



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Bianca Grillo de Oliveira

**Estudo de Plantas Virtuais de Potência: A Busca por Estabilização do Sistema Elétrico**

Araranguá

2024

Bianca Grillo de Oliveira

**Estudo de Plantas Virtuais de Potência: A Busca por Estabilização do Sistema Elétrico**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia

Orientador(a): Prof. Dr. Leonardo Elzeire Bremerman

Coorientador(a) : Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli

Araranguá

2024

Oliveira, Bianca Grillo de

Estudo de Plantas Virtuais de Potência: A Busca por Estabilização do Sistema Elétrico / Bianca Grillo de Oliveira ; orientador, Leonardo Elizeire Bremerman, coorientador, Giuliano Arns Rampinelli, 2024.

62 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Plantas Virtuais de Potência. 3. Transição Energética. 4. Engenharia de Energia. I. Bremerman, Leonardo Elizeire . II. Rampinelli, Giuliano Arns . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. IV. Título.

Bianca Grillo de Oliveira

**Estudo de Plantas Virtuais de Potência: A Busca por Estabilização do Sistema Elétrico**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

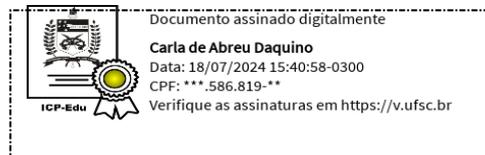
Prof. Dr. Leonardo Elizeire  
Bremerman  
Orientador

Prof.<sup>a</sup> Letícia Toreti Scarabelot,  
Lenergy Energia Solar

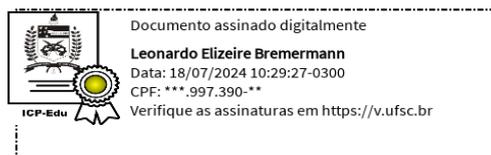
Prof. Geóvio  
Kroth, IFSC

Araranguá, 03 de julho de 2024

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.



Coordenação do Curso



Prof. Dr. Leonardo Elizeire  
Bremerman Orientador



Bianca Grillo Oliveira  
Autor

Araranguá, 2024

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela oportunidade de estar concluindo o curso após tantos períodos turbulentos.

Gostaria de agradecer imensamente os meus pais por me darem força e todo o apoio do mundo para seguir sempre em frente e lutar para alcançar todos os meus sonhos. Sem vocês eu não chegaria onde cheguei de forma alguma, obrigada por serem meu suporte.

Não poderia deixar de agradecer o meu irmão pelo incentivo sempre, obrigada por me fazer mais forte.

Agradeço todos os meus familiares por sempre torcerem por mim, sei do apoio de cada um.

Também gostaria de agradecer minhas amigas por estarem ao meu lado em todo o período da universidade, principalmente Mariani e Júlia, que nunca mediram esforços para me ver bem e me ajudar a chegar onde cheguei.

Gratidão eterna a todos aqueles que estiveram ao meu lado nessa caminhada, cada um está guardado em meu coração.

“Crie a melhor e mais grandiosa visão possível para a sua vida, porque você se torna aquilo que acredita”

Oprah Winfrey

## RESUMO

A transição energética no Brasil consiste em uma oportunidade para inovar na forma como a energia é gerada, distribuída e consumida. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) - 2029, documento estratégico que projeta e orienta o desenvolvimento do setor energético no Brasil, delinea as diretrizes e as metas para a expansão da capacidade energética, tendo em vista a sustentabilidade, a segurança energética e a eficiência econômica. O plano aborda como o país pretende manejar suas fontes de energia, com ênfase crescente em fontes renováveis e tecnologias emergentes -, como as Plantas Virtuais de Potência (VPPs). As VPPs são pesquisadas neste trabalho como uma solução estratégica para integrar recursos de energia distribuída (RED); tratam-se de sistemas que agregam diversas unidades de geração de energia distribuída, armazenamento e cargas controláveis. Logo, são capazes de gerenciar a produção e a demanda de energia de forma flexível, utilizando tecnologias de comunicação e software avançados para operar em tempo real. Ante tal contexto, o objetivo geral desta pesquisa é investigar como as VPPs podem contribuir para a transição energética no Brasil, explorando o seu potencial para aumentar a integração de energias renováveis, melhorar a estabilidade do sistema elétrico e otimizar a gestão de energia distribuída - considerando também os desafios regulatórios e operacionais na sua implementação. Os Objetivos Específicos incluem: (i) analisar a evolução tecnológica das VPPs nos últimos anos e identificar as principais inovações que impactam seu desempenho; (ii) identificar os desafios tecnológicos e operacionais enfrentados no desenvolvimento e operação das VPPs, com foco em soluções aplicadas em contextos internacionais; (iii) investigar soluções técnicas e modelos operacionais para otimizar o desempenho das VPPs no mercado de energia brasileiro. Essa análise envolve o estudo sistemático de conceitos técnicos, tais como: (a) Recursos de Energia Distribuída (RED); (b) Sistemas de Armazenamento de Energia; (c) Medidores Inteligentes e Tecnologias de Comunicação; (d) Modelagem e Simulação de Sistemas de Energia. Estes conceitos serão explorados para entender como podem ser integrados nas estratégias de VPPs, impactando a segurança energética. A pesquisa adotará uma abordagem mista, combinando métodos qualitativos e quantitativos. Inicia-se com a Revisão Sistemática da Literatura para estipular o estado da arte das VPPs e identificar lacunas de pesquisa (nos seguintes repositórios científicos: *IEEE Xplore Digital Library*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *Scopus* e *Web of Science*); segue-se com a Análise Quantitativa de Dados para investigar a performance das VPPs e estudos de caso internacionais; e sistematizam-se propostas de implementação de VPPs no Brasil. Logo, as ferramentas analíticas geradas nesta pesquisa incluem: tabelas de frequência (para sumarizar os tipos de metodologias usadas nos estudos); mapas gráficos (para visualizar a distribuição de variáveis como a eficiência ou a eficácia das diferentes tecnologias estudadas). As hipóteses da pesquisa são: (H1) a implementação de VPPs no Brasil pode reduzir significativamente os custos de transação e operação no mercado de energia distribuída; (H2) VPPs equipadas com tecnologias de armazenamento de energia podem melhorar a estabilidade do sistema elétrico brasileiro; (H3) A adoção de VPPs facilitará uma maior penetração de energias renováveis na matriz energética brasileira. Desse modo, este estudo pretende realizar uma análise acadêmica sobre o potencial das VPPs na transição energética brasileira, e contribuir com diretrizes práticas para formuladores de políticas, reguladores e profissionais do setor.

**Palavras-chave:** Plantas Virtuais de Potência. Recursos de Energia Distribuída. Tecnologia de Rede Inteligente. Sistemas de Gestão de Energia. Transição Energética

## ABSTRACT

The energy transition in Brazil represents an opportunity to innovate in how energy is generated, distributed, and consumed. The Ten-Year Energy Expansion Plan (PDE) for 2029, a strategic document that projects and guides the development of the energy sector in Brazil, outlines the guidelines and goals for expanding energy capacity with a focus on sustainability, energy security, and economic efficiency. The plan discusses how the country intends to manage its energy sources, with an increasing emphasis on renewable sources and emerging technologies, such as Virtual Power Plants (VPPs). VPPs are explored in this study as a strategic solution to integrate distributed energy resources (DER); they are systems that aggregate various units of distributed energy generation, storage, and controllable loads. Thus, they are capable of managing energy production and demand flexibly, using advanced communication technologies and software to operate in real time. In this context, the general objective of this research is to investigate how VPPs can contribute to the energy transition in Brazil, exploring their potential to increase the integration of renewable energies, improve the stability of the electrical system, and optimize the management of distributed energy - also considering the regulatory and operational challenges in their implementation. The Specific Objectives include: (i) analyzing the technological evolution of VPPs in recent years and identifying the main innovations that impact their performance; (ii) identifying the technological and operational challenges faced in the development and operation of VPPs, with a focus on solutions applied in international contexts; (iii) investigating technical solutions and operational models to optimize the performance of VPPs in the Brazilian energy market. This analysis involves the systematic study of technical concepts, such as: (a) Distributed Energy Resources (DER); (b) Energy Storage Systems; (c) Smart Meters and Communication Technologies; (d) Modeling and Simulation of Energy Systems. These concepts will be explored to understand how they can be integrated into VPP strategies, impacting energy security. The research will adopt a mixed approach, combining qualitative and quantitative methods. It begins with a Systematic Literature Review to establish the state of the art of VPPs and identify research gaps (in the following scientific repositories: IEEE Xplore Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, and Web of Science); followed by Quantitative Data Analysis to investigate the performance of VPPs and international case studies; and systematizes proposals for implementing VPPs in Brazil. Thus, the analytical tools generated in this research include frequency tables (to summarize the types of methodologies used in the studies); graphical maps (to visualize the distribution of variables such as the efficiency or effectiveness of the different technologies studied); among others. The research hypotheses are: (H1) the implementation of VPPs in Brazil can significantly reduce transaction and operation costs in the distributed energy market; (H2) VPPs equipped with energy storage technologies can improve the stability of the Brazilian electrical system; (H3) The adoption of VPPs will facilitate greater penetration of renewable energies in the Brazilian energy matrix. Thus, this study aims to conduct an academic analysis on the potential of VPPs in the Brazilian energy transition, and contribute practical guidelines for policymakers, regulators, and industry professionals.

Keywords: Virtual Power Plants, Distributed Energy Resources, Smart Grid Technology, Energy Management Systems, Energy Transition.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Visão Geral dos Componentes de uma Planta de Energia Virtual .....	20
Figura 2 - Figura 2 - Planta Virtual de Potência (VPP) .....	23
Figura 3 - Interconexão de Fontes Renováveis e Gestão Energética Centralizada em Usinas Virtuais de Energia .....	40
Figura 4 - Topologia VPP Next Kraftwerke .....	49
Figura 5 - Como a usina virtual Tesla poderia funcionar. ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela 1 - Características e implicações das VPPs em cenários hipotéticos .....	25
Tabela 2 - Tabela 2 - Diferenças entre microgrids (MGs) e às virtual power plants (VPPs).....	43
Tabela 3 – Resultados da pesquisa bibliográfica .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BESS	Battery Energy Storage Systems (Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias)
DERs	Distributed Energy Resources (Recursos Energéticos Distribuídos)
DR	Demand Response (Resposta à Demanda)
EV	Electric Vehicles (Veículos Elétricos)
FP	Fluxo de Potência
FPO-AC	Fluxo de Potência Ótimo AC (Alternating Current)
FPO-DC	Fluxo de Potência Ótimo DC (Direct Current)
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBDR	Incentive-Based Demand Response (Resposta à Demanda Baseada em Incentivo)
IoT	Internet das Coisas
PBDR	Price-Based Demand Response (Resposta à Demanda Baseada em Preço)
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PHS	Pumped Hydro Storage (Armazenamento Hidroelétrico Bombeado)
RD	Resposta à Demanda (similar a DR)
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
UFV	Usinas Fotovoltaicas
VPP	Virtual Power Plants (Plantas Virtuais de Potência)

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO .....	14
2.	OBJETIVO .....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: CONCEITOS E DESAFIOS GLOBAIS .....	18
3.2	PLANTAS VIRTUAIS DE POTÊNCIA .....	19
3.2.1	DEFINIÇÃO E FUNCIONAMENTO.....	22
3.2.2	IMPORTÂNCIA DAS VPPS NA MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ...	24
3.3	TECNOLOGIAS ASSOCIADAS ÀS VPPS.....	27
3.3.1	SMART GRIDS E MEDIDORES INTELIGENTES .....	29
3.3.2	GESTÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .....	31
3.4	FONTES DE GERAÇÃO EM VPPS.....	33
3.4.1	ENERGIA SOLAR: PAPEL E POTENCIAL NAS VPPS.....	36
3.4.2	ENERGIA EÓLICA: INTEGRAÇÃO E IMPACTO EM VPPS.....	38
3.5	O PAPEL DOS AGREGADORES NA GESTÃO DE VPPS.....	41
3.6	ASPECTOS REGULATÓRIOS E POLÍTICAS ENERGÉTICAS.....	45
4.	ESTADO DA ARTE.....	48
5.	DISCUSSÕES E RESULTADOS.....	53
6.	CONCLUSÃO .....	56
7.	REFERÊNCIAS.....	59

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor de energia tem passado por uma transformação impulsionada por uma série de fatores, incluindo a crescente demanda por eletricidade, a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a busca por maior resiliência do sistema elétrico diante de eventos climáticos extremos e outras perturbações. Esses desafios têm levado a uma mudança de paradigma na forma como é produzida, consumida e distribuída a energia, com um foco cada vez maior na descentralização, digitalização e descarbonização do sistema elétrico (Delgado; Lopez; Gonzalez, 2021).

A importância desse tema é enfatizada pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (PDE), que destaca a necessidade de investir em tecnologias que possam garantir a confiabilidade do sistema elétrico nacional, ao mesmo tempo em que promovem a sustentabilidade ambiental. A implementação das Plantas Virtuais de Potência - VPPs está no centro desses esforços, representando não apenas um avanço tecnológico, mas também uma resposta concreta as demandas contemporâneas de energia e mudança climática (GOV, 2023).

Nesse contexto, as Virtual Power Plants (VPPs) surgem como uma solução inovadora e altamente adaptável para enfrentar os obstáculos emergentes e aproveitar as oportunidades oferecidas pela transição energética. Uma VPP pode ser definida como um espaço virtual que agrega e coordena uma variedade de recursos de geração distribuída, armazenamento de energia e demanda flexível, operando de maneira integrada para fornecer uma série de serviços de energia ao sistema elétrico.

Ao contrário das usinas de energia convencionais, que são geralmente grandes, centralizadas e baseadas em combustíveis fósseis, as VPPs capitalizam a flexibilidade e a diversidade dos recursos distribuídos, como módulos solares, turbinas eólicas, baterias de armazenamento, veículos elétricos e dispositivos de gerenciamento de demanda. Essa abordagem descentralizada e distribuída permite que as VPPs forneçam uma série de benefícios, incluindo maior eficiência operacional, melhor integração de energias renováveis, redução de custos e maior resiliência do sistema elétrico.

Ao considerar a temática de Plantas Virtuais de Potência evidenciaram-se as perguntas de “Como as Plantas Virtuais de Potência (VPPs) funcionam e qual é o seu papel na transição energética?” e no escopo de sua definição e funcionamento, “O que são Plantas Virtuais de Potência e como elas operam no sistema elétrico?” e, ainda, “Como as VPPs integram tecnologias diversas para otimizar a gestão da energia?”. Assinala-se o disposto por Kennedy (2024) de que tecnologia de VPP (Planta de Energia Virtual) tem mostrado um potencial imediato para substituir as usinas de pico a gás natural nas redes elétricas, evitando ou substituindo a construção de novos recursos que são considerados os mais poluentes, caros e ineficientes atualmente.

Logo, organizam-se as hipóteses da pesquisa:

- **Eficiência Energética das VPPs:** As VPPs aumentam a eficiência energética ao coordenar a operação de recursos distribuídos de energia.
- **Redução de Emissões:** A implementação de VPPs contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa.
- **Estabilidade do Sistema Elétrico:** A coordenação centralizada de recursos energéticos distribuídos pelas VPPs melhora a estabilidade e a previsibilidade do sistema elétrico.
- **Integração de Fontes Renováveis:** As VPPs facilitam a integração de múltiplas fontes de energia renovável, como solar e eólica, no sistema elétrico.
- **Papel dos Agregadores:** Os agregadores são fundamentais para a eficiência operacional das VPPs, promovendo a troca e a gestão de energia de forma otimizada. A entidade que opera remotamente uma VPP é conhecida como agregador porque controla a capacidade combinada de produção de energia e a demanda de muitos dispositivos diferentes conectados à rede, denominados ativos.
- **Impacto das Tecnologias de Informação e Comunicação:** As TICs, incluindo IoT e inteligência artificial, melhoram a precisão na coleta de dados e no controle dos recursos energéticos.

O objetivo deste trabalho é explorar o papel das VPPs na transição para um sistema de energia mais sustentável. Para alcançar esse objetivo, foi realizada uma revisão abrangente da literatura sobre as VPPs, examinando seus desenvolvimentos mais recentes, benefícios potenciais, necessidades e perspectivas futuras. Por meio dessa análise crítica, busca-se fornecer uma compreensão aprofundada do estado atual e das tendências emergentes no campo das VPPs.

A estrutura deste trabalho é organizada da seguinte forma: no capítulo 2, serão apresentados os objetivos de pesquisa, seguido pelo capítulo 3 contendo os conceitos fundamentais relacionados às VPPs, incluindo sua definição, características essenciais e comparação com as usinas de energia tradicionais, sendo realizada uma revisão da literatura sobre os desenvolvimentos mais recentes no setor de VPPs, destacando avanços tecnológicos, modelos de negócios inovadores e regulamentações relevantes. No capítulo 4, serão explorados os benefícios das VPPs, integração de energias renováveis e resiliência do sistema elétrico apresentando estudos de caso e exemplos de implementação de VPPs em diferentes contextos, seguidos de uma discussão sobre as perspectivas futuras para o desenvolvimento das VPPs no capítulo 5. Então, no capítulo 6, serão apresentadas as conclusões finais do trabalho, destacando as principais descobertas e sugerindo áreas para futuras pesquisas. Ao compreender o papel fundamental das VPPs na transformação do setor de energia, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento e promover discussões sobre o futuro da energia sustentável.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral desta pesquisa é investigar e propor soluções inovadoras para a integração de Plantas Virtuais de Potência (VPPs) no setor elétrico. O foco está na melhoria da eficiência, confiabilidade e estabilidade na geração e distribuição de energia proveniente de fontes intermitentes, contribuindo para a modernização da infraestrutura energética sustentável.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analisar o estado da arte das tecnologias de Plantas Virtuais de Potência (VPPs).
- Identificar os desafios técnicos e operacionais na integração de fontes intermitentes em VPPs.
- Pesquisar as soluções inovadoras para superar os obstáculos identificados, incluindo tecnologias de controle, sistemas de armazenamento de energia e métodos de previsão de geração solar.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: CONCEITOS E DESAFIOS GLOBAIS

Nas últimas duas décadas, o estudo da transição energética e o papel da inovação e da tecnologia no desenvolvimento de soluções para a suficiência energética e o progresso dos países, especialmente das economias emergentes, tornou-se mais relevante. Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis, a transição energética objetiva descarbonizar o sistema energético global, transformando-o em um sistema de zero carbono. Considera-se que o desenvolvimento acelerado das energias renováveis e da transição energética impacta o progresso dos países; assume-se que o desenvolvimento de soluções tecnológicas adequadas gera maior bem-estar para a sociedade por meio da criação de empregos e da melhoria da qualidade de vida (Delgado; Lopes; Gonzalez, 2021).

No processo de mudança dos sistemas sociotécnicos, com o objetivo de promover a competitividade e a sustentabilidade das economias nacionais, a inovação é um fator fundamental para impulsionar o processo de transição energética. Isso ocorre por meio do desenvolvimento e disseminação de conhecimentos para tecnologias de energia renovável, permitindo diversificar as aplicações além da geração e distribuição de energia elétrica -, especialmente na exploração de padrões emergentes em áreas como bioenergia, energia oceânica e hidrogênio de baixo carbono (Delgado; Lopes; Gonzalez, 2021).

A descarbonização do sistema energético global, transformando-o em um sistema de zero carbono, é de fundamental importância para enfrentar as mudanças climáticas e assegurar um futuro sustentável. O relatório "*Lecciones de una década de disparidad de emisiones*", publicado por ocasião da Cúpula sobre a Ação Climática do Secretário-Geral das Nações Unidas aponta que os países falharam em conter o aumento das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), resultando na necessidade de reduções mais drásticas em menos tempo. Nos últimos dez anos, as emissões de GEE aumentaram em uma média de 1,5% ao ano, com um breve período de estabilidade entre 2014 e 2016. Em 2018, as emissões totais de GEE alcançaram 55,3 GtCO<sub>2</sub>e, um valor sem precedentes. As emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de combustíveis fósseis para consumo de energia e processos industriais, que constituem a maior parte das emissões de GEE, aumentaram 2%, atingindo 37,5 GtCO<sub>2</sub>e ao ano (PNUMA, 2020).

Ressalta-se que, desde os apontamentos de Dong et al (2024) no contexto da transição energética, as VPPs contribuem para a eficiência energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa; ademais impulsionam o desenvolvimento de novas indústrias e cadeias de suprimento, reforçando o movimento global para uma economia de baixo carbono e um futuro sustentável. Esta integração e gestão de múltiplas fontes de energia renovável, como já exposto, são importantes para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos pela Agenda 2030, especialmente o ODS 7, que visa garantir o acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos.

### **3.2 PLANTAS VIRTUAIS DE POTÊNCIA**

As Virtual Power Plants (VPPs) atuam na geração, distribuição e gestão de energia elétrica e se destacam pela sua capacidade de agregar e coordenar uma variedade de recursos de geração distribuída, armazenamento de energia e demanda flexível. O conceito de VPPs tem evoluído ao longo das últimas décadas em resposta ao crescente uso de tecnologias de energia distribuída (Lemus et al, 2022).

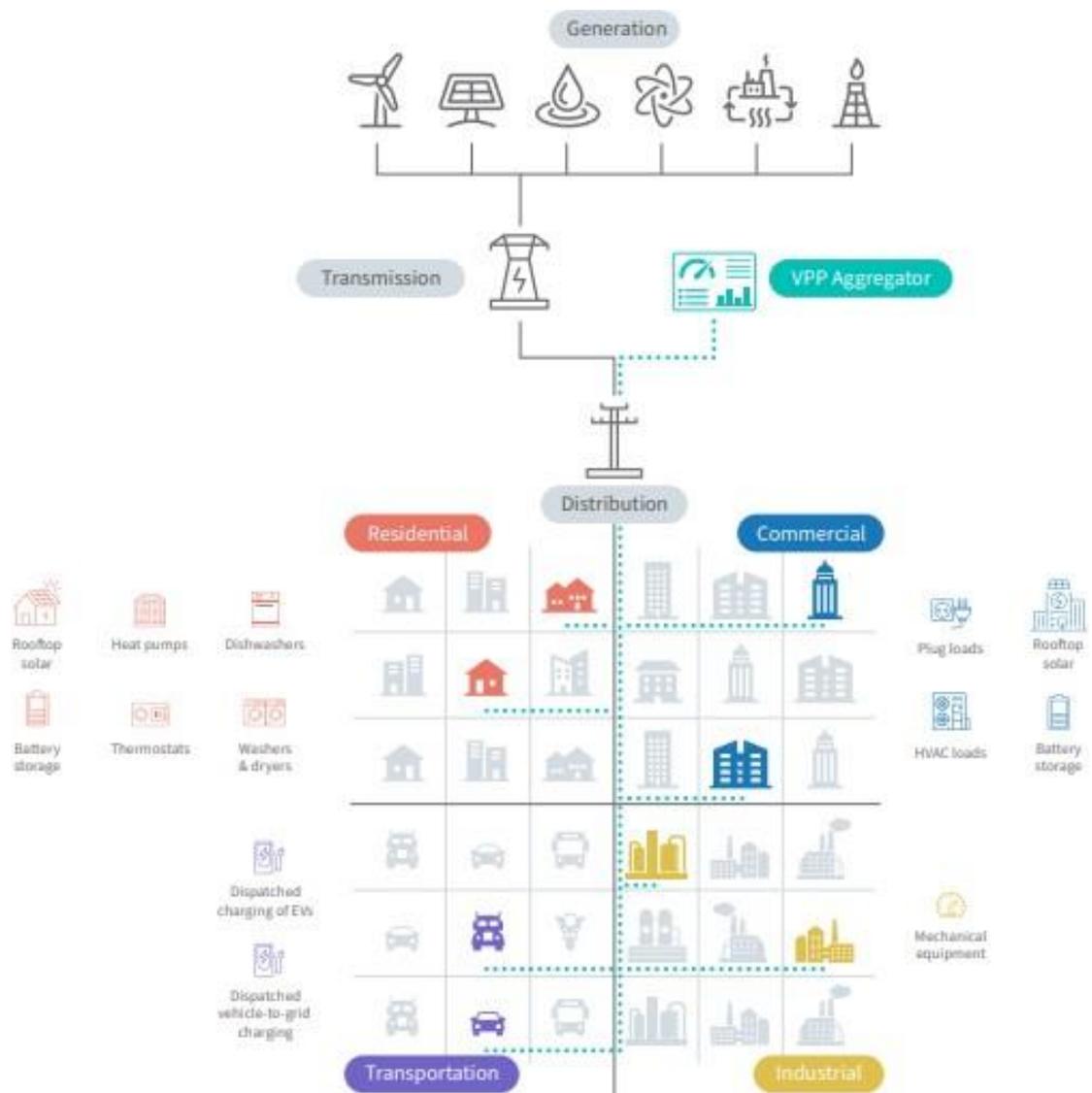
As VPPs surgiram como uma resposta à crescente penetração de fontes de energia renováveis intermitentes, como a energia solar e eólica, que apresentam variações sazonais e diárias em sua produção. Ao integrar e coordenar essas fontes de energia intermitentes com sistemas de armazenamento de energia, como baterias e sistemas de bombeamento hidráulico, podem fornecer uma fonte de energia mais estável e previsível para a rede elétrica (Lemus et al, 2022).

A Figura 1 demonstra como funciona uma Planta de Energia Virtual (VPP, sigla em inglês para Virtual Power Plant), considerando diferentes tipos de recursos energéticos distribuídos e interativos com a rede elétrica. No topo da imagem, diferentes fontes de geração de energia são ilustradas, incluindo energia eólica, hidrelétrica, solar, de biomassa, e outras. Essas fontes geram energia que é transmitida para ser usada em diferentes setores.

A energia gerada é transmitida através de linhas de alta tensão. Um elemento importante é o "Agregador de VPP", responsável por coordenar e gerenciar a distribuição de energia de múltiplos recursos distribuídos. Como mostra a Figura 1, : A energia é distribuída para diversos setores: residencial, no qual inclui dispositivos como módulos solares residenciais, bombas de calor, máquinas de lavar, termostatos

inteligentes, baterias residenciais, entre outros; comercial, no qual abrange carregamentos de veículos elétricos, sistemas de ar-condicionado e ventilação, baterias, e equipamentos industriais leves; transporte, o que inclui o carregamento desconectado de veículos elétricos e o carregamento conectado à rede; industrial, no qual envolve o uso de equipamentos mecânicos e outras cargas pesadas que podem ser gerenciadas de forma a otimizar o consumo e a geração de energia.

Figura 1 - Visão Geral dos Componentes de uma Planta de Energia Virtual



Fonte: Brehm et al (2023)

Com o avanço das tecnologias de comunicação e controle, as VPPs permitem incluir recursos distribuídos, como veículos elétricos, sistemas de controle de

demanda e dispositivos de resposta à demanda. Essa expansão permitiu oferecer serviços incluindo regulação de frequência, gerenciamento de picos de demanda e fornecimento de serviços de rede para operadores de sistemas de distribuição e transmissão, explicam Kaif, Alam e Das (2024).

Especialmente no Brasil aporta caracterizar o cenário da demanda de energia no qual se tem um quadro de incorporação de Novos Consumidores com a expectativa de aumento populacional de cerca de 50% até 2050, e o crescimento da demanda por serviços de maior qualidade devido ao aumento da renda per capita e mobilidade social. A Evolução do Perfil das Edificações com a expansão de habitações e prédios comerciais no longo prazo; além de oportunidades para incentivar edificações eficientes e modernização das existentes, tanto por iniciativas de mercado quanto por políticas públicas (EPE, 2016).

De acordo com o Energymining (2024), o SA VPP (Virtual Power Plant da Austrália do Sul) está demonstrando como plantas de energia virtual e outros recursos de energia distribuída podem operar no futuro, sendo a primeira na Austrália a ajudar a estabilizar os níveis de frequência na rede elétrica. O SA VPP fornece serviços de estabilidade da rede fundamentais para contrapor a falha de uma estação de energia em Queensland em outubro de 2019, proporcionar o fornecimento de energia aos residentes de Port Lincoln durante condições de incêndio catastróficas em novembro de 2019, e responder a problemas de alta e baixa frequência na rede em dezembro de 2019, e desconexões da rede entre a Austrália do Sul e Victoria em novembro de 2019, janeiro de 2020 e novembro de 2022.

Enfatiza-se que a planta de energia virtual da Austrália do Sul envolve várias entidades. A Tesla projetou e desenvolveu o SA VPP e está gerenciando a instalação de sistemas solares e baterias domésticas Tesla Powerwall nas residências da Austrália do Sul. A Energy Locals é o provedor e varejista de eletricidade para todas as residências participantes do SA VPP. Ademais, o Governo da Austrália do Sul apoiou as fases iniciais do projeto com um subsídio de \$2 milhões e um empréstimo de \$20 milhões do Fundo de Tecnologia Renovável, além de um subsídio de \$10 milhões do Fundo de Armazenamento em Escala de Rede, explica Energymining (2024).

As fases iniciais também foram apoiadas por um subsídio de \$8 milhões fornecido pela Australian Renewable Energy Agency (ARENA) e um empréstimo de \$30 milhões da Clean Energy Finance Corporation. Atualmente, a expansão do SA

VPP está sendo financiada inteiramente pela Tesla. O Governo da Austrália do Sul está colaborando com a Tesla para identificar residências da Housing SA que sejam adequadas para essa expansão, ampliando assim a capacidade e o impacto da planta de energia virtual no estado, como aduz Energymining (2024) ao proporcionar uma análise das experiências internacionais.

Como salienta Liffoff (2024), as VPPs são agregações de recursos energéticos distribuídos (DERs), como aparelhos inteligentes, sistemas de energia solar com baterias instalados em telhados, veículos elétricos (EVs) e seus carregadores, além de cargas comerciais e industriais. Esses DERs podem equilibrar a demanda e a oferta de eletricidade e fornecer serviços à rede elétrica, de forma semelhante a uma usina de energia tradicional. Hoje, as VPPs estão na vanguarda da transição para um sistema de energia mais inteligente, descentralizado e sustentável. Elas são capazes de otimizar a operação e o uso de recursos energéticos distribuídos em tempo real, respondendo às flutuações na oferta e demanda de energia e contribuindo para a estabilidade e eficiência do sistema elétrico como um todo (Dong et al, 2024).

### **3.2.1 DEFINIÇÃO E FUNCIONAMENTO**

O conceito de Plantas Virtuais de Potência (VPP) refere-se a um sistema que agrega recursos distribuídos, como turbinas eólicas, geradores fotovoltaicos (PV), cargas controláveis e dispositivos de armazenamento de energia, formando uma "planta de energia equivalente" que é ajustável e facilmente controlada. Esse sistema utiliza diversas tecnologias avançadas de informação e comunicação, bem como métodos adequados de detecção, medição e controle. Ao coordenar e otimizar o status operacional de componentes internos, a VPP tem o potencial de participar do agendamento da rede elétrica da mesma forma que as fontes de energia convencionais, suprimindo a volatilidade causada pela geração de novas energias e pelo consumo aleatório de energia do lado da demanda (Dong et al, 2024).

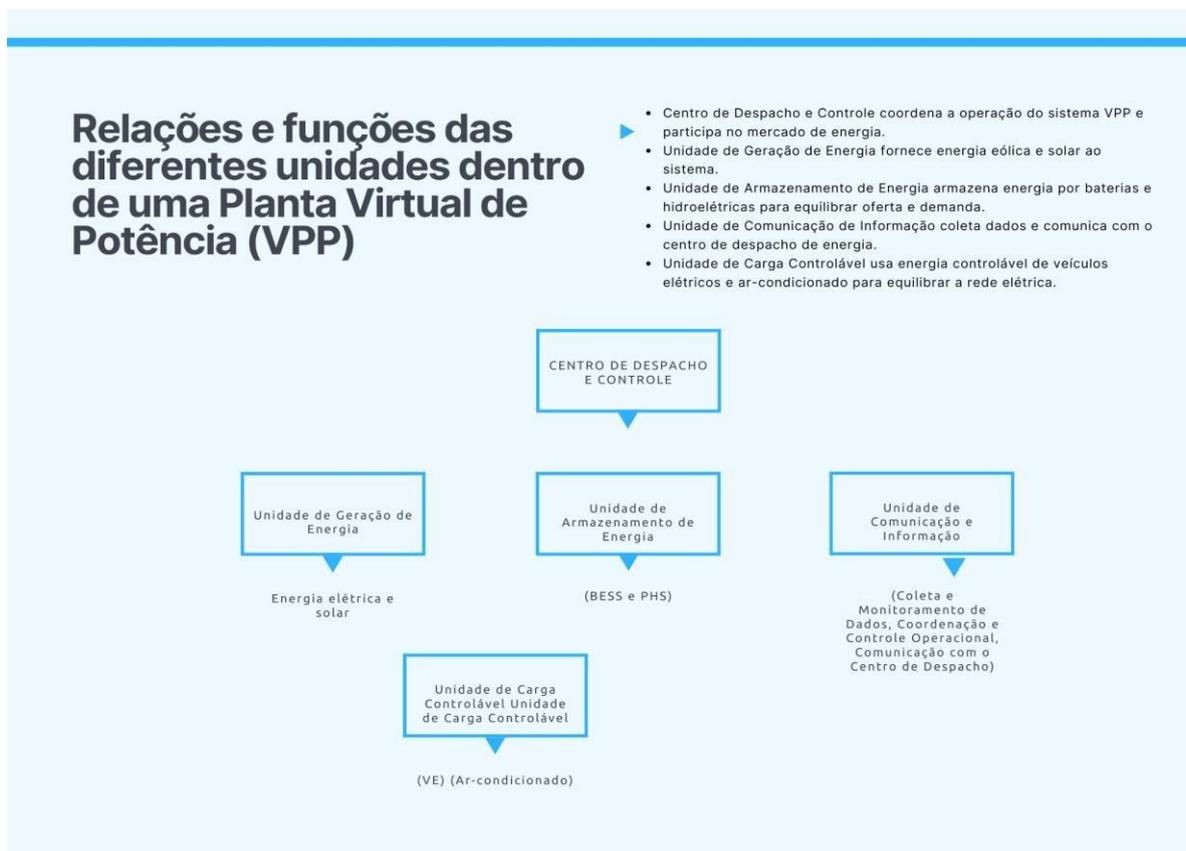
Na explicação de Kaif, Alam e Das (2024) evidenciam que a Planta de Energia Virtual (VPP) é uma área de interesse para soluções industriais modernas, utilizada em indústrias alinhadas aos princípios da Indústria 4.0. A questão que se coloca é sobre os possíveis resultados da integração de redes inteligentes com sistemas tradicionais de gestão de redes que empregam redes peer-to-peer. No escopo da

engenharia de sistemas é uma prática comum em soluções de engenharia e tem sido implementada no desenvolvimento contemporâneo de sistemas considerando o design, desenvolvimento, avaliação e otimização de uma rede elétrica em conformidade com o domínio da Planta de Energia Virtual (VPP).

As VPPs, ao operarem como um único ente no mercado elétrico, permitem que diversos recursos distribuídos de energia (RDE) sejam geridos de maneira eficaz, oferecendo uma resposta ao mercado diante da intermitência das fontes renováveis e da incerteza na demanda. Estes sistemas utilizam técnicas de resposta à demanda (RD), que são estudadas e implementadas para a gestão de carga comercial e industrial (Lemus et al, 2022).

Abaixo apresenta-se uma Figura (Figura 2) de uma Planta Virtual de Potência (VPP) considerando fontes de energia renovável, como turbinas eólicas (que usam o vento) e módulos solares (que usam a radiação solar); ademais de sistemas como baterias (BESS) e armazenamento hidroelétrico bombeado (PHS), que guardam energia para ser usada quando necessário.

Figura 2 - Planta Virtual de Potência (VPP)



Fonte: elaboração do autor.

A VPP, ressaltam Kaif, Alam e Das (2024), exige a antecipação de vários aspectos da infraestrutura física da rede, incluindo o desempenho, fluxo de energia, preço, tolerância a falhas e balanceamento de carga; de modo que é necessário calibrar os parâmetros da rede enquanto se mantém o sistema. Considera-se que ao integrar todos os modelos discretos, contribui-se para a transformação da rede tradicional em uma VPP (técnica de engenharia de sistemas, que envolve a divisão de um sistema em seções como subsistemas e componentes, tem se mostrado uma importante estratégia para alcançar essa transformação).

A VPP é composta por unidades de geração de energia, sistemas de armazenamento de energia, unidades de comunicação de informação e um centro de controle de despacho. Cada componente desempenha na coleta e monitoramento de dados operacionais, na coordenação e controle do status operacional das unidades constituintes e na comunicação com o centro de despacho de energia (Dong et al, 2024). Ao operarem como um único ente no mercado elétrico, permitem que diversos recursos distribuídos de energia (RDE) sejam geridos oferecendo uma resposta ao mercado diante da intermitência das fontes renováveis e da incerteza na demanda. Estes sistemas utilizam técnicas de resposta à demanda (RD), que são estudadas e implementadas para a gestão de carga comercial e industrial (Lemus et al, 2022).

### **3.2.2 IMPORTÂNCIA DAS VPPS NA MODERNIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO**

A tecnologia de planta de energia virtual (Virtual Power Plant, VPP) permite a escala de desenvolvimento dos recursos energéticos distribuídos (Distributed Energy Resources, DERs) ante o aumento do consumo global de energia e as preocupações ambientais. Considera-se que as localizações geográficas dos geradores distribuídos são dispersas, a capacidade das unidades é pequena e as flutuações intermitentes são evidentes, diante disso é necessária uma solução viável - no qual se considera combinar as VPPs com esses DERs imprevisíveis com usinas de energia convencionais para garantir a estabilidade das operações da rede elétrica (Jia et al, 2023).

Enfatiza-se que o armazenamento de energia ajuda a estabilizar a rede elétrica ao fornecer energia durante períodos de alta demanda ou interrupções, como mencionado nos benefícios técnicos das microgrids (MGs), que incluem a redução de

apagões e a falta de vulnerabilidade das grandes redes. As MGs, que podem operar tanto em modo ilhado quanto conectadas à rede, demonstram a flexibilidade proporcionada pelo armazenamento de energia, necessária para áreas remotas onde a transmissão de energia é obstaculizada, garantindo uma fonte confiável de energia mesmo sem conexão contínua com a rede principal (Palizban; Kauhaniemi; Guerrero, 2014).

Nesse sentido, pontua-se abaixo a tabela 1 com as características e implicações das VPPs:

Tabela 1 - Características e implicações das VPPs em cenários hipotéticos

Característica	Explicação	Exemplo Hipotético
Confiabilidade	Aumento da confiabilidade do sistema mesmo com o aumento de eventos climáticos extremos e ameaças cibernéticas	Uma rede elétrica que continua fornecendo energia de forma estável durante uma tempestade severa ou um ataque cibernético, sem quedas de energia.
Acessibilidade	Redução do custo energético para as famílias diante do aumento da inflação e da interrupção da cadeia global de fornecimento de energia	Um programa que subsidia a instalação de módulos solares em residências de baixa renda, diminuindo as contas de eletricidade dessas famílias, mesmo com os custos globais de energia aumentando.
Descarbonização	Redução das emissões de gases de efeito estufa para atender às metas climáticas nacionais, estaduais e corporativas	Uma empresa que instala sistemas de energia solar e eólica, reduzindo as suas emissões de CO <sub>2</sub> em 50%, ajudando a cumprir as metas de emissão zero de uma cidade ou estado.

(continuação) Tabela 1 - Características e implicações das VPPs em cenários hipotéticos

Eletrificação	Facilitação da rápida eletrificação de residências, transportes e indústrias para reduzir as emissões em toda a economia	Uma cidade que promove a adoção de veículos elétricos e instala pontos de carregamento, diminuindo as emissões de poluentes do transporte público e privado.
Saúde	Redução ou eliminação de mortes precoces e outros danos à saúde resultantes da poluição das usinas de energia	Um programa que desativa usinas a carvão próximas a áreas residenciais e as substitui por energia renovável, resultando em menos casos de doenças respiratórias na comunidade.
Equidade	Abordagem dos impactos desiguais à saúde e à comunidade incorporados no sistema energético atual	Um projeto que direciona investimentos em infraestrutura energética sustentável para comunidades historicamente desfavorecidas, melhorando a qualidade do ar e acesso à energia limpa.
Empoderamento do Consumidor	Fornecimento de escolhas e voz aos consumidores de energia na formação do sistema de energia em que participam	Um aplicativo que permite aos consumidores escolherem suas fontes de energia (solar, eólica, etc.) e participar de decisões sobre como a energia é gerida em sua comunidade.

Fonte: elaboração do autor a partir de Brehm et al (2023).

A "escala de desenvolvimento dos recursos energéticos distribuídos (Distributed Energy Resources, DERs)" refere-se ao crescimento e expansão gradual das instalações e capacidades dos recursos de energia que são distribuídos geograficamente em vez de centralizados. Esses recursos incluem fontes de energia renovável (como módulos solares e turbinas eólicas), sistemas de armazenamento de energia (como baterias, e outras tecnologias) que permitem a geração e o armazenamento de energia em pontos espalhados (Jia et al, 2023).

Reforça-se que o armazenamento de energia permite realizar a previsão da geração e demanda, como destacado na metodologia aplicada às VPPs. A capacidade de armazenar energia gera um buffer que suaviza as variações imprevisíveis na geração, especialmente de fontes renováveis. Ademais, a integração de sistemas de armazenamento facilita o gerenciamento e a manutenção da estabilidade da rede. Como descrito, a hierarquia de controle de MGs abrange desde o controle de fluxo de potência até a resincronização com a rede principal, ajustando tensão e frequência, o que é importante para previsões e despacho (Palizban; Kauhaniemi; Guerrero, 2014).

À medida que a demanda por energia cresce e as questões ambientais se tornam mais prementes, mais instalações de DERs estão sendo implementadas. Não obstante, esses recursos não possuem uma central única de produção de energia; comparado com usinas de energia convencionais, cada unidade de DER tem uma capacidade de produção relativamente pequena; a produção de energia dessas fontes pode ser inconsistente, especialmente no caso de energias renováveis que dependem de condições climáticas (Jia et al, 2023).

Devido a essas características, a gestão e a integração desses recursos exigem soluções como a utilização de plantas virtuais de potência (VPPs), que agregam e coordenam esses elementos. As usinas de incineração de resíduos (*Waste Incineration Power Plant, WI*), por exemplo, explica Jia et al (2023) podem recuperar energia gerando eletricidade, e assim, substituir parcialmente as usinas convencionais. Além disso, usar a incineração de resíduos para tratar o lixo pode reduzir o seu volume e peso, alcançar a utilização dos recursos e tratar os resíduos de forma inofensiva. Logo, utilizar a tecnologia VPP para agregar e agendar DERs e usinas de incineração de resíduos permite reciclar e utilizar recursos direcionados ao consumo total de energia renovável.

### **3.3 TECNOLOGIAS ASSOCIADAS ÀS VPPS**

Os modelos de negócio das VPPs podem variar dependendo de fatores como método de financiamento, mercado objetivo, e características tanto dos consumidores quanto da geração distribuída. Além disso, os métodos de ativação e controle das VPPs possibilitam a eficiência de sua operação, podendo variar de controles manuais a sistemas semiautomáticos ou automáticos. A administração operacional dessas

plantas virtuais de potência depende dos estudos de fluxo de potência (FP) empregando técnicas de otimização e simulação, como os fluxos de potência ótimos DC (FPO-DC) e AC (FPO-AC), implementadas por meio de softwares especializados que permitem simulações georreferenciadas, necessárias para ajustes finos em termos de parâmetros elétricos -, como tensão de nó, ângulos, fluxos de potência ativa e reativa, despacho de geração e fator de potência (Lemus et al, 2022).

As Virtual Power Plants (VPPs) têm experimentado uma evolução tecnológica ao longo do tempo, impulsionada pela rápida progressão na área de tecnologias de informação e comunicação (TIC) e pelo avanço das técnicas de otimização e controle. Anteriormente, se baseava em modelos simplificados para a coordenação de recursos de geração distribuída, muitas vezes utilizando métodos de programação linear ou algoritmos de controle simples. No entanto, com o advento de tecnologias avançadas de automação e monitoramento, as VPPs modernas se beneficiam de sistemas de controle mais sofisticados e algoritmos de otimização mais robustos. Isso permite a coordenação dos recursos distribuídos, levando a uma operação mais flexível, confiável e econômica da VPP.

Uma das tecnologias que impulsionou essa evolução é a Internet das Coisas (IoT), que permite a conexão e comunicação entre uma variedade de dispositivos e sensores distribuídos em uma rede elétrica. Por meio de sensores inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real, as VPPs podem coletar dados precisos sobre a produção de energia, a demanda dos consumidores, as condições de mercado e outros parâmetros relevantes.

Além disso, avanços em inteligência artificial e aprendizado de máquina têm permitido o desenvolvimento de algoritmos de previsão mais precisos e modelos de otimização mais avançados. Isso permite que as VPPs prevejam com maior precisão a produção de energia renovável, antecipem variações na demanda de energia e otimizem a operação dos recursos distribuídos em tempo real.

Quanto à modelagem matemática, os modelos utilizados anteriormente eram frequentemente simplificados e determinísticos, com uma ênfase maior na previsão de energia com base em padrões históricos e médias sazonais. No entanto, os modelos atuais são mais complexos e incorporam uma variedade de variáveis e incertezas, levando em consideração fatores como flutuações na produção de energia renovável, variações na demanda de energia e condições de mercado em constante mudança.

### 3.3.1 SMART GRIDS E MEDIDORES INTELIGENTES

Ohanu, Rufai e Oluchi (2024) tratam da relevância das redes inteligentes (Smart Grids) e dos medidores inteligentes no contexto da modernização do sistema de energia. Explicam como as redes inteligentes (Smart Grids) permitem a participação dos prossumidor, que são consumidores que geram a sua própria energia, consomem-na e transferem ou armazenam o excedente. Isso melhora a eficiência do sistema energético, comparando-se às redes convencionais, por meio do uso de dispositivos inteligentes e tecnologias de comunicação, gestão das oscilações de energia e manutenção do equilíbrio entre demanda e oferta local.

Ocorre que as redes inteligentes facilitam a criação de VPPs, que agrupam recursos energéticos distribuídos, como energia renovável, armazenamento de energia e cargas controláveis. As VPPs formam uma rede autossuficiente, aprimorando o comércio de energia, fornecendo um ambiente adequado para a rede e serviços auxiliares, promovendo a otimização de recursos e melhorando a economia e confiabilidade do sistema. Ademais, a integração de EVs nas redes inteligentes reduz a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa, além de colaborar com a qualidade da energia e a regulação a longo prazo. Os EVs, com a função de transferência de energia V2G, ajudam a estabilizar os recursos energéticos renováveis intermitentes.

Calin e Druica (2022) explicam que as Smart Grids são soluções reconhecidas e definidas como uma infraestrutura moderna da rede elétrica introduzida para melhorar a eficiência, confiabilidade e segurança. As tecnologias de redes inteligentes (TRI) estão ligadas ao consumo sustentável e prometem um futuro mais sustentável, destacando benefícios em termos econômicos e ambientais, apesar da variação nas estimativas de economia de custos e energia, e redução de emissões de gases de efeito estufa. Mesmo com a pandemia de Covid-19 diminuindo os investimentos na infraestrutura energética, existem projeções de recuperação e expansão nesse campo, como o Green Deal na União Europeia.

O sucesso desses empreendimentos depende de aspectos técnicos e financeiros, mas também da aceitação das TRI pelos consumidores, especialmente medidores inteligentes, sensores inteligentes, plantas solares e dispositivos de monitoramento de eletricidade. A participação ativa dos consumidores é importante,

considerando que os domicílios representam cerca de 30% do consumo total de energia na Europa. Recomenda-se tratar os consumidores como partes interessadas e participantes no processo de inovação, promovendo o conceito de prosumidores - consumidores que gerenciam ativamente o seu consumo e produção de energia.

Pesquisas sobre preferências dos consumidores por TRI foram realizadas principalmente em mercados desenvolvidos, apontando a necessidade de estimular atitudes positivas e engajamento dos consumidores. Em economias como a Romênia, onde o mercado de eletricidade foi liberalizado recentemente, há interesse em entender as alternativas disponíveis no mercado, incluindo fornecedores, fontes de energia e tecnologias inovadoras.

No estudo de Calin e Druica (2022) se aborda a intenção dos romenos de usar TRI, utilizando o modelo teórico de adoção de tecnologia de risco (RITAM) e a Modelagem de Equações Estruturais de Mínimos Quadrados Parciais (PLS-SEM). A pesquisa com 405 indivíduos identificou os principais fatores que influenciam a intenção de usar TRI: utilidade percebida e facilidade de uso percebida como os principais impulsionadores positivos, e risco percebido com influência negativa. Também confirmam o papel dos motivos financeiros, compreensão técnica e preocupações com riscos.

Observa-se, segundo Ohanu, Rufai e Oluchi (2024) que falta conhecimento sobre Infraestrutura Avançada de Medição - AMI e sobre a visão estratégica para sua implementação e gestão dos dados de medidores inteligentes. Há uma necessidade urgente de comunicação padronizada, controle de distribuição, transmissão de energia aprimorada e informações em tempo real, beneficiando consumidores e concessionárias. Entende-se que os medidores inteligentes coletam e transmitem informações, como dados estatísticos e técnicos, estado de carga das baterias e dados meteorológicos, para agentes inteligentes, auxiliando na coordenação das atividades e transferência de energia nas redes inteligentes.

Considera-se, assim, que a implementação de infraestrutura de carregamento inteligente para EVs, baseada em medidores inteligentes, melhora a economia da rede de distribuição e reduz o desperdício de energia, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e econômica.

### 3.3.2 GESTÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Considera-se que através da gestão centralizada que as VPPs oferecem, é possível reduzir as perdas nos sistemas de transmissão elétrica e aumentar a eficiência geral do sistema de potência. A geração distribuída (GD), que representa cerca de 20% da geração total em alguns sistemas de potência e está em crescimento, impulsiona novas demandas na gestão e operação das redes elétricas - como a necessidade de maior flexibilidade do lado do consumidor e a adaptação das políticas energéticas para suportar essa integração (Lemus et al, 2022).

Explica Nebey (2024) que os avanços em sistemas de gestão de energia focaram no uso de tecnologias de ponta para otimizar a sua utilização. Um desenvolvimento importante envolve a integração de algoritmos de inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (ML) que analisam padrões históricos de consumo de energia, preveem a demanda futura e ajustam o uso em tempo real. Isso permite que o sistema se adapte às flutuações na geração de energia renovável ou picos inesperados de demanda. Além disso, a crescente ênfase em programas de resposta à demanda gera melhoria da gestão de energia do lado da demanda com programas que incentivam os consumidores a ajustar o seu consumo de energia com base em sinais da rede, como incentivos de preços ou notificações de períodos de alta demanda. Ao envolver ativamente os consumidores no processo de gestão, essas iniciativas contribuem para uma rede energética mais responsiva, resultando em maior eficiência e menor impacto ambiental.

Enfatiza-se que a utilização de fontes de energia alternativas permite atender às necessidades energéticas futuras de maneira ecologicamente correta e sustentável, devido ao aumento da demanda e uso de combustíveis fósseis tradicionais como gasolina e diesel e seus altos custos. A rede elétrica tem se transformado em um sistema inteligente e confiável, onde tecnologias de informação e comunicação foram integradas à rede tradicional para melhorar o seu desempenho.

Técnicas inovadoras de gestão do lado da demanda (DSM) são empregadas em conjunto com diversas fontes de energia renovável, incluindo solar e eólica. A DSM é uma estratégia de fornecimento de energia que permite aos usuários aderirem a políticas e práticas benéficas para todos os envolvidos, analisando e modificando atividades anormais que alteram a demanda de carga. No entanto, a introdução da DSM aumentou a complexidade dos sistemas de energia existentes, resultando em

custos adicionais para a instalação de sensores e gestão geral das tarefas. Com essas técnicas, os provedores de energia podem transferir e entregar energia gerada aos clientes com baixos custos operacionais dentro da rede inteligente.

Tendo em vista a gestão energética a busca por a estabilização do sistema, demanda x consumo, os sistemas de armazenamento de energia são fortes aliados na difusão e penetração de fontes renováveis de energia no mercado, uma vez que auxiliam a gerir a geração dessas fontes intermitentes e a assim ter energia disponível para ser despachada quando necessária (ABAQUE, 2015).

Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) podem ser utilizadas para regulação e controle de tensão e frequência, redução de picos de demanda, fornecimento de emergência, gestão de preço, controle da intermitência eólica e solar, equilíbrio de carga, estabilização da rede e black-start<sup>1</sup>. Estas aplicações podem ser centralizadas (na rede ou sistema) ou distribuídas (atrás do medidor). A utilização centralizada é programada e gerenciada pelo operador do sistema que, dependendo da estrutura do mercado de energia, pode ser um operador de geração, de transmissão ou de distribuição (SILVA, 2021).

A gestão da demanda de energia pode ser resolvida com uma DSM bem implementada, que gerencia e monitora a energia necessária para os usuários finais sem a necessidade de adicionar um gerador adicional. Ao introduzir algoritmos de planejamento, a DSM controla a demanda e minimiza o uso de energia, protegendo contra o uso excessivo da rede elétrica. Além disso, isso proporcionaria uma vantagem de custo para os consumidores e seria sustentável a longo prazo através da implementação de práticas de agendamento adequadas. Ressalta-se que existem diversos métodos de gestão do lado da demanda, com três pilares principais: crescimento estratégico da carga, resposta à demanda e conservação de energia. Existem dois tipos de programas de resposta à demanda: programas baseados na confiabilidade e programas baseados no mercado, como explica Nebey (2024).

---

<sup>1</sup> "Black-start é a retomada de funcionamento de uma usina elétrica após o desligamento de todos os geradores.

### 3.4 FONTES DE GERAÇÃO EM VPPS

Nos últimos anos, explica Dong et al (2024) novas fontes de energia (especialmente solar e eólica) têm sido desenvolvidas, resultando em um rápido crescimento da capacidade instalada. No entanto, a incerteza e a volatilidade instantânea da produção eólica afetam a qualidade da eletricidade e a operação estável da rede elétrica; além disso, a intermitência e a variabilidade da energia fotovoltaica aumentam a dificuldade de agendamento da rede elétrica. Dessa forma, a conexão em larga escala de novas fontes de energia à rede elétrica tem impactado a segurança, a economia e a operação estável do sistema elétrico. Do lado do consumo de energia, o rápido crescimento dos veículos elétricos (VEs) tem colocado maiores demandas na capacidade de fornecimento de energia da rede elétrica, por exemplo.

Com a melhoria do padrão de vida dos indivíduos, a popularidade de eletrodomésticos eletrificados, como ar-condicionado e aquecedores elétricos, está aumentando. O acesso aleatório de cargas em grande escala do lado da demanda tem levado ao fenômeno de "pico adiciona pico"<sup>1</sup>, destacando o problema do desequilíbrio entre energia e carga. Ocorre que o método tradicional de regulação tem dificuldades em atender às futuras necessidades de redução de picos. A planta de energia virtual (VPP) permite agregar recursos distribuídos como turbinas eólicas, geradores fotovoltaicos (PV), cargas controláveis e dispositivos de armazenamento de energia em uma "planta de energia equivalente" ajustável e controlada, utilizando várias tecnologias avançadas de informação e comunicação, bem como métodos de detecção, medição e controle adequados.

Diante disso, importa explicar como as Plantas de Energia Virtuais (VPPs) podem ajudar a gerenciar a energia de modo similar às usinas de energia tradicionais, já que permitem coordenar o funcionamento de vários componentes internos e participem do agendamento da rede elétrica -, assim como as fontes de energia

---

<sup>1</sup> "Pico adiciona pico" é um termo que descreve um problema na rede elétrica onde há um aumento repentino e simultâneo no consumo de energia, resultando em uma demanda muito alta em um curto período. Quando muitas pessoas ligam seus aparelhos de ar-condicionado ou carregam seus veículos elétricos ao mesmo tempo, especialmente durante horários de pico, como nas tardes quentes de verão ou à noite quando todos voltam do trabalho. Esse aumento súbito coloca muita pressão na rede elétrica, que precisa fornecer mais energia do que o normal em um curto espaço de tempo. Isso pode causar problemas, como sobrecarga da rede, risco de apagões e dificuldades na manutenção de fornecimento de energia.

convencionais. Ajudam a reduzir a volatilidade (ou variação) que ocorre devido à geração de novas energias, como solar e eólica, e ao consumo de energia aleatória pelos usuários.

Como será explicado a seguir, para otimizar o agendamento das VPPs, é necessário considerar as incertezas em: (i) Usinas eólicas; (ii) Usinas fotovoltaicas; (iii) Cargas (demanda de energia); e (iv) Preços da energia. Existem vários modelos para lidar com essas incertezas como: o Método de Cenários; a Otimização Robusta; e a Otimização em Múltiplos Tempos. Além disso, existe a possibilidade de ajustar o consumo de energia dos usuários através de resposta à demanda (DR) no qual se ajusta o consumo de energia com base nas variações de preço, além de que se utiliza incentivos para ajustar o consumo.

Coordenando e otimizando o status operacional de vários componentes internos, a VPP pode participar do agendamento da rede como fontes de energia convencionais, suprimindo a volatilidade causada pela geração de novas energias e pelo consumo de energia aleatória do lado da demanda. De acordo com Li et al (2024), para otimizar o agendamento das Plantas de Energia Virtuais (VPPs) deve-se considerar as incertezas nas usinas eólicas, usinas fotovoltaicas, cargas e preços que podem ser respondidas com o método de cenários, a programação com restrições de chance, a otimização robusta e a otimização em múltiplos tempos.

O método de cenários envolve modelar dados históricos sobre a função de densidade de probabilidade dos parâmetros incertos. Logo, diferentes tipos de cenários são gerados aleatoriamente utilizando métodos como a simulação de Monte Carlo e o método de estimativa para quantificar as incertezas. Os cenários representativos são obtidos por meio da tecnologia de redução de cenários. Em outras palavras, se mais cenários típicos forem selecionados, a incerteza pode ser descrita com maior precisão, mas a complexidade computacional aumentará. Por outro lado, selecionar menos cenários pode reduzir a complexidade computacional, mas não descreve a incerteza de forma tão precisa (Li et al, 2024).

Já a otimização robusta define o intervalo de flutuação dos parâmetros incertos, estabelecendo um conjunto de incerteza. O resultado é uma solução que satisfaz todos os valores dentro do intervalo de flutuação dos parâmetros desconhecidos. No entanto, essas soluções são frequentemente conservadoras e exigem um alto custo econômico. Devido ao uso de diferentes algoritmos, como redes neurais e aprendizado profundo, as previsões de diferentes escalas de tempo têm

precisão variada. As previsões de curto prazo são mais precisas do que as de longo prazo (Li et al, 2024).

Desse modo, a otimização em múltiplos tempos permite responder à incerteza, utilizando dados de previsão de curto prazo como entrada e corrigindo o plano de agendamento de longo prazo. Há uma variedade de cargas flexíveis no lado do usuário, e o potencial de despacho dessas cargas pode ser explorado através de estratégias de resposta à demanda (Demand Response, DR). Essas estratégias permitem a otimização dos padrões de consumo de eletricidade dos usuários e a coordenação do equilíbrio entre oferta e demanda. As estratégias de DR são divididas em resposta à demanda baseada em preço (PBDR) e resposta à demanda baseada em incentivos (IBDR) (Li et al, 2024).

Unidades controláveis, sistemas de armazenamento de energia e cargas controláveis são frequentemente utilizados para coordenar com a produção da VPP, suprimindo as flutuações na geração de energia renovável. Estudos recentes, apresentados por Dong et al (2024), propuseram modelos de otimização estocástica para VPP que consideram a incerteza das cargas térmicas e elétricas, alcançando a operação coordenada de energia distribuída. Modelos baseados em aprendizado profundo e método de Stackelberg foram propostos para VPPs com estações de carregamento de VEs, otimizando o agendamento de energia distribuída e alcançando a complementaridade energética. Modelos de agendamento de otimização estocástica para VPPs gás-eletricidade, considerando a incerteza eólica e solar, foram desenvolvidos para reduzir a variância da carga do sistema de energia e minimizar a quantidade de energia limpa desperdiçada.

A resposta à demanda (DR) pode organizar o lado da demanda a otimizar o comportamento de consumo de energia, proporcionando a redução da carga de pico, balanceando oferta e demanda e aumentando a segurança do sistema. Alguns consideram a DR como uma unidade componente da VPP, guiando as cargas do lado do usuário a participar da DR, explorando o potencial de resposta dos recursos ajustáveis do lado da demanda e alcançando o agendamento ótimo da VPP.

Modelos de DR baseados em cargas interrompíveis e em cupons foram estabelecidos, reduzindo a congestão da rede de gás natural durante as horas de pico e os custos. Modelos estocásticos de três estágios para VPPs, considerando VEs e procedimentos de DR, mostraram que o uso de planos de DR e VEs pode cobrir as flutuações da produção de novas energias ao menor custo. A adição de um

mecanismo de punição para gestão razoável de carga demonstrou otimização flexível da distribuição de carga e benefícios econômicos aumentados, considera Dong et al (2024).

O principal objetivo do agendamento ótimo das VPPs é melhorar o consumo de energia renovável e a eficiência da produção e consumo de energia, considerando indicadores econômicos ótimos. Modelos de despacho econômico para VPPs baseados em preços de energia por tempo de uso, com a função objetivo de maximizar os benefícios da VPP, foram construídos. Alguns estudiosos incorporam fatores de emissão de carbono em modelos de agendamento ótimo de VPP, buscando operação otimizada e de baixo carbono. Modelos de agendamento econômico de baixo carbono, integrando custos de comércio de carbono, permitem à VPP obter receita de comércio de carbono, reduzindo custos totais de agendamento e emissões de carbono. Modelos de agendamento de otimização de VPP que combinam comércio de carbono e comércio de certificados verdes demonstraram melhorar a taxa de utilização de energia renovável e reduzir emissões de carbono, assegurando benefícios econômicos, explica Dong et al (2024).

### **3.4.1 ENERGIA SOLAR: PAPEL E POTENCIAL NAS VPPS**

A discussão sobre energia solar no Brasil está ligada à crescente busca por fontes de energia renovável que impulsionem o desenvolvimento sustentável e a transição energética (Micena et al., 2018). Entende-se que a energia solar é fundamental nas Plantas de Energia Virtual (VPPs), oferecendo potencial para otimização e integração de recursos energéticos distribuídos. A capacidade de previsão e ajuste em múltiplos tempos possibilita responder às incertezas, utilizando dados de previsão de curto prazo para ajustar o planejamento de longo prazo. As cargas flexíveis no lado do usuário podem ser gerenciadas por estratégias de resposta à demanda (DR), otimizando os padrões de consumo de eletricidade e equilibrando oferta e demanda. Estas estratégias DR são classificadas em resposta à demanda baseada em preço (PBDR) e baseada em incentivos (IBDR) (Li et al., 2024).

Salienta-se que o desenvolvimento de novas fontes de energia, especialmente solar e eólica, aumentou a capacidade instalada, mas também trouxe a incerteza e volatilidade na produção eólica e a intermitência da energia fotovoltaica

- essas variáveis afetam a qualidade da eletricidade e a operação estável da rede elétrica (Dong et al., 2024).

A energia solar, derivada da radiação solar e das reações de fusão no Sol, é uma fonte renovável importante. Os sistemas fotovoltaicos são conhecidos pela confiabilidade e baixa necessidade de manutenção. Embora o custo inicial seja alto, os custos operacionais são reduzidos. O efeito fotovoltaico permite que células solares em módulos convertam energia solar diretamente em eletricidade, sem emissão de poluentes (Micena et al., 2018).

Entre janeiro e agosto de 2023, a capacidade instalada no país cresceu em 7 GW, com destaque para as fontes solar e eólica, refletindo a expansão dessas energias renováveis na matriz elétrica brasileira, que conta com 83,79% de fontes renováveis (GOV, 2023). A célula fotovoltaica, necessária a geração de energia solar, é composta por duas camadas de material semicondutor: uma camada tipo N, com excesso de elétrons, e outra tipo P, com déficit de elétrons. Sob a luz solar, essa junção cria uma barreira de potencial que permite a movimentação de elétrons, gerando eletricidade - sem luz, os elétrons e lacunas não atravessam a barreira (Micena et al., 2018).

A medição da radiação solar é realizada com instrumentos solarimétricos, como heliógrafos, piranômetros, piroheliômetros e actinógrafos, que quantificam a potência da radiação solar e ajudam a entender o recurso solar disponível (Silva, 2021). O efeito fotovoltaico, descoberto por Becquerel em 1839, é o processo físico que converte luz em eletricidade em materiais semicondutores. Este efeito ocorre quando fótons de luz solar atingem um semicondutor, como o silício, excitando elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando pares elétron-lacuna. Isso cria uma diferença de potencial elétrico que gera corrente elétrica quando o circuito é fechado.

Desde a descoberta do efeito fotovoltaico até o desenvolvimento de células solares de silício cristalino na década de 1950, com cerca de 6% de eficiência, a energia solar fotovoltaica evoluiu. Questões como a eficiência das células solares e a redução de custos foram abordados com novos materiais como silício policristalino, amorfo, arseneto de gálio e sulfeto de cádmio (Lima et al., 2020).

A energia solar que atinge a Terra inclui radiação direta, difusa e refletida. A radiação direta vem do Sol; a difusa é modificada pela atmosfera; a refletida depende das características do solo. Fatores como estações do ano, latitude, condições

meteorológicas e altitude influenciam os níveis de radiação solar recebidos na superfície terrestre. Shen et al. (2024) apresentaram um novo modelo matemático, SARIMA, para prever a geração de energia solar na China. Este modelo é uma versão avançada do ARIMA e lida melhor com variações climáticas, tornando os dados mais consistentes antes de aplicar o modelo de previsão.

Lima et al. (2020) explicam que o Sol emite uma enorme quantidade de energia, e a Terra recebe aproximadamente  $1,5125 \times 10^{18}$  kWh por ano. Essa energia é transmitida via radiação eletromagnética, com 97% da radiação solar contida entre 0,3 e 3,0  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda. Compreender a distribuição da energia solar em termos de frequência e comprimento de onda é importante para o seu aproveitamento.

Algoritmos de aprendizado de máquina, como Naïve Bayes, Perceptron Multicamadas (MLP) e Redes Neurais de Memória de Curto e Longo Prazo (LSTM), ajudam a superar a intermitência da geração solar, influenciada por condições climáticas (Torres, 2021). Esses algoritmos foram treinados com dados históricos de clima e geração de energia para prever a produção de energia solar nas horas e dias seguintes. Considera-se o ciclo de vida e o retorno do investimento de uma instalação solar fotovoltaica de 30 kW em Bhubaneswar, Índia, visando uma previsão mais precisa e confiável (Pattanaik et al., 2024).

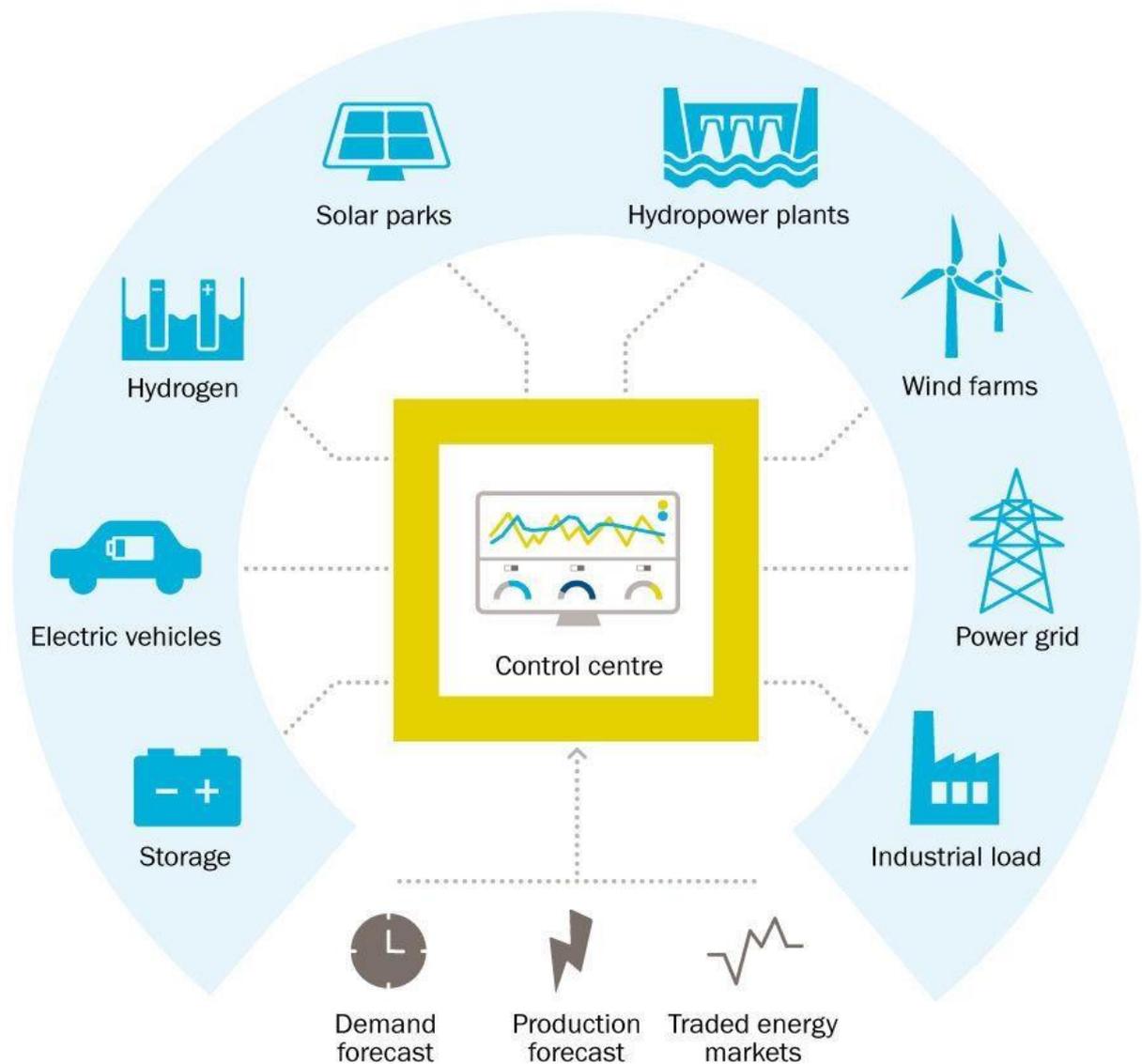
No Brasil, a geração distribuída de energia solar tem avançado graças à regulamentação da ANEEL, que incentiva a instalação de pequenas centrais geradoras renováveis e estabelece o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, permitindo a acumulação de créditos energéticos por até cinco anos (Micena et al., 2018). A energia solar é uma fonte limpa e renovável que, quando otimizada por previsões precisas, reduz a dependência de combustíveis fósseis.

### **3.4.2 ENERGIA EÓLICA: INTEGRAÇÃO E IMPACTO EM VPPS**

A VPP permite a agregação de recursos distribuídos como turbinas eólicas, geradores fotovoltaicos, cargas controláveis e dispositivos de armazenamento de energia em uma planta de energia equivalente, ajustável e controlada. Isso é possível graças ao uso de tecnologias avançadas de informação e comunicação, bem como métodos de detecção, medição e controle apropriados. Dessa forma, a VPP facilita a

integração eficiente de energia eólica, garantindo segurança, economia e operação estável do sistema elétrico.

Figura 3 - Interconexão de Fontes Renováveis e Gestão Energética Centralizada em Usinas Virtuais de Energia



Fonte: Statkraft, 2024.

Abaixo apresenta-se a figura 3 que permite compreender as usinas virtuais de energia (Virtual Power Plants - VPPs) conforme a integração de diversas fontes de energia renovável, como energia eólica, solar, bioenergia e hidrelétrica, geradas por múltiplos produtores distribuídos geograficamente. Com a figura, percebe-se que o

centro de controle é responsável por conectar virtualmente os diversos produtores de energia renovável. Este centro gerencia e monitora a produção e o consumo de energia, permitindo uma operação coordenada.

A imagem mostra como Parques solares, Usinas hidrelétricas, Parques eólicos e Bioenergia integram fontes de energia que são geradas por produtores espalhados geograficamente que, ao conectá-los virtualmente, essas diversas fontes são consolidadas em um único fornecedor de grande escala e confiável. Essa integração virtual permite uma gestão otimizada da produção intermitente de energia renovável, utilizando a flexibilidade das plantas renováveis para benefício dos geradores de energia, operadores de rede e consumidores.

Assim, a figura 3 sinaliza as Tecnologias de Armazenamento e Uso como o Hidrogênio simbolizado por um ícone de armazenamento de gás, representa a produção e armazenamento de hidrogênio como vetor energético; os Veículos elétricos representados por um automóvel, indicam a integração de veículos elétricos que podem consumir e eventualmente devolver energia à rede; e o armazenamento de energia representado por uma bateria, este componente é crucial para armazenar excedentes de energia e liberá-los quando necessário.

Na imagem, a Rede de Distribuição e Consumo simbolizada por uma torre de transmissão, representa a infraestrutura que distribui a eletricidade para diferentes consumidores; a Carga industrial indicada por uma fábrica, representa o consumo de energia em ambientes industriais. Tem-se, ainda a Previsão de demanda representada por um relógio, implica a previsão da quantidade de energia que será necessária no futuro próximo; a previsão de produção indicada por um raio, refere-se à estimativa da energia que será produzida; e os mercados energéticos transacionados representado por um gráfico, refere-se à compra e venda de energia em mercados organizados.

Em 2023, a matriz elétrica do Brasil teve um aumento de 7 GW na capacidade instalada, sendo 6,2 GW oriundos de fontes solar e eólica. As fontes renováveis agora representam 83,79% da matriz elétrica, destacando o Brasil como uma referência em energia limpa. O Brasil possui 1.351 usinas hidrelétricas, que representam 56,17% da capacidade instalada, evidenciando a diversidade da matriz energética. O novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) prevê investimentos de R\$ 73,1 bilhões em energia, com R\$ 64,8 bilhões destinados a fontes renováveis. Assim, a energia eólica receberá R\$ 22 bilhões para acrescentar 5,2 GW considerando que a

meta de expansão de geração de energia elétrica para 2023 é de 10,3 GW (Gov, 2023).

No México, a legislação energética prioriza a exploração e uso de hidrocarbonetos na geração de eletricidade. Esse foco ocorre apesar de um declínio na produção interna desses recursos por mais de uma década, resultando em maior dependência de importações de petróleo, gás natural, fertilizantes e produtos petroquímicos, além de afetar negativamente as exportações de petróleo bruto. A transição para fontes renováveis no México é secundarizada, com incentivos limitados que as colocam em competição com outras fontes dentro de uma definição restrita de energia limpa, baseada em eficiência energética e hídrica, emissões atmosféricas e produção de resíduos (Flores, 2018).

O objetivo é produzir 35% da eletricidade a partir de fontes limpas até 2024, sem distinção entre renováveis e outras como nuclear. A formulação de uma estratégia de transição energética que reduza o uso de combustíveis fósseis, garantindo segurança, igualdade e sustentabilidade, exigirá tempo. Isso inclui definir o papel dos hidrocarbonetos e das renováveis na matriz energética, considerando os seus impactos sociais e econômicos (Flores, 2018).

A transição para fontes renováveis e a adoção de energia eólica no Brasil contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa e enfrentamento das mudanças climáticas. Além disso, há benefícios econômicos diretos para os consumidores devido à redução dos custos operacionais da geração de eletricidade (GOV, 2023).

### **3.5 O PAPEL DOS AGREGADORES NA GESTÃO DE VPPS**

De acordo com Xie et al (2024), em um contexto de crise energética, mudanças climáticas, conflitos regionais e a necessidade de energia renovável, torna-se importante pensar a implementação de uma economia circular e uma planta virtual de potência baseada na comunidade (CE-cVPP), por exemplo. Isto, para promover o desenvolvimento sustentável e verde, ao mesmo tempo que gerencia a discrepância entre a disponibilidade de energia renovável e a demanda dos usuários. O modelo CE-cVPP é um quadro colaborativo centrado na comunidade, apresentado pelos autores que alinha a carga do lado da demanda como objetivo, e o armazenamento e comércio de energia como mecanismos suplementares -, apresentando atributos

como alta autossuficiência, resistência a distúrbios, interação extensa e adaptabilidade.

Apresenta-se, nesse contexto, um importante diferença conceitual entre os consumidores de energia, no sentido clássico, e os prossumidor – conceito já citado anteriormente. prossumidor são consumidores que geram a sua própria energia, a consomem e depois transferem ou armazenam o excedente. Clientes tradicionais obtêm energia da rede elétrica. Os prossumidor também podem armazenar o excesso de energia produzido utilizando um Sistema de Armazenamento de Energia para consumo posterior ou para vender esse excedente para a rede ou para clientes próximos. Estudos mostram que os prossumidor melhoram a eficiência do sistema energético, conforme observado nas comparações entre redes convencionais e redes inteligentes baseadas em prossumidor. Isso inclui a melhoria do funcionamento de eletrodomésticos através de dispositivos inteligentes e tecnologias de comunicação, a oferta de capacidade de armazenamento para auxiliar na gestão das oscilações de energia e a manutenção do equilíbrio entre demanda e oferta local, como explicam Ohanu, Rufai e Oluchi (2024).

O ciclo de energia baseado na comunidade e sua gestão incluem a identificação de fontes renováveis adequadas para a comunidade - pensando as VPP, a energia distribuída, o sistema de energia integrada, o sistema de multi-energia, a energia inteligente, a rede inteligente, as micro-redes, a cogeração, a trigeração, e outros -, na análise de diferentes tipos de demanda energética e exame dos mecanismos de gestão e troca para a participação comunitária. Consideram-se as interconexões e interdependências entre as fontes de energia, com foco na promoção da sustentabilidade sob quatro perspectivas principais: energia, ecologia (sustentabilidade), economia e sociedade, ressaltam Xie et al (2024).

Uma microgrid é um sistema elétrico completo em miniatura que abrange geração, armazenamento, distribuição e consumo de energia dentro de uma localização geográfica específica, como instalações industriais, complexos hospitalares ou comunidades residenciais. Inclui ativos de geração distribuída (DER) como módulos solares, turbinas eólicas, geradores a diesel ou gás, unidades de cogeração (CHP), além de sistemas de armazenamento de energia. Utiliza controladores sofisticados para operar tanto conectada à rede principal quanto de forma isolada (modo ilhado) (Veckta, 2021).

Aqui importa destacar as diferenças entre microgrids (MGs) e às virtual power plants (VPPs). Essas diferenças podem ser ressaltadas de forma comparativa na seguinte tabela:

Tabela 2 - Diferenças entre microgrids (MGs) e às virtual power plants (VPPs)

Aspecto	Microgrids	Virtual Power Plants (VPPs)
Definição e Estrutura	Sistema elétrico completo em miniatura em uma localização específica	Coleta descentralizada de unidades de geração de energia
Objetivo	Fornecer energia confiável a locais específicos	Otimizar a geração e consumo de energia em larga escala
Benefícios Técnicos	Resiliência a apagões, eficiência energética local	Melhoria na eficiência do sistema elétrico em grande escala
Armazenamento de Energia	Necessário para operação eficaz	Opcional, pode operar com ou sem armazenamento
Tecnologia e Dependência	Controladores de microgrid, inversores inteligentes, chaves	Medidores inteligentes, tecnologia de informação
Geografia e Recursos	Área geográfica limitada	Grande área geográfica, agregação de diversos recursos
Mercado e Comercialização	Distribuição de varejo, focada no usuário final	Mercado atacadista de energia
Desafios Legais e Políticos	Enfrenta obstáculos legais e políticos	Opera com menos desafios legais e restrições

Fonte: elaboração do autor a partir de Veckta (2021)

Já a VPP é uma coleção descentralizada e escalada de unidades de geração de energia, como os DER mencionados, ou uma agregação de consumidores flexíveis que podem reduzir estrategicamente sua carga. Utiliza uma plataforma digital para coordenar e controlar os recursos energéticos distribuídos através de um sistema centralizado (Veckta, 2021).

Colocam-se os benefícios técnicos, econômicos e ambientais das microgrids (MGs) e às virtual power plants (VPPs), segundo Palizban, Kauhaniemi e Guerrero (2014):

#### Benefícios Técnicos:

- Suporte a Comunidades Remotas: As MGs são importantes para fornecer energia em áreas remotas onde a transmissão e a distribuição de energia são difíceis. Isso aumenta a confiabilidade e a acessibilidade da energia em regiões isoladas.

- **Maior Eficiência Energética:** A integração de fontes de energia renovável e armazenamento nas MGs melhora a eficiência geral do sistema, reduzindo perdas e melhorando a utilização dos recursos energéticos disponíveis.
- **Redução de Apagões:** As MGs, com sua capacidade de operar em modo ilha, reduzem a vulnerabilidade das grandes redes a apagões, fornecendo uma fonte de energia alternativa em caso de falhas na rede principal.

#### Benefícios Econômicos:

- **Redução de Emissões e Custos de Combustível:** A utilização de fontes de energia renovável e sistemas de armazenamento diminui a dependência de combustíveis fósseis, resultando em menores emissões de poluentes e gases de efeito estufa.
- **Minimização de Perdas de Linha:** As MGs reduzem as perdas de energia durante a transmissão.
- **Redução de Custos de Interrupção:** A capacidade das MGs de fornecer energia de backup em caso de falhas na rede principal diminui os custos associados a interrupções no fornecimento de energia para os consumidores.

#### Benefícios Ambientais:

- **Menores Emissões de Poluentes:** A geração de energia a partir de fontes renováveis dentro das MGs contribui para a redução das emissões de poluentes atmosféricos, melhorando a qualidade do ar e reduzindo os impactos ambientais negativos.
- **Incorporação de Fontes de Energia Limpa:** As MGs aumentam a quantidade de energia renovável integrada à rede elétrica, promovendo uma transição para uma matriz energética mais sustentável e limpa.
- **Redução da Pegada Física do Sistema de Geração:** A geração distribuída dentro das MGs requer menos espaço físico em comparação com as grandes usinas de geração de energia, resultando em um menor impacto ambiental e uso do solo.

Nesse contexto também são considerados os Agregadores na Gestão de VPPs que consistem em plataformas de reunião de diferentes fontes de energia renovável -, como energia solar e eólica, e dispositivos de armazenamento de energia, como baterias -, podendo incluir também dispositivos de consumo controláveis, como veículos elétricos e sistemas de aquecimento ou resfriamento.

No escopo da gestão e otimização, os agregadores permitem coordenar o uso desses recursos de energia, evidenciando quando e como a energia é produzida, armazenada e consumida, garantindo que a oferta e a demanda estejam equilibradas. Ademais, considera-se que em um modelo baseado na comunidade, os agregadores facilitam a troca de energia entre diferentes partes da comunidade; permitem a aumentar a eficiência da rede elétrica, promovendo, reduzindo a dependência de fontes de energia não renováveis.

### **3.6 ASPECTOS REGULATÓRIOS E POLÍTICAS ENERGÉTICAS**

Enfatiza-se, como exposto por Sabatella (2022), que o processo de descarbonização da economia global abriu um período de transição para a promoção da geração elétrica a partir de fontes renováveis - sendo esta, uma estratégia de desenvolvimento local, impulsionando novas indústrias e cadeias de suprimento. Em alguns casos, políticas seletivas de transição energética aduzem a reconversão produtiva para energias eólica e solar, com apoio a pesquisa e desenvolvimento, parcerias público-privadas, financiamento e subsídios. Em outros casos, utilizam-se mecanismos como subastas, incentivando o uso de bens e serviços locais, com sistemas de tarifas garantidas ou de incentivos.

Não há sinais de que as emissões de GEE atinjam seu pico nos próximos anos; cada ano sem reduções torna necessárias restrições mais severas e rápidas. Para limitar o aquecimento global a 2°C ou 1,5°C, as emissões devem ser entre 25% e 55% menores em 2030 do que em 2018. Muitos países, incluindo 65 nações e importantes economias subnacionais, como o estado da Califórnia e grandes cidades ao redor do mundo, estabeleceram metas de emissões líquidas zero até 2050 (PNUMA, 2020).

Entretanto, poucas estratégias de longo prazo enviadas à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) incluem compromissos específicos para alcançar a neutralidade de emissões. Apenas cinco membros do G20

comprometeram-se a reduzir suas emissões a com alguns em processo de aprovar leis a esse respeito. Ocorre que a transição energética global exige investimentos, políticas climáticas para limitar o aquecimento a 1,5°C demandarão um aumento anual das investidas globais no setor energético entre 1,6 e 3,8 trilhões de dólares até 2050, dependendo da rapidez com que se intensificarem as medidas para eficiência energética e conservação (PNUMA, 2020).

No caso do Paraguai, por exemplo, explica Llamosas et al (2021) existe uma vantagem destacada em diversos estudos como oportunidade para impulsionar um processo de desenvolvimento com base na energia. No entanto, a matriz de consumo de energia no país ainda demonstra pouco aproveitamento a nível local, com padrões de uso insustentáveis e alta dependência de derivados de petróleo e biomassa, que juntos representam 83% do consumo energético.

Existe uma correlação entre o uso de fontes modernas como a eletricidade e melhorias nos níveis de qualidade de vida, bem como aumentos nos níveis de crescimento econômico. Esse entendimento reforça a importância de promover uma transição para uma matriz energética sustentável com medidas que objetivem capitalizar as vantagens existentes no setor energético. Nesse contexto, deve-se considerar a relação direta entre o uso sustentável dos recursos energéticos e o desempenho em diversas áreas do desenvolvimento - o que alinha também ao contexto da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que propõe 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), definidos através de 169 metas e medidos por 232 indicadores (especialmente as metas e os indicadores relacionados ao ODS 7, "Energia Acessível e Limpa").

Sabatella (2022) explica que contra as mudanças climáticas globais, o uso de recursos biomássicos - matéria orgânica de origem vegetal ou animal, ou resultante da transformação natural ou artificial dessa matéria - para fins energéticos foi revalorizado pela inovação tecnológica. Historicamente, a queima de biomassa foi o principal combustível utilizado pela humanidade para cozinhar, aquecer, produzir metais e alimentar máquinas a vapor. Com a Revolução Industrial, houve uma transição para o carvão. Se as bioenergias tradicionais limitavam-se à combustão de madeira, resíduos animais e carvão vegetal, as tecnologias atuais focam nos biocombustíveis líquidos e na geração de energia elétrica, com ênfase no subsetor elétrico.

A Argentina, por exemplo, possui condições topográficas e climáticas favoráveis para o aproveitamento de biomassa, com a oferta nacional acessível é de 51 milhões de toneladas por ano, enquanto a demanda atual é de 10 milhões de toneladas anuais, resultando em um superávit anual de 40 milhões de toneladas de recursos de biomassa para fins energéticos. O potencial de energia a partir de biomassa úmida é de 415.860 toneladas equivalentes de petróleo por ano, sendo 44% provenientes de convinamentos bovinos, 27% de suínos, 15% de fazendas leiteiras bovinos e 14% de vinhaça, subproduto da indústria açucareira, coloca Sabatella (2022).

Nesse debate, importa considerar as plantas virtuais de potência (VPPs) visto que são fundamentais para integrar diversas fontes de geração de energia, como solar fotovoltaica, solar térmica de baixa e alta entalpia, eólica on-shore e off-shore, e plantas geotérmicas de potência; e permitem conduzir estratégias de mudança da matriz energética, com vistas a uma maior sustentabilidade e eficiência.

#### 4. ESTADO DA ARTE

Conforme comentado por Richter & Schäfer as plantas virtuais de potência (VPPs) representam uma inovação significativa no setor energético, permitindo a integração e otimização de fontes de energia distribuídas para operar como uma unidade única e coordenada. (2020)

Sabe-se que uma das principais vantagens das VPPs é sua capacidade de fornecer serviços auxiliares à rede, como regulação de frequência, gerenciamento de picos de demanda e fornecimento de reservas estratégicas, facilitam a participação de consumidores e pequenos produtores de energia no mercado energético, promovendo a descentralização e democratização do setor (Liu, Shi & Shou, 2018).

Nos últimos anos, diversas empresas ao redor do mundo têm implementado projetos de VPPs, demonstrando a viabilidade e os benefícios dessa abordagem. A seguir, são apresentados alguns exemplos notáveis de plantas de energia virtual em operação, ilustrando a diversidade de aplicações e tecnologias utilizadas onde tais aplicações demonstram claramente sua eficácia na integração de fontes de energia distribuídas e renováveis, promovendo uma operação mais resiliente e flexível das redes elétricas.

A Next Kraftwerke é uma das maiores VPPs da Europa, localizada na Alemanha, conectando mais de 10.000 unidades de geração distribuída, como biogás, energia solar, eólica e baterias, com uma capacidade combinada superior a 8 GW. Este sistema otimiza a produção e o consumo de energia em tempo real, proporcionando serviços essenciais de balanceamento e reserva para a rede elétrica alemã. Estudos mostram que a Next Kraftwerke tem sido fundamental para a estabilidade da rede ao integrar uma vasta quantidade de recursos energéticos distribuídos (NEXT KRAFTWERKE, 2024).

Figura 4 - Topologia VPP Next Kraftwerke

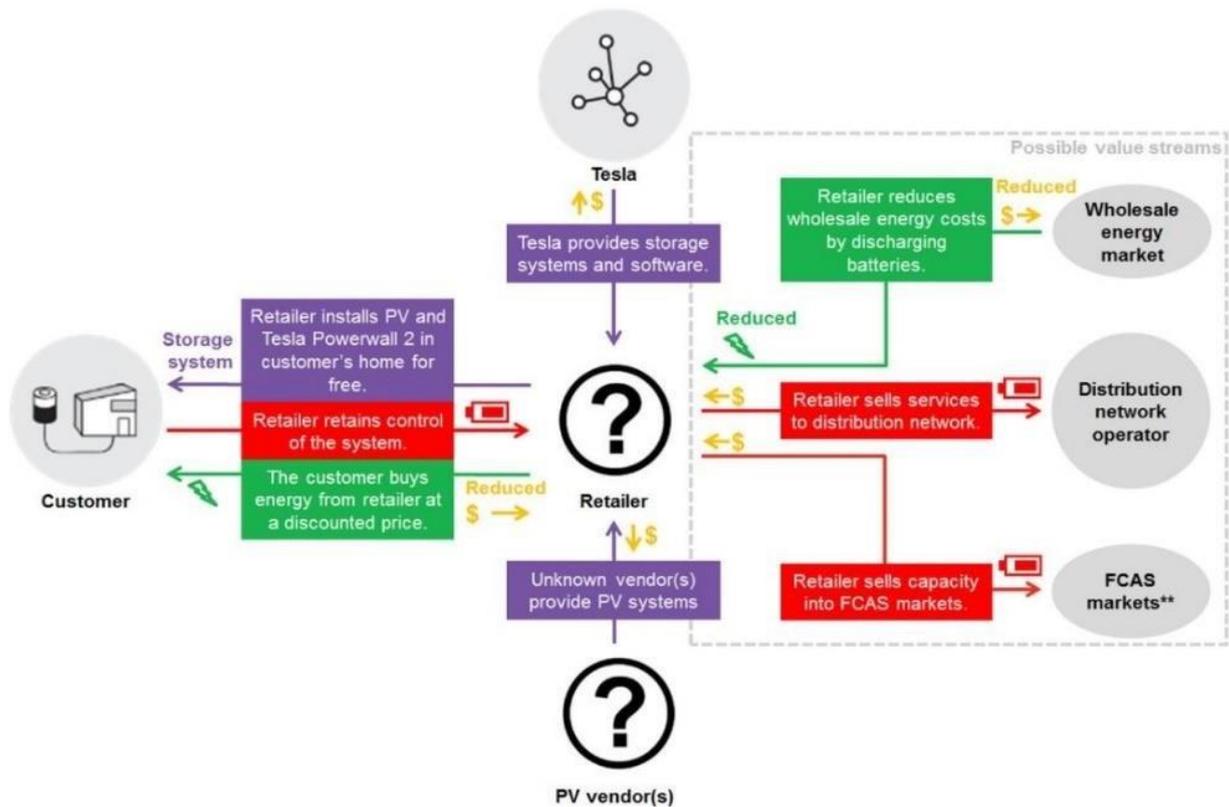


Fonte: NEXT KRAFTWERKE, 2024

A AGL Energy na Austrália está desenvolvendo uma VPP que integra sistemas de energia solar e baterias em residências e empresas. Com uma capacidade planejada de 350 MW, este projeto utiliza tecnologias de armazenamento para estabilizar a rede e fornecer energia renovável de forma eficiente. Pesquisas indicam que este tipo de integração não só aumenta a resiliência da rede, mas também permite a participação ativa dos consumidores no mercado energético (AGL, 2024).

Tesla Virtual Power Plant, é um projeto inovador na Austrália que conecta baterias Powerwall instaladas em residências para criar um sistema de armazenamento distribuído com uma capacidade total de 250 MW de sistemas interligados de armazenamento solar e de bateria em telhados distribuídos por 50.000 residências. Esta VPP ajuda a reduzir a dependência de fontes de energia tradicionais e aumenta a resiliência da rede. Estudos de caso têm mostrado que as baterias domésticas interconectadas podem fornecer serviços de balanceamento e resposta rápida à demanda, beneficiando tanto os consumidores quanto o operador da rede (TESLA, 2024).

Figura 5 - Como a usina virtual Tesla poderia funcionar



Fonte: Bloomberg New Energy Finance.

Na Austrália também, a GreenSync opera a plataforma Decentralized Energy Exchange (deX), que permite a integração de várias fontes de energia distribuídas em uma VPP. Este projeto maximiza a utilização de energias renováveis e melhora a eficiência da rede elétrica australiana. A pesquisa sobre VPPs destaca que plataformas como a deX podem otimizar a operação da rede, facilitando a gestão de recursos distribuídos e promovendo a descentralização do setor energético (GREENSYNC, 2024).

A Sonnen opera uma VPP que conecta baterias domésticas em toda a Alemanha, permitindo que os proprietários de baterias compartilhem energia e suportem a rede elétrica com serviços de balanceamento e reserva. A comunidade Sonnen demonstra como redes descentralizadas de armazenamento de energia podem contribuir significativamente para a estabilidade e eficiência da rede, especialmente em um contexto de crescente participação de energias renováveis (SONNEN, 2024).

Enel X, na Itália, uma subsidiária do Grupo Enel, opera VPPs que combinam diversas fontes de energia distribuídas, utilizando tecnologias avançadas de software para otimizar a geração e o consumo de energia. Estudos indicam que a aplicação de VPPs em grande escala, como a da Enel X, pode melhorar significativamente a integração de fontes renováveis na rede elétrica, reduzindo a necessidade de geração de reserva convencional (ENEL X, 2024).

A Statkraft, maior produtora de energia renovável da Europa, opera várias VPPs que combinam diferentes fontes de energia, como hidrelétricas, parques eólicos e solares. A empresa utiliza essas plantas virtuais para fornecer serviços de balanceamento e resposta rápida a rede (Statkraft, 2024.).

Sonnen Connect USA, uma subsidiária da Sonnen, opera uma VPP nos Estados Unidos da América que conecta baterias domésticas para fornecer serviços de armazenamento e balanceamento à rede elétrica, além de permitir que os proprietários de baterias compartilhem energia entre si.

Aggregated Micro Power, no Reino Unido, opera VPPs que integram sistemas de energia distribuída, como biomassa, baterias, hidrogênio verde e energia solar. As VPPs da AMP fornecem serviços de flexibilidade à rede elétrica do Reino Unido (AMP, 2024).

Esses exemplos demonstram que as VPPs são uma solução viável e eficaz para integrar fontes de energia renováveis e distribuídas, otimizar a operação das redes elétricas e proporcionar maior resiliência e flexibilidade ao sistema trabalhando também com a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa. A adoção crescente de VPPs em diversos países sublinha a relevância dessa tecnologia no futuro da energia sustentável e descentralizada.

## 5. DISCUSSÕES E RESULTADOS

Todas as perguntas que construíram o escopo de discussões dessa pesquisa foram respondidas e contrapostos ante a análise de conceitos teóricos centrais dos autores sistematizados abaixo:

Tabela 3 – Resultados da pesquisa bibliográfica

Autor(es)	Ano	Conceitos Técnicos Abordados	Explicação Geral do Aporte
Delgado; Lopes; Gonzalez	2021	Transição energética, energias renováveis, bem-estar social	Discutem o impacto da transição energética no bem-estar social e na criação de empregos.
PNUMA	2020	Emissões de GEE, descarbonização	Relata o aumento das emissões de GEE e a necessidade de ações para a descarbonização.
Dong et al	2024	Plantas Virtuais de Potência (VPPs), técnicas de engenharia de sistemas	Descrevem a aplicação e o impacto das VPPs na estabilização da rede elétrica.
Kaif, Alam e Das	2024	Integração de redes inteligentes, sistemas de gestão de redes	Exploram a integração de VPPs com redes inteligentes e seus efeitos na eficiência da rede.
Lemus et al	2022	Resposta à demanda, gestão de carga comercial e industrial	Investigam as técnicas de resposta à demanda e sua implementação para gestão de carga.
Jia et al	2023	Desenvolvimento dos recursos energéticos distribuídos (DERs), incineração de resíduos	Abordam a expansão dos DERs e a utilização de VPPs para melhorar a eficiência energética.
Brehm et al	2023	Características das VPPs, exemplos hipotéticos de aplicação	Fornecem um modelo hipotético para explicar a importância e o funcionamento das VPPs.
Ohanu, Rufai e Oluchi	2024	Redes inteligentes, medidores inteligentes	Discutem a contribuição das redes inteligentes e dos medidores inteligentes na modernização do sistema energético.
Calin e Druica	2022	Smart Grids, preferências dos consumidores por tecnologias de redes inteligentes	Analisam a aceitação do consumidor e os benefícios das smart grids na Europa.
Nebey	2024	Gestão de energia, uso de inteligência artificial para otimização de energia	Examina tecnologias avançadas para otimizar a gestão e o uso de energia.
Xie et al	2024	Agregadores na gestão de VPPs, economia circular em plantas de energia virtual	Propõem um modelo de VPP baseada na comunidade e discutem a gestão de energia através de agregadores.

(continuação) Tabela 3 – Resultados da pesquisa bibliográfica

Sabatella	2022	Políticas energéticas, descarbonização, uso de biomassa para energia	Comenta sobre políticas para promover a descarbonização e o uso sustentável de biomassa para energia.
Llamosas et al	2021	Aproveitamento de energia, sustentabilidade energética	Focam na importância de desenvolver uma matriz energética sustentável no Paraguai.
Micena et al.	2018	Energia solar, desenvolvimento de tecnologia fotovoltaica no Brasil	Discutem o estado e o potencial da energia solar no Brasil.
Silva	2021	Medição da radiação solar, instrumentação solarimétrica	Explica métodos e instrumentos para a medição da radiação solar.
Lima et al.	2020	Eficiência das células solares, aproveitamento da energia solar	Analisa a evolução das tecnologias fotovoltaicas e sua eficiência.
Shen et al.	2024	Modelagem da geração de energia solar, variações climáticas	Apresentam um modelo avançado para prever a geração de energia solar na China.
Torres	2021	Uso de algoritmos de aprendizado de máquina para previsão de energia solar	Explora como o aprendizado de máquina pode superar a intermitência na geração solar.
Pattanaik et al.	2024	Retorno do investimento em instalações solares fotovoltaicas	Investigam o retorno econômico de instalações fotovoltaicas na Índia.

Fonte: elaboração do autor.

Ao investigar a importância das VPPs na modernização do sistema elétrico, identificou-se sua relevância tanto para a modernização quanto para a estabilidade do sistema elétrico. As VPPs (Virtual Power Plants) contribuem para a sustentabilidade e eficiência energética. Considerando as tecnologias associadas às VPPs, observou-se que os avanços tecnológicos suportam o seu desenvolvimento e operação. Ademais, tecnologias de informação e comunicação (TIC) e a Internet das Coisas (IoT) melhoram a eficácia das VPPs, otimizando a sua funcionalidade.

Analisando as Smart Grids e Medidores Inteligentes, verifica-se que estas tecnologias são centrais na implementação de VPPs, visto que os medidores inteligentes facilitam a gestão da energia e suportam a descentralização energética. No que tange à gestão e ao armazenamento de energia em VPPs, empregam-se diversas estratégias e tecnologias que contribuem para a eficiência e sustentabilidade do sistema elétrico.

As VPPs integram novas fontes de geração de energia, como solar e eólica. A intermitência das fontes renováveis impacta a gestão das VPPs, exigindo soluções

específicas. A energia solar apresenta grande potencial nas VPPs, sendo a previsibilidade e a resposta à demanda otimizadas com sua integração. A energia eólica, por sua vez, é integrada nas VPPs com desafios e benefícios próprios, influenciando a eficiência e sustentabilidade dessas plantas.

Considerando o papel dos Agregadores na Gestão de VPPs, entende-se que os agregadores facilitam a interação entre diversos componentes energéticos e consumidores prossumidor (consumidores que também produzem energia). As políticas energéticas e regulatórias influenciam diretamente a adoção e desenvolvimento das VPPs, sendo que as políticas de descarbonização e os incentivos para energias renováveis exercem impacto sobre o seu desenvolvimento.

## 6. CONCLUSÃO

Essa pesquisa evidenciou que as Plantas Virtuais de Potência (VPPs) apresentam uma importante contribuição para a gestão de energia, coordenando uma variedade de recursos de geração distribuída e armazenamento. Essa coordenação proporciona uma resposta estável e previsível para a rede elétrica. Como visto, as VPPs agregam recursos distribuídos de energia, coordenando a sua operação para funcionar como uma única planta de energia no mercado elétrico. Utilizam tecnologias de informação e comunicação avançadas para otimizar o status operacional de seus componentes internos, contribuindo para a estabilidade e eficiência do sistema elétrico.

As VPPs são fundamentais para a eficiência energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa, reforçando o movimento global para uma economia de baixo carbono. A integração de múltiplas fontes de energia renovável pelas VPPs colabora para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 7. Assim, as VPPs atuam na modernização do sistema elétrico, promovendo a sustentabilidade energética.

Foi visto como o desenvolvimento das VPPs foi impulsionado por avanços na área de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), otimização e controle. Esses avanços permitem a coordenação dos recursos energéticos distribuídos. A Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial têm permitido uma coleta de dados mais precisa e um controle dos recursos, melhorando a previsibilidade e a resposta à demanda.

As redes inteligentes e os medidores inteligentes permitem a participação ativa dos prossumidor (consumidores-produtores) e suportam a formação de VPPs, otimizando a troca de energia e a eficiência do sistema. A tecnologia dos medidores inteligentes coleta e transmite informações para a coordenação das atividades e transferência de energia nas redes inteligentes. Ademais, como exposto, a gestão centralizada e o armazenamento de energia através das VPPs reduzem perdas e aumentam a eficiência do sistema de potência.

Diante disso, colocam-se as seguintes recomendações:

- Recomenda-se a criação de políticas de incentivo específicas para a implementação e expansão das VPPs, visando aumentar a participação de fontes renováveis.
- Sugere-se o aumento dos investimentos em tecnologias de informação e comunicação, como IoT e inteligência artificial, para otimizar a operação das VPPs.
- Promover a formação e capacitação de agregadores que possam coordenar eficientemente os recursos energéticos distribuídos, melhorando a interação e a eficiência energética.
- Implementar sistemas de monitoramento e avaliação das VPPs para identificar oportunidades de melhoria e garantir a eficiência operacional.
- Investir em programas de educação e conscientização para consumidores e prossumidor sobre os benefícios e funcionamento das VPPs.

E, ademais, apontam-se as sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar estudos comparativos entre diferentes modelos de VPPs implementados em diversos países, analisando os resultados e identificando as melhores práticas.
- Investigar o impacto econômico das VPPs sobre os consumidores e o mercado elétrico, avaliando os benefícios econômicos diretos e indiretos.
- Desenvolver modelos previsionais avançados para melhorar a precisão na previsão de geração e consumo de energia nas VPPs.
- Conduzir estudos de caso detalhados sobre a implementação de VPPs em comunidades locais, analisando os desafios e os resultados obtidos.
- Explorar a integração das VPPs com sistemas de mobilidade elétrica, avaliando o potencial de sinergia entre veículos elétricos e redes inteligentes.

Assim, estratégias inovadoras de gestão do lado da demanda são implementadas para analisar e ajustar o consumo de energia em resposta a sinais da rede. Desse modo, as VPPs contribuem para a eficiência e a resiliência do sistema elétrico. Ocorre que as VPPs agregam novas fontes de energia, como solar e eólica, coordenando sua operação para suprimir volatilidades e melhorar a estabilidade da rede. A intermitência das fontes renováveis é gerida através de técnicas avançadas, como a otimização em múltiplos tempos e a resposta à demanda.

A energia solar é importante nas VPPs devido à sua capacidade de previsão e ajuste, respondendo às incertezas e otimizando o agendamento de energia. As cargas flexíveis no lado do usuário são gerenciadas através de estratégias de resposta à demanda para otimizar os padrões de consumo de eletricidade. Ademais, a energia eólica é integrada nas VPPs, garantindo segurança e economia no sistema elétrico através de sua gestão coordenada. A integração da energia eólica nas VPPs contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e proporciona benefícios econômicos diretos aos consumidores.

Pontuou-se como os agregadores coordenam diversos componentes energéticos, facilitando a troca de energia e aumentando a eficiência da rede elétrica. Em um modelo baseado na comunidade, os agregadores permitem uma maior interação e eficiência energética, promovendo a sustentabilidade. Observou-se que os agregadores impactam na gestão das VPPs, promovendo a integração de recursos distribuídos e o uso otimizado da energia.

Como visto as políticas energéticas e regulatórias promovem a adoção de fontes renováveis e a implementação de VPPs como parte de uma estratégia de descarbonização. As políticas de incentivo para energias renováveis são precisas para o desenvolvimento e eficácia das VPPs no contexto global de redução de emissões. Entende-se que o suporte regulatório é determinante para o sucesso das VPPs na transição energética.

## 7. REFERÊNCIAS

AMP. **Uma plataforma global de transição energética**. 2024. Disponível em: <https://www.amp.energy/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BREHM, Kevin et al. Virtual Power Plants, Real Benefits. 2023. Disponível em: [https://rmi.org/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2023/01/virtual\\_power\\_plants\\_real\\_benefits.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/2023/01/virtual_power_plants_real_benefits.pdf). Acesso em: 20 jun. 2024.

CĂLIN, Rodica; DRUICĂ, Elena. A risk integrated technology acceptance perspective on the intention to use smart grid technologies in residential electricity consumption. *Journal of Cleaner Production*, v. 370, 2022.

CONNECT, Sonnen. VIRTUAL POWER PLANT PROGRAM. 2024. Disponível em: <https://sonnenusa.com/en/sonnenConnect/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

DELGADO, Diana; LOPEZ, Fernando J.; GONZALEZ, Graciela. Transición energética, innovación y usos directos de energía geotérmica en México: un análisis de modelado temático. *Prob. Des, Ciudad de México*, v. 52, n. 206, p. 115-141, sept. 2021.

DONG et al, Zhao, Research on day-ahead optimal dispatching of virtual power plants considering the coordinated operation of diverse flexible loads and new energy. *Energy*, v. 297, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Demanda de Energia 2050. 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-458/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.

FLORES, Ramón Carlos. Energía solar en hogares y negocios pequeños: una propuesta. *Economía UNAM*, vol. 15, no. 44, Ciudad de México, may./ago. 2018.

GADELHA, Hugo Sarmiento; BEZERRA, Paulo Gomes; MAIA, Adryele Gomes; MOURA, Frederico Cavalcantes de; PINA, Geórgia Carla de Vasconcelos; SILVA, Everton Francisco Carvalho. Tesla Virtual Power Plant: enfoque no direito ambiental. 2023. 13 f., *Revista Brasileira de Filosofia e História*, Pombal, 2023. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RBFH/article/view/10268/12186>. Acesso em: 18 jun. 2024.

GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA. South Australia's Virtual Power Plant. Disponível em: <https://www.energymining.sa.gov.au/consumers/solar-and-batteries/south-australias-virtual-power-plant>. Acesso em: 20 jun. 2024.

GOV. Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023 - Com construção de usinas fotovoltaicas e eólicas, matriz elétrica brasileira chega a 83,79% de fontes renováveis, uma referência internacional. 2023, online.

GOV. Plano Decenal de Expansão de Energia - PDE 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/pde-2029-a-2021/pde-2023/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde-2023.pdf/view>. Acesso: 20 jun. 2024.

KENNEDY, Ryan. Texas is the proving ground for a new way of electric grid operation. PV Magazine USA. 28 maio 2024. Disponível em: <https://pv-magazine-usa.com/2024/05/28/texas-is-the-proving-ground-for-a-new-way-of-electric-grid-operation/>. Acesso em: 20 jun. 2024.

KAIF et al, A.M.A. Daiyan; Alam, Khandoker Shahjahan; Das, Sajal K. Blockchain based sustainable energy transition of a Virtual Power Plant: Conceptual framework design & experimental implementation. Energy Reports, v. 11, 2024. Acesso em: 20 jun. 2024

JIA et al, Dongqing; Shen, Zhong; Li, Xingmei; Lv, Xiaoyan. Bi-level scheduling model for a novel virtual power plant incorporating waste incineration power plant and electric waste truck considering waste transportation strategy. Energy Conversion and Management, v. 298, 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Innovation landscape brief: utility-scale batteries. Abu Dhabi: Irena, 2019a. Disponível em: <<https://bit.ly/3G84tZM>>.

LI et al, Qiang; Zhou, Yongcheng; Wei, Fanchao; Li, Shuangxiu; Wang, Zhonghao; Li, Jijia; Zhou, Guowen; Liu, Jinfu; Yan, Peigang; Yu, Daren. Multi-time scale scheduling for virtual power plants: Integrating the flexibility of power generation and multi-user loads while considering the capacity degradation of energy storage systems. Applied Energy, v. 362, 2024.

LLAMOSAS, Cecilia et al . Energía y desarrollo: explorando el potencial del sector energético para cumplir metas de desarrollo en Paraguay. Poblac.Desarro., SAN LORENZO , v. 27, n. 52, p. 58-68, June 2021 .

LIFTOFF ENERGY. Virtual Power Plants. Disponível em: <https://liftoff.energy.gov/vpp/>. Acesso em: 20 jun. 2024.

LIMA, Ariane A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. Revista Brasileira de Ensino de Física [online]. 2020, v. 42.

MICENA, Raul et al. Estudio técnico del uso de energía solar y biogás en vehículos eléctricos en Ihabela-Brasil. Ingenius, Cuenca, n. 20, p. 58-69, dic. 2018.

MAHMUD, Khizir et al. Uma estrutura de internet de energia com recursos energéticos distribuídos, prósumers e usinas virtuais de pequena escala: uma visão geral. Revisões de Energia Renovável e Sustentável, v. 127, p. 109840, 2020.

NEBEY, Abraham Hizkiel. Recent advancement in demand side energy management system for optimal energy utilization. Energy Reports, v. 11, 2024.

NEXT KRAFTWERKE. Next Kraftwerke passes 10,000 megawatt milestone of aggregated capacity. 2022. Disponível em: <https://www.next-kraftwerke.com/news/10000-megawatt-of-aggregated-capacity>. Acesso em: 15 jun. 2024.

OHANU, Chibuike Peter; RUFAL, Salihu Ahmed; OLUCHI, Ugbe Christiana. A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration. *Heliyon*, v. 10, n. 3, 2024.

PALIZBAN, Omid; KAUHANIEMI, Kimmo; GUERRERO, Josep. Microgrids in active network management—Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36 (2014) 428–439.

PNUMA, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Informe sobre la disparidad en las emisiones de 2019. Resumen. *El trimestre econ*, Ciudad de México , v. 87, n. 346, p. 567-590, jun. 2020 .

PATTANAİK, Sushree Samikshya, et al. Life Cycle Assessment and Forecasting for 30kW Solar Power Plant using Machine Learning Algorithms. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2024, p. 100476.

RICARDO, Javier. Tesla: o primeiro teste de usina de energia virtual é bem-sucedido. 2021. Disponível em: <https://economiaenegocios.com/tesla-o-primeiro-teste-de-usina-de-energia-virtual-e-bem-sucedido/#:~:text=Tesla%3A%20o%20primeiro%20teste%20de%20usina%20de%20energia,Austr%C3%A1lia%20que%20cobre%20energia%20limpa%20e%20pol%C3%ADticas%20clim%C3%A1ticas>. Acesso em: 28 abr. 2022.

SILVA, Rogério Diogne de Souza e. UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS NO SETOR ELÉTRICO E AS PERSPECTIVAS PARA O BRASIL, 2021. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11036/1/radar\\_68\\_utilizacao\\_de\\_sistemas\\_de\\_armazenamento.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11036/1/radar_68_utilizacao_de_sistemas_de_armazenamento.pdf). Acesso em: 18 jun. 2024.

SHEN, Yun, et al. A novel SARCIMA model based on central difference and its application in solar power generation of China. *Applied Energy*, 2024, vol. 360, p. 122858.

SILVA, Douglas Fernandes da. Estratégias de implementação de um gerador solar fotovoltaico na empresa Motormac. 2021.

STATKRAFT. Virtual Power Plants. Disponível em: <https://www.statkraft.com/what-we-offer/energy-flexibility-management/virtual-power-plants/>. Acesso em: 20 jun. 2024.

TORRES, Sérgio. Previsão do preço de ações brasileiras utilizando redes neurais artificiais. 2021.

VEKTA. How To Choose Between A Microgrid And A Virtual Power Plant

May 20. Disponível em: <https://veckta.com/2021/05/20/virtual-power-plant/>. Acesso em: 20 jun. 2024.

XIE et al, Haonan; Ahmad, Tanveer; Zhang, Dongdong; Goh, Hui Hwang; Wu, Thomas. Community-based virtual power plants' technology and circular economy models in the energy sector: A Techno-economy study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 192, 2024.