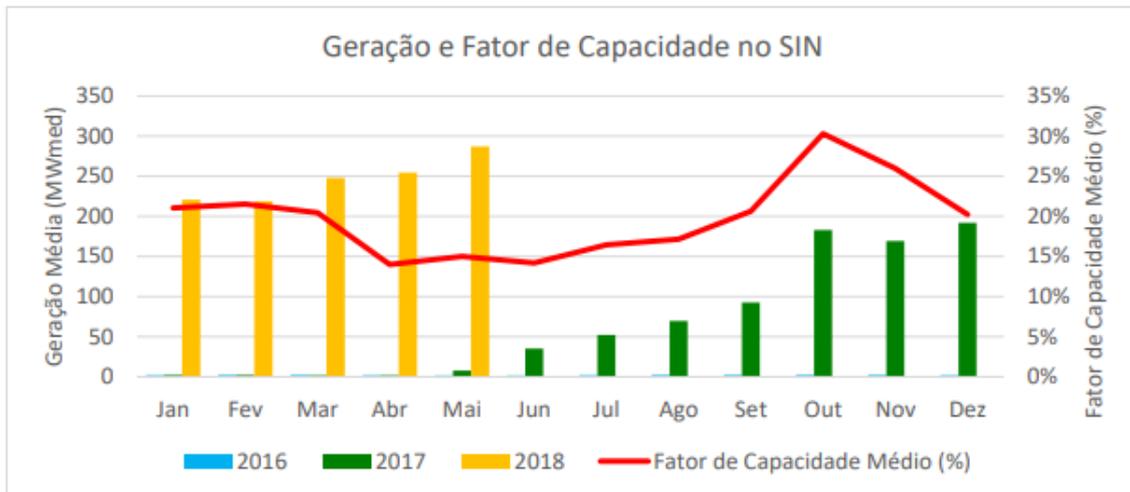
A expansão da geração fotovoltaica no SIN vem crescendo de forma acelerada, assim como no caso da eólica no início do seu processo, e tem atraído investimentos. O potencial de geração fotovoltaica no Brasil pode ser observado na figura 15 que relaciona a potência de irradiação solar medida em  $Wh/m^2 dia$  em todo o território.



**Figura 15.** Irradiação solar ao longo do Brasil em  $Wh/m^2.dia$ .  
Fonte: ANEEL, 2019.

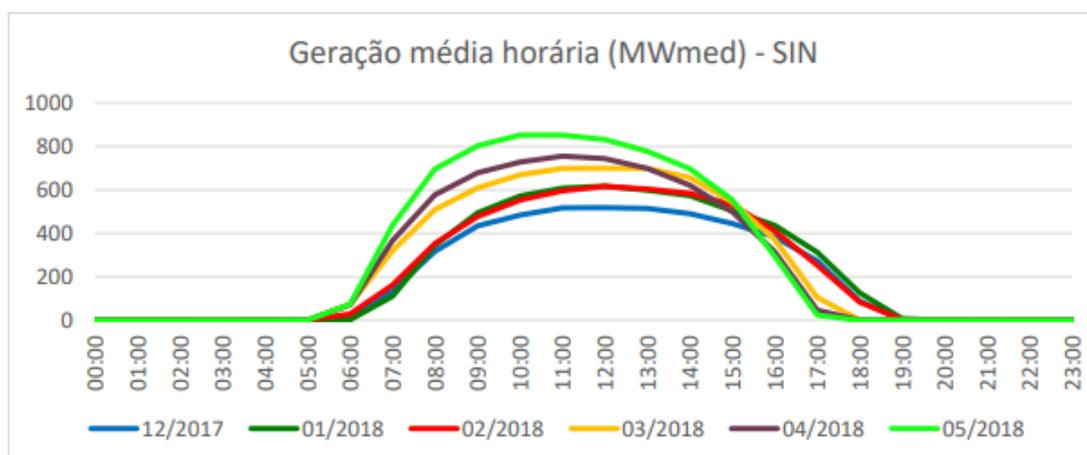
O potencial solar no Brasil tem médias elevadas quando comparadas a vários países do mundo que já inseriram a geração fotovoltaica na sua matriz energética. O potencial de algumas regiões do país, como o Nordeste, para a geração fotovoltaica recai sobre áreas onde não haveria possibilidade de criar geração por fontes hídricas, por exemplo, devido à ausência de bacias hidrográficas.

A figura 16 mostra o perfil de geração comum em relação aos meses nos anos de 2016 a 2018. A produção de 2016 foi bem modesta, mas ganhou expressão nos anos seguintes. É possível observar através do gráfico que os meses de maior produção para a fotovoltaica estão entre setembro e novembro, enquanto os meses de menor geração foram de abril a julho.



**Figura 16.** Geração de energia por fonte fotovoltaica em  $MW_{\text{médio}}$  de 2016 a 2018.  
Fonte: ANEEL, 2019

A figura 17 mostra o perfil de geração diário para os meses de dezembro de 2017 e janeiro a maio de 2018. A produção ao longo do dia varia um pouco em relação à época do ano, mas tem início por volta das 6 horas e é encerrada por volta das 17 horas. Há fatores que podem impactar de maneira pontual as usinas individuais, como sombreamento por nuvens ou horários com chuvas, mas o conjunto de várias usinas espalhadas pelo Brasil torna o processo mais constante e seguro do ponto de vista energético.



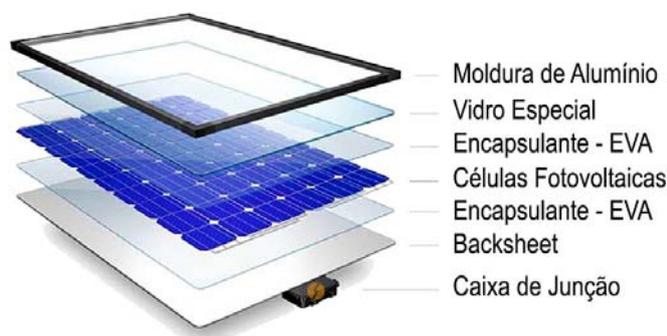
**Figura 17.** Geração de energia por fonte fotovoltaica em  $MW_{\text{médio}}$  em dezembro de 2017 a maio de 2018. Fonte: ANEEL, 2019

Para aproveitamento do potencial solar, a geração fotovoltaica é realizada usando células fotovoltaicas, as quais são constituídas por materiais semicondutores, ou seja, com características intermediárias entre um condutor e um isolador. O material

semicondutor utilizado, normalmente, é o silício (distribuição eletrônica Si:[Ne] 3s<sup>2</sup> 3p<sup>2</sup>).

Os materiais semicondutores ao serem aplicados nas células devem absorver numa gama mais vasta do espectro solar, além de que, para o material ser usado nesse tipo de células, é necessário modificar as suas propriedades elétricas. A célula fotovoltaica é um dispositivo que aproveita a energia da luz solar para criar diretamente uma diferença de potencial elétrico nos seus terminais, produzindo uma corrente elétrica contínua.

As células têm materiais distintos, formando camadas de cargas diferentes (material do tipo N com excesso de elétrons e material do tipo P com excesso de lacunas ou grande falta de elétrons), acarretando assim a formação de um campo eletromagnético. Os átomos que constituem as células, ao serem incididos pelos fótons, liberam elétrons, devido à energia de radiação que os fótons transportam. A radiação à qual uma célula fotovoltaica é sensível tem comprimento de onda entre 300 nm e os 600 nm. A figura 18 apresenta as camadas que formam um módulo fotovoltaico convencional e seus níveis.



**Figura 18.** Composição de módulos fotovoltaicos.

Fonte: Atlas Solar, 2012.

A corrente gerada ao longo dos painéis é contínua e é conduzida ao inversor de corrente, o qual tem como função principal transformar corrente contínua em alternada. Além dessa função, os inversores também estabilizam a tensão, a corrente e a frequência da energia produzida pelos painéis fotovoltaicos.

A equação que relaciona a potência de geração e irradiação é dada por:

$$P = \frac{E}{HSP \eta} \quad (5)$$

Onde  $P$  é a potência em  $W$ ,  $E$  é a energia produzida em  $Wh$ ,  $\eta$  é o rendimento global do sistema e  $HSP$  é a chamada Hora de Sol Pico dada em  $h$  e corresponde a quantidade de horas que o sol pode fornecer potência igual ou superior a  $1000 W/m^2$ .

A quantidade de painéis necessários para a potência desejada é dada pela razão entre a potência total e a potência do painel individual. Há módulos comerciais no Brasil que estão entre potências de 330 e 545 W e fora do Brasil podem chegar a 650 W, mas há avanços tecnológicos frequentes, com lançamentos de novas potências em curto tempo.

#### 4.3. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Para uma crescente integração das energias renováveis, são essenciais métodos e sistemas de armazenamento de energia. O fato da intermitência por parte de fontes renováveis, principalmente fonte solar e eólica, torna não despachável e pouco previsível a utilização dessas fontes. Uma estratégia para resolução desse problema é integrar sistemas capazes de armazenar a energia gerada e não consumida simultaneamente e despachar uma quantidade de energia nos momentos em que não há geração suficiente para suprir a carga.

A ANEEL, em 2016, abriu chamado específico e estratégico de pesquisa e desenvolvimento nacional para sistemas de armazenamento na perspectiva do SIN e esta oportunidade foi facultada principalmente a empresas do ramo elétrico como concessionárias e empresas ligadas a energia. Este fato demonstra a importância do tema dentro do sistema em que se encontra a malha de transmissão e distribuição se encontra.

O modo mais indicado e comum para o armazenamento de energia é em sua forma primária devido a sua estabilidade, o que contribui para que a maioria das energias primárias seja armazenada com facilidade. Tratando-se das energias renováveis, a sua forma primitiva não é passível de ser armazenada e isso obriga que essas sejam convertidas em energia secundária, como calor e eletricidade.

Os sistemas de armazenamento de energia convencionais incluem 4 componentes principais: mecanismo de armazenamento, processo de carga e descarga, monitoramento e controle. Segundo Lopes (2015), as tecnologias de armazenamento de

energia podem ser classificadas de acordo com a forma como são armazenadas ou sua aplicação.

O armazenamento de energia traz benefícios como: ajudar a reduzir o consumo excessivo de combustíveis fósseis, associado com o aquecimento global, e ao mesmo tempo conservar esses recursos com uma natureza não renovável; desempenhar um papel importante na penetração de recursos energéticos renováveis, limpos e intermitentes; ajudar na equipotencialização, operação e controle de frequência dos sistemas de energia elétrica; e ajudar a manter a estabilidade e melhorar a qualidade da energia em micro redes.

As aplicações do armazenamento de energia são dependentes da densidade de energia e densidade de potência e, segundo Lopes (2015), distinguem-se em dois grupos: de elevada potência, cujo tempo de funcionamento é muito curto; e de elevada energia, que se caracterizam por elevada autonomia de funcionamento, fornecendo energia por longos períodos. A figura 19 ilustra a disposição das utilidades das tecnologias de armazenamento e sua definição (Helsingen, 2015).

Utilidade	Definição
Regulação da tensão	Manter o nível de tensão entre os limites favoráveis através de transformadores e modificadores de fase
Regulação da frequência	Regulação contínua das mudanças na procura, num intervalo de milissegundos a 15 minutos
Estabilização da rede	Capacidade de resposta rápida a picos de procura
Reserva girante	Capacidade de compensar a rápida e inesperada geração de energia, intervalos inferiores a 15 minutos
Seguimento de carga ( <i>Load following</i> )	Ajustar, continuamente, a oferta à procura (tipicamente em intervalos de 15 minutos), ou seja, armazenar energia excedente (horário fora de pico) e devolver quando é necessária (horas de pico), sem aumentar a produção
Deslocamento temporal ( <i>time shifting</i> )	Capacidade de armazenar energia em períodos fora de pico, quando o preço é baixo, e descarregar em horas de pico, a preços mais elevados
Alisamento de picos ( <i>Peak sheaving</i> )	Capacidade de controlar o autoconsumo em períodos de grande consumo
<i>Black Start</i>	Capacidade de reiniciar autonomamente, ou seja, sem recorrer a energia da rede
Nivelamento de carga ( <i>Load Levelling</i> )	Fornecer energia no horário de pico, reduzindo a produção em centrais que envolvem maiores custos económicos

**Figura 19.** Utilidades das tecnologias de armazenamento de energia e respectiva definição. Fonte: Helsingen, 2015.

A análise da figura 19 deixa explícito que uma maior densidade de potência serve para manter parâmetros de rede como tensão e corrente, e maiores densidades de carga são benéficas para nivelamentos de carga. Na integração de fontes renováveis com alguma imprevisibilidade de produção, aliado a uma variação na carga que precisa ser suprida, o melhor método de armazenamento tende a ser aquele que tenha alta densidade de carga e densidades de potência não tão elevadas.

Segundo Grazzini e Milazzo (2008), uma classificação comum adotada para as tecnologias de armazenamento é de acordo com o tipo de energia armazenada como pode ser visto na tabela 4 e está organizada nas seguintes categorias: energia química, eletroquímica, eletromagnética, mecânica ou térmica.

**Tabela 4.** Classificação das tecnologias de armazenamento.

<b>Eletroquímica</b>	<b>Elétrica</b>	<b>Mecânica</b>	<b>Térmica</b>	<b>Química</b>
Baterias estacionárias	Energia eletromagnética	Bombeamento hídrico	Sem mudança de fase	Hidrogênio
Baterias de fluxo	Capacitor Capacitor de dupla camada	Volante de Inércia Ar comprimido	Com mudança de fase	Gás natural sintético

Fonte: Grazzini e Milazzo. 2008.

#### **4.3.1. Armazenamento de Energia Eletroquímica**

A forma de armazenamento eletroquímica ocorre através do uso de baterias, as quais, segundo Chen e colaboradores (2009), são a forma mais antiga de armazenar energia elétrica. A definição mais simples de bateria é um conjunto de células eletroquímicas que podem ser ligadas em série ou paralelo e funcionam de acordo com reações do tipo Redox (ou oxirredução). As reações químicas do tipo oxirredução envolvem a transferência de elétrons através de ânodos (polo negativo) e cátodos (polo positivo), ambos em contato com um eletrólito (condutor de eletricidade, na forma de solução), produzindo uma corrente elétrica contínua (Luo *et al*, 2015).

Há dois tipos de baterias que são as de fluxo e as estacionárias. Nas baterias chamadas estacionárias, o eletrólito faz o papel do meio para transferir os íons. Nas denominadas de fluxo, o eletrólito é o meio onde se armazena a energia (Helsingen, 2015). Em qualquer dos tipos de bateria, diferentes materiais são aplicados nos componentes do sistema e isso possibilita a utilização de diferentes tipos de baterias

com diferentes aplicações. Esses diferentes tipos de bateria podem ser selecionados para utilização, dependendo da quantidade de energia que se pretende armazenar e do espaço disponível (Abelho, 2011).

Em baterias convencionais, os íons movem-se do polo negativo para o positivo durante o processo de descarga com os elétrons conduzidos no mesmo sentido através de um condutor, o que gera um fluxo de elétrons como corrente contínua que pode ser usado para alimentar um circuito. O processo pode ser revertido, ou seja, pela utilização de tensão externa, é possível carregar novamente a bateria. Nessas baterias, as dimensões e a composição das células têm uma grande influência na capacidade de armazenamento e na potência da bateria. As baterias mais comuns e comerciais são baterias de íons de lítio, níquel-cádmio, sulfato de sódio e chumbo ácido. A tabela 5 exibe vantagens e desvantagens de acordo com o tipo de tecnologia utilizada na bateria.

**Tabela 5.** Vantagens e desvantagens dos principais tipos de baterias estacionárias.

<b>Tipos de bateria estacionária</b>	<b>Ácido-chumbo</b>	<b>Íons-Lítio</b>	<b>Sulfato de Sódio</b>	<b>Níquel-Cádmio</b>
Desvantagens	Baixa densidade de potência;			Custos elevados;
	Perda de desempenho;	Custo elevado;		Rápida auto-descarga;
	Vida útil curta;	Requer sistema de equilíbrio e controle durante a carga	Custo elevado;	Redução da capacidade de recarga;
	Materiais pesados e tóxicos;		Questões de segurança	Materiais pesados e tóxicos;
Vantagens	Elevada manutenção;			
		Maior densidade de energia;	Potência elevada;	Maior densidade de Potência;
	Baixa auto-descarga;	Pouca manutenção;	Densidade energética elevada;	Maior ciclo de vida;
	Baixo custo;	Baixa taxa de descarga;	Boa eficiência;	Pouca manutenção;

Fonte: H. Chen *et al*, 2009.

Os desafios a serem superados nas baterias são as mudanças nas composições dos materiais dos diversos componentes. Até então, os materiais utilizados são tóxicos e

não recicláveis. Vencidas essas barreiras, o armazenamento torna-se uma tecnologia mais viável e sustentável para aplicações cada vez mais comuns.

Tratando-se de baterias de fluxo, a composição padrão inclui dois tanques de armazenamento, com dois eletrólitos, duas bombas e uma célula de combustível. Os tanques armazenam os eletrólitos que alimentam a célula de energia, a qual é constituída pelos elétrodos e por uma membrana microporosa que permite a passagem de, apenas, íons selecionados, não permitindo a mistura dos dois eletrólitos, de forma a gerar corrente elétrica (Abelho, 2011). O processo de carga e descarga de uma bateria de fluxo é semelhante à de uma bateria secundária, a diferença é que o eletrólito não é armazenado junto dos elétrodos.

O princípio de funcionamento baseia-se nas reações de oxidação-redução dos eletrodos. Para carregar, um dos eletrólitos é oxidado no ânodo e o outro é reduzido no cátodo, convertendo energia elétrica em energia eletroquímica. Para descarregar, o eletrólito é conduzido à célula de combustível. O volume dos tanques de armazenamento define a quantidade de energia armazenada. A potência alcançada pode ser superior às das baterias convencionais, uma vez que ela só depende do tamanho da célula de combustível (Abelho, 2011). As baterias de fluxo mais comuns são oxidação-redução de vanádio, bromo e de zinco (Chen et al., 2009).

Esse tipo de bateria pode ser acoplado a sistemas de energia renovável, como a energia eólica e fotovoltaica, contudo o armazenamento de energia em larga escala com a utilização de baterias ainda é raro (Chen et al., 2009). As baterias de fluxo têm como características favoráveis o rápido tempo de resposta, a elevada capacidade de recarga, por substituição do eletrólito, o que proporciona maior longevidade ao equipamento, possibilidade de descarga completa sem danificar a bateria (Abelho, 2011) e utilização de materiais não tóxicos.

#### **4.3.2. Armazenamento de Energia Elétrica**

O armazenamento sob a forma de energia elétrica também é possível e pode ser realizado através de capacitores e supercapacitores. No caso da utilização de capacitores, a energia elétrica é armazenada como energia do tipo potencial elétrica e na utilização de supercapacitores, a energia é armazenada como energia do tipo cinético (magnética) em bobinas.

Os sistemas com supercapacitores são compostos por bobina supercondutora, um sistema de controle e um sistema de refrigeração. Em supercondutores, a resistência a corrente elétrica é tornada nula devido ao material supercondutor ser mantido a temperaturas muito baixas com auxílio de hélio líquido ou nitrogênio. A corrente elétrica é mantida em circulação na bobina por períodos indefinidos e isso permite o armazenamento.

A fim de manter o campo magnético, faz-se necessária a utilização de uma corrente elétrica contínua circulante que produz perdas ôhmicas. Essas perdas são proporcionais ao quadrado da corrente elétrica e diretamente a resistência dos condutores. A corrente elétrica é diretamente proporcional a quantidade de energia armazenada e, para que essa seja maximizada, supercondutores com resistência ôhmica muito baixa ou nula são selecionados para utilização.

Sistemas de armazenamento desse tipo tem potência entre 1 e 10 MW, eficiência na ordem de 95% e tempo de resposta para entrega da energia armazenada muito curto (Helsingen, 2015). Dessa forma, o armazenamento usando essa tecnologia é direcionado para suprir picos de potência com tempo de resposta muito rápido, mas que não exijam grandes quantidades de energia.

Segundo Bueno e Brandão (2016), utilizar propriedades supercondutoras requer temperaturas de até 260°C abaixo de zero, o que implica em tecnologias específicas, infraestrutura especial e consumo energético elevado para a refrigeração (mesmo em momentos de *standby*). Outras vantagens do sistema de armazenamento através de supercondutores são o longo período de vida útil, com um número elevado de cargas/descargas, a baixa degradação do material, o baixo custo de manutenção e a alta segurança de operação.

Chen et al (2009) apontam como desvantagens desses sistemas a autodescarga do equipamento em torno de 15% por dia e o capital elevado para investimentos devido aos sistemas necessários para manter temperaturas criogênicas. Esses motivos são responsáveis pela não utilização desse tipo de sistema em escala comercial, sendo utilizadas em apenas pequenos sistemas para controle de qualidade de energia.

Uma alternativa para armazenamento de energia elétrica é a utilização de supercapacitores ou capacitor elétrico de dupla camada (CDC). Um capacitor é constituído por duas placas condutoras com uma fina camada isolante entre elas, chamada de dielétrico, a qual pode ser de vidro, filme plástico ou cerâmica.

Durante o processo de carregamento, a fonte de energia elétrica é ligada ao capacitor para alimentação e a corrente começa a fluir para o capacitor pela diferença de potencial observada devido ao acúmulo de cargas. O equipamento é projetado de tal forma que permite acumular quantidades iguais de cargas positivas e negativas em região específica para cada polaridade de forma a atrair-se e não se misturar. Essa organização cria um campo eletrostático, onde a energia é armazenada.

A igualdade na tensão dos terminais com a tensão da fonte de alimentação é indicativa de que o capacitor está completamente carregado e a corrente para de fluir. A máxima tensão possível de ser armazenada é característica do material empregado no dielétrico e a quantidade de energia armazenada depende de sua área (Chen et al., 2009).

Com relação a densidade de energia acumulada, os supercapacitores estão entre as baterias e os capacitores convencionais, pois têm um ciclo de vida bastante superior as baterias (quantidade de carga e descarga bem maior) e uma densidade de energia inferior medido em Wh/kg. Como há uma relação direta entre potência e energia acumulada, à medida que a energia decresce na descarga, a potência do sistema diminui ( $U = \frac{1}{2}CV^2$ , onde  $U$  é o potencial,  $C$  é a capacitância em Farad e  $V$  é a tensão em Volt).

Assim como na alternativa anterior, os supercapacitores são sistemas capazes de armazenar energia por curtos períodos com uma resposta muito rápida na entrega da energia armazenada. A aplicação de supercapacitores deve ser no intuito de suprir grandes picos de potência instantânea com tempo de resposta muito rápido, o que tende a suavizar mudanças na carga, mas possuem uma baixa capacidade de armazenamento, comparados a outras tecnologias.

Tendo tais características em foco, a utilização desses sistemas é vantajosa onde há picos de potência elevados de curta a curtíssima duração. Outro tipo de aplicação é em sistemas híbridos, em conjunto com baterias, a fim de minimizar variações bruscas para a bateria, o que torna possível o aumento da vida útil das baterias.

Os capacitores convencionais são uma tecnologia madura de armazenamento direto de energia, mas ainda não são capazes de atuar em larga escala. Sendo assim a utilização de supercondutores com dupla camada passa a ser uma alternativa mais viável com o desenvolvimento de novos materiais que constituem o eletrólito (baseados em nano materiais) (Santos, 2013). Isso permite a redução da distância entre os eletrodos condutores a fim de aumentar a capacidade de armazenamento e, portanto, a densidade

de energia (Luo et al., 2015). Apesar da eficiência dessa tecnologia ser em torno de 90%, a taxa de autodescarga diária ainda é um problema e chega a alcançar até 40%. Outras desvantagens relacionadas a esse armazenamento são os elevados custos de investimento e a deterioração do solvente utilizado nos capacitores em curto período, comparando com todo o sistema.

#### **4.3.3. Armazenamento de Energia Mecânica**

Um método alternativo de armazenamento de energia aos já citados é como energia mecânica, podendo ser sob a forma de energia cinética ou potencial, com tecnologias como volante de inércia, bombeamento hídrico e ar comprimido.

A tecnologia de armazenamento mais desenvolvida e aplicada em larga escala é a denominada hidrelétrica reversível, pois seu princípio de funcionamento é relativamente simples (Chen et al., 2009). São necessários dois reservatórios com diferentes alturas para que ocorra o aproveitamento do deslocamento da massa de água de modo a transformar energia potencial em cinética, o que gira as pás da turbina através da qual o fluido flui. Para a produção de energia, se necessário, a água fluirá do reservatório mais alto para o reservatório mais baixo; todavia, quando não há necessidade de produzir energia ou há um excedente, a água é bombeada do reservatório mais baixo para o reservatório mais alto para ser armazenada.

Atualmente, aproximadamente 99% da capacidade mundial de armazenamento de energia instalada é bombeamento hídrico (Odukamaiya et al., 2017), com eficiência entre 70% e 85%, comum para a tecnologia. A quantidade de energia armazenada é diretamente proporcional a diferença de altura entre as cotas e quantidade de água bombeada para o reservatório superior.

A tecnologia de bombeamento hídrico permite armazenar grandes quantidades de energia por longos períodos devido a:

- ter um nível de despacho elevado,
- ter uma pequena autodescarga associada com a evaporação natural dos reservatórios,
- possuir longo tempo de vida útil,
- ser uma tecnologia amplamente testada e
- ter um padrão confiável de segurança.

As limitações da tecnologia estão ligadas a capacidade do volume finito dos reservatórios e a diferença de altura entre eles. Esses fatores são determinantes para a potência de saída da central geradora e dependem estritamente do local geográfico onde se encontram as barragens (Vranas, 2017). Há ainda desvantagens como alto custo de construção, tempo de construção elevado e impacto ambiental na construção através do impacto no regime fluvial e por mudança na paisagem natural.

Com objetivo de driblar essas limitações, há estudos dedicados ao aproveitamento hidrelétrico que utilizam reservatórios como minas inundadas ou até mesmo oceanos como cota inferior. Há um importante avanço para esses sistemas, quando ligados a fontes de energia renováveis como eólica e solar fotovoltaica como defendido por Luo et al (2015).

Outro tipo de tecnologia de armazenamento de energia mecânica que pode atingir potências semelhantes a hidrelétrica reversível é através de ar comprimido (AEAC – Armazenamento de Energia a Ar Comprimido). A ideia primitiva e mais fundamental de armazenamento de energia usando ar comprimido envolve a compressão, estocagem do ar e expansão. Os componentes utilizados para esse processo são reservatórios, turbina, compressor e gerador.

Quando a geração de eletricidade está acima do consumo (horários fora ponta), o excedente de energia elétrica aciona um motor elétrico que ativa o compressor para realizar trabalhos sobre o ar ambiente. Ao comprimir o fluido e armazená-lo em um reservatório guarda consigo energia potencial. Quando o consumo é maior que a geração e faz-se necessário a produção de energia elétrica (horário de ponta), o ar é liberado, aquecido e expandido em uma turbina que está ligada ao gerador elétrico, produzindo energia elétrica e devolvendo-a a rede.

O grande diferencial normalmente atribuído aos sistemas de armazenamento utilizando ar comprimido está relacionado com os custos de investimento, que para sistemas muito grandes não são muito elevados, se comparados com baterias ou outros métodos para grandes densidades energéticas. Esses sistemas permitem uma melhor gestão da energia, uma vez que, armazenam a energia em excesso na rede e a liberam quando é necessário.

No entanto, para usar esse tipo de armazenamento em larga escala, o reservatório deverá possuir variáveis muito bem definidas e dimensões bastante consideráveis. O ciclo completo de compressão e expansão têm baixa eficiência, em geral, devido à transferência de calor com o ambiente, cujo armazenamento não é

viável. Uma vez que o calor trocado é perdido, há geração entrópica, o que diminui o trabalho útil possível do sistema (Chen et al., 2009).

A eficiência comum atribuída às centrais convencionais desse tipo de tecnologia é cerca de 50%, mas para atingir esse valor faz-se uso de um reaquecimento, geralmente, através da queima de combustíveis fósseis para o ar a fim de melhorar sua eficiência. Pensando em um processo completamente sustentável, esse fator é complicador para o sistema devido a emissão de gases poluentes (Vranas, 2017).

Nesse sentido, vários projetos têm surgido no intuito de avaliar diferentes formas de realizar o processo com o objetivo de obter centrais sustentáveis e sem utilização de combustíveis fósseis. Como exemplos, podem ser citados os processos de armazenamento utilizando ar comprimido com compressão/expansão adiabática, com aproveitamento de energia térmica ou com compressão/expansão isotérmica, ou ainda com aproveitamentos de hidrelétrica reversível (Luo et al., 2015).

Uma forma de armazenamento de energia mecânica diferente das já apresentadas é através de energia cinética de uma massa girante e utilizam-se atualmente sistemas do tipo volante de inércia, conforme mostrado na figura 20. Essa tecnologia é composta por um cilindro rotativo, um motor (processo de carga) reversível que também opera como gerador (processo de descarga) e uma câmara de vácuo (Luo et al., 2015). A utilização de chumaceiras magnéticas e câmara de vácuo permitem minimizar as forças de atrito (Vranas, 2017), minimizando assim a autodescarga e as perdas por atrito no sistema. A energia cinética é gerada pelo movimento da massa inercial, e quanto maior a sua velocidade maior a quantidade de energia armazenada (EL-MANN, 2009).

Esse modo de armazenamento não é viável para armazenar em longo prazo, uma vez que as taxas de autodescarga são altas, pois o atrito faz com que a massa inercial perca rapidamente o movimento (Lopes, 2015). Apesar disso, tais sistemas têm um tempo de resposta rápido, alta densidade de potência, longo tempo de vida útil e alta eficiência (90% a 95%) permitindo muitas descargas.



**Figura 20.** Esquema de um sistema de volante inercial. Fonte: Lopes, 2015

#### 4.3.4. Armazenamento de Energia Química

Um método de armazenamento que tem ganhado atenção é o armazenamento de energia química e está majoritariamente relacionado com sistemas de armazenamento de hidrogênio e gás de síntese (ou natural sintético - GNS) (Luo et al., 2015). A utilização dessa tecnologia apresenta algumas vantagens operacionais, como a possibilidade de armazenamento e distribuição na rede de gás natural já existente (Luo et al., 2015), dispensando o investimento em infraestruturas de distribuição.

Além das formas tradicionais de produção de hidrogênio utilizando “gás natural, óleos pesados, materiais biológicos e carvão”, outro processo para produzir hidrogênio de forma mais sustentável do ponto de vista ambiental é a eletrólise da água ( $H_2O$ ), utilizando células de combustível (Helsingen, 2015).

Para armazenar hidrogênio, são comumente utilizados sistemas compostos por uma célula combustível, depósito de armazenamento e eletrolisador (conversor eletroquímico responsável pela eletrólise). O processo é composto por uma célula eletroquímica, onde são consumidos o agente redutor (combustível) e o agente oxidante (comburente), os quais reagem na presença de um eletrólito, com o objetivo de gerar energia elétrica (Chen et al., 2009). Uma célula de combustível reversível, como a célula de hidrogênio, utiliza hidrogênio e oxigênio para gerar eletricidade e água e, no processo inverso, consome água e eletricidade para produzir hidrogênio e oxigênio. O hidrogênio passa através do ânodo enquanto o oxigênio através do cátodo e, com ajuda de um catalisador, o hidrogênio é separado em íons positivos e elétrons. Os primeiros

passam no eletrólito e combinam-se com o oxigênio formando água, enquanto os elétrons passam num circuito externo e formam a corrente elétrica da célula.

O armazenamento de hidrogênio pode ser de formas diferentes como “gás a alta pressão, um líquido a baixa temperatura, absorvido em hidretos metálicos ou quimicamente ligado em hidretos complexos” (Luo et al., 2015). Como exemplo, no caso de aplicações estacionárias, o armazenamento indicado é sob a forma de gás de alta pressão. O tipo de armazenamento também depende das quantidades armazenadas, uma vez que, para armazenar quantidades menores, o ideal é utilizar pequenos depósitos. Por outro lado, para o armazenamento em grandes quantidades, podem-se utilizar minas de sal, em que quanto maior a quantidade de hidrogênio armazenada, menor a pressão de armazenamento para a mesma quantidade de energia (Luo et al., 2015).

Segundo Helsingen (2015), embora a eficiência do ciclo completo do processo, a baixas temperaturas, esteja compreendida entre os 56% a 73%, em geral, a eficiência de ciclo completo dessa tecnologia de armazenamento de energia está na ordem dos 20% a 45%. As vantagens desse tipo de sistema é poder armazenar, por longos períodos, grandes quantidades de energia devido à alta densidade de energia do hidrogênio. Além disso, o hidrogênio é versátil, pois pode ser utilizado como combustível para transporte e aquecimento, com o benefício de ser um combustível não poluente e renovável (Helsingen, 2015) e pode ser aplicado em média e larga escalas. Uma desvantagem desse tipo de sistema é o custo muito elevado por ser necessário que o hidrogênio tenha alto grau de pureza (Leonzio, 2016). Essa exigência garante a longevidade do sistema e a baixa densidade de energia, o que implica que os depósitos de armazenamento tenham um volume bem considerável. Esse processo é desafiador, pois é necessário encontrar a melhor maneira de funcionamento com maior eficiência e redução dos custos envolvidos.

O armazenamento de gás natural sintético (GNS) é outra forma de armazenamento de energia química. Esse gás é produzido segundo a reação de *Sabatier*  $CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$  (Leonzio, 2016).

A reação entre o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o hidrogênio, na presença de um catalisador de níquel, dá origem a gás metano e a água. O hidrogênio pode ser obtido através da eletrólise da água.

Existem diversas fontes de  $CO_2$  e encontrar processos cada vez mais limpos que utilizem esse componente é um desafio para aqueles que trabalham com captura e utilização de carbono (CCU). Quando existe excesso de eletricidade na rede, essa é

utilizada pelo sistema, dando início à eletrólise da água, seguida da reação de Sabatier. Quanto maior o consumo dos reagentes, maior será a eficiência do processo, o qual, estequiometricamente, utiliza 4 vezes mais hidrogênio do que dióxido de carbono.

O armazenamento de metano pode ser feito através de liquefação, mas também pode ser injetado diretamente na rede de gás, em depósitos pressurizados ou subterrâneos. O metano tem uma densidade mássica de energia superior à do hidrogênio e a temperatura de ebulição mais alta e esses fatores fazem com que esse armazenamento seja mais barato (Chen, 2009). A eficiência de um ciclo nesse processo está na ordem dos 20% a 30% e por isso ainda é considerado um sistema muito dispendioso.

#### **4.3.5. Armazenamento de Energia Térmica**

Ainda existem tecnologias de armazenamento de energia térmica que são sistemas que armazenam calor, podendo haver mudança de fase ou não. O calor pode ser armazenado a temperaturas mais baixas que a temperatura ambiente, para aplicações de arrefecimento, ou a temperaturas mais elevadas que a temperatura ambiente, utilizado para aquecimento (Vranas, 2017).

Geralmente, os sistemas de armazenamento de energia térmica são compostos por um reservatório que contém o fluido de transferência de calor ou meio de armazenamento, um sistema de refrigeração e uma bomba. Quando o calor armazenado é do tipo que sua transferência não ocorre com mudança de fase, observam-se mudanças de temperatura no meio onde está armazenado o ar.

Na maioria das alternativas, meios líquidos possuem maior capacidade calorífica e maior densidade energética, mas capacidades de descarga mais baixas. Já situações em que o meio é sólido, há menor probabilidade de extravasamento e o tempo de vida útil do conjunto é maior (Helsingen, 2015). Quando se trata de temperaturas superiores a 600°C, os meios sólidos são os mais apropriados. A mudança de temperatura no meio que armazena a energia é a força motriz para a transferência de calor, pois, quando a sua temperatura diminui ou aumenta, a energia é liberada ou armazenada, respectivamente.

Quando o calor é armazenado em um meio sólido, requer a passagem de um fluido de trabalho, ocorrendo transferência de calor por convecção. Caso o meio de armazenamento seja líquido, é necessário bombeá-lo para fora do recipiente de armazenamento para um permutador de calor (Vranas, 2017).

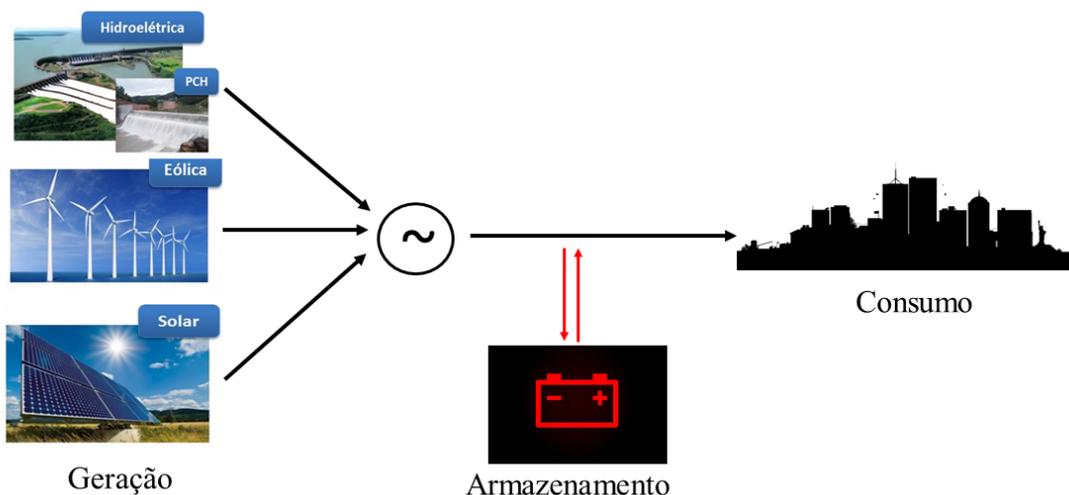
O armazenamento de energia com mudança de fase aproveita o meio para armazenar calor, sem mudança de temperatura. A substância mais conhecida para armazenar calor é a mistura gelo/água e a principal vantagem de armazenar calor com mudança de fase é a capacidade de armazenar grandes quantidades de energia num volume relativamente pequeno, sem mudanças de temperatura, que permite transferências de calor mais eficientes (Luo et al., 2015).

A eficiência dos processos sem mudança de fase utilizados para armazenamento tem ciclos com eficiência entre 50% e 90%. Já para processos com mudança de fase, a eficiência é um pouco maior tendo rendimento de 75% a 90% (Sarbu e Sebarchievici, 2018). Essa forma de armazenamento pode ser utilizada para conciliar demanda e oferta de energia térmica e tem a grande vantagem, de muitas vezes, utilizar a energia que seria dissipada para o ambiente. Essa forma de armazenamento possui a vantagem de não prejudicar o meio ambiente e ser reversível em uma grande quantidade de ciclos.

## 5. MÉTODOS

As sazonalidades para geração de energia elétrica através de fontes renováveis possuem unidades de tempo diferentes entre si, pois há variações ao longo do ano e pode ser expressa comparando meses e estações do ano. Há também variações durante o dia, as quais serão percebidas ao longo de horas e há pequenas flutuações perceptíveis apenas na unidade de minutos ou segundos.

O trabalho foi desenvolvido visando à adequação da demanda e geração de energia através das fontes de energia renováveis e de métodos de armazenamento robustos. Para alcançar tais objetivos, o estudo foi dividido em sazonalidade anual e sazonalidade diária. A figura 21 apresenta um esquema da abordagem utilizada neste trabalho.



**Figura 21.** Esquema do tipo de abordagem de integração das fontes renováveis e convencionais.

Com o objetivo de adequação da sazonalidade anual, o modelo foi desenvolvido na unidade de tempo de meses a fim de observar as mudanças de inclinação da terra (verão/inverno), direção dos ventos e regime de chuvas.

Visando a adequação da sazonalidade diária, o modelo foi realizado na unidade de tempo de horas do dia para estudar o que acontece ao longo do dia produtivo com suas intermitências próprias.

### 5.1. MODELO: ABORDAGEM ANUAL

Visando o atendimento da demanda com as fontes de geração de energia solar, hídrica e eólica, foram consideradas suas variações anuais de acordo com as características próprias das sazonalidades.

Os dados de consumo de energia elétrica foram obtidos através de arquivos da ONS (2019), entre as datas de 01 de dezembro de 2018 e 30 de novembro de 2019, para o Brasil e para o subsistema da região Nordeste. Os dados são apresentados na tabela 6.

**Tabela 6.** Dados do consumo de energia elétrica no Brasil e na região Nordeste em GWh.

	<b>Brasil</b>	<b>NE</b>	<b>NE/BR</b>
Mês	Consumo (GWh)	Consumo (GWh)	%
Janeiro	54.416	8.435	15,50%
Fevereiro	48.351	7.759	16,05%
Março	51.468	8.272	16,07%
Abril	49.481	8.009	16,19%
Mai	49.820	8.252	16,56%
Junho	45.916	7.391	16,10%
Julho	46.939	7.565	16,12%
Agosto	47.623	7.665	16,10%
Setembro	48.094	7.698	16,01%
Outubro	51.710	8.489	16,42%
Novembro	49.898	8.446	16,93%
Dezembro	50.465	8.163	16,18%

Fonte: ONS, 2019.

A energia disponibilizada para o consumo (despachada) total é a soma da geração de energia a partir das fontes selecionadas. Para tal, foram consideradas as potências de geração individuais e a integração só foi constituída na rede integrada de corrente alternada.

$$Cons = G^{solar} + G^{eólica} + G^{hídrica} - S \quad (6)$$

onde  $Cons$  é a energia consumida em GWh,  $G^{solar}$ ,  $G^{eólica}$  e  $G^{hídrica}$  são as quantidades de energia geradas por fonte solar, eólica e hídrica, respectivamente.  $S$  é a quantidade de energia armazenada (não consumida instantaneamente).

Quando a energia é gerada, mas não consumida, o rearranjo da equação 6 fica:

$$S = \sum_{fonte} G^i - Cons \quad (7)$$

Para a geração hídrica foram utilizados dados de geração da ONS para a usina de Sobradinho na Bahia, de 01 de dezembro de 2018 a 30 de novembro de 2019, disponíveis no site do operador nacional e apresentados na tabela 7 (ONS, 2019).

**Tabela 7.** Dados de geração da usina de Sobradinho (BA) em GWh.

Mês	Geração (GWh)
Janeiro	154
Fevereiro	120
Março	120
Abril	119
Maiο	173
Junho	152
Julho	148
Agosto	140
Setembro	163
Outubro	164
Novembro	172
Dezembro	119

Fonte: ONS, 2019.

A potência de geração solar pode ser obtida usando a equação (5) e a energia gerada pela equação (5) rearranjada:

$$E = P HSP \eta_s \quad (8)$$

onde  $\eta_s$  é a eficiência e o HSP é horas de sol pico (ou pleno) em h e P é a potência dada em Watts. Foram dimensionados sete (7) parques fotovoltaicos de 150 MWp (megawatts pico) de potência com somatório de potência a 1,05 GWp (gigawatts pico).

Para a geração eólica, tem-se:

$$E = \frac{1}{2} \rho_{ar} A \eta_{ag} C_{aer} v^3 h \quad (9)$$

onde  $h$  são as horas de produção mensal de energia, levando em consideração uma eficiência de 20% esta é o conjunto de todas as ineficiências encontrada através do produto das ineficiências. Foi dimensionado um parque eólico com 92 aerogeradores de 2 MW (megawatts) de potência nominal de um gerador comercial.

Os dados para geração solar (HSP) e eólica ( $v$  e  $C_{aer}$ ) foram obtidos através da plataforma do CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S Brito) (2019) para dimensionamento dos parques de geração eólica e solar, bem como a quantidade de energia gerada.

A tabela 8 apresenta os dados utilizados para a geração eólica de área, densidade do ar e eficiência efetiva do conjunto.

**Tabela 8.** Dados considerados para a geração eólica.

<b>Dados Considerados</b>		
Variável	Valor	Unidade
$\rho_{ar}$	1,125	$kg/m^3$
A	9503	$m^2$
$\eta_{ag}$	0,2	adm

A tabela 9 foi utilizada da mesma base do centro de referência e tem os valores dos parâmetros solarimétricos e de vento necessários.

**Tabela 9.** Dados de coeficiente aerodinâmico, velocidade do vento e horas de sol pico em Sobradinho.

<b>Mês</b>	<b>C</b>	<b>v</b>	<b>HSP</b>
Jan	5,28	4,68	6,47
Fev	5,28	4,68	6,12
Mar	5,24	4,64	6,04
Abr	5,24	4,64	5,3
Mai	5,24	4,64	4,99
Jun	7,87	7,01	4,8
Jul	7,87	7,01	5,06
Ago	7,87	7,01	5,78
Set	7,07	6,28	6,45
Out	7,07	6,28	6,5
Nov	7,07	6,28	6,64
Dez	5,28	4,68	6,41

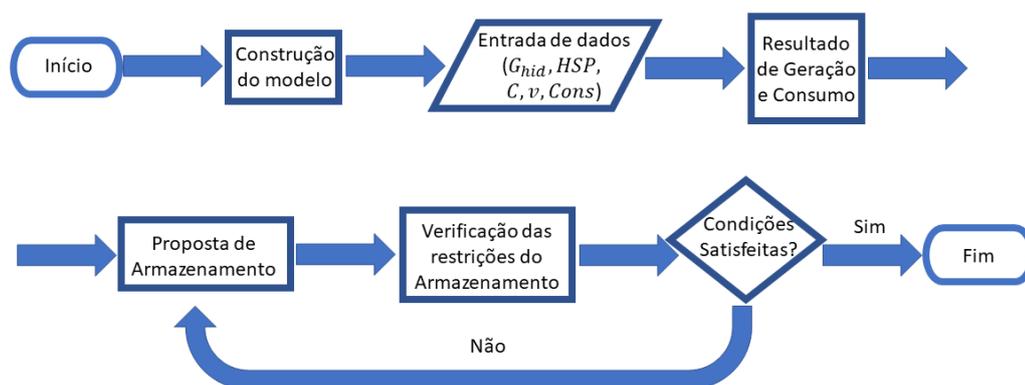
Fonte: ONS, 2019.

Inicialmente, foram considerados a geração e o consumo sem armazenamento a fim de avaliar a quantidade de energia que precisa ser armazenada ao longo do ano utilizando a equação 7.

As ineficiências de cada fonte de geração foram levadas em consideração separadamente, mas foram desprezadas ineficiências da transmissão e distribuição de energia elétrica.

Posteriormente, com a informação da profundidade de carga conhecida para a abordagem em questão, foi possível determinar o quanto de energia precisa ser armazenado.

A figura 22 mostra o algoritmo utilizado para obter consumo, geração e armazenamento de energia para a resolução da abordagem anual com método de armazenamento adequado.



**Figura 22.** Algoritmo de resolução do problema entre consumo e geração na abordagem anual.

## 5.2. MODELO: ABORDAGEM DIÁRIA

De forma análoga à abordagem anual, para satisfazer o atendimento da demanda de consumo, foram utilizadas as fontes de energia solar, hídrica e eólica, considerando as variações durante o dia e as sazonalidades em função do horário.

Os dados de consumo de energia elétrica foram obtidos através de arquivos da ONS (2019), entre as datas de 01 de dezembro de 2018 e 30 de novembro de 2019, para o Brasil e para o subsistema da região Nordeste.

Para o consumo, foram considerados os valores médios de consumo de energia em função do horário durante o mês. Os dados de consumo de energia elétrica são apresentados em MWh/h, bem como todas as fontes de geração de energia.

A tabela 10 apresenta os valores horários de consumo de energia elétrica ao longo dos meses do ano.

**Tabela 10.** Dados de consumo de energia elétrica do Nordeste, conservando a mesma fração de 5%.

	Consumo (MWh/h)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	629,24	594,25	567,73	566,70	534,72	492,55	547,68	494,42	559,34	550,83	550,85	521,53
1	609,68	575,44	551,63	548,80	522,38	461,43	532,29	479,58	541,00	534,91	534,09	504,99
2	592,57	560,42	538,82	536,96	511,60	452,01	521,70	470,26	529,23	523,11	521,68	491,29
3	579,28	549,78	530,66	527,67	503,29	445,74	514,81	464,55	522,30	515,65	514,43	481,47
4	569,62	542,28	524,62	522,06	501,32	444,48	512,51	462,48	519,24	510,60	506,71	474,76
5	563,89	529,21	504,84	501,53	490,89	436,12	504,64	451,73	495,01	476,26	468,34	468,49
6	531,92	507,12	480,79	479,23	487,48	436,21	481,77	435,09	484,06	473,94	467,36	453,60
7	517,06	509,59	508,74	508,16	514,51	459,43	506,98	460,51	515,93	504,90	498,68	450,73
8	510,67	536,15	546,23	546,16	539,29	488,87	541,11	492,09	550,87	539,55	533,80	481,31
9	547,62	568,13	563,61	563,46	548,65	503,30	556,59	506,84	566,86	555,61	549,32	515,98
10	564,43	583,84	573,95	573,33	556,44	512,26	567,55	516,50	577,31	564,94	559,24	532,73
11	574,31	589,41	575,71	574,16	556,22	511,66	568,33	516,01	575,39	562,69	557,64	541,52
12	572,98	584,78	567,67	566,62	553,71	504,50	559,92	507,46	565,95	553,22	549,95	540,10
13	563,30	586,29	580,50	579,47	561,02	514,42	569,14	517,32	581,28	569,44	567,39	532,12
14	576,16	598,95	588,56	587,87	566,53	521,51	577,36	525,69	592,40	581,20	579,32	542,75
15	585,71	601,18	583,93	582,91	562,97	519,42	576,65	525,43	592,02	579,45	576,01	550,98
16	580,72	588,81	567,91	570,17	555,60	511,79	568,74	517,11	580,16	566,52	561,67	545,33
17	562,33	563,11	547,95	569,49	562,42	521,46	572,22	513,87	572,90	557,89	542,01	529,65
18	525,66	558,07	586,87	597,30	573,05	541,64	603,65	547,57	604,88	582,36	568,37	509,40
19	558,95	580,31	586,51	590,41	566,31	530,15	591,95	538,54	595,37	574,17	562,77	548,60
20	575,14	587,73	585,08	587,71	566,37	522,05	582,10	530,56	588,78	570,06	560,55	550,34
21	571,06	597,69	604,42	605,50	572,49	534,66	596,85	545,36	608,87	593,02	584,32	544,34
22	595,99	610,00	602,76	602,38	565,72	529,71	589,19	536,93	603,18	591,46	586,04	561,69
23	598,49	602,68	587,57	586,45	549,89	512,31	568,51	516,25	582,46	573,73	571,71	559,04

Assim como na abordagem anual, a energia disponibilizada para o consumo (despachada) total é a soma da geração de energia a partir das fontes selecionadas e considerada a integração somente na rede integrada de corrente alternada do SIN.

Foram consideradas as fontes de energia solar fotovoltaica (HSP) e eólica ( $v$  e  $C_{aer}$ ) com seu potencial disponível em função horária de acordo com dados do CRESESB ao longo do dia através de dados médios para o mês em questão. Os dados

de HSP (potencial solar) são exibidos na tabela 11, de acordo com horário e mês correspondente.

**Tabela 11.** Dados do potencial solar (HSP) em Sobradinho durante o dia.

	Potencial Solar (HSP)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	3433	1214	915	1124	840	391	91	750	4134	14006	16078	10031
6	67924	55372	56650	69342	74494	64160	55693	70641	98146	131872	127508	95570
7	221770	212285	217953	235311	239086	232882	222830	247512	278169	320137	307352	258676
8	397919	392624	396886	393587	391437	386313	382066	421201	460037	505496	481819	423387
9	540668	541253	537079	524718	518013	509245	511495	565738	603343	642704	603624	540353
10	617771	625803	628956	621295	596061	588715	604434	662643	704794	716719	661267	606286
11	655551	657155	680134	659654	611311	610158	631966	698389	741135	735755	681769	645184
12	639416	659890	677505	645711	593782	578418	611952	685557	717396	701277	656928	621045
13	596686	614735	640382	598010	542624	535675	570153	636043	654922	629850	588083	562456
14	503089	518307	539938	493403	440567	442596	480048	531667	536851	503199	469916	458486
15	362458	381614	385457	341377	299578	303420	341779	375637	367970	333217	309179	313656
16	192011	209343	199107	161745	132565	137082	165062	182591	164641	137907	131861	151454
17	46862	53054	38863	19294	9085	10044	19594	23501	17577	12866	15530	27856
18	931	937	102	0	0	0	0	0	0	0	0	202
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Na tabela 12, é apresentado o potencial eólico em Sobradinho através da velocidade de vento ( $v$ ), nas mesmas condições da análise anual, em função horária e permanecendo com os mesmos valores de coeficiente aerodinâmico ( $C_{aer}$ ).

**Tabela 12.** Dados do potencial eólico ( $v$ ) em Sobradinho durante o dia.

	Potencial Eólico (Velocidade de Vento, $v$ )											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	5,6079	5,9094	4,9446	5,9697	7,1757	7,4169	7,839	8,0199	8,1405	7,5375	6,1506	5,427
1	5,6682	5,8491	4,7637	5,9697	7,1757	7,3566	7,8993	8,0802	8,0802	7,5375	6,1506	5,427
2	5,9697	5,9094	4,824	5,9094	7,0551	7,2963	7,839	7,9596	8,0199	7,5375	6,2109	5,4873
3	5,9094	6,03	5,1255	5,9697	6,9345	7,1154	7,6581	7,7787	7,8993	7,4772	6,2109	5,4873
4	5,8491	5,8491	5,3064	5,7888	6,6933	6,9345	7,4772	7,5375	7,6581	7,236	6,1506	5,427
5	5,7285	5,6682	5,1858	5,6079	6,4521	6,6933	7,236	7,2963	7,3566	7,0551	5,9697	5,1858
6	5,5476	5,3667	5,0049	5,427	6,2712	6,4521	6,9948	7,1757	7,1757	6,8742	6,03	5,1858
7	5,3667	5,427	4,8843	5,3064	6,0903	6,2109	6,8139	6,9948	7,1757	6,8139	6,1506	5,3667
8	5,3064	5,427	4,7637	5,1858	5,9697	5,9697	6,6933	6,8742	7,1757	6,6933	6,03	5,427
9	5,2461	5,3064	4,7034	5,0049	5,7888	5,8491	6,5727	6,7536	7,0551	6,5124	5,7888	5,3064
10	5,1858	5,3064	4,5225	4,824	5,6682	5,7285	6,4521	6,633	7,0551	6,5124	5,7888	5,2461
11	5,3064	5,5476	4,8843	5,3064	6,2109	6,2712	7,1757	7,236	7,4169	6,7536	5,7888	5,3667
12	5,1255	5,427	4,824	5,3667	6,4521	6,6933	7,6581	7,6581	7,5375	6,6933	5,6079	5,1255
13	4,824	5,0652	4,5225	5,3064	6,5727	6,8139	7,839	7,7184	7,4772	6,4521	5,3064	4,824
14	4,5225	4,6431	4,1607	5,0652	6,4521	6,8139	7,7787	7,5978	7,236	6,0903	4,9446	4,5225
15	4,1607	4,3416	3,7989	4,7637	6,2712	6,6933	7,5978	7,4169	6,9948	5,7888	4,5828	4,221
16	3,9195	4,1004	3,5577	4,5828	6,0903	6,5727	7,4169	7,1757	6,7536	5,5476	4,2813	3,9798
17	3,8592	3,9195	3,3768	4,4019	5,9697	6,4521	7,2963	7,0551	6,633	5,427	4,0401	3,8592
18	3,8592	3,9195	3,3768	4,4622	5,9094	6,4521	7,2963	7,1154	6,633	5,427	3,9798	3,8592
19	4,0401	4,0401	3,5577	4,5828	6,03	6,5124	7,3566	7,1757	6,8742	5,5476	4,0401	3,9195
20	4,4622	4,4622	3,9798	4,9446	6,2712	6,6933	7,5375	7,4169	7,1757	5,7888	4,3416	4,1607
21	5,1858	5,2461	4,824	5,6079	6,633	6,8742	7,7184	7,7184	7,5375	6,3315	4,824	4,6431
22	5,9094	6,03	5,427	6,0903	6,8139	6,9948	7,6581	7,7787	7,839	6,6933	5,5476	5,1858
23	6,03	6,1506	5,427	6,03	6,8139	6,9948	7,5375	7,6581	7,7787	6,8139	5,8491	5,3667

Por fim, a tabela 13 apresenta os dados de geração da usina hidrelétrica de Sobradinho médio em função das horas do dia para cada mês.

**Tabela 13.** Geração de energia elétrica real na usina hidrelétrica em Sobradinho durante o dia.

Geração Hídrica Horária Real (MWh/h)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	217,255	168,327	163,789	167,037	240,945	214,013	205,583	187,136	211,917	211,335	249,798	164,782
1	213,328	170,657	162,408	167,263	236,555	215,857	204,468	189,194	211,966	212,274	250,962	159,223
2	215,829	170,657	164,261	161,596	238,883	215,409	203,957	190,844	209,634	214,112	249,932	163,342
3	216,493	169,53	163,306	168,832	240,964	220,94	201,295	193,2	212,58	208,888	248,279	166,182
4	216,056	177,805	163,286	166,939	239,322	221,901	202,432	195,132	212,685	207,78	248,915	160,75
5	213,878	184,202	162,658	166,78	240,824	217,045	200,003	192,794	213,155	208,79	248,647	160,617
6	216,407	174,948	161,237	169,138	236,618	214,964	198,568	187,41	212,72	210,264	247,474	160,393
7	215,693	172,426	162,449	163,507	238,93	216,12	201,531	187,079	211,027	212,386	249,337	159,077
8	215,458	171,959	161,238	164,594	238,683	216,307	200,274	186,508	210,597	211,509	250,696	160,787
9	215,401	169,945	162,461	165,612	237,139	215,26	198,305	185,72	208,368	209,551	247,892	157,872
10	219,121	170,761	162,71	167,189	240,054	212,795	196,904	185,391	213,011	205,902	246,355	159,46
11	221,867	170,479	160,585	164,823	238,481	216,684	196,729	183,81	213,192	210,444	244,992	156,341
12	221,943	170,953	159,676	166,042	237,762	214,035	199,407	187,636	211,316	211,095	250,677	157,067
13	222,928	170,087	160,405	164,928	240,724	209,378	197,022	186,835	208,836	210,535	247,92	156,991
14	218,319	169,969	160,528	165,728	237,946	209,583	200,48	185,96	208,585	211,354	247,172	154,562
15	220,312	165,656	160,391	165,114	235,94	210,22	199,228	189,642	213,822	210,374	247,732	156,851
16	216,131	168,178	158,26	163,541	233,73	209,139	198,778	186,733	209,964	209,616	246,224	156,338
17	219,113	173,014	162,63	164,962	239,429	210,111	201,239	186,255	210,262	209,205	245,798	155,707
18	218,823	172,214	162,996	168,347	239,263	215,482	200,944	187,472	210,305	209,558	248,442	158,248
19	223,298	171,528	161,205	165,225	239,269	215,24	199,628	184,918	210,717	208,044	248,638	158,65
20	223,896	170,836	162,093	167,534	241,993	215,02	203,188	187,105	212,693	209,643	249,254	157,926
21	219,374	171,309	162,797	165,55	237,501	219,083	203,441	185,985	213,227	207,256	249,942	159,758
22	222,45	171,516	160,689	170,469	236,274	216,303	201,681	190,314	212,811	208,016	252,961	163,219
23	223,207	170,437	164,913	168,356	239,367	216,821	206,026	191,019	213,757	207,493	250,221	161,144

Na abordagem anual, a geração advinda da fonte hídrica foi utilizada como ferramenta de armazenamento de energia através do volume de água útil no reservatório para adequação de consumo e geração de energia elétrica para aquela abordagem. Com base nisso, fez-se necessário estimar a geração de eletricidade ao longo do dia, mantendo o perfil de geração e tendo como geração total ao fim do mês o valor definido na abordagem anual, após a tomada de decisão através da gestão de energia. A estimativa de geração horária pode ser realizada de acordo com a equação (10):

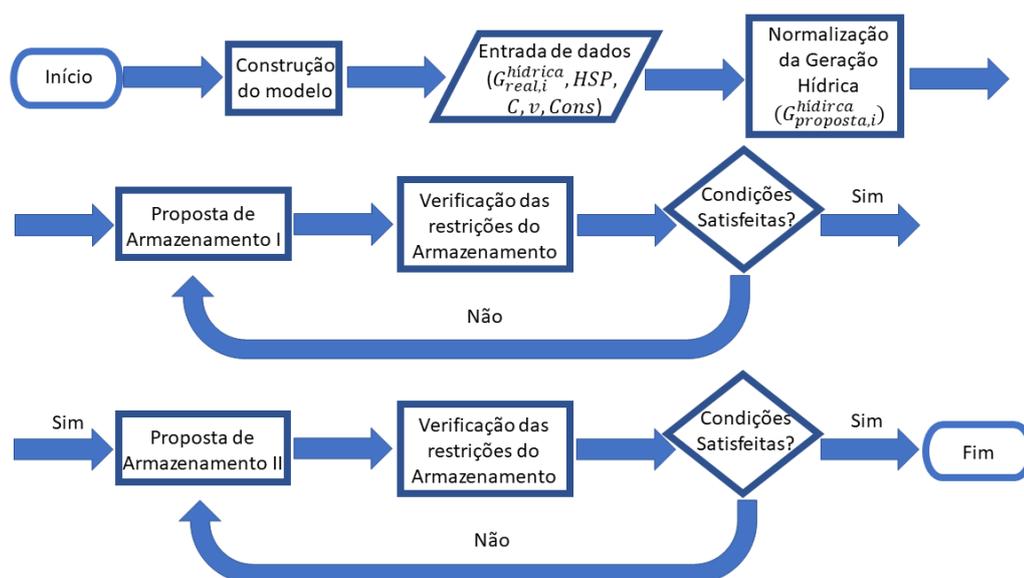
$$G_{proposta,i}^{hidrica} = \frac{G_{real,i}^{hidrica}}{G_{real,mês}^{hidrica}} \times G_{proposta,mês}^{hidrica} \quad (10)$$

Onde  $i$  é a hora no dia, de 0 a 23 horas,  $G_{proposta,i}^{hidrica}$  é a geração de energia através da fonte hídrica no horário  $i$ ,  $G_{real,i}^{hidrica}$  é a geração de energia através da fonte hídrica real coletada no site da ONS (2019) no horário  $i$ ,  $G_{real,mês}^{hidrica}$  é a geração de energia através da fonte hídrica real coletada no site da ONS (2019) no mês e  $G_{proposta,mês}^{hidrica}$  é a geração de energia através da fonte hídrica proposta para o mês na abordagem anual. O resultado é exibido na tabela 14 de acordo com meses e horários correspondentes.

**Tabela 14.** Geração de energia elétrica proposta na usina hidrelétrica em Sobradinho durante o dia.

	Geração Hídrica Horária Proposta (MWh/h)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0	296,52	260,57	293,20	310,88	286,40	69,06	70,55	48,80	114,67	162,89	175,02	274,45
1	291,16	264,18	290,72	311,30	281,18	69,65	70,16	49,34	114,69	163,62	175,84	265,19
2	294,58	264,18	294,04	300,75	283,95	69,51	69,99	49,77	113,43	165,04	175,11	272,05
3	295,48	262,43	292,33	314,22	286,42	71,29	69,07	50,38	115,03	161,01	173,96	276,78
4	294,89	275,24	292,29	310,69	284,47	71,60	69,46	50,88	115,08	160,15	174,40	267,73
5	291,91	285,14	291,17	310,40	286,25	70,04	68,63	50,27	115,34	160,93	174,21	267,51
6	295,37	270,82	288,63	314,79	281,25	69,36	68,14	48,87	115,10	162,07	173,39	267,14
7	294,39	266,92	290,80	304,31	284,00	69,74	69,15	48,78	114,19	163,71	174,70	264,94
8	294,07	266,19	288,63	306,33	283,71	69,80	68,72	48,64	113,95	163,03	175,65	267,79
9	293,99	263,07	290,82	308,22	281,87	69,46	68,05	48,43	112,75	161,52	173,68	262,94
10	299,07	264,34	291,26	311,16	285,34	68,66	67,57	48,34	115,26	158,71	172,61	265,58
11	302,82	263,90	287,46	306,75	283,47	69,92	67,51	47,93	115,36	162,21	171,65	260,39
12	302,92	264,64	285,83	309,02	282,61	69,06	68,43	48,93	114,34	162,71	175,64	261,60
13	304,27	263,29	287,14	306,95	286,13	67,56	67,61	48,72	113,00	162,28	173,70	261,47
14	297,98	263,11	287,36	308,44	282,83	67,63	68,79	48,49	112,86	162,91	173,18	257,42
15	300,70	256,44	287,11	307,30	280,45	67,83	68,36	49,45	115,70	162,15	173,57	261,24
16	294,99	260,34	283,30	304,37	277,82	67,48	68,21	48,69	113,61	161,57	172,52	260,38
17	299,06	267,83	291,12	307,01	284,59	67,80	69,05	48,57	113,77	161,25	172,22	259,33
18	298,66	266,59	291,78	313,31	284,40	69,53	68,95	48,89	113,79	161,53	174,07	263,56
19	304,77	265,53	288,57	307,50	284,40	69,45	68,50	48,22	114,02	160,36	174,21	264,23
20	305,59	264,45	290,16	311,80	287,64	69,38	69,72	48,79	115,09	161,59	174,64	263,03
21	299,42	265,19	291,42	308,11	282,30	70,69	69,81	48,50	115,38	159,75	175,12	266,08
22	303,61	265,51	287,65	317,26	280,84	69,80	69,21	49,63	115,15	160,34	177,24	271,84
23	304,65	263,84	295,21	313,33	284,52	69,96	70,70	49,81	115,66	159,93	175,32	268,39

O balanço de energia entre produção e consumo é dado pela equação 6 e o armazenamento necessário para cada situação é dado pela equação 7. O armazenamento de energia para a abordagem diária precisa tornar despachável a energia gerada com intermitências que ocorrem por hora. O algoritmo da figura 23 mostra o método utilizado para solução do problema nessa escala de tempo.



**Figura 23.** Algoritmo de resolução do problema entre consumo e geração na abordagem diária.

Os modelos de geração e consumo, bem como o balanço energético, seguem as mesmas equações da abordagem anual com a diferença da escala de tempo, a qual é em horas (h), para essa abordagem. O armazenamento para a abordagem diária é idealizado para ajustar as curvas de geração e consumo de energia visando maximizar a produção eólica e solar no sistema e controlar a produção a partir da fonte hídrica. O excesso de energia no sistema em uma hora de não utilização pode ser ainda armazenado em outra forma para ser despachado em um horário de consumo acima da geração.

Para o estudo de armazenamento, foi considerada a mesma produção de energia hidrelétrica somada ao fim do dia, porém o método primário de armazenamento foi concebido através da otimização da vazão turbinada para variar a produção de energia ao longo do horário. Dessa forma, a energia total produzida ao longo do dia e o nível da represa no início e fim do dia serão iguais, porém a energia produzida em um horário com abundância de geração eólica e, principalmente, solar seria deslocada para outro horário com escassez de energia.

Resgatando a equação (6), dando índices específicos para as variáveis e rearranjando, tem-se a equação 11:

$$S_{i,j} = G_{i,j}^{solar} + G_{i,j}^{eólica} + G_{i,j}^{hídrica} - Cons_{i,j} \quad (11)$$

Onde  $S_{i,j}$  é o valor de energia armazenada no horário  $i$  do mês  $j$  tendo a geração hídrica como elemento manipulado de controle.

Com a finalidade de minimizar o armazenamento em formas de energia secundárias diferentes de energia potencial como o caso do lago da hidrelétrica, foi realizada uma otimização de acordo com as equações e inequações 12 a 15:

$$Min S_{i,j} = G_{i,j}^{solar} + G_{i,j}^{eólica} + G_{i,j}^{hídrica} - Cons_{i,j} \quad (12)$$

$$s.a. \cdot \sum_{i=0}^{23} G_{real,i}^{hídrica} = \sum_{i=0}^{23} G_{proposto,i}^{hídrica} \quad (13)$$

$$0,1 G_{real,i}^{hídrica} \leq G_{i,j}^{hídrica} \leq 2 G_{real,i}^{hídrica} \quad (14)$$

$$S \geq 0 \quad (15)$$

A equação 13 preserva a igualdade do somatório da geração hídrica ao longo do dia ser o mesmo para ambos os casos. A restrição representada pela equação 14 é necessária para que a geração tenha como limite inferior 10% da geração real observada no horário em questão e, como limite superior, o dobro da geração real. Essa restrição é puramente técnica para evitar desligamento da usina hidrelétrica e sobrecarga do sistema de geração, respectivamente. A restrição 15 é para que o armazenamento tenha um valor positivo e não atinja valores negativos que não têm sentido físico para o problema em questão.

O método para de solução utilizado foi o de Newton–Raphson de acordo com YPMA (1995), o qual consiste em buscar raízes para a equação, observando a função e sua derivada como a inclinação da reta tangente para o ponto de interseção.

Uma vez aplicado o método inicial para armazenamento e satisfeitas as condições, fez-se a análise de armazenamento secundário através de tecnologias com baixa taxa de descarga e alta densidade de carga. A melhor tecnologia para satisfazer a essa demanda são as baterias ditas estacionárias que têm as vantagens e desvantagens descritas na tabela 5 (Chen *et al*, 2009) e que servem bem para este tipo de aplicação.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

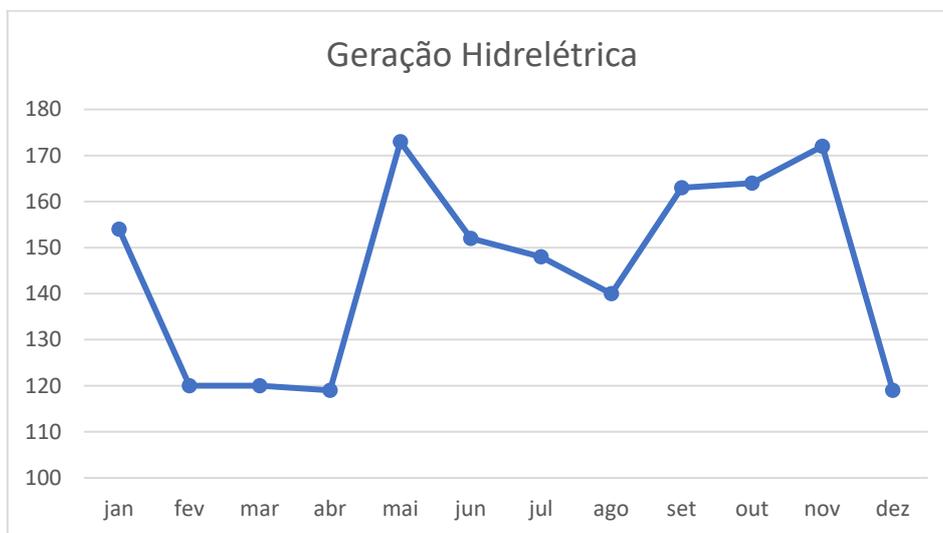
Assim como as análises, os resultados estão apresentados de acordo com o tipo de abordagem adotada.

Primeiramente, a abordagem anual foi adotada a fim de verificar a viabilidade de armazenamento e indicar possíveis soluções para diferentes demandas e gerações de energia mês a mês.

Posteriormente, foi adotada uma abordagem diária para verificar, nessa dimensão de tempo e em função horária, a geração e consumo de energia com a finalidade de indicar possíveis estratégias de armazenamento eficientes para a questão.

### 6.1. ABORDAGEM ANUAL

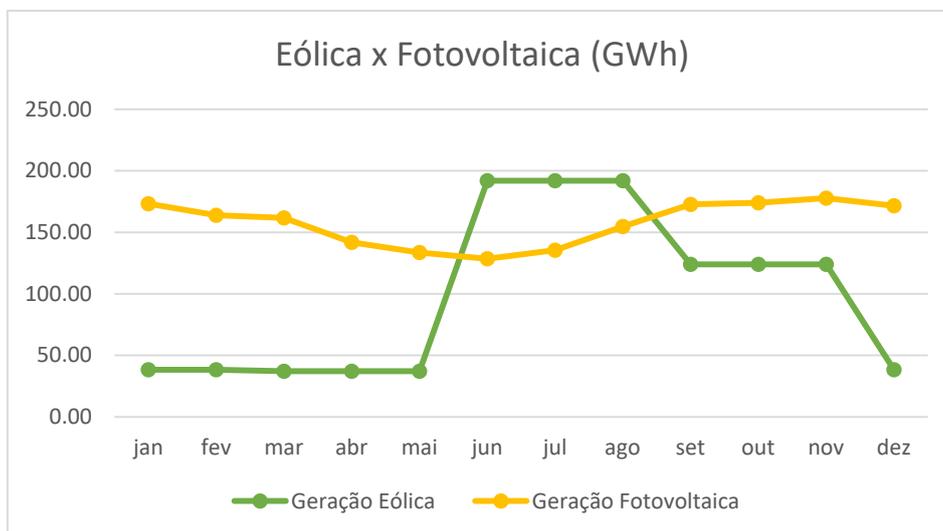
Foi escolhido Sobradinho devido à disponibilidade de dados e a presença da fonte de geração hídrica. A curva de geração de energia proveniente de fonte hídrica durante dezembro de 2018 a novembro de 2019 é apresentada na figura 24.



**Figura 24.** Geração de energia elétrica pela usina de Sobradinho em GWh.

A geração hídrica tem algumas variações devido a períodos secos e chuvosos, o que impactou a geração mês a mês durante o ano apresentado. Vale ressaltar que, para os dados obtidos, há ainda a interferência da ONS com uma política de minimização de custo e gerenciamento de reservas, utilizando a geração a partir da energia hidráulica no Brasil, além das variações devido ao clima.

As gerações fotovoltaicas e eólicas, utilizando os dados descritos no item anterior, são apresentadas na figura 25. É possível observar que a geração eólica e fotovoltaica tem alguma complementaridade, pois no decréscimo da geração eólica há um incremento na geração fotovoltaica e o contrário também é verdade.

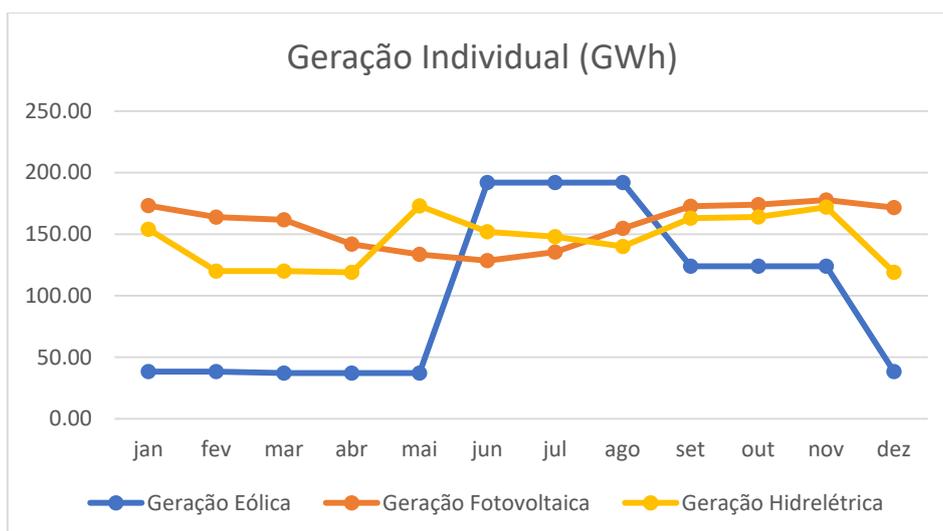


**Figura 25.** Geração de energia elétrica a partir de fonte solar e eólica em GWh.

Os meses de junho a agosto são os melhores para a geração eólica, mas esses meses são menos produtivos para a geração fotovoltaica. Nesses meses, é inverno no hemisfério sul, o que traz um impacto negativo para geração fotovoltaica devido à inclinação do eixo da terra que implica em menos irradiação direta nos módulos fotovoltaicos. Já para a geração eólica, essa condição é benéfica devido à maior umidade relativa do ar, o que implica em um maior trabalho realizado sobre as pás dos aerogeradores.

Para facilitar a análise das três fontes envolvidas, são apresentadas na figura 26 as curvas de geração a partir das fontes fotovoltaica, eólica e hídrica ao longo do período observado.

É possível notar que, além da complementaridade entre as fontes, a fonte hídrica sofre influência da tomada de decisão, já que é a única das três fontes de energia com possibilidade de ser regulada. Destacando o mês de maio, por exemplo, é possível observar que há uma queda da geração a partir da fonte solar, enquanto a geração eólica permanece constante. O operador do SIN, visualizando essa situação, atua para aumentar a geração hídrica e suprir a necessidade do consumo.



**Figura 26.** Geração de energia elétrica a partir de fonte eólica, solar e hidrelétrica em GWh.

O balanço energético, para o caso apresentado, foi realizado considerando um consumo de 5% da energia demandada anual no subsistema do Nordeste devido à disponibilidade dos dados e a localidade da geração. A tabela 15 apresenta o balanço energético realizado ao longo dos meses do ano considerando geração, consumo e armazenamento.

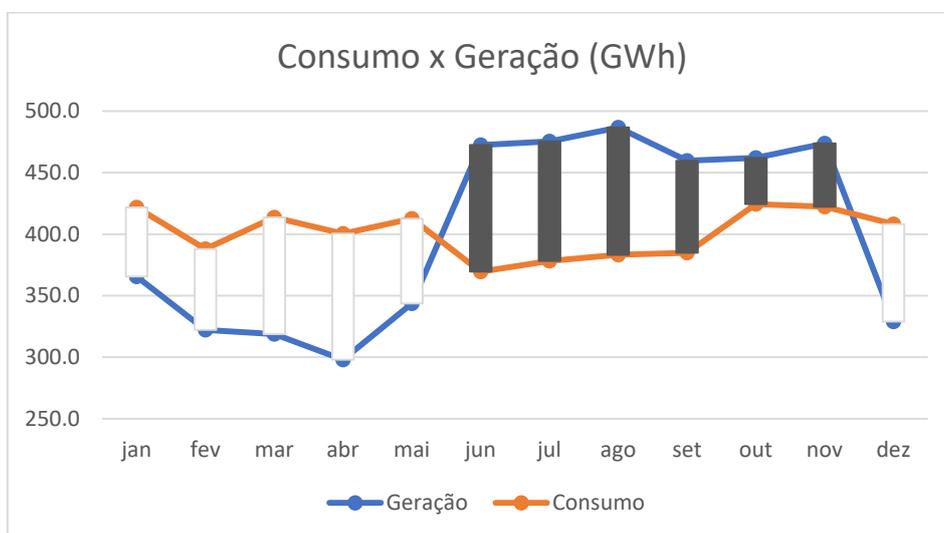
**Tabela 15.** Balanço energético com consumo e geração.

	Balanço energético (GWh)			
	Geração	Consumo	Armazenamento	Acumulado
Jan	365,6	421,8	-56,2	-56,2
Fev	322,2	388,0	-65,8	-121,9
Mar	318,8	413,6	-94,8	-216,8
Abr	298,0	400,5	-102,5	-319,2
Mai	343,7	412,6	-68,9	-388,2
Jun	472,5	369,6	103,0	-285,2
Jul	475,5	378,3	97,2	-188,0
Ago	486,7	383,3	103,5	-84,5
Set	459,7	384,9	74,8	-9,7
Out	462,0	424,5	37,6	27,9
Nov	473,8	422,3	51,5	79,4
Dez	329,0	408,2	-79,2	0,2

No balanço energético, é possível ver que, de janeiro a maio, há mais consumo que geração, mas de julho a novembro, ocorre o contrário. Isso implica que a energia

gerada pode ser armazenada em uma época do ano (junho a novembro) para utilização no restante do tempo.

A figura 27 formada pelo somatório da geração de energia em questão e consumo serve para mostrar a inversão ao longo do ano e indica que é necessária uma alternativa de armazenamento que sirva para armazenar uma quantidade grande de energia por um período relativamente longo, sem a necessidade de grandes picos de potência. Observando a tabela 15 em conjunto com a figura 26, é possível afirmar que o mês que possui maior necessidade de armazenamento acumulado é maio com 388,2 GWh (GigaWatt hora) acumulado.



**Figura 27.** Geração e consumo em GWh do sistema apresentado.

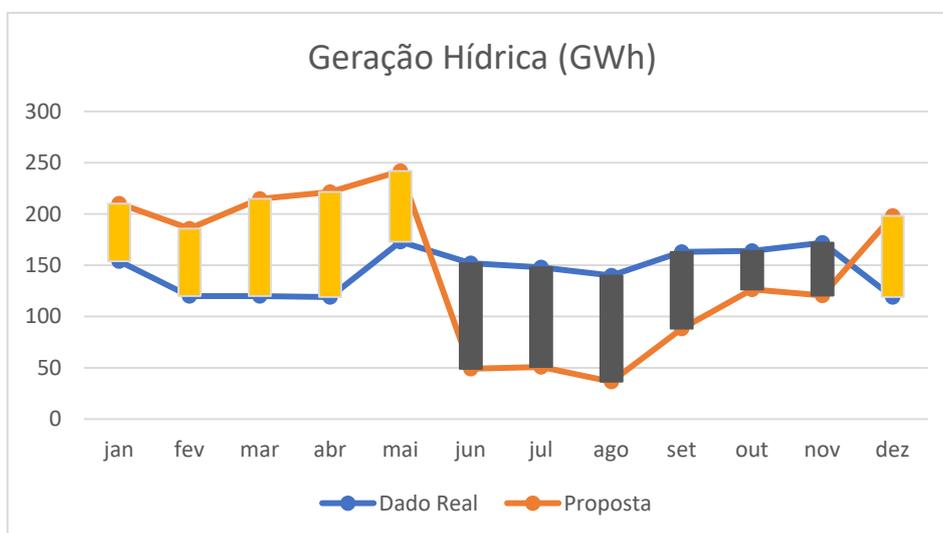
A solução apontada para armazenar uma quantidade de energia dessa magnitude foi o armazenamento de água no reservatório da hidrelétrica e indicada na tabela 16 como deveria ser a geração de energia a partir da fonte hídrica para que haja o equilíbrio entre consumo e geração.

Observando a tabela 16 é possível ver que, nos meses de junho a novembro, a produção de energia deveria ser menor do que a geração real verificada e, de dezembro a maio, deveria ser maior do que o real.

**Tabela 16.** Proposta de geração hídrica para equilíbrio de consumo e geração anual.

Geração Hidrelétrica (GWh)		
	Real	Proposto
Jan	154	210,2
Fev	120	185,8
Mar	120	214,8
Abr	119	221,5
Mai	173	241,9
Jun	152	49,0
Jul	148	50,8
Ago	140	36,5
Set	163	88,2
Out	164	126,4
Nov	172	120,5
Dez	119	198,2

Observa-se na figura 28 que a geração hídrica em uma época do ano pode ser deslocada para outra época deixando de produzir energia através dessa fonte. A energia que deixa de ser produzida através da fonte hídrica torna-se volume de água útil no reservatório e, uma vez que seja vertido, será transformada em energia injetada no SIN.

**Figura 28.** Geração hídrica real e proposta para solucionar o problema de armazenamento.

Uma vez que a energia através da fonte hídrica deixa de ser produzida, há um acúmulo de água no reservatório que pode ser entendido como volume útil ou ainda como cota (m) do reservatório.

A avaliação da viabilidade do armazenamento passa pela verificação dos limites superiores e inferiores de capacidade do reservatório. Para o caso da usina de Sobradinho, os limites operativos são de 392,5 m de cota máxima e 380,5 m de cota mínima. A tabela 17 contém os valores das cotas reais e propostas para geração de energia ao longo dos meses. É possível verificar que a maior cota registrada no intervalo de tempo analisado pela NOS ocorreu no mês de abril, com 388,2 m de altura. Com o armazenamento proposto neste trabalho, a maior cota seria no mês de novembro, com valor de 387,5 m.

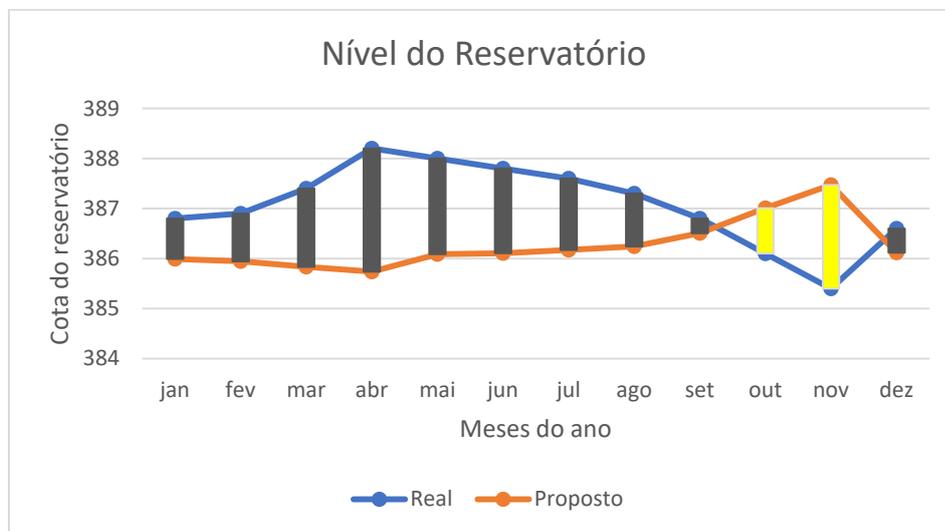
**Tabela 17.** Níveis reais e propostos para o reservatório da hidrelétrica ao longo do ano.

	Nível do reservatório (m)	
	Real	Proposto
Jan	386,8	386,0
Fev	386,9	385,9
Mar	387,4	385,8
Abr	388,2	385,7
Mai	388	386,1
Jun	387,8	386,1
Jul	387,6	386,2
Ago	387,3	386,2
Set	386,8	386,5
Out	386,1	387,0
Nov	385,4	387,5
Dez	386,6	386,1

Observa-se, na figura 29, o comportamento do nível do reservatório ao longo do ano. Como cota mínima real ao longo do ano, vê-se novembro com 385,4 m e, com a adoção do armazenamento de energia através do método indicado, o mês com menor cota seria o mês de abril, com 385,7. Nota-se que os valores são bem próximos, o que indica que toda energia armazenada em uma época do ano foi utilizada em outra época, tendo assim o ciclo fechado para geração e consumo.

A altura da superfície do lago de Sobradinho teria variações um pouco mais intensas em uma época do ano, porém, através dos dados apresentados para a abordagem anual, é possível concluir que o método de armazenamento apresentado é

viável e que seria eficaz, sem exceder os limites de operação da usina hidrelétrica em questão.



**Figura 29.** Cota de altura real e proposta para o reservatório de Sobradinho.

Sendo assim, o método proposto é eficaz para o ajuste das curvas de consumo e geração, utilizando a integração das fontes apresentadas dentro do estudo anual, sem acarretar prejuízos ao sistema ou aos consumidores.

## 6.2. ABORDAGEM DIÁRIA

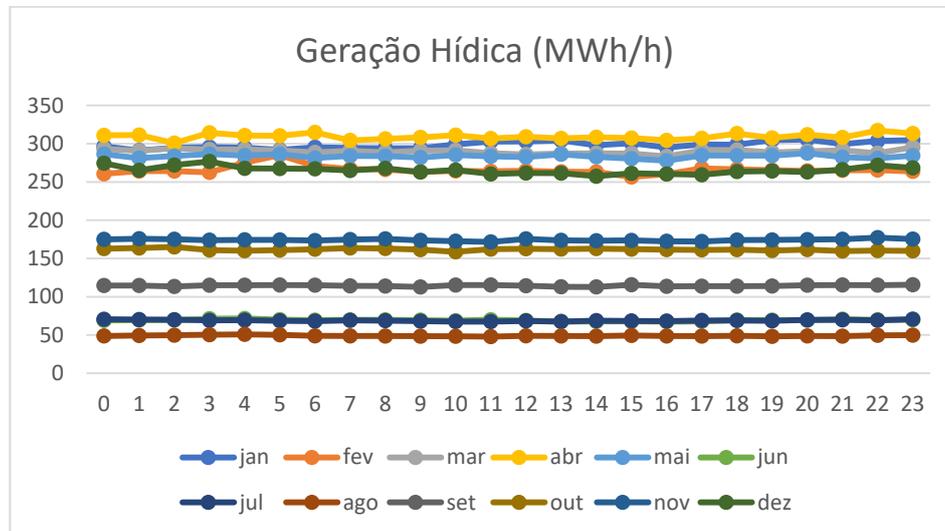
O estudo de caso da hidrelétrica de Sobradinho foi mantido devido à disponibilidade de dados de geração hídrica e das variáveis utilizadas no dimensionamento das fontes eólica e solar.

Como dito anteriormente, o tempo para a análise em questão é na escala de horas e para cada mês do ano foi considerada a média diária, no período entre 0h e 23h, nas mesmas datas da análise anual.

Na figura 30, observa-se a geração de energia a partir da fonte hídrica em função horária ao longo dos meses do ano. O resultado é influenciado pela análise anual e a geração foi calculada usando a equação 10, pois na abordagem anual essa fonte foi usada como método de armazenamento ao longo do ano.

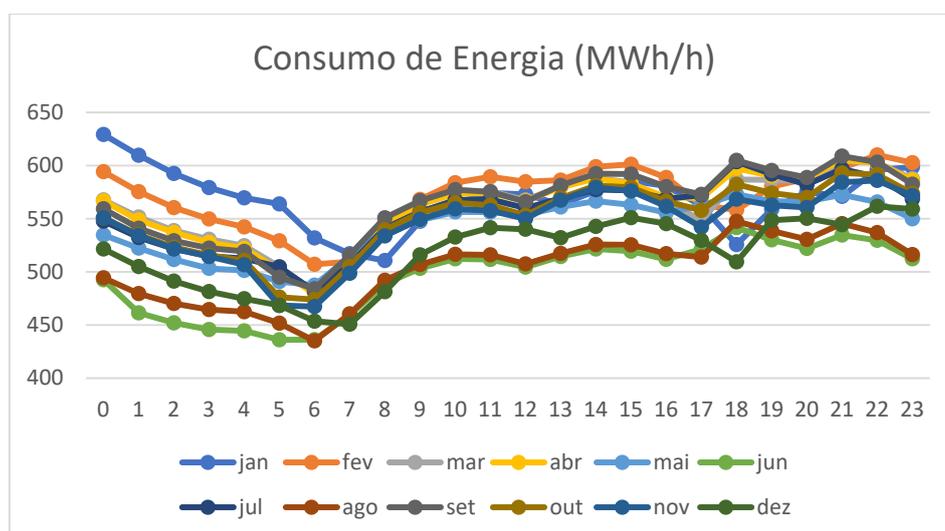
Nota-se que a maior participação da fonte hídrica é no mês de abril e a menor participação no mês de agosto, como indicado na análise anual. As flutuações da

geração hídrica são pequenas e os gráficos mostram que a potência utilizada é quase constante ao longo do dia.



**Figura 30.** Geração de energia hidrelétrica em Sobradinho em função horária.

A Figura 31 apresenta o perfil de consumo de energia na região nordeste em diferentes meses do ano, ao longo do dia. O consumo considerado para o estudo de caso foi de 5% do consumo da região nordeste, assim como na análise anual, porém o perfil de consumo é bem semelhante, variando apenas quantidades.



**Figura 31.** 5% do consumo de energia da região Nordeste do Brasil.

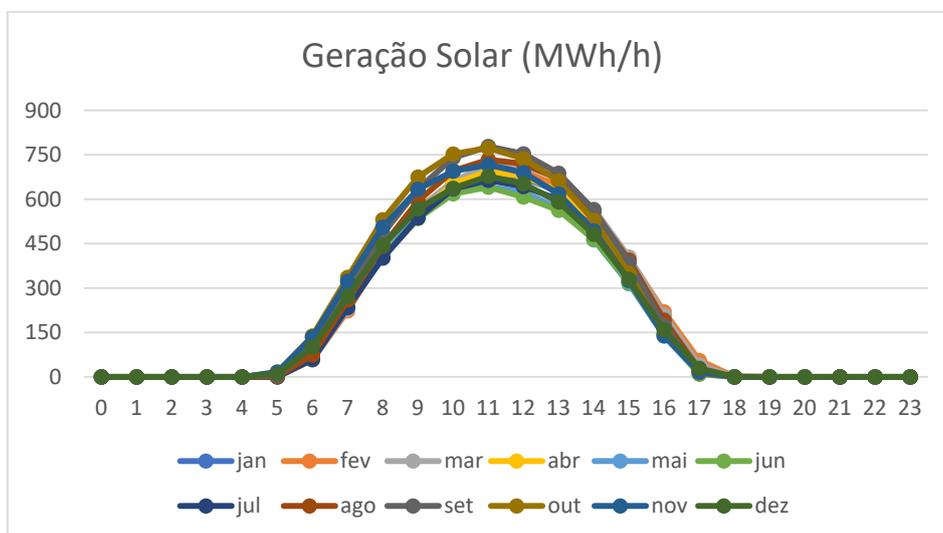
O consumo de energia elétrica ao longo do dia tem variações dependendo dos meses do ano, mas mantém um perfil bastante similar em comportamento. Observando

o mês de janeiro, por exemplo, é possível verificar que há um vale (baixo consumo de energia) próximo às 8 horas da manhã (chegando a 517 MWh/h) e um mínimo às 9 horas da manhã (510 MWh/h). Após esse horário, há um acréscimo de consumo de energia, atingindo pequenos platôs de consumo e ocorre um consumo acentuado no início da noite, mantendo o patamar durante toda ela.

Outro extremo é o mês de junho que apresenta o menor consumo às 06h (435 MWh/h) e com pico de consumo às 18 horas. Esse é um fator complicador para a utilização de energias renováveis na matriz energética, pois a energia solar fotovoltaica tende a zero no horário em que o consumo é maior.

Como pode ser visto na figura 32, a energia solar fotovoltaica apresenta o perfil de uma gaussiana ao longo do dia, tendo 12 horas de geração aproximadamente e 12 horas sem geração com fim da geração onde o consumo é acrescido, como previamente comentado.

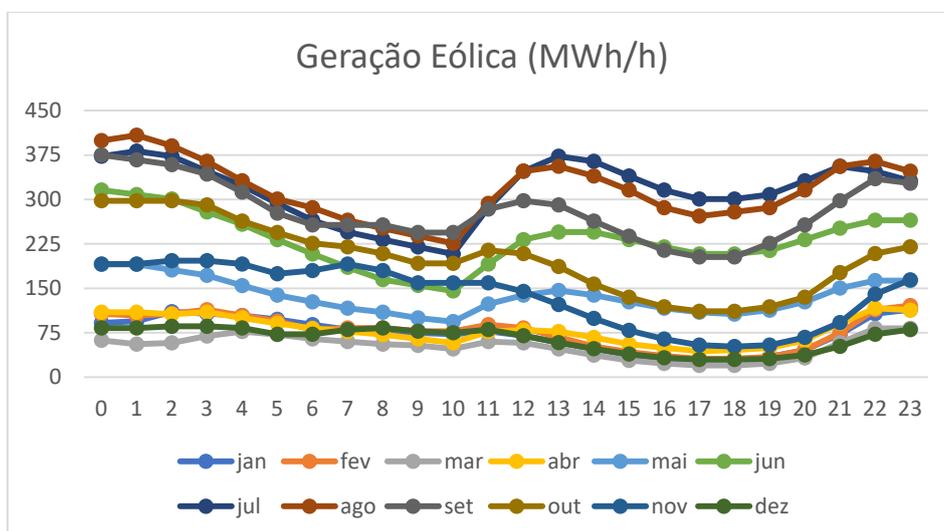
No mês de junho, é inverno no hemisfério sul e, na localização de Sobradinho, é época de chuva, fatos que contribuem para o menor potencial solar para produção de energia por possuir menor irradiação.



**Figura 32.** Geração de energia Solar fotovoltaica ao longo do dia através do mês.

Com a chegada da primavera, a irradiação solar começa a aumentar devido a fatores como menos nuvens para encobrir a luz do sol, ângulo de incidência dos raios solares com a superfície mais próximo de  $90^\circ$  do que no inverno e temperaturas mais amenas do que no verão. O aumento do potencial solar atinge seus maiores níveis nos meses de setembro e outubro, tendo apenas o deslocamento da curva em horário.

A potência de geração através do parque eólico pode ser vista na figura 33 e tem em outubro (coincidindo com o potencial solar) e novembro seu maior potencial de geração. O perfil de geração da energia eólica característico com vale perto das 10 h e, logo após, um pico próximo às 13 h.



**Figura 33.** Geração de energia Eólica ao longo do dia através do mês.

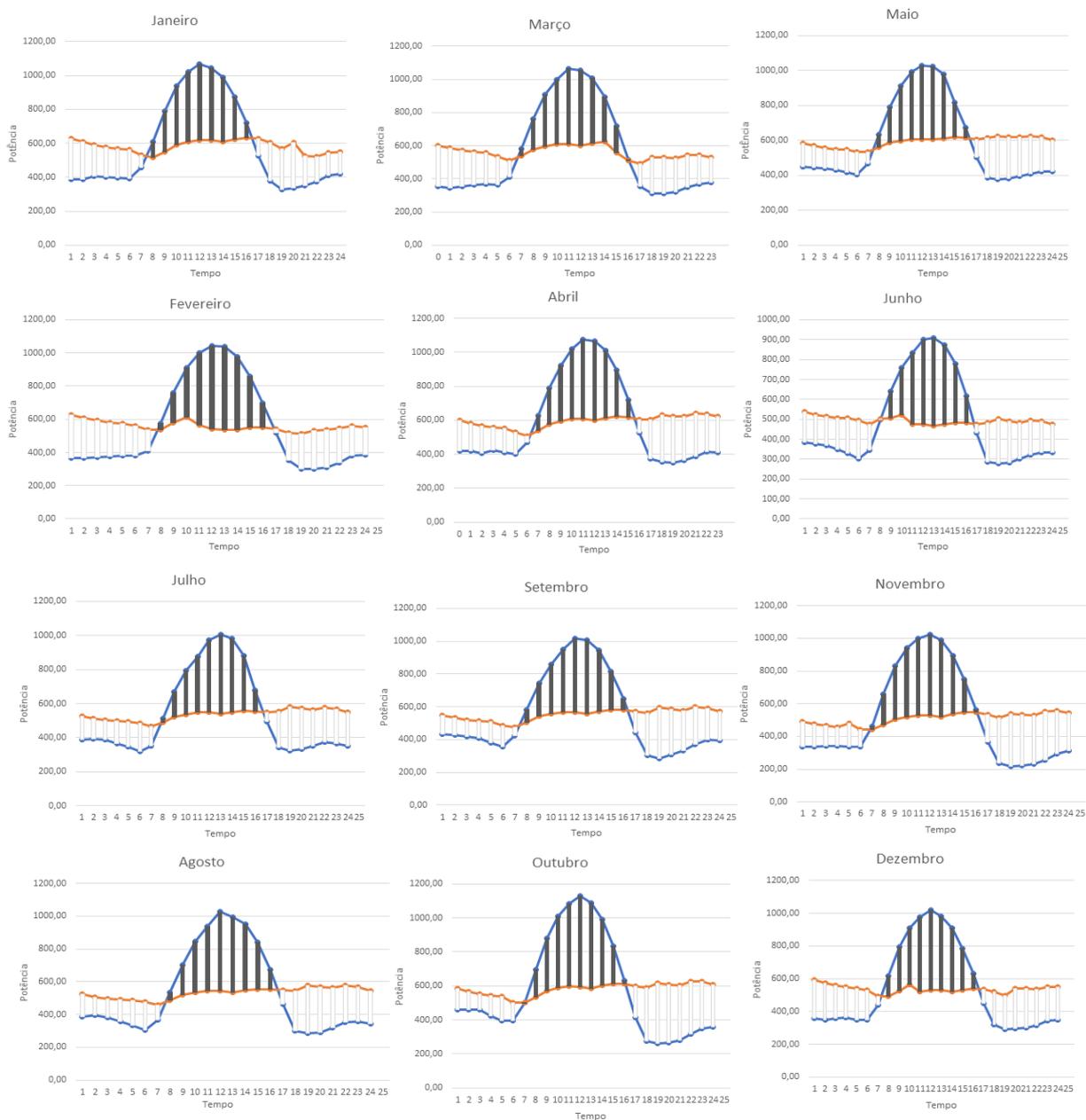
O mês de março é o mês com menor potencial de geração eólica, tendo seus níveis de geração abaixo de todos os meses, como pode ser visto na figura 33, além de ser mais constante que os demais.

Uma vez que cada geração (solar fotovoltaica, hídrica e eólica) tem suas características próprias, a integração dessas fontes faz total sentido e apresenta-se com uma relevância bastante acentuada a fim de ajustar esses perfis de geração ao perfil de consumo do caso estudado.

A integração das fontes de geração de energia elétrica é apresentada a seguir, com a participação da geração hídrica ao longo do dia, conservando seu perfil original, mas com a quantidade de energia já referenciada na análise anual. A figura 34 mostra a soma da geração de energia através das fontes estudadas e a curva de consumo de energia ao longo do dia em diferentes meses do ano.

Observa-se que há momentos ao longo do dia em que a soma das curvas de geração eólica, solar fotovoltaica e hídrica é menor que o consumo, o que implica em falta de energia gerada. Por outro lado, há uma sobra de energia elétrica proveniente da geração em excesso em outro horário e esses eventos em conjunto podem ser

aproveitados para ajustar as curvas de geração e consumo de energia ao longo dessa janela de tempo.



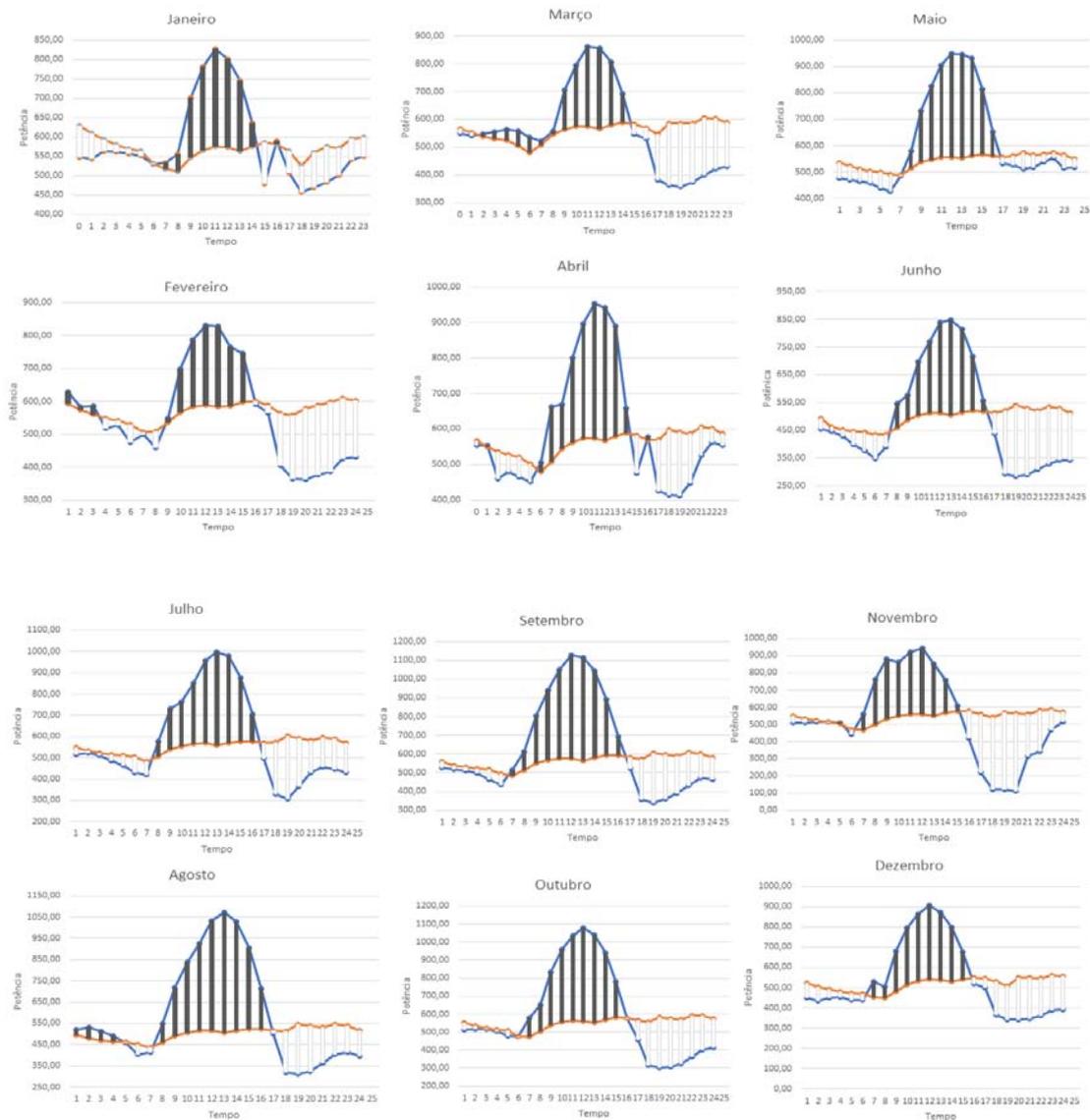
**Figura 34.** Integração entre as fontes de energia (Geração) e consumo ao longo do dia nos meses.

Na maioria dos meses, a janela de tempo em que a produção de energia é maior do que o consumo ocorre entre 7 h e 16 h. A partir das 16 h, há um decréscimo de geração a partir da energia eólica e a luminosidade para a produção de energia solar fotovoltaica já está baixa.

O método inicial de armazenamento de energia utilizado na análise diária foi uma otimização, tendo como variável manipulada a geração de energia elétrica a partir

da fonte hidráulica. A geração hidrelétrica de energia pode ser controlada através de abertura ou fechamento de comportas para vazão vertida ser desejável.

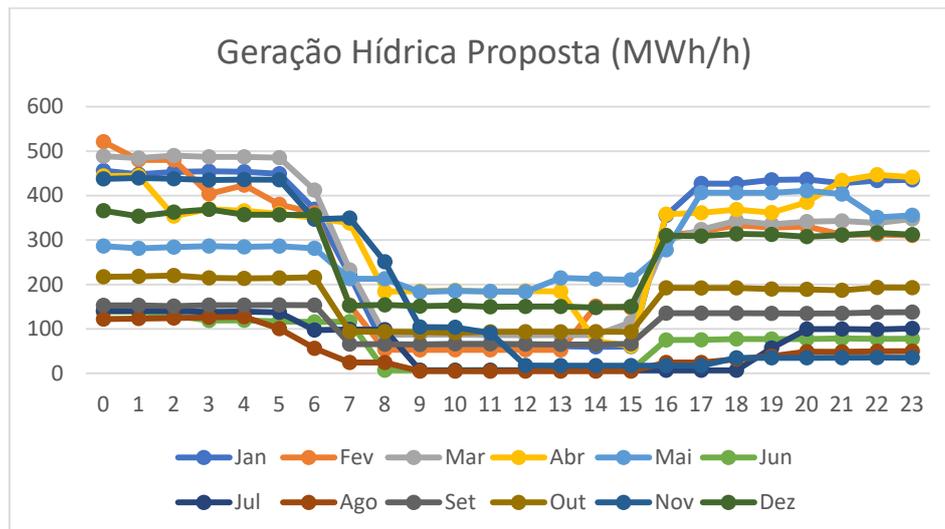
A figura 35 apresenta a geração otimizada de energia através da geração hidrelétrica ao longo do dia e foi realizada de acordo com as limitações e restrições aplicadas nas equações de 10 a 12.



**Figura 35.** Resultado da otimização utilizando a variação da geração de energia hidrelétrica.

A energia gerada através da fonte hídrica aproxima mais a curva de geração e consumo de energia elétrica e pode-se perceber na figura 34 que o impacto dessa fonte de energia, ao longo do dia, suaviza mudanças bruscas de geração.

O resultado da otimização diretamente na geração hídrica realizada pode ser visto na figura 36, pois o resultado teve como principal consequência a minimização da geração de energia elétrica a partir dessa fonte, quando a solar fotovoltaica era máxima. A convergência atingida satisfaz todas as restrições impostas ao problema na sua modelagem e, algumas vezes as restrições lineares foram atingidas como fronteira para a solução viável do problema.



**Figura 36.** Resultado da otimização utilizando a variação da geração de energia hidrelétrica.

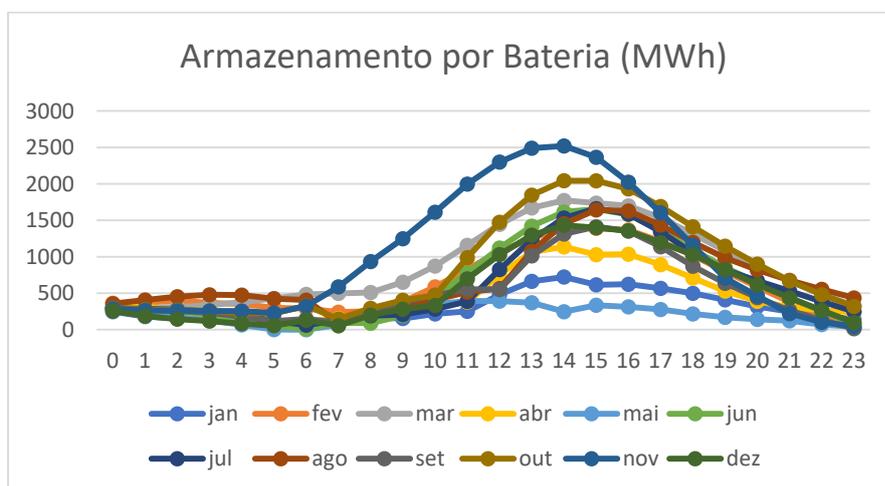
O mês de março é o que apresenta maior variação ao longo do dia e maio é o mês com mudanças mais suaves. As mudanças mais suaves indicam uma maior necessidade de geração hídrica até por carência de geração de energia por outra fonte, como solar e eólica, assim como indicado na abordagem anual.

É importante notar que a geração de energia hídrica por si só não é suficiente para adequar consumo e geração. Sendo assim, faz-se ainda necessário utilizar outra fonte de armazenamento para concluir a adequação da geração de energia ao consumo, no estudo de caso apresentado.

A utilização de método de armazenamento secundário fez-se necessário e, nesse caso, utilizou-se um conjunto de baterias com capacidade de armazenamento de 2.500 MWh de energia elétrica devido ao mês de novembro, o qual apresenta uma grande quantidade de energia a ser armazenada. A escolha da bateria deve-se a maior eficiência a exemplo de baterias de íons de lítio, além de possuir a maior maturidade tecnológica e, atualmente, maior aplicação e disponibilidade comercial.

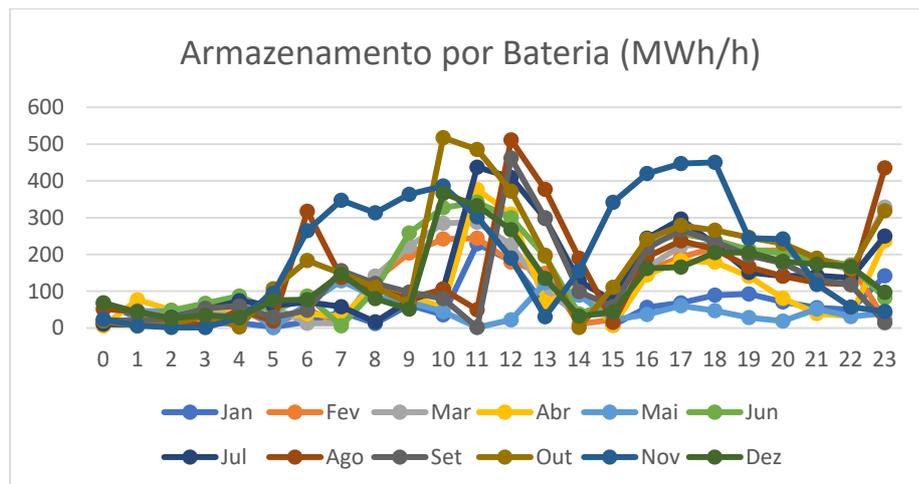
Na figura 37, é possível verificar as variações às quais o sistema de armazenamento está submetido. O mês com menor variação e menores quantidades de energia a ser armazenada é o mês de maio e, aquele com maior variação, é novembro. O mês com maior necessidade de armazenamento apresenta essa particularidade por ter grande potencial de geração solar e eólica e, nesses casos, faz-se necessário ter um sistema mais robusto para tratar as intermitências existentes nessas fontes.

O armazenamento utilizado é cíclico e tem como característica principal responder às variações de geração e consumo de energia elétrica. Sendo assim, é possível verificar o deslocamento da curva para horários mais próximos das 18h de modo a compensar o declínio da geração de energia através da fonte fotovoltaica e eólica.



**Figura 37.** Armazenamento acumulado de energia através de baterias ao longo do dia em diferentes meses.

A potência de utilização da bateria apresentada na figura 38 tem a finalidade de avaliar qual a potência de carga e/ou descarga para o conjunto de baterias escolhido, pois ela relaciona a diferença de energia elétrica em um espaço de tempo conhecido, o qual, nesse caso, foi de 1 hora. Para essa medida não foi levado em consideração o sentido do fluxo de energia (carga ou descarga), mas a diferença em módulo para verificar valores absolutos.



**Figura 38.** Potência de armazenamento através de baterias ao longo do dia em diferentes meses.

O conjunto de baterias apresentou maior valor de potência no mês de outubro entre 9 h e 10 h, com 517,3 MWh/h, porém a potência média entre todas as medidas é de 129,8 MWh/h. Isso indica que o conjunto de baterias a ser utilizado pode ter 520 MW de potência útil despachável de modo a satisfazer o sistema analisado, apesar de, na maioria dos casos, estar próximo de 130 MW de potência utilizada no sistema.

Uma alternativa seria um conjunto de baterias com potência de 130 MW despachável de íons de lítio associado a um conjunto de baterias de fluxo que possam despachar uma potência complementar de 390 MW para satisfazer a especificidade apresentada.

## 7. CONCLUSÕES

As fontes de geração de energia elétrica estudadas neste trabalho têm intermitências naturais, porém apresentam uma complementaridade de geração. Como exemplo, as gerações eólica e solar fotovoltaica apresentam uma relação de acréscimo de uma em detrimento do decréscimo da outra na abordagem anual.

A solução apontada para resolver o problema da intermitência ao longo do ano foi utilizar o armazenamento de água no reservatório da hidrelétrica em estudo, modificando a curva de geração. A modificação proposta faz com que, nos meses em que há alta produção por fontes solar e eólica, ocorra uma diminuição da produção de energia através de fonte hídrica e o contrário também é verificado.

Na abordagem diária, que considera as variações e intermitências ao longo do dia, também há pequenas complementaridades. No entanto, há o caso de decréscimo de geração de energia a partir das fontes solar e eólica no fim do dia e é contrário ao aumento do consumo. Esse é o maior problema verificado para as fontes renováveis, pois apresentam baixa produção em um horário considerado crítico.

A integração das fontes de geração de energia elétrica teve a participação da geração hídrica ao longo do dia, conservando seu perfil original, mas com a quantidade de energia já referenciada na análise anual.

Para tirar proveito da complementaridade entre as fontes é preciso que haja uma variável passível de ser manipulada e o método inicial de armazenamento de energia utilizado na análise diária foi uma otimização, tendo como variável a geração de energia elétrica a partir de fonte hidráulica.

A energia gerada através da fonte hídrica aproximou mais a curva de geração e consumo de energia elétrica de forma que o impacto dessa fonte de energia ao longo do dia suaviza mudanças bruscas de geração e a soma da energia gerada ao longo do dia é exatamente a mesma.

A convergência atingida satisfaz todas as restrições impostas ao problema na sua modelagem e, algumas vezes, as restrições lineares foram atingidas como fronteira para solução viável do problema. No entanto, apenas esse método de armazenamento não foi suficiente para adequar totalmente consumo e geração de energia elétrica.

A utilização de método de armazenamento secundário fez-se necessário e, nesse caso, utilizou-se um conjunto de baterias com capacidade de armazenamento de 2.500 MWh de energia elétrica devido ao mês de novembro apresentar uma grande quantidade

de energia a ser armazenada. O conjunto de baterias a ser utilizado pode ter 520 MW de potência útil disponível para satisfazer o sistema analisado, apesar de, na maioria dos casos, estar próximo de 130 MW de potência utilizada no sistema.

Portanto, utilizando um armazenamento misto de controle da vazão turbinada na hidrelétrica e um conjunto de baterias com potência e quantidade de armazenamento específicas, é possível adequar, com boa precisão, a demanda e a produção de energia elétrica na malha proposta.

## 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desafio de integrar as fontes de energia renováveis e vencer os obstáculos de utilizar uma matriz energética essencialmente limpa ainda merece mais estudos e elucidação. Sendo assim, para trabalhos futuros sugere-se:

- Avaliar ambientalmente o impacto produzido pelas termoelétricas e utilização de energias renováveis poderá ser benéfico para a mitigação de emissões dos gases de efeito estufa;
- Avaliar a viabilidade econômica para o mercado cativo de energia (ACR) da não utilização de fontes térmicas na geração de eletricidade dentro SIN;
- Avaliar a viabilidade econômica para investidores no mercado de geração em investir nos métodos de armazenamento propícios para o SIN;
- Estudar e propor controle usando técnicas de controle avançado para geração de eletricidade integrando as fontes renováveis com hidrelétrica no SIN;
- Estudar a otimização econômica na geração de eletricidade considerando as intermitências e períodos de seca mais intensa;
- Estudar e propor controle para a geração de eletricidade, incluindo decisões baseadas em políticas de estado para o operador nacional do sistema elétrico.

## REFERÊNCIAS<sup>1</sup>

ABELHO, Sofia Gazimba. **Armazenamento de energia eléctrica: cenários para o sistema eléctrico Português**. 2011. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

ABRAPCH – Associação Brasileira de PCHs e GCHs (2017). Custo médio de PCHs e CGHs ficou em R\$ 225/MWh desde 2010, aponta estudo. Disponível em: <https://abrapch.org.br/2017/08/03/custo-medio-de-pchs-e-cghs-ficou-em-r-225mwh-desde-2010-aponta-estudo/> (último acesso: 08/12/2019).

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Banco de Informações da Geração (BIG). [Online] 15 de junho de 2014. [Citado em: 2014 de junho de 15.]  
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução nº 281. Estabelece as condições gerais de contratação do acesso, compreendendo o uso e a conexão, aos sistemas de transmissão de energia eléctrica.1999.  
Resolução 219. Dá nova redação ao art. 22 da Resolução nº 281, de 1o de outubro de 1999, com prazo para republicação integral.2003.  
Altera a redação dos arts. 1º e 3º da Resolução Normativa nº 77, de 18 de agosto de 2004. Resolução Normativa 271/2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 021/2016 – “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro. Disponível em: <  
[https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset\\_publisher/ahiml6B12kVf/content/temas-para-investimentos-em-p-d/656831?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d?p\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_ahiml6B12kVf%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26p\\_p\\_col\\_count%3D3](https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset_publisher/ahiml6B12kVf/content/temas-para-investimentos-em-p-d/656831?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d?p_p_id%3D101_INSTANCE_ahiml6B12kVf%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D3)>. Acesso em: 16 de julho de 2021.

AGRONEGÓCIOS e tecnologias. Gazeta Mercantil, 24 maio 2006, p. A-3.

AN, Yuan et al. Theories and methodology of complementary hydro/photovoltaic operation: Applications to short-term scheduling. **Journal of renewable and sustainable energy**, v. 7, n. 6, p. 063133, 2015.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Decreto 5.163. Regulamenta a comercialização de energia eléctrica, o processo de outorga de concessões e autorizações de geração de energia eléctrica, e dá outras providências. Brasília: s.n., 30 de julho de 2004.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Lei 10.604. Dispõe sobre recursos para subvenção a consumidores de energia eléctrica da Subclasse Baixa Rendada novaredaçãoaosarts.27e28daLeinº 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras

---

<sup>1</sup>De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

providências.2002.

BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C. A. L. Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil. **Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia**, 2016.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). InfoMercado. [Online] [citado em: 2013 de 11 de 10.] [http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/quem-](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-)

CAMARGO, L. A. S. et al. A business model to incentivize hydro companies inversions in wind and biomass power plants. In: **2013 4th International Youth Conference on Energy (IYCE)**. IEEE, 2013. p. 1-8.

CAMARGO, Ivan Marques de Toledo; ALMEIDA, Luís Henrique Bassi. A contratação de energia de reserva no atual modelo do setor elétrico brasileiro: da teoria à prática. 2009.

CHEN, Haisheng et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. **Progress in natural science**, v. 19, n. 3, p. 291-312, 2009.

CHEN, Long Xiang et al. A novel isobaric adiabatic compressed air energy storage (IA-CAES) system on the base of volatile fluid. **Applied Energy**, v. 210, p. 198-210, 2018.

CHOW, Tin Tai. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. **Applied energy**, v. 87, n. 2, p. 365-379, 2010.

CRESESB - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S Brito – Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 28 de novembro de 2019.

DIAS, NATÁLIA VANTON. Estratégias de Comercialização de Energia para um Portfólio de Usinas: Análise da Complementaridade Energética e Mecanismo de Hedge. **Projeto de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Orientador: Prof. Dr. Dorel Soares Ramos. São Paulo: s.n., 2007.**

EL-MANN, Mauricio. Sistema Armazenador de Energia Cinética–SAEC– Implementação Experimental. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Expansão da Geração Eólica no Brasil. Nota Técnica PRE 01/2009-r0. Rio de Janeiro: s.n.,2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2022. Brasília: [s.n.], 2013. p. 410 p.

Energia Eólica Brasil e Mundo. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 8. 2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2019). Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia, Brasília - DF. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-ben> (último acesso: 12/09/2019).

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2021). Balanço Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia, Brasília - DF. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balancoenergetico-nacional-ben> (último acesso: 22/06/2021).

GONCALVES, André Rodrigues et al. Cenários de expansão da geração solar e eólica na matriz elétrica brasileira. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. 2018.

Helsingen, Eirik Mørkved. “Adiabatic Compressed Air Energy Storage.” 155 (June): 804–15. 2015.

INFOMERCADO. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/infomercado?\\_adf.ctrl-tate=q4gbm9pus\\_5&\\_afLoop=1152687616686641#!](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado?_adf.ctrl-tate=q4gbm9pus_5&_afLoop=1152687616686641#!)>. Acesso em: 16 Novembro 2019.

LEONZIO, Grazia. Process analysis of biological Sabatier reaction for bio-methane production. **Chemical Engineering Journal**, v. 290, p. 490-498, 2016.

LOPES, Sérgio Augusto Seixas. **Tecnologias de armazenamento de energia para fornecimento de serviços de sistema**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra.

LUO, Xing et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied energy**, v. 137, p. 511-536, 2015.

LUZ, Thiago José da. **METODOLOGIAS E TECNOLOGIAS PARA A INTEGRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra.

MARGETA, Jure; GLASNOVIC, Zvonimir. Exploitation of temporary water flow by hybrid PV-hydroelectric plant. **Renewable Energy**, v. 36, n. 8, p. 2268-2277, 2011.

MARINHO, Raoni Rugai. Estudo de alternativas de comercialização para alavancar a viabilidade econômica de Usinas Eólicas no Parque Gerador Brasileiro. **Projeto de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Orientador: Prof. Dr. Dorel Soares Ramos. São Paulo: sn**, 2011.

MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno; AZEREDO, Maria Francisca Velloso. Capítulo II Complementaridade entre a energia solar e a energia hidroelétrica. 2018.

MATHIESEN, Brian Vad; LUND, Henrik; KARLSSON, Kenneth. 100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth. **Applied energy**, v. 88, n. 2, p. 488-501, 2011.

ODUKOMAIYA, Adewale et al. Thermal analysis of near-isothermal compressed gas energy storage system. **Applied energy**, v. 179, p. 948-960, 2016.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico – Histórico da Operação. Disponível em: <[http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao\\_energia.aspx](http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx)> Acesso em: 28 de novembro de 2019.

RALSTON, Francisco et al. Risk constrained contracting strategies of renewable portfolios. In: **2010 7th International Conference on the European Energy Market**. IEEE, 2010. p. 1-7.

RAMOS, D. S.; GUARNIER, E.; CAMARGO, L. A. S. Incorporando os efeitos da complementaridade Hidro-Eólica na formação do Portfólio de Empresas Geradoras de Energia Elétrica. In: **XII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning-SEPOPE**. 2012.

RAMOS, D. S., et al. Análise Estruturada de Portfólio de Unidades de Geração de Características Sazonal e Complementar com o Suporte de Algoritmos Genéticos. **Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL**, 2013. São Paulo: s.n., 2013.

RAMOS, D. S.; GUARNIER, E.; WITZLER, L. T. Using the seasonal diversity between renewable energy sources to mitigate the effects of wind generation uncertainties. In: **2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)**. IEEE, 2012. p. 1-7.

RAMOS, D. S. et al. Minimizing market risk by trading hydro-wind portfolio: A complementarity approach. In: **2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM)**. IEEE, 2013. p. 1-8.

REDA, ALEXANDRE GUNFINKEL. Complementação energética entre pequenas centrais hidrelétricas e usinas eólicas considerando a inserção de incertezas para cenários futuros de geração. **Projeto de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP)**. Orientador: Prof. Dr. Dorel Soares Ramos. São Paulo: sn, p. 110, 2011.

SANTOS, NUNO PESSANHA. Supercondensadores. O que são? Como Funcionam? <[http://www.academia.edu/7472630/Supercondensadores - O que são Como Funcionam](http://www.academia.edu/7472630/Supercondensadores_-_O_que_são_Como_Funcionam_)> 2013 Acesso em: 16 novembro 2019.

SARBU, Ioan; SEBARCHIEVICI, Calin. A comprehensive review of thermal energy storage. **Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 191, 2018.

SILVA, Edmilson Ferreira da. **Principais condicionantes das alterações no modelo de comercialização de energia elétrica: retrospectiva e análise crítica**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

STREET, Alexandre et al. Risk constrained portfolio selection of renewable sources in hydrothermal electricity markets. **IEEE Transactions on power systems**, v. 24, n. 3, p. 1136-1144, 2009.

STREET, Alexandre et al. Sharing quotas of a renewable energy hedge pool: A cooperative game theory approach. In: **2011 IEEE Trondheim PowerTech**. IEEE, 2011. p. 1-6.

SUSTERAS, Guilherme L. et al. Attracting wind generators to the wholesale market by mitigating individual exposure to intermittent outputs: an adaptation of the Brazilian experience with hydro generation. In: **2011 8th International Conference on the European Energy Market (EEM)**. IEEE, 2011. p. 674-679.

TEIXEIRA, Luis E. et al. Feasibility study of a hydro PV hybrid system operating at a dam for water supply in southern Brazil. **Journal of Power and Energy Engineering**, v. 3, n. 09, p. 70, 2015.

VRANAS, Todd M. **Control system development for power generation from small-scale compressed air energy storage**. Naval Postgraduate School Monterey United States, 2017.

YPMA, Tjalling J. Historical development of the Newton–Raphson method. **SIAM review**, v. 37, n. 4, p. 531-551, 1995.