UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

JOÃO TADEU ALVES DOS SANTOS

**BLOCKCHAIN EM SISTEMAS DE VIRTUAL POWER PLANT:
ESTUDO PARA APLICAÇÃO NA MACROMETRÓPOLE
PAULISTA**

SÃO PAULO
2021

JOÃO TADEU ALVES DOS SANTOS

BLOCKCHAIN EM SISTEMAS DE VIRTUAL POWER PLANT: ESTUDO PARA
APLICAÇÃO NA MACROMETRÓPOLE PAULISTA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Energia do Instituto de Energia
e Ambiente da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Célio Bermann

Versão Corrigida

SÃO PAULO

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, João Alves dos Santos.

Blockchain em sistemas de virtual power plant: estudo para aplicação
na Macrometrópole Paulista. /João Alves dos Santos; orientador: Célio
Berman. – São Paulo, 2021.

211 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-
Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da
Universidade de São Paulo.

1. Geração de energia elétrica. 2. Distribuição de energia
elétrica. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: ALVES DOS SANTOS, João Tadeu

Título: Blockchain em Sistemas de Virtual Power Plant: Estudo para Aplicação na Macrometrópole Paulista

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências da Energia.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Presidente: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que primeiro me formaram como pessoa para além dos muros acadêmicos. Desta forma, me permitiram aqui chegar e daqui continuar sendo a mesma pessoa com os mesmos valores. Sem todo o esforço deles, literalmente, não teria passado dos primeiros meses de vida. Obrigado por todo esse amor.

Dedico também a minha esposa, que me acompanha nesta jornada e pelos últimos dez anos, entre picos e vales, entendeu a minha ausência em diversos momentos. As noites acordado, as horas estudando, todo esforço ao longo dos anos. Esse caminho que não começou agora, o qual não foi fácil, se tornou factível pela sua presença. Sem dúvida, esse trabalho tem muito dela e de sua doação para que eu pudesse chegar aqui. Não foi fácil, mas chegamos.

Por fim, dedico à Shitiro Honda (*in memoriam*), que sempre me apoiou a seguir nesse caminho por acreditar em minha faceta como pesquisador.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a três pessoas que deram a ignição neste trabalho, quando nem mesmo era um projeto, ao vencermos um *Hackathon* sobre *Blockchain*. Obrigado Cadu Palmieri, Giovanni Bonin e Rodrigo Araújo, por aquele dia, pela ajuda, apoio, piadas ao longo desta caminhada e acima de tudo, pela amizade. Desta forma, eternizamos agora o NFNB e aquilo que sempre citamos: “a indústria sempre vence”.

Agradeço ao Prof. Célio Bermann, não apenas pela orientação e pela companhia ao longo deste trabalho, mas também por ter me permitido, no momento crucial da inscrição, me abrir a porta. Nunca esquecerei deste momento e de suas palavras, obrigado.

Academicamente, agradeço ao grupo de pesquisa do qual faço parte, os professores do IEE e aos colegas que entraram no programa juntamente comigo. As visões de cada um, seus conhecimentos e conversas, de um modo ou de outro, faz agora parte de mim e de como eu vejo os problemas, para além da esfera técnica.

Agradeço à Juliana, pelas conversas, dúvidas e questionamentos. Sem a sua presença, este trabalho não seria acessível a todos, a visão sobre o que ele pode ser ainda, não seria clara. Obrigado por ter feito parte de tudo isso, pois sempre temos que saber agradecer.

Por fim, agradeço a Adenauer Gonçalves (*in memoriam*), Edson Marconi, Hilton Carvalho, João Zamorra, Manoel Dias, Neander Reimer e Pedro Sobrinho. Obrigado pelos ensinamentos.

Este trabalho é parte das atividades do projeto temático, em andamento, “Governança ambiental na Macrometrópole Paulista, face à variabilidade climática”, processo nº 15/03804-9, financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e vinculado ao Programa FAPESP de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais.

世上无难事，只怕有心人

(Não existe tarefa impossível, para quem faz de coração)

Provérbio Chinês

Senão você, então quem?

Se não agora, então quando?

Gary Herbert

RESUMO

Atualmente a temática de Transição Energética e as tentativas de se alcançar os objetivos da agenda 2030 se mostram uma tendência mundial. Localmente, somam-se os desafios do setor de energia elétrica e o impacto das mudanças climáticas sobre a matriz energética brasileira. Presente dentro deste contexto, a Macrometrópole Paulista (MMP) precisa repensar suas estratégias de segurança energética e como a inclusão da Geração Distribuída (GD) irá mudar os paradigmas da região, garantindo segurança energética e uma maior independência das variações dentro do cenário nacional. Estas condições favorecem a investigação de novos modelos e ferramentas que auxiliem o fornecimento de energia de modo seguro, acessível e com baixa emissão de carbono. Com foco nessas novas possibilidades, este trabalho investigou uma temática que segue sob interesse crescente no setor de pesquisa e também comercial, as Virtual Power Plants (VPPs). Esta tecnologia permite a coordenação de fontes distribuídas de energia, enquanto comercialmente, opera com fornecimento similar a uma usina convencional. Enquanto fisicamente existem apenas os recursos de geração e a infraestrutura usada para transmissão de energia e troca de dados, o núcleo da usina existe apenas em âmbito digital. Este trabalho investigou a temática de VPPs, adotando a tecnologia *blockchain* como uma ferramenta habilitadora para novos modelos de negócio. O desenvolvimento da pesquisa apresentou como resultado duas vertentes que colaboram e somam-se ao estado da arte atual deste tema. Do ponto de vista de avaliação de projeto, a aplicação da análise multicritério se mostrou uma ferramenta capaz de auxiliar na tomada de decisão quanto a inserção de novas fontes. Em paralelo, a prova de conceito desenvolvida permitiu avaliar a simulação de uma operação de vinte e quatro horas de uma VPP utilizando *blockchain*. Estas duas abordagens resultaram na proposição de novos modelos de negócio que são aderentes a MMP e ao futuro do setor elétrico nas perspectivas dos estudos da EPE. Os artefatos gerados não se esgotam apenas neste trabalho, modificações e melhorias permitem que novas pesquisas sejam realizadas, simulando novos cenários e novos modelos de negócio com utilização de *blockchain*.

Palavras-chave: Virtual Power Plant. Blockchain. Geração Distribuída. Smart Contracts. Smart Grid.

ABSTRACT

Currently, the topic of Energy Transition and the attempts to achieve the 2030 agenda goals are a global trend. Locally, there are the challenges of the electricity sector and the impact of climate change on the Brazilian energy matrix. Present within this context, the São Paulo Macrometropolis (MMP) needs to rethink its energy security strategies and how the inclusion of Distributed Generation (GD) will change the region's paradigms, ensuring energy security and greater independence from variations within the national scenario. These conditions favor the investigation of new models and tools that help to supply energy in a safe, affordable and low-carbon way. Focusing on these new possibilities, this work investigated a theme that continues to be of growing interest in the research and commercial sector, the Virtual Power Plants (VPPs). This technology allows the coordination of distributed energy sources, while commercially operating with a supply similar to a conventional power plant. While physically there are only the generation resources and the infrastructure used for energy transmission and data exchange, the core of the plant only exists in the digital sphere. This work investigated the theme of VPPs, adopting blockchain technology as an enabling tool for new business models. The development of the research presented as a result two strands that collaborate and add to the current state of the art of this theme. From the point of view of project evaluation, the application of multi-criteria analysis proved to be a tool capable of assisting in decision making regarding the insertion of new sources. In parallel, the proof of concept developed allowed to evaluate the simulation of a twenty-four hour operation of a VPP using blockchain. These two approaches resulted in the proposition of new business models that adhere to MMP and the future of the electricity sector in the perspectives of the EPE studies. The generated artifacts are not exhausted only in this work, modifications and improvements allow new researches to be carried out, simulating new scenarios and new business models using blockchain.

Keywords: Virtual Power Plant. Blockchain. Distributed Generation. Smart Contracts. Smart Grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Etapas do <i>Design Science Research</i>	20
Figura 2.1 – Representação básica inicial de uma VPP	28
Figura 2.2 – Representação genérica de uma VPP nos modelos atuais	30
Figura 2.3 – Representação genérica de uma VPP com as separações entre TVPP e CVPP.	32
Figura 2.4 – Arquitetura de um sistema de VPP	35
Figura 2.5 – Representação detalhada de uma VPP.	35
Figura 2.6 – Arquitetura de três camadas de uma IMA.....	42
Figura 2.7 – Diagrama de Blocos da plataforma de software genérica de VPP.....	47
Figura 3.1 – Função Hash aplicada ao documento de entrada do sistema	61
Figura 3.2 – Fluxo de troca de informação utilizando criptografia de chave simétrica .	62
Figura 3.3 – Fluxo de troca de informação utilizando criptografia de chave assimétrica	64
Figura 3.4 – Fluxo de troca de informação utilizando assinatura digital	65
Figura 3.5 – Fluxo de troca de informação utilizando certificado digital	66
Figura 3.6 – Representação do Problema dos Generais Bizantinos	67
Figura 3.7 – Blockchain como um caso particular de Distributed Ledger.....	70
Figura 3.8 – Bloco genérico básico baseado no usado pelo Bitcoin	73
Figura 3.9 – Representação da Merkle Tree com os dados das transações presentes no bloco	75
Figura 3.10 – Cadeias de blocos da estrutura de dados presentes em sistemas <i>blockchain</i>	76
Figura 3.11 – Modelo de transação proposto por Nakamoto	77
Figura 3.12 – Participação do usuário nos modelos de identidade.....	86
Figura 3.13 – Arquitetura de Sistema de Identidade Auto-Soberana.....	87
Figura 3.14 – Áreas do setor elétrico com que tem projetos utilizando Blockchain.....	89
Figura 3.15 – Nuvem de palavras com as palavras-chave utilizadas	95
Figura 4.1 – Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável	101
Figura 4.2 – Componentes necessários para a modernização do setor elétrico nacional	103
Figura 5.1– Classes de problemas	136
Figura 5.2 – Arquitetura geral utilizada para a Prova de Conceito	140

Figura 5.3 – Atores presentes na Prova de Conceito	141
Figura 5.4 – Fluxograma para escolha de adoção de <i>blockchain</i>	144
Figura 5.5 – <i>Stack</i> tecnológica escolhida.....	145
Figura 5.6 – Fluxo de dados da Prova de Conceito	146
Figura 5.7 – Estrutura de dados presente no Firebase	147
Figura 5.8 – Topologia da rede <i>blockchain</i> utilizada	148
Figura 5.9 – Arquitetura de <i>smart contracts</i> do sistema.....	149
Figura 5.10 – Sequência macro de funcionamento do sistema.....	150
Figura 5.11 – Fase inicial de interação dos contratos.....	151
Figura 5.12 – Consulta do dado de geração.....	152
Figura 5.13 – Consulta de dados de pagamento e geração de RECs.....	152
Figura 5.14 – Fluxo de geração e uso de certificados digitais.....	154
Figura 5.15 – Interface principal de operação	159
Figura 5.16 – Interface representando a geração dos REDs.....	160
Figura 5.17 – Interface dos resultados diários	160
Figura 5.18 – Interface e acesso via script às informações no <i>blockchain</i>	162
Figura 5.19 – JSON com valores presentes no <i>blockchain</i> para pagamento e emissão de RECs.....	163
Figura 5.20 – Histórico de mudança dos registros no contrato operacional.....	165
Figura 5.21 – Utilização de dados públicos e privados com inclusão da EPE	167
Figura 5.22 – Inclusão de canais para acesso compartilhados com outros atores	168
Figura 5.23 – Representação de VPP com REDs e seus contratos diferenciados	172
Figura 5.24 – Dinâmica para tokenização de ativos de geração.....	173
Figura 5.25 – Relação de agentes de mercado dentro deste modelo	174
Figura 5.26 – Extensão da Prova de Conceito para inclusão de <i>smart contract</i> com regras de <i>tokens</i>	175
Figura 5.27 – Modelo social e seus atores.....	176

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Quantidade de artigos publicados sobre a temática de VPP por ano	26
Gráfico 2.2 – Os dez maiores produtores de artigos na temática de VPP	26
Gráfico 3.1 – Artigos publicados por ano sobre a temática VPP utilizando <i>blockchain</i>	93
Gráfico 3.2 – Publicações por país	94
Gráfico 3.3 – Frequência de palavras-chave para os artigos levantados	94
Gráfico 3.4 – Quantidade de artigos para classes definidas	96
Gráfico 4.1 – Participação na demanda de energia elétrica, por classe de consumo....	113
Gráfico 4.2 – Evolução da capacidade instalada (MW) de GD fotovoltaica na MMP	117
Gráfico 4.3 – Evolução das classes de consumo no número de unidades de GD Fotovoltaica na MMP	118
Gráfico 4.4 – Quantidade de Veículos Elétricos na MMP	129
Gráfico 5.1 – Peso calculado para cada critério	143
Gráfico 5.2 – Curva de Carga utilizada na simulação	157
Gráfico 5.3 – Produção de energia de cada RED	158
Gráfico 5.4 – Curva de Carga e de Geração com combinação das fontes.....	158

LISTA DE MAPAS

Mapa 4.1 – Macrometrópole Paulista e suas regiões.....	110
Mapa 4.2 – Usinas termoeletricas que utilizam combustivel fossil na MMP	114
Mapa 4.3 – Municípios atendidos com Fibra Óptica na MMP	119
Mapa 4.4 – Atendimento do protocolo de comunicação CAT-M	121
Mapa 4.5 – Atendimento do protocolo de comunicação NB-IoT	121
Mapa 4.6 – Atendimento do protocolo de comunicação LoRa	122
Mapa 4.7 – Usinas presentes na região da MMP	123
Mapa 4.8 – Instalações de GD na região da MMP	124
Mapa 4.9 – Mapa de calor de instalações de GD na região da MMP	124
Mapa 4.10 – Linhas de Transmissão presentes na MMP	125
Mapa 4.11 – Municípios com Medidores Inteligentes instalados na MMP	127
Mapa 4.12 – Concessionárias presentes na região da MMP	128
Mapa 4.13 – Rodovias presentes na MMP	130
Mapa 4.14 – Acesso a Internet nos municípios da MMP	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Aplicações de IoT nas áreas de energia elétrica, industrial, residencial e cidades inteligentes.....	41
Quadro 2.2 – Redes presentes localmente nos consumidores finais e suas descrições..	43
Quadro 2.3 – Exemplos de ataques que podem ocorrer em uma REI e conseqüentemente, em uma VPP.....	51
Quadro 3.1 – Propriedades dos tipos de blockchain.....	77
Quadro 3.2 – Requisitos necessários para um algoritmo de consenso	78
Quadro 3.3 – Algoritmos de Consenso.....	80
Quadro 3.4 – Tipos de <i>Tokens</i> e suas descrições.....	84
Quadro 4.1 – Descrição dos componentes propostos pela EPE	103
Quadro 5.1 – <i>Smart Contracts</i> e suas descrições.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tecnologias sem fio utilizadas em sistemas de comunicação de REIs.	45
Tabela 2.2 – Aplicações de VPPs até 2015 em todo o mundo.	53
Tabela 4.1 – Perfil e Indicadores macroeconômicos da MMP	111
Tabela 4.2 – Capacidade Instalada para geração de eletricidade dentro da região da MMP, até 2019.....	113
Tabela 5.1 – Escala de Saaty utilizada na análise multicritério.....	139
Tabela 5.2 – Valores atribuídos para cada critério	142
Tabela 5.3 – Valores para vetor prioridade e cálculo do autovalor	142
Tabela 5.4 – Características das cidades escolhidas.....	154
Tabela 5.5 – Tabelas com pesos por características para cada cidade	155
Tabela 5.6 – Cálculo de prioridade de escolha para cada cidade	155
Tabela 5.7 – Conjunto de REDs utilizados na simulação.....	156
Tabela 5.8 – Comparação dos valores teóricos e os obtidos na simulação	162
Tabela 5.9 – Comparação dos valores diários teóricos e os obtidos na simulação	163
Tabela 5.10 – Valores teóricos para pagamentos e emissão de RECs	164

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CVPP	<i>Commercial Virtual Power Plant</i>
DEI	Dispositivo Elétrico Inteligente
DSR	<i>Design Science Research</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
GTMSE	Grupo de Trabalho de Modernização do Sistema Elétrico
IMA	Infraestrutura de Medição Avançada
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
OSD	Operador do Sistema de Distribuição
OST	Operador do Sistema de Transmissão
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
REC	<i>Renewable Energy Certificate</i>
RD	Resposta à Demanda
RED	Recursos
REI	Redes Elétricas Inteligentes
SAE	Sistema de Armazenamento de Energia
SCVE	Sistema de Carregamento de Veículo Elétrico
SEB	Setor Elétrico Brasileiro
SG	<i>Smart Grid</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
TVPP	<i>Technical Virtual Power Plant</i>
VE	Veículo Elétrico
VPP	<i>Virtual Power Plant</i>
VU	<i>Virtual Utility</i>

SUMÁRIO

<u>FICHA CATALOGRÁFICA.....</u>	<u>3</u>
--	-----------------

<u>1 INTRODUÇÃO.....</u>	<u>15</u>
---------------------------------	------------------

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	18
1.2 JUSTIFICATIVA E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	18
1.3 OBJETIVOS.....	19
1.4 METODOLOGIA.....	19
1.4.1 REVISÃO DA LITERATURA	20
1.4.2 IDENTIFICAÇÃO DE ARTEFATOS E CONFIGURAÇÃO DE CLASSES DE PROBLEMAS ...	21
1.4.3 PROPOSIÇÃO, PROJETO, DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DOS ARTEFATOS.....	21
1.4.4 EXPLICITAÇÃO DAS APRENDIZAGENS	22
1.4.5 CONCLUSÕES E GENERALIZAÇÃO DE CLASSES DE PROBLEMAS	22
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	22

<u>2 VIRTUAL POWER PLANTS.....</u>	<u>24</u>
---	------------------

2.1 O CONCEITO DE VPP.....	27
2.2 A DEFINIÇÃO DE VPP	30
2.3 TIPO DE VPPs.....	31
2.3.1 TECHNICAL VIRTUAL POWER PLANT – TVPP.....	32
2.3.2 COMMERCIAL VIRTUAL POWER PLANTS – CVPPs.....	33
2.4 ESTRUTURA DE UMA VPP	34
2.4.1 SISTEMAS DE GERAÇÃO, ARMAZENAMENTO E CARGAS CONTROLADAS	36
2.4.2 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	39
2.4.2.1 Interface com Mercado.....	48
2.4.2.2 Previsão	48
2.4.2.3 Otimização.....	49
2.4.2.4 Controlador de RED e Sistema de Carga de Veículos Elétricos.....	49
2.4.2.5 Armazenamento de Dados.....	50
2.4.3 SEGURANÇA E PRIVACIDADE	50
2.5 APLICAÇÕES DE VPPs.....	53

3	<u>A TECNOLOGIA BLOCKCHAIN E SUA APLICAÇÃO EM VPPS.....</u>	57
3.1	SISTEMAS DISTRIBUÍDOS.....	58
3.1.1	REDES PEER-TO-PEER	59
3.1.2	SEGURANÇA	60
3.1.2.1	Algoritmos de Criptografia	60
3.1.2.2	Função Hash Criptográfica.....	61
3.1.2.3	Criptografia de chave simétrica.....	62
3.1.2.4	Criptografia de chave assimétrica	63
3.1.2.5	Assinaturas Digitais.....	64
3.1.2.6	Certificados Digitais.....	65
3.1.3	ALGORITMOS DE CONSENSO	66
3.2	DISTRIBUTED LEDGER TECHNOLOGIES	67
3.3	BLOCKCHAIN.....	70
3.3.1	ESTRUTURA DE DADOS DE UM BLOCKCHAIN	73
3.3.1.1	Metadado	73
3.3.1.2	Nonce.....	74
3.3.1.3	Merkel Root.....	74
3.3.1.4	Hash do Bloco Anterior.....	75
3.3.1.5	Transações	76
3.3.2	TIPOS DE BLOCKCHAINS.....	77
3.3.3	CONSENSO DISTRIBUÍDO	78
3.3.4	SMART CONTRACTS	82
3.3.5	TOKENS EM ICOS.....	83
3.4	APLICAÇÕES DE BLOCKCHAIN NO SETOR ELÉTRICO	88
3.4.1	COMERCIALIZAÇÃO PEER-TO-PEER	90
3.4.2	GERENCIAMENTO E OPERAÇÃO DA REDE.....	90
3.4.3	FINANCIAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE ENERGIA RENOVÁVEL.....	91
3.4.4	GERENCIAMENTO DE CERTIFICADO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	91
3.4.5	MOBILIDADE ELÉTRICA	91
3.4.6	CRÍPTOMOEDAS E TOKENIZAÇÃO	92
3.5	APLICAÇÕES DE BLOCKCHAIN EM VIRTUAL POWER PLANTS.....	93
4	<u>OS REQUISITOS PARA MMP.....</u>	100

4.1	A MODERNIZAÇÃO DAS CIDADES.....	100
4.2	MODERNIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO NACIONAL	102
4.2.1	ABERTURA DO MERCADO	106
4.2.1.1	Expansão da Instalação de Medidores Inteligentes.....	107
4.2.2	GRANULARIDADE TARIFÁRIA.....	107
4.2.3	USINAS HÍBRIDAS E AGREGADORES.....	108
4.2.4	INSERÇÃO DE <i>BLOCKCHAIN</i> NO SETOR ELÉTRICO	109
4.3	A IMPORTÂNCIA DA MMP	110
4.4	CARACTERIZAÇÃO DO PANORAMA ENERGÉTICO DA MMP.....	112
4.4.1	CONSUMO DE ENERGIA	112
4.4.2	GERAÇÃO DE ENERGIA.....	113
4.4.3	BALANÇO ENTRE OFERTA E DEMANDA.....	115
4.4.4	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	116
4.5	LIMITANTES E DESAFIOS	118
4.5.1	INFRAESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO E DADOS	119
4.5.2	INFRAESTRUTURA ELÉTRICA.....	122
4.5.3	CONCESSIONÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA	128
4.5.4	CIBERSEGURANÇA E PRIVACIDADE	130
4.5.5	ACESSO DOS USUÁRIOS A INTERNET.....	131
4.6	DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS E RESTRIÇÕES	133
4.6.1	MERCADO	133
4.6.2	INFRAESTRUTURA	133
4.6.3	PLATAFORMA DE SOFTWARE	134
5	<u>DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E RESULTADOS</u>	<u>135</u>
5.1	CONFIGURAÇÃO DAS CLASSES DE PROBLEMAS	135
5.2	IDENTIFICAÇÃO E PROPOSIÇÃO DOS ARTEFATOS.....	136
5.2.1	ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA INSERÇÃO DE VPPs	136
5.2.2	PROVA DE CONCEITO DE UMA VPP	137
5.3	PROJETO DOS ARTEFATOS PROPOSTOS	138
5.3.1	PROTOCOLO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA INSERÇÃO DE VPPs	138
5.3.2	PROVA DE CONCEITO DA VPP.....	139
5.4	DESENVOLVIMENTO DOS ARTEFATOS.....	141

5.4.1	DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO	141
5.4.2	DESENVOLVIMENTO DA PROVA DE CONCEITO DA VPP.....	144
5.4.2.1	Camada de Front-End.....	145
5.4.2.2	Camada de Back-End	146
5.4.2.3	Camada <i>Blockchain</i>	147
5.4.2.4	Diagramas de Sequência das Operações	150
5.4.2.5	Controle de Acesso as Informações	153
5.4.2.6	Segurança no acesso a Camada de <i>Blockchain</i>	153
5.5	AVALIAÇÃO DOS ARTEFATOS DESENVOLVIDOS	154
5.5.1	AVALIAÇÃO DA ANÁLISE MULTICRITÉRIO	154
5.5.2	AVALIAÇÃO DA PROVA DE CONCEITO DE VPP	156
5.6	CONCLUSÕES E GENERALIZAÇÕES.....	165
5.6.1	CONCLUSÃO SOBRE O PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO	165
5.6.2	CONCLUSÃO SOBRE A PROVA DE CONCEITO DA VPP	166
5.6.2.1	Inclusão de Mecanismos de Identidade.....	168
5.6.2.2	Limitações Identificadas do Artefato	168
5.6.3	GENERALIZAÇÃO DOS ARTEFATOS DESENVOLVIDOS.....	170
5.7	MODELOS DE ADOÇÃO PARA A MMP	170
5.7.1	MODELO PARA PEQUENOS GERADORES	171
5.7.2	MODELO PARA VIABILIZAÇÃO DE PROJETOS DE GD	172
5.7.3	MODELO SOCIAL	175
6	<u>CONCLUSÕES.....</u>	<u>177</u>
6.1	CONTRIBUIÇÕES PARA AVALIAÇÃO DE PROJETOS E TECNOLOGIAS	177
6.2	IMPLICAÇÕES NA REGIÃO DA MMP	177
6.3	DESDOBRAMENTOS COLATERAIS.....	178
6.4	PESQUISAS E TRABALHOS FUTUROS	179
7	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>181</u>
	<u>APÊNDICE A – PROTOCOLO DE ESCOLHA DE CIDADES UTILIZANDO</u>	
	<u>MÉTODO MULTICRITÉRIO</u>	<u>202</u>

APÊNDICE B – DIAGRAMA DE ESTRUTURAÇÃO DOS <i>SMART CONTRACTS</i>	
UTILIZADOS	203

1 INTRODUÇÃO

Motivadas pelas mudanças climáticas acompanhadas ao longo dos anos, em 2015 a Conferências de Mudanças Climáticas das Nações Unidas (*The United Nations Climate Change Conference*, UNFCCC) ratificou o Acordo de Paris. Esta iniciativa visava articular a sociedade, governos e empresas para a reduções das emissões de gases de efeito estufa, através do desenvolvimento de políticas buscando um desenvolvimento mais sustentável (UNFCCC; IRENA; UN ENVIRONMENT, 2018).

Um dos focos para essa mudança está centrado no setor de energia, responsável pela emissão de dois terços das emissões totais de gases de efeito estufa. Estas emissões estavam, em grande parte, associadas à utilização de combustíveis fósseis, utilizadas em diversos processos industriais e de obtenção de energia (UNFCCC; IRENA; UN ENVIRONMENT, 2018). Em busca dos objetivos propostos pelo Acordo de Paris e a redução das mudanças climáticas, o setor de energia mundial intensificou o processo de transição energética, através de atividades dos países signatários e de acordo com características regionais de cada economia (IRENA, 2018a).

Estas condições têm se mostrado um motor de mudanças que irá acarretar impactos significativos em infraestruturas e modelos de negócios hoje existentes no setor de energia. Estima-se que até 2050 os sistemas passarão por uma intensa modernização e que a composição das matrizes energéticas globais, reduzindo a participação das fontes não renováveis, dos atuais 76% para 15% em 2050, e privilegiando os recursos renováveis de baixa emissão de CO₂ (IRENA, 2018a).

Dentro deste contexto, algumas características têm se apresentado como vetores de modificação setorial, permitindo uma migração dos aproveitamentos energéticos atuais para novos modelos. As três principais vertentes que se apresentam como os pilares desta transição energética são a descarbonização, descentralização e digitalização dos sistemas energéticos. A unificação destas temáticas, permitirá uma modernização do setor, para modelos mais aderentes aos princípios de baixa emissão de CO₂, utilizando tecnologias modernas e permitindo um aumento em sua viabilidade comercial (IRENA, 2020a).

A procura pela redução de CO₂ dentro do sistema energético, focando no setor de energia elétrica, encontra na descarbonização a possibilidade do aumento da presença de fontes de geração de energia com baixas emissões de CO₂, como as fontes renováveis. Estes recursos podem ser adotados simultaneamente ao movimento por uma maior eletrificação de setores onde a presença de combustíveis fósseis é dominante, como o segmento de transportes. Por serem mecanismos de conversão associados a recursos naturais (solar, eólico e hídrico, por exemplo), seu melhor aproveitamento está associado à alocação de unidades geradoras em regiões onde existe maior eficiência dos processos de conversão (IRENA, 2018a).

O segundo pilar da transição energética, corresponde a esta descentralização dos sistemas de geração, sendo alocados de acordo com as características regionais e simultaneamente próximo aos centros de consumo. Estas novas tipologias, que divergem de sistemas centralizados quanto à operação e também se distinguem quanto ao despacho dada a sua intermitência, trazem a evolução tecnológica como um ferramental para a modernização (IRENA, 2020a).

A digitalização por sua vez, representa o futuro dos sistemas de energia, permitindo que novas tecnologias, como *big data* e *machine learning* por exemplo, possam ser utilizadas, trazendo para as empresas e instituições setoriais novos modelos de operação, de forma otimizada, conhecendo profundamente as dinâmicas das redes de energia elétrica e suas reais necessidades (IEA, 2017; MIT ENERGY INITIATIVE, 2015a).

Com esta evolução em curso, somando-se o desenvolvimento tecnológico contínuo e a adoção de ferramentas de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), o processo de digitalização permitirá o surgimento de novos modelos de negócio, novos vínculos entre os clientes e as empresas que atuam no setor de energia, assim como uma modernização que pode ser benéfica para um acesso mais igualitário da energia e redução dos custos finais para os usuários. Ainda que a consolidação desta evolução cresça rapidamente no âmbito internacional, a Empresa de Pesquisa em Energia (EPE) em seu plano decenal para 2029 indica um crescimento na utilização dos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) no cenário nacional, guiada pela digitalização e culminando em uma revolução no mercado nacional de energia (EPE, 2019a).

Dentro desta grande mudança prevista no setor, existe a tendência do surgimento da figura dos agregadores (IRENA, 2019a), os quais são entidades que reúnem uma diversidade de REDs em seu portfólio e podem despachar a energia gerada de acordo com as necessidades do sistema considerando a disponibilidade das fontes ou do conjunto delas, acompanhando a dinâmica momentânea do sistema. Essa flexibilidade permite um novo modelo de operação, com sistema de precificação distinto, com uma energia assegurada mais estável, ainda que se tenham fontes intermitentes no portfólio comercial, mas que podem atuar de forma complementar (EPE, 2019a; RAMOS et al., 2020). A flexibilidade operacional garantida com esse modelo permite uma maior segurança energética, uma vez que as fontes de geração, quando operadas de forma otimizada, podem apresentar um efeito compensatório e assim, atender os critérios de disponibilidade estabelecidos.

Contudo, os agregadores precisam de um ferramental tecnológico capaz de permitir a gestão dos REDs, integração com o sistema de energia elétrica, comunicação com agentes de comercialização e, de forma mais sofisticada, previsões de demanda para otimização operacional do despacho, os sistemas que atendem estes requisitos são denominados como *Virtual Power Plants* (VPPs), os quais formam a base desta pesquisa.

Embora a temática de VPPs não se mostre tão recentes no mercado (YOKOYAMA; NARA, 2003), a modernização das redes elétricas, adoção da geração distribuída e a inserção de tecnologias emergentes como ferramentas habilitadoras de novos modelos de negócio (IRENA, 2019b), permitem uma nova visão deste conceito. Dentre estas tecnologias, a conhecida como *blockchain* vem sendo investigada quanto a sua utilização no setor elétrico (BRILLIANTOVA; THURNER, 2019; WU; TRAN, 2018). Suas características e possíveis aplicações se mostram promissoras no setor, se tornando uma temática que demanda muita pesquisa. Sob esta perspectiva, esta pesquisa foca na utilização desta tecnologia associada à sistemas de VPPs, investigando a possibilidade de sua aplicação nos novos modelos de sistemas e negócios que permitam a inserção destas soluções na região da Macrometrópole Paulista (MMP) e assim, consequentemente, no setor de energia elétrica em âmbito nacional.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O cerne desta pesquisa se encontra na união de duas vertentes, VPPs e o uso de *blockchain* associado a este tipo de sistema, que estão sendo pesquisadas e aplicadas no setor de energia elétrica em âmbito internacional. Desta maneira, este trabalho busca responder um questionamento central: existe possibilidade da implantação de sistemas de VPP dentro do contexto da MMP e como a tecnologia *blockchain* poderia auxiliar esta implementação?

1.2 JUSTIFICATIVA E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A utilização das VPPs está em crescimento no cenário internacional, mostrando a importância do uso deste tipo de ferramenta no setor elétrico. Porém, no território nacional as iniciativas são escassas e não são claros os limitantes para utilização deste modelo, deixando em aberto questões que podem ser investigadas e contribuir para a inserção deste tipo de solução como parte da modernização do sistema de energia elétrica em caráter nacional.

A expectativa do aumento gradual da presença de agregadores no futuro do mercado brasileiro, como indicado no Plano Decenal de Expansão da Energia 2029 (PDE 2029), este tipo de aplicação pode trazer contribuições para a segurança energética, modelos para precificação de energia de acordo com a composição de fontes utilizadas, novos modelos de venda de energia e remuneração para *prosumers*¹ assim como a flexibilidade do uso de recursos, acompanhando o comportamento e previsões da demanda.

Entretanto, a inserção das VPPs depende de critérios de regulação, aspectos tecnológicos e de viabilidade econômica. Os modelos de agregação precisam ser reconhecidos e regulados pelo setor, permitindo sua aplicação de forma não abusiva ou com benefícios indevidos por falta de regras claras. Na dimensão tecnológica, a infraestrutura nacional deve permitir o surgimento deste tipo de modelo, através da digitalização e uso de tecnologias emergentes, como é o caso do *blockchain*, possibilitando a modernização do setor elétrico.

¹ *Prosumer*, prosumidor em português, corresponde aos consumidores que são capazes de gerar energia em sua unidade, compreendendo seu consumo ou injetando o excedente na rede elétrica de distribuição.

Essa evolução permite um mercado com maior transparência e seguro nos aspectos operacional e comercial, enquanto torna possível o surgimento de novos modelos de negócio. Os resultados obtidos com a investigação destas vertentes podem permitir a construção de um arcabouço que auxilie os planejadores, concessionárias e outras empresa na adoção e uso deste tipo de tecnologia, colaborando para a modernização do setor.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é verificar a possibilidade de adoção do sistema de VPP utilizando a tecnologia *blockchain* e compreender os possíveis modelos de operação utilizando esta tecnologia. Delimitando um cenário que compreenda o contexto nacional, utilizou-se a (MMP) como um recorte regional. Esta região se apresenta como um recorte interessante, uma vez que seu consumo de energia local representa um percentual significativo dentro do sistema nacional, enquanto a infraestrutura dos municípios apresenta uma diversificação relevante para averiguações em diferentes cenários.

Dentro deste objetivo geral, os objetivos específicos estão definidos, conforme explicitado a seguir:

- Verificar a existência de modelos e arquiteturas de uso da tecnologia que sejam mais adequadas ao cenário nacional, utilizando como base casos internacionais;
- Investigar a viabilidade do uso de VPP com base em critérios técnicos;
- Desenvolver um modelo de VPP que possa ser aplicado e replicado na MMP, respeitando as características do setor elétrico brasileiro e dos limitantes encontrados durante a pesquisa.

1.4 METODOLOGIA

O método de pesquisa utilizado neste trabalho se centrou na aplicação do *Design Science Research* (DSR), focado em projetos orientados a resolução de problemas, permitindo a criação e avaliação de artefatos de forma rigorosa. Utilizou-se o roteiro proposto por Dresch et al. (2015), de forma adaptada, para a condução desta pesquisa. A Figura 1.2 representa o fluxo do trabalho adotado.

Figura 1.1 – Etapas do *Design Science Research*.

Fonte: Autor. Adaptado de Dresch et al.(2015)

Uma vez o problema identificado e bem definido, como explicitado anteriormente na justificativa para esta pesquisa, as etapas posteriores seguem conforme o fluxograma apresentado.

1.4.1 Revisão da Literatura

Inicialmente foram realizadas as etapas de revisão bibliográfica e conscientização do problema, investigando o estado da arte da área e os pontos ainda em aberto relacionados ao problema.

Por se tratar de uma pesquisa multidisciplinar, realizou-se o levantamento e revisão em duas frentes distintas, antes de unificá-las. Inicialmente buscaram-se nas bases de dados de trabalhos científicos trabalhos que abordam a temática de VPP. Em um segundo momento, foram levantados os materiais relacionados a tecnologia *blockchain*, de forma generalista e procurando compreender detalhes de seu funcionamento. Em uma última etapa, foram levantados trabalhos que apresentam aplicações no setor de energia elétrica

de forma introdutória, para então, investigar trabalhos que tratem de plataformas de VPPs que utilizam a tecnologia *blockchain*.

Como mencionado, esta dissertação apresenta um trabalho que investiga a unificação de dois temas, que estão em plena evolução por caminhos distintos, por isso se torna importante conhecer o estado da arte de ambos. Enquanto do ponto de vista acadêmico de fornecer base para novas pesquisas, este trabalho pode ser de interesse para públicos distintos.

O público oriundo de temas focados no setor de energia, pouco familiarizado com temas relacionados a tecnologias emergente, pode encontrar nesta dissertação um material que permite compreender a tecnologia *blockchain* e suas possíveis aplicações para a área de energia. Entretanto, o público associado a área de Tecnologia da Informação pode desconhecer alguns detalhes do setor de energia, quanto a temática de VPP. Desta forma, a revisão adotada permite uma leitura de forma complementar onde se possa entender como a ferramenta tecnológica se aplica a um problema setorial, visão importante para a transição energética, tão discutida nos bancos acadêmicos e no mercado de forma geral.

1.4.2 Identificação de artefatos e configuração de classes de problemas

A identificação dos artefatos e classes de problemas se utilizaram do levantamento de dados e o mapeamento da MMP, utilizando essas informações como cenário regional para aplicação e o estudo dos modelos que se encaixam dentro das características do setor elétrico nacional, sob a perspectiva da inclusão de agregadores.

1.4.3 Proposição, projeto, desenvolvimento e avaliação dos artefatos

Uma vez definidos os artefatos que podem ajudar na investigação, a etapa seguinte consistiu na elaboração dos artefatos com base nos levantados para problema, utilizando como referências os artefatos e as classes de problemas genéricos, encontrados na etapa anterior.

Após a definição dos artefatos as etapas seguintes compreenderam o projeto, desenvolvimento e avaliação dos artefatos. Com este conjunto de etapas foram estabelecidos os melhores artefatos com base na avaliação realizada.

1.4.4 Explicitação das aprendizagens

A metodologia definida por DRESCH et al. (2015) considera a explicitação das aprendizagens obtidas com este desenvolvimento, documentando os pontos de sucesso e de falhas ocorridos durante o processo. Esta dissertação se trata dessa explicitação, com todas as informações para a replicação dos procedimentos.

1.4.5 Conclusões e Generalização de Classes de Problemas

Finalizando a metodologia, todos os resultados obtidos foram organizados, permitindo apresentar conclusões e generalização dos resultados encontrados, construindo um arcabouço com informações que podem colaborar com o desenvolvimento de trabalhos futuros ou auxiliar na solução de problemas similares por outros pesquisadores.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação será composta por uma estrutura capitular, composta por seis tópicos que compreendem o desenvolvimento do trabalho. O primeiro, de caráter introdutório, compreende as informações apresentadas até este ponto, caracterizando o trabalho, seus objetivos, justificativas e métodos que foram empregados. O segundo capítulo apresenta o conceito de VPP e o estado da arte da área, através da revisão bibliográfica do assunto, demonstrando suas características, arranjos tecnológicos necessários e casos de uso em caráter internacional. Com este conhecimento, pode-se construir a base para explorar sua utilização e também conhecer os pontos importantes que devem ser considerados para o desenvolvimento do modelo posterior. O terceiro capítulo apresenta a revisão bibliográfica a respeito da tecnologia *blockchain*, abordando seu histórico, características e o seu estado da arte. São apresentados os exemplos de uso no setor elétrico e como sua integração pode ser realizada com modelos de VPPs, apresentando a importância da tecnologia e os requisitos para seu uso.

O capítulo quatro inicia a fase aplicada deste trabalho, agregando os levantamentos realizados a respeito da MMP, informações adicionais sobre a modernização e o futuro do setor elétrico nacional e finalizando com o levantamento de requisitos necessários para a inserção de uma plataforma de VPP. Estas definições e informações são os insumos necessários para o capítulo seguinte, onde são definidos e escolhidos os artefatos que podem apresentar soluções para este cenário. Ainda dentro desta etapa, os artefatos são projetados e avaliados, permitindo a construção do conhecimento através desta metodologia e finalizando o capítulo com a generalização dos problemas e explicitando todo o aprendizado obtido. Por fim, são apresentadas as conclusões obtidas com este desenvolvimento, considerações para futuras pesquisas e demais elucidações necessárias.

2 VIRTUAL POWER PLANTS

A adoção crescente de REDs se mostra uma tendência crescente, aumentando a complexidade operacional dos sistemas elétricos e modificando os paradigmas de geração, exigindo uma maior flexibilidade das redes elétricas (IRENA, 2018a). Sob o aspecto de sustentabilidade, as fontes de energia presentes neste novo modelo possuem baixa emissão de gases de efeito estufa (IRENA, 2020b), entretanto, dependem de características locais para uma maior eficiência. Os potenciais eólicos e solares no Brasil, por exemplo, são conhecidos através dos atlas desenvolvidos para mapear o potencial ao longo do país (NEIVA et al., 2017; PEREIRA et al., 2017), construídos com pesquisas e simulações realizadas por instituições nacionais. Estes documentos apresentam informações e mapas que podem ser analisados por empresas e pesquisadores, permitindo a identificação de locais onde a exploração do recurso natural se mostra mais eficiente para a conversão de energia.

Os projetos de novas unidades geradoras sempre são orientados por estudos similares, focados em cada tipificação de fonte geradora, para escolher as regiões que favorecem a tecnologia adotada, permitindo a viabilidade econômica da geração e o melhor aproveitamento do recurso explorado. Outra característica inerente é a intermitência dos REDs, adicionando outro fator desafiador para operação, exigindo um acompanhamento em tempo real da demanda exigida e das fontes disponíveis para ofertar a energia requerida. Estas características abriram espaço para o surgimento e crescimento da figura dos agregadores (BURGER; CHAVES-ÁVILA, 2016). Estas entidades atuam dentro do setor de energia elétrica buscando explorar novos modelos de negócio, operando portfólios que agrupam fontes de geração distribuída, coordenando esta estrutura de forma complementar e atuando no fornecimento de forma única (BURGER; CHAVES-ÁVILA, 2016; IRENA, 2019a).

Realizar a gestão de fontes de geração de naturezas diferentes, com intermitências e capacidades de geração distintas apresenta uma enorme complexidade. Ademais, novos elementos são adicionados continuamente nas redes elétricas, motivados pela eletrificação através da transição energética, como sistemas de armazenamento de energia (SAE) e veículos elétricos (VE).

A perspectiva contínua de inserção de elementos que operam de forma distribuída, adiciona complexidade na gestão, ao mesmo tempo que abre caminho para novos modelos

de negócio. A alocação física em pontos geograficamente distintos e os comportamentos característicos de cada elemento, trazem consigo a descentralização da informação, onde cada elemento deve estar em constante comunicação com os gestores, o mercado e também com os agregadores, tornando a digitalização um dos caminhos para a modernização ainda maior do setor elétrico (IEA, 2017; IRENA, 2020b). Esta troca de informações permite a realização de previsões de geração, acompanhamento das condições locais do ambiente onde a fonte está inserida, enquanto monitora as variáveis de mercado, como demanda e preço.

A digitalização, um dos pilares da transição energética, permite a criação de novas soluções tecnológicas para esta complexa dinâmica, que permeará as redes elétricas, exigindo que agregadores recebam informações contínuas de mercado, concessionárias de transmissão e distribuição, além das unidades geradoras do seu portfólio (IRENA, 2019a, 2020a; MIT ENERGY INITIATIVE, 2015b). Os desafios impostos para este modelo de negócio que envolvem os agregadores despertaram um crescente interesse por sistemas que possibilitam a gestão diante estas características (IRENA, 2019a), conhecidos como *Virtual Power Plants* (VPP) (BARINGO; RAHIMIYAN, 2020; SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011a; YOU et al., 2009).

A temática sobre sistemas de VPPs apresenta um interesse crescente não apenas no mercado de energia e entre agregadores, mas também no segmento de pesquisa. Quando analisadas as informações sobre publicações, através de uma busca realizada com auxílio do sistema Scopus², observa-se uma quantidade crescente de trabalhos como mostra o Gráfico 2.1, totalizando 1602 artigos publicados entre os anos de 1999 e 2020. A inserção dos RED, o amadurecimento e evolução de diversas tecnologias e redes de comunicação, apresentam um caminho factível para este tipo de solução, o que se traduz em um campo prolífico de pesquisas e projetos.

² O Scopus é um banco de dados com mais de 16.500 revistas científicas catalogadas, servindo como base para pesquisa de artigos científicos e oferecendo ferramentas para a análise de dados.

Gráfico 2.1 – Quantidade de artigos publicados sobre a temática de VPP por ano

Fonte: Autor. Banco de dados: Scopus (2020)

Analizando as informações sobre os dez países que mais publicaram artigos com esta temática, apresentados no Gráfico 2.2, observa-se uma predominância grande da China com a presença de muitos países europeus, contudo, ausência do Brasil. Dentro de todo o conjunto de dados investigados, o Brasil está na 33ª posição, com apenas 9 artigos publicados, contra os 418 publicados pela China. Todavia, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) acredita que a modernização do sistema elétrico brasileiro, no horizonte de 2029, permita o surgimento dos agregadores e o avanço na digitalização do sistema elétrico.

Gráfico 2.2 – Os dez maiores produtores de artigos na temática de VPP

Fonte: Autor. Base de dados: Scopus (2020)

A expectativa do avanço da digitalização do setor de energia elétrica, uma maior abertura do mercado no futuro e a necessidade crescente de soluções para gerenciamento de REDs em território nacional, demonstra a necessidade de uma maior investigação da temática de VPPs. Este capítulo tem por finalidade realizar a compreensão deste tipo de tecnologia, investigando o estado da arte deste tipo de sistema, seu funcionamento, componentes e casos de aplicação presentes no mundo atualmente.

2.1 O CONCEITO DE VPP

A temática de VPPs tem como marco inicial o evento *Symposium on the Virtual Utility* realizado em 1996 na cidade de Saratoga Springs, no estado de New York nos Estados Unidos. Este evento apresentou o conceito de *Virtual Utility* (VU), o qual definia uma associação de empresas do setor de energia elétrica que poderiam fornecer energia para os consumidores, sem de fato serem as proprietárias dos ativos presentes no sistema de geração e sem a necessidade de serem fisicamente um gerador (AWERBUCH; PRESTON, 1997). O conceito se apresentava com uma premissa válida diante das tendências correntes naquele momento. A entrada de REDs no setor energético americano, a abertura do mercado de energia elétrica e a inserção de TICs, com a crescente promessa da Internet conectado locais geograficamente distantes se mostrava o cenário ideal. As projeções futuras também tornavam atrativa esta abordagem, com um aumento com a preocupação ambiental através da inclusão de fontes de energia limpa e a redução do custo de energia produzida por estas fontes. A desmaterialização também se mostrava uma tendência, viabilizando economicamente o conceito, migrando o setor de geração dos projetos de grandes usinas para a economia de escala na adoção de tecnologias menores de geração (AWERBUCH; PRESTON, 1997). Estas mudanças, contudo, dependiam da evolução tecnológica, da mudança organizacional do mercado e das relações entre empresas do setor de energia elétrica com os consumidores finais. O conceito resolvia em teoria alguns limitantes e permitia uma nova maneira de olhar o mercado, porém era necessária uma maior maturidade tecnológica para as primeiras aplicações, o que se mostrou o limitante técnico à época.

Somente no ano de 2003 artigos voltaram a demonstrar investigações nesta temática, onde dois trabalhos apresentaram o conceito de VPP. As ideias eram similares a proposta de VU e as motivações surgiram pelo aumento crescente da inclusão de fontes

de Geração Distribuída (GD) nos sistemas elétricos alvos das pesquisas. Dielmann & Van Der Velden (2003) apresentaram um artigo abordando uma possível resolução para a redução de custo dos projetos de geração das companhias do setor de energia elétrica, porém mantendo um baixo valor da energia comercializada, com base no cenário de energia elétrica alemão. Enquanto o trabalho de Yokoyama & Nara (2003) investigava saídas para a flexibilização da regulamentação e abertura do mercado de energia japonês, vendo na GD uma alternativa atrativa, considerando as características de contribuição para prevenir o aquecimento global e a redução de perdas com a geração localizada próxima a demanda.

Ambos os estudos avaliaram a inserção e composição de fontes de GD em seus locais de estudo, onde chegaram à conclusão de que o uso deste tipo de tecnologia deve ser realizado através da composição de um conjunto de diferentes fontes de geração, aproveitando a eficiência de cada fonte e a complementariedade entre elas. A combinação de diferentes fontes permitia a mitigação da intermitência, reduzindo assim o impacto desta característica inerentes à algumas fontes. A gestão da geração, entretanto, deveria ser realizada por um único operador, combinando a geração das fontes diante da demanda exigida, tornando economicamente eficiente o fornecimento. Dielmann & Van Der Velden (2003) são mais descritivos quando a sua visão de gestão, onde cada conjunto deve ter um sistema de gerenciamento local (Local Management System, LMS), o qual seria responsável pela comunicação com o sistema de gerenciamento de energia (Energy Management System, EMS), como apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Representação básica inicial de uma VPP

Fonte: Autor. Adaptado de Dielmann & Van Der Velden(2003)

Yokoyama & Nara (2003) de forma um pouco mais generalista, aprofundam a abordagem, considerando como seria o futuro do sistema elétrico. Dentro desta abordagem, acreditam em uma maior descentralização do que a prevista por Dielmann & Van Der Velden (2003), assim como uma maior penetração das TICs. Com esta abordagem, foram propostos modelos, considerando sistemas comerciais que estavam sendo desenvolvidos por empresas privadas como ABB³ e em ENCORP⁴ e o instituto de pesquisa EPRI⁵. Os modelos propostos levaram em consideração a comunicação entre agentes (concessionárias, governo, clientes), o fornecimento de energia e a comunicação entre unidades de GD, formando através do sistema, um gerenciamento das fontes de energia e ajustando a oferta de acordo com a demanda e o mercado, envolvendo a informação dos agentes. Estes dois estudos trataram de forma inicial e generalista o assunto de VPP, considerando a utilização da tecnologia da época. Posteriormente a estes estudos, a evolução tecnológica permitiu uma definição mais clara do que seriam estes sistemas e como poderiam evoluir acompanhando o desenvolvimento do setor de energia e as necessidades de mercado.

As características atuais de uma VPP estão associadas ao aspecto físico e digital deste tipo de sistema. O componente físico está associado com a agregação de diversas fontes de GD, despacháveis e não despacháveis, alocadas na mesma planta física ou em regiões geograficamente diferentes mas controladas de forma conjunta (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011a; YOU et al., 2009). O componente digital está apoiado em sistema de software e TICs, que permite a troca de informações entre mercado, Operadores do Sistema de Distribuição (OSDs), Operadores do Sistema de Transmissão (OSTs), cargas flexíveis e as unidades geradoras (PASETTI; RINALDI; MANERBA, 2018), como apresentado na Figura 2.2. As Ferramentas de software permitem ainda a realização de previsões (GHAVIDEL et al., 2016), agendamento de despacho e a possibilidade da operação através de um Centro de Controle e Operação (CCO), similar a uma usina tradicional (BURGER; CHAVES-ÁVILA, 2016; IRENA, 2017, 2019a).

³ ABB – <http://www.abb.com>

⁴ Empresa americana, focada em desenvolvimento de hardware e software para sistemas distribuídos.

⁵ Instituto de pesquisa americano especializado no setor de energia elétrica, responsável pelo desenvolvimento de pesquisas e ferramentas que auxiliam toda a cadeia de fornecimento do setor elétrico.

Figura 2.2 – Representação genérica de uma VPP nos modelos atuais

Fonte: Próprio Autor.

2.2 A DEFINIÇÃO DE VPP

As definições de VPP foram muito diversas durante a evolução do conceito, variando com o tipo de estudo realizado ou qual a característica era investigada (ADU-KANKAM; CAMARINHA-MATOS, 2018). Inicialmente as VPPs foram definidas como um instrumento de agregação de fontes de GD distribuídas através de uma rede, formando um portfólio flexível para venda de energia de serviços no mercado (ANDERSEN et al., 2009; DIELMANN; VAN DER VELDEN, 2003; SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011b). Estas definições cobriam o aspecto físico e comercial, indicando a compreensão que uma VPP seria uma entidade trabalhando virtualmente como uma usina de geração para o mercado, enquanto fisicamente seu portfólio não seria composto apenas de uma unidade geradora, mas sim de outras unidades, acompanhando ainda o conceito de *Virtual Utility*. Posteriormente esta definição foi complementada, agrupando outras características às VPPs com base nas tecnologias existentes. Desta maneira, uma VPP poderia ser então dotada de sistemas de Resposta a Demanda (RD) (PASETTI; RINALDI; MANERBA, 2018), previsão (carga, geração e preço) e modelos de otimização de despacho (BARINGO; RAHIMIYAN, 2020; YANG et al., 2019), além de incorporar ativos como veículos elétricos, cargas controláveis e sistemas de armazenamento (ADU-KANKAM; CAMARINHA-MATOS, 2018; AVILA et al., 2018; RAAB et al., 2011).

Com estas visões distintas, contendo aspectos complementares, a definição de Adu-Kankam & Camarinha-Matos (2018) se encontra a mais adequada, embora não tão descritiva quanto a detalhes técnicos:

Uma VPP é uma entidade virtual que envolve várias partes interessadas e valorizando tecnologias heterogêneas *multi-site* descentralizadas, formadas pela agregação de fontes de energia distribuídas despacháveis⁶ e não despacháveis e sistemas de armazenamento de energia, incluindo veículos elétricos e cargas controláveis. É apoiado por tecnologia de informação e comunicação para formar o equivalente a uma única usina, virtualmente, com capacidade de gerenciar e coordenar suas operações, garantindo poder e fluxo de informações entre seus *stakeholders*, a fim de minimizar custos de geração, maximizar lucros e aumentar a participação na demanda programas de resposta, bem como o comércio no mercado de eletricidade. (ADU-KANKAM; CAMARINHA-MATOS, 2018).

A definição compreende o caráter de agregação das fontes descentralizadas e da presença no mercado, como apenas uma entidade, ainda que com um portfólio variado de ativos de geração. Se mostra ainda completa ao associar as TICs como elemento de coordenação e gerenciamento, uma vez que a separação geográfica das fontes, as informações de geração e de demanda, todos sistemas de automatismo e comunicação com o mercado se torna possível com estes elementos.

2.3 TIPO DE VPPS

As VPPs podem ser caracterizadas primariamente em dois tipos, comerciais (*Commercial Virtual Power Plant*, CVPP) e técnicas (*Technical Virtual Power Plant*), diferindo em suas finalidades. Conceitualmente, pode-se representar estes dois tipos, de forma separada como mostrado na Figura 2.3, indicando o fluxo de comunicação com as entidades de acordo com o tipo de VPP.

⁶ As fontes de energia despacháveis são tecnologias de geração que podem entrar em operação quando solicitadas, entregando rapidamente os níveis desejados de energia e operando sem o risco de interrupções. Exemplos deste tipo de fonte são as usinas termoeletricas e hidroeletricas com reservatório.

Figura 2.3 – Representação genérica de uma VPP com as separações entre TVPP e CVPP.

Fonte: Adaptado de ZAJC; KOLENC; SULJANOVIĆ (2019)

2.3.1 Technical Virtual Power Plant – TVPP

As TVPPs possuem duas características principais que as distinguem das CVPPs quanto ao seu escopo de atuação. A primeira característica está associada a localização dos REDs, os quais se encontram na mesma área geográfica (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011b). A segunda característica está associada a operação, uma vez que as TVPPs normalmente atendem sistemas locais, próximos às unidades geradoras (PUDJANTO; RAMSAY; STRBAC, 2007; SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011b). A TVPP tem como serviços e funções principais, contribuir com o gerenciamento local junto ao OSD, enquanto pode colaborar com o balanceamento do sistema do OST (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011b; ZAJC; KOLENC; SULJANOVIĆ, 2019).

Ao receber informações detalhadas da rede local, a TVPP se torna capaz de fornecer serviços ancilares utilizando REDs, de acordo com o perfil de operação da rede e com o menor custo possível, uma vez que conhece o comportamento de geração e o custo de cada RED pertencente ao seu portfólio. Dentro desta concepção, os OSDs que utilizam o

conceito de TVPP podem ser considerados como operadores de Rede de Distribuição Ativa (RDA) (PUDJANTO; RAMSAY; STRBAC, 2007).

As TVPPs não possuem interface com o mercado de energia elétrica, ao contrário das CVPPs, portanto são utilizadas como parte da infraestrutura de gerenciamento dos OSD e OSTs. Contudo, a implementação das TVPPs, assim como das CVPPs, pode mudar, caso a modernização, separação e descentralização crescente do setor, exijam novas funções ou regulações (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011a).

2.3.2 Commercial Virtual Power Plants – CVPPs

As CVPPs são uma representação de um portfólio de REDs, com informações sobre suas características operacionais e o custo de operação para cada ativo de geração, atuando diretamente no mercado, comercializando a energia gerada por seu portfólio (PUDJANTO; RAMSAY; STRBAC, 2007; SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011b). Através delas, agregadores e varejistas conseguem ter visibilidade e operar com capacidade flexível no mercado de energia elétrica (ZAJC; KOLENC; SULJANOVIĆ, 2019) da mesma maneira que uma usina geradora conectada a transmissão (PUDJANTO; RAMSAY; STRBAC, 2007). As CVPPs têm como funções e serviços a negociação no mercado atacado de serviços, balanceamento de carteiras de negociação e a prestação de serviços ancilares para os OSTs.

Quando observado da perspectiva do gerador, os REDs pertencentes ao portfólio de uma CVPP minimizam os impactos associados a uma operação isolada no mercado, onde sua competitividade pode ser prejudicada. Se tornando fornecedor de energia da uma CVPP, a plataforma pode utilizar seu fornecimento como garantia de recurso para fechar contratos maiores de fornecimento, uma vez que a agregação de entidades de geração permite a oferta de um montante de energia maior do que o ofertado pelos pequenos produtores de forma desagregada. O gerador por sua vez pode reduzir sua ociosidade, com um contrato constante de fornecimento, otimizando seu retorno financeiro através da comercialização realizada pela CVPP (PUDJANTO; RAMSAY; STRBAC, 2007).

Uma empresa que atue como CVPP pode compor seu portfólio com qualquer quantidade de REDs, enquanto os geradores individuais têm liberdade para avaliar as condições e diferenciais ofertados por cada CVPP, escolhendo qual se mostra a melhor

opção para representá-lo no mercado atacadista e no TVPP (PUDJANTO; RAMSAY; STRBAC, 2007; SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011b).

As CVPPs são indiferentes a aspectos de operação das redes de distribuição, levando em consideração apenas os aspectos comerciais, por este motivo, consideram que as redes de distribuição são estáveis. As funcionalidades básicas das CVPPs são a otimização e programação da produção com base na demanda prevista e no potencial e geração através do seu portfólio. Quando existem discrepâncias entre estas informações, podem ser inseridos ao sistema dados de Recursos de Resposta à Demanda (RRD). (PUDJANTO; RAMSAY; STRBAC, 2007; SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011b).

Quando a CVPP atua no mercado de energia comercializando diretamente com os OSTs, ela se torna responsável por repassar informações sobre o REDs para a estrutura de TVPP. O TVPP por sua vez, atua no gerenciamento dos REDs indicando as restrições da rede local, bem como agrega o REDs aos parâmetros da rede local para apresentação no nível de transmissão. A CVPP otimiza a posição do seu portfólio em relação às variações de mercado e repassa os horários de fornecimento RED e parâmetros operacionais ao TVPP. (PUDJANTO; RAMSAY; STRBAC, 2007; SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011b).

2.4 ESTRUTURA DE UMA VPP

Investigar a estrutura de uma VPP de modo mais detalhado permite compreender os mecanismos de funcionamento e como eles se integram. Embora não exista um padrão definido quanto a composição de uma VPP, muitos componentes são similares desde a os primeiros artigos apresentando as concepções iniciais, como mostrado genericamente na figura 2.4. Partindo de um aumento no nível de detalhamento desta representação genérica, analisando outros trabalhos que tratam tecnicamente da estruturação de VPPs (JOHNSON et al., 2017; ZAJC; KOLENC; SULJANOVIĆ, 2019), se torna possível definir um modelo de partida para ser avaliado.

Porém, a figura 2.5 apresenta um modelo mais detalhado dos componentes de uma VPP, separando por camadas cada uma das entidades presentes neste tipo de sistema,

formando uma arquitetura mais moderna e completa. Cada componente será descrito a seguir quanto ao estado da técnica atual.

Figura 2.4 – Arquitetura de um sistema de VPP

Fonte: Autor. Adaptado de ZAJC; KOLENC; SULJANOVIĆ (2019).

Figura 2.5 – Representação detalhada de uma VPP.

Fonte: Autor.

2.4.1 Sistemas de Geração, Armazenamento e Cargas Controladas

A agregação de REDs, formando um portfólio de fontes, forma o principal componente de uma VPP, seu sistema de geração. A possibilidade de gerenciar fontes de diversas naturezas, em locais geograficamente diferentes e otimizando sua operação em conjunto, apresenta o diferencial das VPPs em relação às usinas convencionais (GHAVIDEL et al., 2016). As intermitências e incertezas naturais de alguns destes recursos, oferecem desafios operacionais, uma vez que não são despacháveis, podem apresentar instabilidades de frequência e tensão, reduzindo assim a confiabilidade do fornecimento (SADEGHIAN et al., 2020). A utilização de um sistema de VPP, por outro lado, permite otimizar a operação dos recursos que compõe o portfólio do seu sistema de geração, reduzindo efeitos de intermitência, corrigindo instabilidades, entregando a energia contratada com confiabilidade e obtendo o melhor retorno financeiro (OTHMAN; HEGAZY; ABDELAZIZ, 2017; YANG et al., 2019).

Um portfólio de geração de uma VPP pode ser composto por diversas tecnologias de geração, despacháveis ou não, que garantem flexibilidade ao sistema, uma vez que são conhecidos seus perfis de operação (BARINGO; RAHIMIYAN, 2020; SADEGHIAN et al., 2020) e podem ser utilizados sistemas de previsão, com utilização de dados de estações meteorológicas e séries temporais dos dados de geração de cada RED (MACDOUGALL et al., 2016; MOUTIS; HATZIARGYRIOU, 2014). As seguintes tecnologias de REDs que podem ser consideradas para compor o sistema de geração de uma VPP (SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011a; STEINIGER, 2017):

- Cogeração
- Biomassa e Biogás
- Microturbinas a gás natural
- Gerador Diesel
- Pequena Central Hidrelétrica (PCH)
- Sistemas Eólicos
- Sistemas Fotovoltaicos

Outra opção de RED que pode ser associado a sistemas de VPP são os *prosumers*, uma vez que em países com mercados livres, a energia produzida ou armazenada pelo

consumidor pode ser vendida, gerando retorno financeiro (PASETTI; RINALDI; MANERBA, 2018). Neste cenário a VPP atua como uma entidade única perante o mercado, cumprindo a regulamentação do setor, dando visibilidade e trazendo benefícios aos *prosumers*, uma vez que, agregando diversos geradores, pode oferecer um montante de energia para venda que atenderia grandes consumidores ou competindo no preço da energia para venda a outros consumidores residenciais (SADEGHIAN et al., 2020; ZHOU; YANG; SHAO, 2016).

Os SAEs podem ser incluídos ao portfólio de uma VPP, conferindo diferencial operacional ao transferir energia de um período horário para outro (GHAVIDEL et al., 2016). Alguns sistemas apresentam um retorno financeiro com este modo operacional, uma vez que podem ser carregados em um horário em que o preço da energia é baixo, comercializando posteriormente, no momento que preço da energia esteja mais alto (SADEGHIAN et al., 2020). Uma outra opção da utilização dos SAEs, são configurações híbridas, formando um conjunto com fontes não despacháveis ou estocásticas, como eólicos ou fotovoltaicos, equilibrando a geração com a demanda durante um determinado período de tempo ou mesmo combinações diferentes de tecnologias de armazenamento (GHAVIDEL et al., 2016; POLGARI et al., 2017).

As seguintes tecnologias podem ser utilizadas como SAE para a integração com sistemas de VPP, como parte de seu portfólio (GHAVIDEL et al., 2016; SABOORI; MOHAMMADI; TAGHE, 2011a):

- Central Hidroelétrica Reversível
- Armazenamento de Energia em Ar Comprimido
- Armazenamento de Energia em *Flywheel*
- Armazenamento de Energia em Supercondutores Magnéticos
- Armazenamento de Energia em Baterias
- Armazenamento de Energia em Supercapacitores
- Célula Combustível de Hidrogênio

As cargas flexíveis (CF) correspondem às cargas que podem ser ajustadas automaticamente, de acordo com a variação de preço ou pagamento de incentivos, a

dependem do horário (GHAVIDEL et al., 2016). Com o advento da Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT), permitindo a conexão de produtos e equipamentos à internet e possibilitando a troca de dados, as novas gerações de cargas na indústria, sob o paradigma da indústria 4.0, ou residenciais e de comércio, sob os paradigmas de *smart home* e *smart building*, podem estar em conexão direta com sistemas de VPP (BEHI et al., 2020). Desta maneira, as CFs podem receber remotamente um comando autorizado ou então um sinal de preço, utilizando um sistema de precificação dinâmica (BEHI, BENAZ et al., 2020; GHAVIDEL et al., 2016). Este tipo de operação também é conhecido como Resposta da Demanda (RD).

A RD pode ser classificada em dois tipos: baseada em preços e baseada em incentivos. O sistema baseado em preços refere-se à mudança no perfil de uso da energia associado às alterações no preço ao longo das horas do dia. Deste modo, o consumidor desloca o uso da energia para momentos em que o preço é mais baixo e diminui a utilização nos instantes em que o preço está mais caro. Os sistemas baseados em incentivos oferecem aos consumidores incentivos financeiros para redução da demanda em momentos críticos no sistema, quando a oferta esteja escassa ou quando há queda da confiabilidade. Esses últimos são produtos despacháveis, ou seja, são acionados através de uma ordem de despacho do operador (BEHI, BENAZ et al., 2020; EPE, 2019b; PASETTI; RINALDI; MANERBA, 2018).

Os VEs estão sendo inseridos no sistema elétrico, operando geralmente em primeiro momento como cargas, contudo podem ser utilizados como elementos de armazenamento móvel, possibilitando que sejam associados às VPPs, trazendo benefícios e desafios quanto a sua operação, devido sua flexibilidade (ALAHYARI; EHSAN; MOUSAVIZADEH, 2019; GHAVIDEL et al., 2016). A grande variedade de modelos de VE apresenta uma grande fonte de incerteza na gestão do armazenamento e cargas disponíveis para a venda, uma vez que as capacidades de baterias, tempos de carga e descarga, podem variar (GHAVIDEL et al., 2016; IEA, 2018). Estas informações são essenciais para a previsão de oferta de energia.

Os sistemas de *Vehicle-to-Grid* (V2G), *Vehicle-to-Home* (V2H) e *Vehicle-to-Building* (V2B) devem permitir o monitoramento e gestão, através de uma comunicação confiável e segura com a VPP (GAO et al., 2014), uma vez que diferente dos SAE

dedicados ao sistema de geração, os VEs devem ser carregados de acordo com a requisição do usuário. Este comportamento acrescenta um fator de imprevisibilidade do ponto de vista operacional, uma vez que os VEs podem ser carregados a qualquer hora do dia, também podem ser usados como armazenamento em horários variados e ainda podem ter o sistema de carga ou recarga interrompidos. Por estes motivos, a inclusão de VEs e sua integração com as VPPs depende de sistemas de *smart charging* e RD (KAHLEN; KETTER; VAN DALEN, 2018). Contudo, a inserção de VEs, quando bem orquestrada, oferece uma grande flexibilidade para a VPP, uma vez que disposição de SAEs em variadas regiões permite a entrega de energia à rede com baixas perdas (GAO et al., 2014; KAHLEN; KETTER; VAN DALEN, 2018).

2.4.2 Redes Elétricas Inteligentes

A integração com o *Smart Grid* (SG) se mostra outro componente importante, sendo responsável pela comunicação entre a VPP e os elementos presentes na rede elétrica. O conceito de SG, também denominado de Redes Elétricas Inteligentes (REI) em português, está associado a integração de TICs ao sistema de energia elétrica tradicional (KAGAN et al., 2013; MOMOH, 2012) permitindo uma mudança nos paradigmas de gestão de processos e operação das concessionárias.

Embora parte das redes de distribuição apresentem um determinado grau de automação, traduzido em uma inteligência limitada a processos de operação, as REIs trazem consigo propostas de soluções que podem agregar valor para as concessionárias, como aumento da confiabilidade, segurança e eficiência da rede ou otimização dinâmica das operações entre fontes geradores e a distribuição para o consumidor final (BORLASE, 2013; CGEE, 2012; RIVERA; ESPOSITO; TEIXEIRA, 2013).

Atualmente, com a inclusão dos REDs, modificação de comportamento dos consumidores, se tornando *prosumers*, a presença de novos componentes como VEs, sistemas de RD e SAE atrás do medidor, as REIs se tornam uma ferramenta essencial (MELIANI et al., 2020). A comunicação bidirecional presente nas REIs, realizada em tempo real, permite a troca de informações entre cada novo componentes da rede e o sistema de operação. A digitalização do fluxo de troca de dados entre as entidades presentes dentro do sistema elétrico, permite monitorar e controlar a infraestrutura como um todo, com potenciais benefícios para o sistema (KAZIČKOVÁ; BUHNOVA, 2016).

Os principais componentes das REIs são os medidores inteligentes, sensores, sistemas de monitoramento e controle, além de tecnologias de comunicação, os quais possibilitam a troca de dados entre as *stakeholders* do setor elétrico. Estes componentes formam a denominada Infraestrutura de Medição Avançada (IMA). A medida que a descentralização do sistema elétrico avança, o surgimento de Micro Redes (MR) também se beneficiam dessa nova infraestrutura, permitindo novos modelos locais, sustentáveis e operando independente da produção de energia em larga escala (AL-TURJMAN; ABUJUBBEH, 2019; MELIANI et al., 2020). Este novo cenário permite o surgimento de VPPs locais, operando dentro de uma região específica ou permitindo a comercialização de energia entre duas comunidades distintas (MOURIK et al., 2019; VAN SUMMEREN et al., 2020).

A inserção dos medidores inteligentes junto as unidades consumidoras permitem uma ferramenta poderosa para a troca de informações entre a demanda e a concessionária, aprimorando a transação de energia. Os medidores e suas funcionalidades variam conforme objetivos da sua aplicação. Através da IMA, os medidores e a troca bidirecional de informações podem auxiliar na economia de energia, inserção de precificação dinâmica, controle de CFs, gerenciamento de interrupções, aumento na segurança, avaliação da qualidade de fornecimento (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010) e gestão que dependem da resposta à demanda e perfil de consumo de cada consumidor (AL-TURJMAN; ABUJUBBEH, 2019). Outras aplicações dos medidores inteligentes dentro da IMA envolvem detecção de furto de energia, estimação de estado do REI, localização de falha, gestão de interrupção, proteção de falha de alta impedância e operação em tempo real (CHAKRABORTY et al., 2021; KAGAN, 2013). Os medidores inteligentes devem se tornar um elemento essencial também no futuro da infraestrutura, com a integração das concessionárias de outros serviços, como fornecimento de água e gás, onde funcionaram como uma interface dentro deste cenário, permitindo novos modelos de negócio (STEWART et al., 2018).

Outros equipamentos estão sendo inseridos nas REIs, se beneficiando do avanço da tecnologia e aumento da capacidade de processamento, os quais estão essencialmente associados ao paradigma de IoT. Os sistemas de IoT permitem o acompanhamento em tempo real de sensoriamento, captura contínua de dados, controle e processamento local

através de *edge computing*, permitindo a execução de algoritmos de *machine learning* (AHMAD; ZHANG, 2021; HUANG et al., 2018). Esta inserção de aplicações possibilita uma análise mais detalhada de sistemas e locais, quanto ao seu perfil de consumo, possibilidade de programas de eficiência energética e gestão remota dos ativos conectados. O Quadro 2.1 apresenta algumas das possíveis aplicações de soluções baseadas em IoT de acordo com a área de utilização.

Quadro 2.1 – Aplicações de IoT nas áreas de energia elétrica, industrial, residencial e cidades inteligentes.

Área	Aplicação
Redes Elétricas	Comutação, proteção, energias renováveis conectadas à rede, medidores de qualidade de energia, compensadores, medidores de qualidade de energia, relés de proteção, indicadores de falha de linha, micro-redes, infraestrutura de medição avançada, etc.
Indústria	Sensores de ocupação, submedição, sistemas de controle de edifícios, medição de qualidade de energia, controlador de micro-rede, controles de alimentação de edifícios, sistemas de armazenamento de energia, controle de fator de potência e compensadores, automação de processos, medição de qualidade de energia, etc.
Residencial	Armazenamento térmico solar, painéis solares no telhado, aplicativos de inteligência, sistema de segurança, carregamento de veículos elétricos, geradores de backup, geo-fencing, armazenamento térmico solar e estações meteorológicas, etc.
Cidade Inteligente	Ônibus e informações de transporte público em tempo real para o público, iluminação pública, estacionamento inteligente, serviços comunitários de Wi-Fi, detecção de movimento e ocupação, publicidade interativa, semáforos automáticos, câmeras de vigilância, etc.

Fonte: (AHMAD; ZHANG, 2021)

A integração entre os dispositivos e entidades dentro do IMA tem como parte essencial a comunicação de dados, permitindo a conexão, coleta e sua transferência entre sistemas. As REIs de forma geral atendem extensas regiões geográficas, associadas a área sob a responsabilidade da concessionária de energia (AL-TURJMAN; ABUJUBBEH, 2019). A comunicação dentro deste cenário é realizada por uma combinação de sistemas cabeados e wireless, onde ambos devem atender requisitos de latência, largura de banda, segurança e confiabilidade, associados a tarefa executada pela IMA (WAN; ZHANG; WANG, 2019). O sistema de comunicação deve cobrir uma vasta região geográfica, com limitantes naturais, que dependem da presença de investimento em infraestrutura. Por este motivo, comumente vista como uma rede hierárquica, com arquitetura de três camadas. Estas três camadas são: Camada de Acesso, Camada de Distribuição e camada Principal, como exibido na figura 2.6.

Figura 2.6 – Arquitetura de três camadas de uma IMA

Fonte: Autor. Adaptado de (WAN; ZHANG; WANG, 2019)

A Camada de Acesso comporta as redes que permitem a conexão um grande número de dispositivos eletrônicos inteligentes (DEIs), com fluxos de informação em tempo real, os quais se comunicam diretamente com o medidor inteligente (WAN; ZHANG; WANG, 2019). Os medidores inteligentes, por sua vez, fazem papel de gateway para a troca das informações com a camada seguinte. Ainda dentro desta camada são encontradas as infraestruturas conhecidas como *Home Area Network* (HAN), *Industrial*

Area Networks (IAN) e *Business/Building Area Networks* (BAN), onde as descrições são apresentadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Redes presentes localmente nos consumidores finais e suas descrições

Sigla	Descrição
HAN	Este tipo de rede é projetado para receber a conexão e interconectar aparelhos elétricos inteligentes, como televisor, máquina de lavar, ar-condicionado e sistemas de gerenciamento de energia. Através desta rede são realizadas também os serviços de resposta à demanda, ligando e desligando os equipamentos de acordo com a tarifa elétrica. Esta rede está ligada diretamente ao conceito de <i>smart home</i> .
BAN	Esta infraestrutura é destinada para comunicação entre dispositivos alocados em edifícios e escritórios, como sistema de iluminação, sensores de presença nos ambientes e sistema de gerenciamento de energia. Como são construções maiores, a sua curva de carga é diferente da residencial, demandando outro tipo de gestão e a possibilidade de serviços direcionados ao setor. Este sistema de comunicação está relacionado diretamente ao conceito de <i>smart building</i> .
IAN	Esta rede é definida como a infraestrutura de comunicação e interconexão de dispositivos e máquinas presentes do ambiente industrial, de acordo com o setor de atuação. Podem agregar desde hardware tradicional de escritório (computadores e impressoras) até sistemas SCADA, Sistemas de Controle Distribuídos (SCD) e Controladores Lógicos Programáveis (PLC). A gestão de energia e estes sistemas estão relacionados diretamente com o conceito de Indústria 4.0 e <i>Industrial Internet of Things</i> (IIoT).

Fonte: Adaptado de MATTIOLI, R ; MOULINOS (2015).

A segunda camada, chamada Camada de Distribuição, compreende a rede que permite a interconexão e transferência de dados das redes locais (HAN, BAN, IAN) através da IMA e fornece suporte de comunicação para gerenciamento de dados coletados pela rede de distribuição. Todos estes componentes são interconectados ao *backbone* da REI, que será responsável por gerenciar este grande volume de dados. Esta camada ainda agrega redes especializadas que permitem comunicação com sensores, atuadores e equipamentos do sistema de energia. Estas redes são conhecidas como *Neighborhood Area Network* (NAN), *Field Area Network* (FAN). As redes do tipo FAN são destinadas para conexão de subestações de distribuição, alimentadores, transformadores, REDs, SAE, micro-redes e o CCO das concessionárias, enquanto as redes NAN podem ser

usadas alternadamente com a IMA, porém apenas com a tarefa de interconectar medidores inteligentes com a concessionária (MATTIOLI, R ; MOULINOS, 2015). Dentro desta camada, as subestações ainda contam com a sua própria *Local Area Network* (LAN), conectando o sistema SCADA local, DEIs, Unidade de Terminal Remoto (*Remote Terminal Unit*, RTU), Unidades de Monitoramento de Potência (*Power Monitoring Unit*, PMUs) e demais dispositivos. Estas subestações podem ser controladas e monitoradas remotamente, através da troca de dados entre a rede local conectada a uma FAN ou diretamente a uma rede de *backhaul*, cabeada ou sem fio (MATTIOLI, R ; MOULINOS, 2015).

A Camada Principal compreende a rede conhecida como *Wide Area Network* (WAN), interconectando as redes NAN, FAN e IMA através de um *backbone* de alta capacidade, entregando uma grande quantidade de dados adquiridos ao longo das outras duas camadas. Através da rede WAN a concessionária tem acesso aos dados da rede como um todo, monitorando o estado da rede, realizando operações necessárias e possibilitando armazenar esse dados (WAN; ZHANG; WANG, 2019). Os dados armazenados podem ser processados posteriormente, utilizando ferramentas de ciência de dados, *big data* e *machine learning*, possibilitando que a concessionária tire *insights* para otimização de sua operação, melhoria na prestação de serviço, verificação de furtos de energia, previsões de demanda e carga e até detecção de falhas ao longo da rede (IBRAHIM; DONG; YANG, 2020; SINGH; YASSINE, 2018). Ainda dentro desta camada se encontram os sistemas de comunicação dos OSTs, dada a extensão da infraestrutura de transmissão. Através da WAN, os OSTs podem controlar e monitorar remotamente o seus sistemas SCADA, Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System*, EMS) e o Sistema de Gerenciamento de Distribuição (*Distribution Management System*, DMS) (MATTIOLI, R ; MOULINOS, 2015).

As três camadas apresentadas diferem na área de cobertura que devem ser cobertas pelas tecnologias de comunicação. As redes HAN, BAN e IAN possuem dispositivos localizados dentro de um raio de centenas de metros, enquanto as redes NAN, FAN, IMA e WAN devem atender áreas de dezenas ou centenas de quilômetros (AL-TURJMAN; ABUJUBBEH, 2019; MATTIOLI, R ; MOULINOS, 2015). O volume de dados trafegados, velocidade, escalabilidade, segurança e os custos de cada tecnologia são pontos a serem observados. Atualmente, os sistemas de comunicação sem fio que tem se

apresentado como tendência, principalmente na camada de acesso e de distribuição, são do tipo *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN). As infraestruturas LPWAN, como *SigFox*, *Long Range* (LoRa) e *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT), tem apresentado uma crescente aplicação para aplicação *Machine-to-Machine* (M2M) e de IoT (AL-TURJMAN; ABUJUBBEH, 2019; WAN; ZHANG; WANG, 2019). A tabela 2.3 apresenta as tecnologias sem fio utilizadas atualmente, para cada tipo de rede, com sua velocidade e área de cobertura.

Tabela 2.1 - Tecnologias sem fio utilizadas em sistemas de comunicação de REIs.

Tecnologia	Protocolo	Data Rate	Área de Cobertura	Camada de Rede
Z-Wave	Z-Wave	40 kbps	30 m	HAN/BAN/IAN
Bluetooth	802.15.1	721 kbps	100 m	HAN/BAN/IAN
ZigBee	ZigBee	250 kbps	100 m	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
	ZigBee Pro	250 kbps	1600 m	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
WiFi	802.11x	2 - 600 Mbps	250 m	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
WiMAX	802.16	75 Mbps	100 m	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
Celular	GPRS	14.4 kbps	50 km	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
	2.5G	144 kbps	50 km	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
	3G	2 Mbps	50 km	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
	LTE	14 Mbps	50 km	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
	4G	100 Mbps	50 km	HAN/BAN/IAN FAN/NAN
NB-IoT	2G	14.4 kbps	10 – 100 km	FAN/NAN WAN
	4G	100 Mbps	10 – 100 km	FAN/NAN WAN
Wi-SUN	IEEE 802.15.4g	300 kbps	500 m – 5 km	FAN/NAN WAN
SigFox	SigFox	100 bps	30 - 50 km (Rural)	FAN/NAN

			3 - 10 km (Urbano)	WAN
LoRaWAN	LoRaWAN	50 kbps	10 - 15km (Rural)	FAN/NAN
			2 – 5 km (Urbano)	WAN
Satellite		1 Mbps	100 – 6000 km	WAN

Fonte: Adaptado de (AL-TURJMAN; ABUJUBBEH, 2019; WAN; ZHANG; WANG, 2019).

As tecnologias de comunicação sem fio possibilitam flexibilidade na comunicação entre equipamentos por não dependerem de uma infraestrutura física instalada ao longo do caminho que distancia os dispositivos. Contudo, devem existir mecanismo de contingência e redundância presentes nas REIs, principalmente em gargalos relacionados ao volume de dados trafegados. Os sistemas cabeados podem ser utilizados para adicionar segurança e resiliência dos sistemas, mantendo o sistema atuante e seguro (WAN; ZHANG; WANG, 2019).

A dependência das VPPs em relação ao uso de dados, utilizados para sua gestão e tomada de decisão operacional, evidencia a necessidade de uma boa infraestrutura de comunicação. Devido a sua estrutura descentralizada quanto aos REDs utilizados, informações que podem ser recebidas de sistemas de recarga de VE, RD, dos OSD e OST, a rede de comunicação deve ser bem definida, permitindo que os dados possam ser trafegados de forma contínua, resiliente e em tempo real, ou próximo dele. (REKIK et al., 2016). Outro ponto importante esta na utilização de boas praticas e normas de comunicação que regem a área das REIs, pois em algumas arquiteturas e composições do sistema, diversas entidades devem colaborar entre si (REKIK et al., 2016), de forma segura e garantindo a interoperabilidade dos sistemas (KAGAN, 2013; KOLENC et al., 2019; MATTIOLI, R ; MOULINOS, 2015).

2.1.1. Plataforma de Software

O componente fundamental para o gerenciamento e funcionamento de uma VPP, assim como seu diferencial no mercado quando comparada a figura dos agregadores, esta em sua plataforma de software e os módulos que a compõe. Contudo, não existe um padrão que defina a plataforma de software de uma VPP, sendo que as proposições estão em geral associadas ao tipo de aplicação que são pesquisadas (JOHNSON et al., 2017; PASETTI; RINALDI; MANERBA, 2018; RAAB et al., 2011; STEINIGER, 2017; ZHOU; YANG; SHAO, 2016) ou aos produtos ofertados no mercado (SLEMAN

SALIBA, MARC ANTOINE, 2017). Contudo, algumas funcionalidades se mostram básicas nos modelos propostos, independente da utilidade.

- Gestão de portfólio de RED
- Negociação com o mercado
- Formação de preço e contratos
- Comunicação com OSD e OST
- Monitoramento de condição da rede
- Histórico de Produção

Outras funcionalidades foram sendo incorporadas com o desenvolvimento tecnológico, procurando acrescentar e evoluir esse tipo de plataforma. O volume de dados trafegado aumentou, com a inclusão de informações vindas de consumidores, *prosumers*, estações de recarga de VEs e de previsão do tempo. O aumento na quantidade de dados coletados por todo o sistema, somado ao poder computacional crescente, permitiu a inclusão de sistemas de previsão, muitos utilizando algoritmos de inteligência artificial (LUO; HONG; DING, 2019; MACDOUGALL et al., 2016).

Este desenvolvimento tem permitido melhorias nos mecanismos de otimização e de agendamento de despacho, tornando mais precisa a operação das VPPs (ALAHYARI; EHSAN; MOUSAVIZADEH, 2019; KASAEI; GANDOMKAR; NIKOUKAR, 2017). A Figura 2.9 apresenta um diagrama de blocos que generaliza estas informações, estabelecendo um modelo que abrange uma plataforma esperada para uma VPP atualmente.

Figura 2.7 – Diagrama de Blocos da plataforma de software genérica de VPP

Fonte: Autor.

2.4.2.1 Interface com Mercado

As tarefas relacionadas as interações com o mercado são realizadas por este módulo. Ele deve ser o ponto de entrada de informações vindas do mercado de energia elétrica (negociação e preços), informações para execução de contratos e comunicação com OSDs, quando se tratar de uma CVPP, e com OSTs, quando se tratar de uma TVPP (JOHNSON et al., 2017).

Estas informações são utilizadas conjuntamente com dados fornecidos pelos módulos de previsão (oferta de energia, demanda, preço), gestão de portfolio (custo e característica das fontes) e gerenciamento de contratos, permitindo a negociação de fornecimento e preço da energia, com a posterior execução dos contratos (MORENO; DÍAZ, 2019). Este módulo deve possuir regras específicas capazes de gerar resultados financeiros e auxiliar a operação, conhecendo em detalhes as características dos mercados onde realiza negociações, (NGUYEN-DUC; NGUYEN-HONG, 2020; WANG; RIAZ; MANCARELLA, 2020), maximizando o retorno financeiro do portfolio (BARINGO; RAHIMIYAN, 2020; BEHI et al., 2020) e lidando com as incertezas presentes na operação com RED intermitentes (CHEN et al., 2020).

2.4.2.2 Previsão

O módulo de previsão contém os algoritmos para predição de variáveis utilizadas por outros módulos da plataforma. Informações capturadas, originadas dos monitoramentos de carga e geração permitem realizar a previsão para ajuste do sistema,

definindo o horizonte de acordo com a operação (intraday ou day-ahead, por exemplo) (GOUGHERI et al., 2021; MACIEJOWSKA; NITKA; WERON, 2019).

Dados obtidos do mercado permitem a previsão de preços e perfil de compra de energia, os resultados obtidos com informações de mercado e associados aos dados preditivos de operação, podem ser utilizados para ajuste do módulo de otimização, que define a forma de operação mais estável e rentável para a VPP (MACDOUGALL et al., 2016; YU et al., 2019).

2.4.2.3 Otimização

Os módulos de otimização levam em conta o perfil da fonte de geração, o custo financeiro, seu retorno e sua localização geográfica. Através da resolução matemática de modelos técnicos-financeiros, são capazes de definir a melhor operação de despacho, obtendo o melhor resultado operacional e maximizando o retorno do portfólio (BARINGO; RAHIMIYAN, 2020).

Este tipo de módulo depende também dos resultados de previsões e dados das características de cada fonte geradora presente no portfólio da VPP (ALAHYARI; EHSAN; MOUSAVIZADEH, 2019; WANG; RIAZ; MANCARELLA, 2020). Os dados recebidos do monitoramento em tempo real permitem o ajuste contínuo de operação, através de sistemas de controle, orquestrando a utilização dos REDs (JOHNSON et al., 2017).

2.4.2.4 Controlador de RED e Sistema de Carga de Veículos Elétricos

O módulo de controle dos REDs permite que a plataforma se comunique com a plataforma de gerenciamento das unidades geradoras. Estes sistemas devem operar em tempo real e permitir o monitoramento de cada ativo de geração, assim como o envio de informações dos sistemas de otimização (JOHNSON et al., 2017; ZAJC; KOLENC; SULJANOVIĆ, 2019).

Similar ao controlador de REDs, a VPP pode possuir um módulo dedicado ao Sistema de Carga de VEs (SCVE). Os VEs têm um comportamento dual dentro do sistema elétrico, podendo operar de forma distinta, de acordo com a atividade que o consumidor

deseja realizar. Nos horários de energia mais cara, o consumidor pode optar por injetar energia na rede, onde deve ser tratado como um armazenamento. Entretanto, em horários em que a energia se encontre mais barata, o usuário pode requerer a recarga de sua bateria, funcionando como uma carga adicional ao sistema (HAQUE; WOLFS; ALAHAKOON, 2020; RASHIDIZADEH-KERMANI et al., 2021). O SCVE deve compreender este comportamento e trocar informações com a VPP, de modo que ela tenha flexibilidade para operar de acordo com a informação de momento e características associadas ao VE que está operando.

2.4.2.5 Armazenamento de Dados

A utilização de dados e de ferramentas de *Big Data* corresponde a um dos módulos essenciais para o funcionamento de uma plataforma de VPP. A grande quantidade de dados transacionados, armazenados e que podem ser processados, permitem extrair conhecimento ou alimentar atividades que devem ser executadas por uma VPP (SINGH; YASSINE, 2018; XIAO et al., 2020).

O volume de dados operacionais transacionados por dia pode ser elevado, contudo através dele se pode conhecer parâmetros para melhoria e otimização dos sistemas (CHAKRABORTY et al., 2021), o sistema de previsão é altamente dependente dos dados históricos das variáveis que se deseja prever (KODIDALA et al., 2021; LUO; HONG; DING, 2019; MACDOUGALL et al., 2016), além de informações sobre clientes, negociações e contratos firmados, onde a depender do modelo de negócio, podem ter variações de preços em um curto espaço temporal (SHABANZADEH; SHEIKH-EL-ESLAMI; HAGHIFAM, 2017). Todas estas funções dependem da persistência de dados pela plataforma, contudo, podem posteriormente retornar valor através de técnicas de ciências de dados e *machine learning*.

2.4.3 **Segurança e Privacidade**

O funcionamento de uma VPP está intimamente ligado ao uso de dados. A plataforma de software agrega muitas informações, persistidas em bancos de dados, enquanto sua comunicação com agentes externos também exige um fluxo constante de informação, que inclui agentes de mercado, DSO, TSO, agregadores, unidades de geração, VEs e *prosumers*. Este amplo domínio de comunicação, dados transacionados e

armazenados precisam estar seguros e as camadas de segurança e privacidade devem ser consideradas como um componente presente em toda VPP.

Os canais de comunicação, entre as unidades geradoras, medidores inteligentes, estações de recarga de VEs e cargas controláveis seguem normas específicas, que regem protocolos que podem ser utilizados e os níveis de segurança e governança que devem ser aplicados (HANSEN; STAGGS; SHENOI, 2017; JOHNSON et al., 2017). De acordo com a MATTIOLI, R e MOULINOS (2015), diversos tipos de ataques podem ocorrer em sistemas de comunicação presentes nas REIs, como mostrado no Quadro 2.3, incluindo ataques a elementos presentes na IMA, permitindo acesso ao próprio sistema da VPP em casos graves de falha. Para minimizar essas ocorrências, é necessário a inclusão de planos de governança de segurança e medidas de contingência que permitam o isolamento e recuperação do sistema, com a maior redução de danos possível (LESZCZYNA, 2018).

Quadro 2.3 – Exemplos de ataques que podem ocorrer em uma REI e consequentemente, em uma VPP.

Elemento Alvo	Descrição do Evento
Ataque a Central de Controle	Um dos piores cenários considerados, uma vez que através de um ataque <i>Distributed Denial of Service</i> (DDoS) ou infecção por <i>malware</i> , pode tornar o sistema de produção de energia inoperante e inseguro. ⁷
Roubo de Dados	Informações técnicas e de consumidores são vazados, através de um <i>malware</i> nos computadores, excesso de permissões dos usuários, uso de criptografia fraca ou falha nos protocolos de autenticação. ⁸
Ataque <i>Man-in-the-Middle</i>	Modifica a comunicação entre dois componentes da rede, que estão se

⁷ Esta categoria de evento pode ser exemplificada com os ataques realizados por cibercriminosos russos contra a infraestrutura da Ucrânia - <https://www.wired.com/story/russian-hackers-attack-ukraine/>

⁸ Este tipo de evento pode ser exemplificado com um ataque atual no setor de petróleo, atingindo os sistemas da Colonial Pipeline - <https://www.vox.com/recode/22428774/ransomware-pipeline-colonial-darkside-gas-prices>

	comunicando diretamente. Este processo consiste frequentemente em monitorar a rede, interceptar os dados transferidos e usar a descriptografia de força bruta
Incidentes com colaboradores internos	Isso inclui funcionários, prestadores de serviço ou usuários externos, que podem potencialmente danificar uma organização de dentro.
Falta de Padronização	A falta de padrões de segurança dos dispositivos em uma rede inteligente pode aumentar as vulnerabilidades que podem ser exploradas.
Conexões Vulneráveis de VEs	Os VEs requerem conexões adicionais para a troca dos dados necessários ao seu correto funcionamento. Essas conexões usam protocolos bem conhecidos por invasores (como Bluetooth, Wi-Fi ou GPRS)
Engenharia Social	Os ataques de engenharia social aumentaram exponencialmente nos últimos anos e se tornaram uma das maiores preocupações dos especialistas em segurança. Esses ataques se concentram no pessoal e seu objetivo é roubar dados operacionais ou de negócios, credenciais do usuário, dados privados, etc.
Autenticação	Pontos fracos que podem ser explorados por um invasor para obter acesso ao sistema ou aos dados internos. Essas situações podem funcionar como uma etapa anterior para ataques mais

	elaborados (danos ao sistema, roubo de informações, <i>blackouts</i> , etc.).
--	---

Fonte: Adaptado de MATTIOLI, R ; MOULINOS (2015)

Outra vertente a ser observada está associada à proteção de dados presentes nos sistemas. Cada modelo de VPP pode agrupar dados de diferentes entidades, utilizando os resultados do processamento destas informações como um diferencial para sua operação e oferta de energia com decisões baseadas em dados. Contudo, as interações com dados de terceiros devem obedecer a regulações locais. Dois exemplos de regulações que lidam diretamente com dados utilizados por VPPs são a *General Data Protection Regulation* (GDPR), criada pela União Europeia, e a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), criada no Brasil. Ambas são similares, com pequenas diferenças, uma vez que a LGPD foi criada tendo como referência a GDPR.

O armazenamento e processamento de dados devem atender as diretivas dessas regulamentações, sob pena de punição. Exemplos de situações passíveis de punição foram os recentes vazamentos de dados de concessionárias nacionais, expondo dados de consumidores, antes da LGPD entrar em vigência (ALVES DOS SANTOS; BERMAN, 2021). Um exemplo de interação no setor elétrico brasileiro foi o comunicado do O Operador Nacional do Sistema (ONS), no âmbito nacional, deixando transparente qual a finalidade de processamento dos dados e que irão seguir a legislação vigente (ALVES DOS SANTOS; BERMAN, 2021; ONS, 2020).

2.5 APLICAÇÕES DE VPPS

Existem expectativas de que o mercado de VPPs apresente crescimento, usando como referência seu valor de US\$ 191.5 milhões de dólares no ano de 2016, para um mercado de US\$ 1.1875 bilhões em 2023 (WANG et al., 2019c). Inicialmente, os projetos eram dedicados a pesquisa e investigação do tema, contudo, esta expectativa, pode criar um cenário favorável para o surgimento de novos projetos no cenário internacional e nacional (RAMOS et al., 2020). Na tabela 2.5, são apresentadas as iniciativas ao redor do mundo até 2015, com sua localização, tipos de REDs utilizadas e funções no mercado.

Tabela 2.2 – Aplicações de VPPs até 2015 em todo o mundo.

Nome	Tempo	Países	Tipo de RED	Funções
VFCPP	2001-2005	Alemanha, Holanda, Espanha	Célula Combustível	Desenvolva, implemente, teste o VPP e mostre se as células de combustível podem ser instaladas em residências
PM VPP	2005-2007	Holanda	μ-Cogeração	Fornece o mecanismo de mercado
FENIX	2005-2009	Reino Unido, Espanha, França	μ-Cogeração, Solar, Eólica	Permitir que sistemas baseados em DER se tornem a solução para o futuro sistema de abastecimento de eletricidade da UE eficiente em termos de custos, seguro e sustentável
EDISON	2009-2012	Dinamarca	Veículos Elétricos	Fornece a energia de equilíbrio necessária para aumentar o uso da energia eólica
FLEX POWER	2010-2013	Dinamarca	Eólica	Ative o equilíbrio de energia de demandas de eletricidade e gerações de pequena escala
WEB2ENERGY	2010-2015	Alemanha, Polónia, Áustria e Suíça	CHP, Solar, Eólica, Biogás, Hidroelétrica	Implementar e aprovar todos os três pilares da “ <i>Smart Distribution</i> ”: <i>Smart Metering</i> , <i>Smart Energy Management</i> ,

				<i>Smart Distribution Automation</i>
TWENTIES	2012- 2015	Bélgica, Alemanha, França	Eólica	Avançar na consolidação da geração de energia eólica

Fonte: Adaptado de WANG et al.(2019)

A partir do ano de 2016, novos projetos começam a surgir, focados na aplicação comercial das VPPs. Nos Estados Unidos, a empresa *Consolidated Edison*⁹ (ConEdison) iniciou seu projeto de uma VPP utilizando de painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento alocados nos seus clientes. Foram destinados 15 milhões de dólares para este projeto, com expectativa de geração de 1.8 MW (REUTERS EVENTS, 2016). A expansão deste projeto ao longo dos anos indica que a cidade de New York poderá contar com 1.5 GW de energia instalada até 2025 e 3 GW até 2030 (COLTHORPE, 2021).

Ainda no ano de 2016, a *Australian Renewable Energy Agency* (ARENA), iniciou o projeto *South Australia's Virtual Power Plant* (SA VPP). Com envolvimento da concessionária local Energy Locals¹⁰ e da empresa Tesla¹¹, foi desenvolvido um sistema de operação similar ao proposto pela ConEdison, com instalação de painéis fotovoltaicos e sistemas de armazenamento. Divido em 3 fases, o programa custou ao governo local 32 milhões de dólares em nas duas primeiras etapas, de instalação e testes da solução, enquanto a terceira etapa custou 38 milhões de dólares, contudo sem custo de instalação para as residências aderentes ao programa, o qual prevê a redução do custo da energia consumida (ENERGYLOCALS, 2021). Atualmente o projeto se encontra em sua terceira fase, onde ao final dela esperasse que o sistema terá 20 MW de potência instalada (ARENA, 2020).

A União Europeia por sua vez, iniciou um projeto em 2017, previsto para durar até 2022, sob o nome “*cVPP - Community-based Virtual Power Plant: a novel model of radical decarbonisation based on empowerment of low-carbon community driven energy*

⁹ ConEdison, Inc - <https://www.conedison.com>

¹⁰ EnergyLocals - <https://energylocals.com.au>

¹¹ Tesla - <https://www.tesla.com>

initiatives”¹². Com investimento total de 7.1 milhões de euros, sendo realizado na Bélgica, Irlanda e Holanda, seu foco está na integração de comunidades de *prosumers*. Ao agregarem a energia localmente, as comunidades podem ser participar do mercado de venda de energia como uma única entidade. Todo o gerenciamento e tomada de decisões quanto a energia fornecida e preços fica sob decisões tomadas pela comunidade (INTERREG NORTH-WEST EUROPE, 2021).

A iniciativa mais recente de implantação de uma VPP ocorreu na China, em 2019, na Província de Hebei. Este projeto foi realizado com a concessionária Jibei Electric Power, subsidiária da empresa State Grid¹³, em conjunto com a empresa ABB. A VPP conta com um portfólio de 11 tipos de fontes distintas, conectadas usando um sistema de *Internet of Things in Power Systems* (IOTIPS), para troca de dados em tempo real. O sistema está direcionado para fornecimento de energia elétricas de três cidades da província, Zhangjiakou, Qinhuangdao e Langfang. A potência instalada nesta primeira etapa é de 26.5 MW, contando com uma expansão em uma segunda etapa, chegando a uma capacidade instalada de 226 MW (ABB, 2020).

Em 2019 implementou-se a primeira VPP em território nacional. Embora não corresponda a um sistema em operação, este projeto, parceria da Fundação CERTI e AES Tietê, recebeu uma premiação na EnergyWeek no mesmo ano (ENERGYWEEK, 2019).

¹² The Interreg NWE Europe Programme - <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/cvpp-community-based-virtual-power-plant/>

¹³ State Grid Corporation of China - <http://www.sgcc.com.cn>

3 A TECNOLOGIA BLOCKCHAIN E SUA APLICAÇÃO EM VPPS

A evolução do setor elétrico, inclusive em âmbito nacional, está em compasso com o processo de transição energética, buscando a descarbonização da geração de energia, modelos descentralizados e empregado a digitalização como uma ferramenta para viabilizar a modernização dos agentes do setor e suas relações. Dentro do processo de digitalização, a presença de tecnologias emergentes apresenta a possibilidade da mudança em termos operacionais, organizacionais e financeiros. A modernização do setor, utilizando tais tecnologias, permitirá que novos modelos de negócio se mostrem viáveis e mudem as dinâmicas do mercado.

Entre as tecnologias emergentes que estão ganhando destaque, o *blockchain* se mostra uma tecnologia que estará presente no futuro do setor. As características presentes nesta tecnologia mostram um potencial de mudança no armazenamento de dados, realização de transações comerciais, automação na comunicação M2M e a possibilidade de usá-lo em sistemas pensados sob o modelo *security by design*¹⁴.

Atualmente, conhecer os detalhes desta tecnologia e as possibilidades de utilização se mostra uma necessidade essencial para o desenvolvimento de sistemas focados na modernização do sistema elétrico, principalmente para a criação de modelos inovadores de VPPs. A utilização da tecnologia *blockchain* se mostra um elemento de viabilização de plataformas que necessitam realizar tarefas transacionais, sejam elas de natureza financeira ou de informação, entre diversas entidades com interesses, por vezes, conflitantes. Entretanto, as tarefas transacionais não englobam todos os potenciais usos da tecnologia, suas características podem ser utilizadas em sistemas que necessitem de segurança, automação de atividades, tokenização e outras possibilidades, como sistemas direcionados a uso de criptomoedas, assunto não coberto por este trabalho.

O presente capítulo aborda a tecnologia apresentando inicialmente os conceitos que compõem a tecnologia *blockchain*, sendo abordados, de forma introdutória, os sistemas distribuídos e criptografia. Posteriormente apresenta-se o conceito de *Distributed Ledger Technology* (DLT), quais são suas características e como o *blockchain* está inserido

¹⁴ Abordagem utilizada em engenharia de software para projeto de sistemas que são pensados desde o projeto para serem seguros, ao invés de implementações de segurança reativas, após a entrega e implantação do sistema em ambiente de produção.

dentro deste conceito, antes de então introduzir a tecnologia e descrever seus componentes. Ao final será apresentada uma revisão bibliográfica das aplicações de *blockchain* em sistemas de VPP, demonstrando o estado da arte, as tendências de aplicação e assim, permitindo compreender os fundamentos que serão utilizados posteriormente, no desenvolvimento dos modelos propositivos de VPPs, um dos objetivos desta dissertação.

3.1 SISTEMAS DISTRIBUÍDOS

Os sistemas distribuídos correspondem atualmente a grande parte dos sistemas computacionais presentes no mercado. A expansão da troca de informações entre sistemas e o crescimento na quantidade de equipamentos de borda na rede tornaram a computação e os sistemas distribuídos um paradigma necessário para os sistemas modernos. O acesso a recursos distribuídos, como arquivos, acesso a páginas web e processamento de atividades em diferentes dispositivos, como celulares e *tablets*, são exemplos da aplicação deste paradigma (COULOURIS et al., 2013).

O funcionamento de um sistema distribuído está associado a conexão dos dispositivos, interligados em rede, onde suas ações são coordenadas através da troca de mensagens. Estas ações compreendem o compartilhamento de recursos entre sistemas ou usuários. A coordenação do uso dos recursos pode ser realizada dos computadores da rede ou gerenciado por cada usuário, sendo definido pelo protocolo de comunicação utilizado (COULOURIS et al., 2013)

Este tipo de sistema possui algumas vantagens em comparação com os sistemas centralizados, sendo elas a maior capacidade de processamento, redução de custos, maior confiabilidade e a possibilidade de escalar. A soma do poder de processamento de cada dispositivo presente na rede pode ser maior do que a de sistemas centralizados e com um custo menor, ao se comparar os valores investidos em um conjunto de computadores e o de um supercomputador (COULOURIS et al., 2013). Quanto a confiabilidade, ela se torna maior, uma vez que caso um computador da rede falhe, outro pode tomar seu lugar na execução de atividades. A possibilidade de escalar o sistema está associada a flexibilidade de se realizar a inserção de novos computadores na rede, aumentando assim o poder de processamento (DRESCHER, 2017).

Contudo, sistemas distribuídos também apresentam desvantagens quando comparados a computadores individuais, como *overhead* de coordenação e comunicação, dependência de redes, complexidade dos programas e problemas de segurança. A coordenação de sistemas distribuídos exige capacidade de processamento de cada participante ao mesmo tempo que se faz necessárias a comunicação entre cada dispositivo, demandando recurso contínuos de coordenação e comunicação. A comunicação entre os dispositivos depende da presença contínua de uma rede, permitindo a troca de mensagens entre eles, onde qualquer falha ou problema pode comprometer partes do sistema.

Estes cenários acarretam aumento complexidade no desenvolvimento de software, que deve ter mecanismos de contingência para as situações como ausência de rede e deve ser tolerante a falhas, dependendo da rede. A segurança se mostra como elemento crítico deste tipo de sistema, em especial atualmente. Os requisitos de segurança devem se preocupar desde a verificação da confiabilidade dos componentes da rede até o tráfego das informações entre os participantes (DRESCHER, 2017)

3.1.1 Redes Peer-to-Peer

Uma das arquiteturas utilizadas em sistemas distribuídos, que compreendem a temática investigada, são as redes *peer-to-peer* (P2P), formadas por computadores individuais, chamados de nós, compartilhando dados e recursos de larga escala sem a presença de um servidor de coordenação (COULOURIS et al., 2013; DRESCHER, 2017). Os nós da rede possuem um status igualitário quanto a seus direitos e funções dentro do sistema, sendo também consumidores e fornecedores de recursos. Este funcionamento permite a rede dar suporte a sistemas e aplicativos distribuídos, com processamento em larga escala e a possibilidade de replicar arquivos em cada um dos dispositivos, garantindo redundância da informação. Deste modo, quanto mais usuários utilizarem o sistema e foram inseridos na rede, maior, mais potente e resiliente se tornará o sistema (COULOURIS et al., 2013, Drescher). Os sistemas P2P operam, atualmente, através de middlewares que simplificam a comunicação entre os nós, compartilhamento de recursos além de possibilitar a inserção ou exclusão dos nós da rede (COULOURIS et al., 2013)

Contudo, este tipo de rede demanda mecanismos de segurança, como outros sistemas distribuídos. As trocas de informações devem ser confiáveis entre os elementos que fazem parte da rede, protegendo a comunicação da rede de uma interceptação de um agente malicioso. Outra característica necessária é o gerenciamento de participantes das redes, evitando falhas individuais que possam reduzir a confiabilidade da rede (COULOURIS et al., 2013).

3.1.2 Segurança

Os aspectos de segurança são uma camada importante em sistemas distribuídos, como mencionado anteriormente, uma vez que este tipo de arquitetura depende da troca de informações. Garantir a integridade destas informações e evitar a presença de agentes maliciosos são tarefas essenciais para as redes e nós. A seguir são apresentados algumas das ferramentas utilizadas para garantir segurança em sistemas distribuídos e também implementadas em muitos sistemas de *blockchain*.

3.1.2.1 Algoritmos de Criptografia

Atualmente, a criptografia pode ser definida como um arcabouço de estudos e técnicas matemáticas que visam proteger informações e sistemas digitais, assim como a computação distribuída de ataques. Desta forma, esta caracterização abrange mecanismos que garantem integridade, técnicas para troca de chaves secretas, protocolos para autenticação de usuário e sistemas como leilões, eleições e dinheiro digital (KATZ; LINDELL, 2014).

Entre os algoritmos de criptografia, duas classes estão diretamente associadas aos sistemas distribuídos, permitindo a troca de informação de modo seguro entre os componentes de uma rede. Os algoritmos de chaves simétricas e assimétricas correspondem a uma classe vinculada a troca de informação com encriptação e deciptação com uso de chaves, enquanto os resumos criptográficos, conhecido como funções *hash*, estão associados a geração de um identificador único para um determinado conteúdo ou arquivo (ANDRESS, 2014; COULOURIS et al., 2013). No território

nacional, o governo federal faz a indicação dos algoritmos recomendados para sistemas criptográficos, visando a segurança e padronização deste tipo de aplicação¹⁵.

3.1.2.2 Função Hash Criptográfica

A função *hash* criptográfica é baseada na utilização de uma função matemática criptográfica do tipo *one-way*, uma vez que ao se gerar o valor *hash* para uma determinada informação se torna computacionalmente inviável realizar o caminho inverso, devido ao custo computacional necessário para realizar o processo inverso (ANDRESS, 2014). Este procedimento se mostra consistente para geração de uma “impressão digital” para a informação, uma vez que o valor de *hash* é único para cada entrada e independente de quantas vezes o algoritmo seja executado, a mesma entrada sempre resultará em um mesmo valor de *hash*. Este tipo de mecanismo pode ser utilizado para verificar a integridade de um arquivo enviado entre os participantes da rede, por exemplo. Como mostrado na Figura 3.1, pode-se gerar o *hash* referente ao conteúdo de um arquivo e informá-lo aos demais participantes, os quais poderão utilizar o mesmo algoritmo no momento da recepção do arquivo, verificando se o valor do *hash* informado corresponde ao obtido. Este procedimento garante a integridade do artigo transacionado, indicando que o mesmo não foi adulterado durante a troca de informações.

Figura 3.1 – Função Hash aplicada ao documento de entrada do sistema

Fonte: Autor, adaptado de: ANDRESS (2014)

Atualmente os algoritmos mais populares e utilizados para a geração de valores de *hash*, são (ANDRESS, 2014):

- Message Digest (MD)¹⁶

¹⁵ DOC ICP 01.01 - <https://www.gov.br/iti/pt-br/centrais-de-conteudo/anexo-1-doc-icp-01-01-v-2-0-final-pdf>

¹⁶ Atualmente considerado inseguro.

- Secure Hash Function (SHA)
- RIPEMD
- Whirlpool

3.1.2.3 Criptografia de chave simétrica

Os algoritmos de chave simétrica são conhecidos pela utilização de uma única chave secreta, capaz de encriptar e descriptar uma determinada informação. Este tipo de algoritmo se mostra mais eficiente e seguro quando não existe a necessidade da troca da chave, tendo como exemplo um cenário onde apenas uma pessoa a possui e fica responsável pela codificação e decodificação da informação (ANDRESS, 2014; BASHIR, 2018).

Quando existe a necessidade do fornecimento da chave para demais entidades, ela deve ser realizada através de um canal seguro, reduzindo a possibilidade de vazamento. Caso a chave secreta seja exposta, qualquer portador da chave pode decodificar a informação e ter acesso ao seu conteúdo. A Figura 3.2 mostra o exemplo de fluxo de encriptação e decriptação de informações utilizando o algoritmo de chave simétrica (ANDRESS, 2014).

Figura 3.2 – Fluxo de troca de informação utilizando criptografia de chave simétrica

Fonte: Autor, adaptado de: ANDRESS (2014)

Os algoritmos comumente utilizados para estes tipos de sistemas são¹⁷ (ANDRESS, 2014):

- AES
- DES
- 3DES
- Blowfish

3.1.2.4 Criptografia de chave assimétrica

Os algoritmos de chave assimétrica, conhecida também como chave pública, utilizam um conjunto de duas chaves distintas. A primeira pode ser fornecida livremente, conhecida como chave pública, enquanto a segunda chave deve ser mantida em segredo, denominada chave privada. Este conjunto permite que ao criptografar uma determinada informação com uma das chaves, somente a outra pode descriptar (ANDRESS, 2014; BASHIR, 2018).

A escolha por qual chave ser usada na ação de criptografia depende da segurança e confidencialidade, uma vez que muitos usuários podem estar em posse da chave pública, conseguindo descriptografar a informação codificada pela chave privada. Inversamente, variados usuários podem codificar um conjunto de informações com a chave pública, onde somente o detentor da chave privada conseguirá descriptar. A Figura 3.3 apresenta o fluxo de codificação e decodificação utilizando o par de chave pública e chave privada (ANDRESS, 2014)

¹⁷ Destes, os algoritmos DES, 3DES e Blowfish são atualmente considerados inseguros.

Figura 3.3 – Fluxo de troca de informação utilizando criptografia de chave assimétrica

Fonte: Autor, adaptado de: ANDRESS (2014)

Os algoritmos mais utilizados para este tipo de criptografia são (ANDRESS, 2014):

- RSA
- DSS
- ECDH
- ECDSA.

3.1.2.5 Assinaturas Digitais

As assinaturas digitais têm como função garantir a autenticidade de uma determinada mensagem. Este mecanismo assegura que a mensagem foi enviada pelo remetente esperado e também garante que seu conteúdo original não foi fraudado. Este procedimento utiliza o algoritmo de *hash*, embora não seja mandatório em todos os casos, e chaves assimétricas. O fluxo desta operação é apresentado na Figura 3.4, onde inicialmente o autor gera o *hash* do conteúdo da mensagem, posteriormente encriptando o valor do *hash* com sua chave privada. A mensagem e o *hash* encriptado são enviados, quando o destinatário recebe a mensagem, pode descriptar o *hash* e verificar a autenticidade gerando o *hash* do conteúdo e comparando ambos.

Figura 3.4 – Fluxo de troca de informação utilizando assinatura digital

Fonte: Autor, adaptado de: ANDRESS (2014)

3.1.2.6 Certificados Digitais

Os certificados digitais têm como objetivo autenticar a chave pública de um determinado usuário. Através deste mecanismo, se torna possível garantir a origem da assinatura utilizada, garantindo o não-repúdio por parte de quem assinou. Eles são criados através da associação de informações de uma entidade, que conferem sua identidade, a uma chave pública. A sua geração é realizada através de uma Autoridade Certificadores (AC), que se trata de uma entidade confiável, variando de empresas privadas a órgãos do governo. A AC faz parte de uma infraestrutura conhecida por Infraestrutura de Chave Pública (*Public Key Infrastructure*, PKI). A composição de uma PKI contém um conjunto de hardware, software, políticas e procedimentos para realizar a gestão de certificados digitais, através da criação, armazenamento, distribuição e revogação do mesmo (STALLINGS, 2005)

A Figura 3.5 apresenta o fluxo de obtenção, uso e verificação do certificado digital em um caso geral, com uma PKI genérica realizando a emissão e verificação. Inicialmente o remetente obtém o certificado, em posse dele, envia a mensagem e o certificado. O destinatário, ao receber a mensagem, realiza a verificação do certificado, validando assim a veracidade da mensagem recebida (ANDRESS, 2014).

Figura 3.5 – Fluxo de troca de informação utilizando certificado digital

Fonte: Autor, adaptado de: ANDRESS (2014)

3.1.3 Algoritmos de Consenso

A segurança de sistemas distribuídos também está associada ao gerenciamento dos componentes da rede. Um nó malicioso pode colocar em risco a segurança do sistema, oferecendo a troca de informações não confiáveis e utilização incorreta de recursos (COULOURIS et al., 2013). Uma das técnicas para verificar a integridade dos nós de sistemas distribuídos está em aplicar protocolos de consenso, possibilitando que a rede continue sua operação, desconsiderando os nós faltosos.

Os problemas de consenso estão presentes na área de computação tolerante a falha, onde a algoritmos de resolução podem assegurar que os nós estão livres de falha, mantendo o sistema inteiro e confiável, pois uma vez que falhem, são excluídos da comunicação, mantendo apenas os nós confiáveis operando. (COULOURIS et al., 2013; DRESCHER, 2017). Um dos problemas mais tradicionais associados a este tipo de necessidade é conhecido como Problema dos Generais Bizantinos, proposto por Lamport em 1982, como uma abstração do problema de sistemas distribuídos (BASHIR, 2018).

A proposição consiste em considerar um ataque à cidade de Bizâncio por generais, que estão geograficamente separados e se comunicam através de mensagens e o ataque só terá sucesso se todos atacarem simultaneamente. Um dos generais é responsável pelo comando e a identificação se existe um general traidor entre eles é realizada através da verificação das mensagens trocadas, onde se evidencia o traidor ao não propagar a ordem de forma correta (BASHIR, 2018; COULOURIS et al., 2013). A figura 3.6 apresenta uma exemplificação deste problema, através da troca de mensagens entre os generais, onde o G1, responsável pelo comando, apresenta a ordem de atacar e o G3 corresponde ao traidor, que propaga a ordem errada.

Figura 3.6 – Representação do Problema dos Generais Bizantinos

Fonte: Autor, adaptado de: BASHIR (2018)

A abstração deste problema retrata os nós de uma rede distribuída como os generais, onde a troca de informações entre eles pode ser verificada através de um determinado protocolo e identificar a presença de um nó malicioso. Atualmente, os sistemas distribuídos podem ser dotados de um entre diversos protocolos existentes, adiante, serão apresentados os mais comuns utilizados em sistemas de blockchain.

3.2 DISTRIBUTED LEDGER TECHNOLOGIES

Os sistemas distribuídos e as redes P2P permitiram o surgimento de algumas classes de aplicações, que usaram as características deste tipo de arquitetura como diferenciais para determinadas classes de problemas. Uma destas aplicações, que vem sendo utilizada

principalmente no setor financeiro, é conhecida como *Distributed Ledger Technology* (DLT). As DLTs são sistemas de armazenamento distribuídos pelos nós de uma rede P2P, contendo uma cópia idêntica do mesmo conjunto de dados e que podem ser atualizados de forma sincronizada, uma vez obtido o consenso dos participantes das redes (UGARTE, 2018). Este mecanismo de persistência de dados difere os DLTs dos bancos de dados distribuídos tradicionais por inserir uma verificação da confiança dos elementos da rede, validando esta ação. Enquanto os bancos de dados tradicionais são distribuídos em uma rede onde existe confiança nos nós e em sua cooperação, uma DLT pode estar presente em uma rede onde os nós não confiam completamente uns nos outros, exigindo um mecanismo de verificação coletiva, antes de compartilhar as atualizações dos registros. (UGARTE, 2018).

A utilização deste tipo de sistema pelo setor financeiro reside na exploração de sua capacidade de ser um livro-razão (*ledger*). Este setor é caracterizado pelo uso de sistemas de livro-razão, antes mesmo do surgimento dos DLTs, como um sistema de medição unificado, registrando todas as transações dos ativos nele registros (TOWNSEND, 2020). As transações consolidadas podem criar demonstrações financeiras formais e reconhecidas pelo mercado, como fluxo de caixa, balanço patrimonial e demonstração de resultados. Permitem também acompanhar e pesquisar a movimentação de ativos ao longo do tempo, indicando sua posse original e as mudanças ocorridas até o momento atual. De moedas até terrenos, o livro-razão utilizado por cada entidade mantém um registro dos ativos financeiros de modo confiável, utilizando a confiança na entidade como fiadora da informação ali contida (TOWNSEND, 2020; UGARTE, 2018)

Atualmente os DLTs expandem este tipo de utilização do mecanismo de livro-razão, tornando-os distribuídos por uma rede, sem a necessidade da presença de uma entidade financeira como intermediário e garantindo a confiabilidade das transações. Os usuários podem armazenar e acessar informações relacionadas a diversos ativos, incluindo indicações de posse de um determinado bem, transações de ativos ou saldos em contas. Estas informações são distribuídas pelos participantes da rede, onde cada transação envolvendo os ativos registrados é atualizada, seguindo o mecanismo de consenso entre os nós e garantindo a confiabilidade destas atividades sem a necessidade de uma entidade central (MILLS et al., 2016; PINNA; RUTTENBERG, 2016). As

vantagens demonstradas pela utilização de DLTs em alguns mercados são as seguintes (UGARTE, 2018):

- Eliminação dos custos de mensagem e redução de custos de *back-office*
- Redução da complexidade das transações, com aumento na rastreabilidade e transparência
- Aumento da velocidade de processamento em alguns casos e circunstâncias, melhorando a gestão de liquidez

A digitalização cada vez maior da sociedade tem permitindo a presença maior dessa classe de sistemas, não apenas como um livro-razão de ativos financeiros, mas como um ecossistema capaz de fornecer ferramentas de identificação confiáveis e criação de novos negócios (UGARTE, 2018). A possibilidade de identificar usuários ou determinado ativo, de modo confiável, seguro e mantendo a sua privacidade, enquanto permite a rastreabilidade por órgãos competentes, abre caminho para a descentralização de algumas atividades. A utilização para esta finalidade deve elevar a adoção de sistemas de DLTs, garantindo a confiabilidade e segurança de dados, exigidas pelas atuais leis de proteção de dados como a GDPR e a LGPD (ALVES DOS SANTOS; BERMAN, 2021; PREUKSCHAT; REED, 2021). As DLTs estão se popularizando, motivadas pelo interesse crescente a respeito do *Bitcoin* e demais criptomoedas¹⁸ (UGARTE, 2018). A sustentação de sistemas que envolvem este tipo de ativo está baseada na tecnologia conhecida como *Blockchain*, que será descrita mais adiante. Embora exista uma linha tênue entre ambos, onde muitas vezes se dificulta até a definição clara dos sistemas de DLT (RAUCHS et al., 2018; TOWNSEND, 2020), o *blockchain* pode ser considerado um tipo particular de DLT, como mostrado na Figura 3.7, compondo um grupo de aplicações específicas, a exemplo dos *Directed Acyclic Graph* (BENČIĆ; ŽARKO, 2018) que correspondem a sistemas de DLTs com mecanismos diferentes das redes *blockchain* conhecidos. Dentro do grupo de tecnologias *blockchain*, existem suas subdivisões, como os permissionados presentes na figura.

¹⁸ Criptomoedas são moedas virtuais que utilizam algoritmos criptográficos para garantir a segurança das transações. Atualmente existem diversas criptomoedas, além do *Bitcoin*. Uma listagem deste mercado pode ser acompanhada em: <https://coinmarketcap.com/pt-br/>

Figura 3.7 – Blockchain como um caso particular de Distributed Ledger

Fonte: Autor. Adaptado de UGARTE (2018)

O surgimento de criptomoedas e a evolução das DLTs com base nos recursos adicionados pelo *blockchain*, como os *smart contracts*, tem tornado este tipo sistema em uma tecnologia promissora, que deverá abrir caminho para sua aplicação em outros setores. A quantidade de projetos segue se proliferando, expandindo as possibilidades de utilização e fomentando a pesquisa, especialmente em sistemas que envolvem pagamentos, transferência de fundos e negociações que exigem transparência (UGARTE, 2018).

Entretanto, cabe ressaltar que por se tratar de um grupo específico dentro do universo das DLTs, a utilização da tecnologia *blockchain* deve ser avaliada conforme as necessidades de projeto de acordo com seus requisitos. Em determinadas situações, o projeto pode ser atendido por outras classes de DLTs, onde necessariamente não sejam necessárias as características específicas do *blockchain*, as quais podem adicionar uma complexidade desnecessária ao sistema, acarretando, inclusive, sua inviabilidade (FERNÁNDEZ-CARAMÉS; FRAGA-LAMAS, 2018; WUST; GERVAIS, 2018)

3.3 BLOCKCHAIN

A tecnologia *blockchain*, como explicitado anteriormente, trata-se de um tipo particular de DLT, com características próprias que a diferencia das demais. Embora tenha ganhado destaque com o surgimento do *Bitcoin* (NAKAMOTO, 2008) e sua popularização na mídia, não se trata puramente de uma invenção, mas sim de uma inovação incremental utilizando tecnologias já existentes (TOWNSEND, 2020). Antes de compreender os detalhes da tecnologia, se faz importante destacar que embora em geral se associe o *Bitcoin* ao *blockchain* como se tratando de um mesmo elemento, ambos são

figuras distintas entrelaçados pela sua popularização. O nome *Bitcoin* está associado a criptomoeda criada, porém simultaneamente dá nome também a rede blockchain que dá sustentação às operações da criptomoeda (SWAN, 2015). Neste sentido, temos duas entidades envolvidas nessa crescente popularização, uma sendo a criptomoeda e a outra a sua *blockchain*, algo que será presente em outros casos existentes atualmente.

O trabalho apresentado por NAKAMOTO (2008), cuja identidade é desconhecida, dando origem ao *Bitcoin* trazia a proposição para uma questão até então não solucionada por outras iniciativas, o problema do gasto duplo usando uma rede P2P. Anteriormente, proposições como o *DigiCash*, *e-gold*, *B-Money* e *Bit Gold* buscavam apresentar a possibilidade da utilização de uma moeda digital, entretanto não resolviam o problema de maneira satisfatória (AU; POWER, 2018). O *DigiCash* resolvia o problema do gasto duplo, mas exigindo uma entidade central de confiança e revelando a identidade dos usuários responsáveis pelas transações. A iniciativa do *e-gold* conferia o lastro da moeda utilizando negociações com metais preciosos, mas operava fora da legalidade. A proposição do *B-Money* apresentava uma solução para o gasto duplo, mas seu idealizador assumia a impossibilidade de sua implementação. A proposta mais relevante, o *Bit Gold*, proposto por Nick Szabo, trazia muitos dos elementos que viriam a estar presentes na proposição de Satoshi Nakamoto, contudo, sua idealização nunca fora implementada (AU; POWER, 2018; BASHIR, 2018).

O *Bitcoin* resolvia as questões que seus predecessores não conseguiam, através de uma rede descentralizada, com mecanismo de consenso confiável e um sistema de prova de trabalho resistente a fraudes, permitindo a imutabilidade dos registros (DRESCHER, 2017; NAKAMOTO, 2008). Esta tecnologia, que se tornou popular sob o nome de *Blockchain*, permite a realização de transações em uma rede descentralizada, sem a presença de um intermediário, onde a confiança se estabelece pela neutralidade da rede, sua transparência quanto ao histórico de transações acessível forma pública, enquanto o código-fonte do seu sistema está em modelo *open source*. As transações são validadas através dos nós participantes da rede, que utilizam o mecanismo de consenso para entrarem em acordo quanto ao registro das informações no livro-razão distribuído. Este registro, realizado por blocos que contêm uma listagem consolidada de transações submetidas a rede, seriam a base para evitar o gasto duplo em redes onde mais de 51% do poder computacional não esteja comprometido, enquanto a dependência do bloco

antecessor como validação do bloco atual, confere a imutabilidade da cadeia. Estes mecanismos serão descritos a seguir em detalhes, para uma concepção mais amplas das inovações propostas por (NAKAMOTO, 2008).

A tecnologia *blockchain* ao decorrer do tempo, passou por uma série mudanças até chegar no momento atual. Em seu trabalho, SWAN (2015) relaciona a evolução da tecnologia *blockchain* em três fases que agregam características distintas aos sistemas, mostrando sua evolução ao longo do tempo. A fase inicial, onde vê-se a gênese da tecnologia com o *Bitcoin*, definida como *blockchain 1.0*, se mostra marcada pelo surgimento das criptomoedas, atraindo a atenção para um novo ativo financeiro. A evolução da tecnologia, em uma segunda fase de maturidade, denominada *blockchain 2.0*, com o aumento de iniciativas buscando aliar criptomoedas e mecanismo de negociação e transferências, são incorporados às plataformas o conceito de *smart contracts* (SWAN, CHENG, BUTERIN). Este mecanismo passa a permitir de execução de modelos mais complexos dentro das plataformas, com negociações realizadas de forma automática, atendendo a requisitos pré-definidos em um código-fonte que representa digitalmente um contrato, utilizando criptomoedas como meio de pagamento, ou transação de tokens dependendo da plataforma, e registrando todas as informações na *blockchain*.

Em sua fase evolutiva mais recente, a qual SWAN (2015) denomina como *blockchain 3.0*, são incluídos os conceitos de Aplicação Descentralizada (*Decentralized Application*, DApp), permitindo a criação de novos negócios que não necessitam de uma entidade centralizadora para condução de serviços. Sob este paradigma, aplicações permitiram a negociações P2P entre usuários, sem a necessidade de um intermediário, através de sistemas de código-aberto que poderia ser conhecido por todos e com uma rede *blockchain* como meio de transações e pagamentos entre usuários. Dois exemplos deste novo modelo são o Golem¹⁹, serviço que provê acesso a hardware de terceiros, que se encontram ociosos, para usuários que desejam executar tarefas que exigem alto processamento, mas não possuem hardwares potentes a sua disposição, pagando pelo processamento utilizado (GOLEM FACTORY GMBH, 2016). Outro serviço, chamado Sia²⁰, possui o objetivo de prover um serviço de armazenamento descentralizado,

¹⁹ <https://www.golem.network>

²⁰ <https://sia.tech>

utilizando espaço ocioso dos nós que participam da rede, remunerando os participantes pelo uso deste espaço (VORICK; CHAMPINE, 2014).

3.3.1 Estrutura de dados de um Blockchain

O modelo de armazenamento de dados pela tecnologia *blockchain* apresenta uma de suas características que o diferencia dos demais DLTs. Sua estrutura de dados se divide em blocos, onde são adicionadas as transações realizadas pelos usuários e os dados de controle do próprio bloco (DRESCHER, 2017; NAKAMOTO, 2008). A figura 3.8 apresenta o exemplo de um bloco genérico básico, com os componentes utilizados na rede do *Bitcoin*, os quais são similares em outros *blockchains* ou variações desta estrutura. A descrição dos componentes do cabeçalho e do corpo serão descritos a seguir, apresentando uma compreensão do papel de cada elemento dentro do bloco genérico apresentado (ANTONPOULOS, 2014).

Figura 3.8 – Bloco genérico básico baseado no usado pelo Bitcoin

Fonte: Autor, adaptado de: (BASHIR, 2018; DRESCHER, 2017)

3.3.1.1 Metadado

O elemento metadado contém as informações do número de versão do bloco, o valor do *timestamp* e o grau de dificuldade para o algoritmo da Prova de Trabalho. A versão está associada, no caso do *Bitcoin*, ao histórico de desenvolvimento da plataforma,

atualmente na versão 4. O campo de timestamp contém o horário, no formato Unix Time, do momento em que o bloco foi registrado no armazenamento. O grau de dificuldade representa qual o nível de dificuldade computacional que será exigido no puzzle criptográfico resolvido pelos mineradores, no caso do protocolo do *Bitcoin* (ANTONPOULOS, 2014).

3.3.1.2 Nonce

O campo nonce²¹ contém o número encontrado através do algoritmo de consenso, no caso do *Bitcoin*, um algoritmo do tipo Prova de Trabalho (*Proof of Work*, PoW). A implementação do PoW exige que o minerador procure pelo valor do nonce que, adicionada aos dados do bloco, gere um *hash* com uma determinada quantidade de zeros no seu início. A quantidade de zeros determinados está associada ao grau de dificuldade, ajustado de acordo com a capacidade de processamento da rede. Este mecanismo de execução do PoW recebe o nome de mineração e se apoia sobre a tarefa de consumo de trabalho dos nós para encontrar a solução, de tal forma que o minerador é recompensado pelo esforço e um agente malicioso seja desencorajado de alterar a rede, por ser necessário um esforço muito custoso (ANTONPOULOS, 2014; DRESCHER, 2017).

3.3.1.3 Merkel Root

A *Merkel Root* está associada a um resumo *hash* proveniente das informações das transações inseridas no bloco. Este nome está relacionado com a estrutura de dados envolvida neste processamento, denominado *Merkel Tree*, proposta por Ralph Merkle, que corresponde a uma árvore de dispersão (ANTONPOULOS, 2014; DRESCHER, 2017).

Sua representação está apresentada na Figura 3.9, começa a ser montada com o valor de *hash* para cada transação realizada, onde os *hashes* são posteriormente concatenados, gerando um novo valor de *hash* de concatenação, até que por fim se gere um valor de *hash* único que representa todas as transações realizadas. Este *hash* final, chamado de *Merkle Root*, será armazenado no cabeçalho do bloco como identificação resumida das transações do bloco.

²¹ Nonce – Em criptografia, se refere a um número escolhido de forma arbitrária que é utilizado apenas uma vez

Figura 3.9 – Representação da Merkle Tree com os dados das transações presentes no bloco

Fonte: Autor. Adaptado de ANTONOPOULOS (2014)

3.3.1.4 Hash do Bloco Anterior

Esta informação é essencial para gerar a cadeia de blocos, que define a estrutura de dados do *blockchain* e garante sua característica da imutabilidade. A Figura 3.10 apresenta esta lista encadeada formada por cada bloco persistido no armazenamento. De forma geral, este tipo de estrutura inicia com o bloco gênese, responsável por ser o primeiro bloco de toda cadeia e gerar o primeiro *hash* que será utilizado. O próximo bloco gerado irá persistir as informações das transações realizadas, as configurações do cabeçalho e o valor de *hash* do bloco gênese.

O próximo bloco, por sua vez, irá receber e armazenar o valor do *hash* do bloco anterior e assim sucessivamente. A cadeia cresce ao longo do tempo, com cada bloco gravado, dependente sempre do valor de *hash* do bloco gravado anteriormente, formando assim a estrutura de dados que dá o nome para a tecnologia. Esta estrutura apresenta a imutabilidade, com a redução de possíveis fraudes motivadas por este mecanismo, pois a

adulteração de uma transação de um bloco em uma determinada parte da cadeia exigiria modificar todos os blocos mais recentes que foram processados anteriormente, o que atualmente é computacionalmente muito difícil e custoso (ANTONPOULOS, 2014; DRESCHER, 2017).

Figura 3.10 – Cadeias de blocos da estrutura de dados presentes em sistemas *blockchain*

Fonte: Autor. Adaptado de: (DRESCHER, 2017)

3.3.1.5 Transações

As transações adicionadas ao corpo do bloco contêm a mudança de posse de uma determinada quantidade de ativos, no caso do *Bitcoin*, são registradas as mudanças relacionadas a quantidade de criptomoeda dos usuários que realizaram a transação. Cada transação é assinada criptograficamente pelo remetente da transação, utilizando mecanismo de chaves assimétricas e gerando uma assinatura digital, como mostrado na Figura 3.11, seguindo a proposta apresentada por NAKAMOTO (2008).

A transação assinada pelo remetente é adicionada ao bloco, que será submetido à rede. Uma vez a verificação das transações indiquem sua validade para esta mudança de posse, um dos mineradores presente na rede, o qual conseguiu realizar a Prova de Trabalho, gera o bloco que será validados pelos demais mineradores, adicionando ele na cadeia e difundindo por todos os livros-razão distribuídos nos nós (BASHIR, 2018).

Figura 3.11 – Modelo de transação proposto por Nakamoto

Fonte: Adaptado de (NAKAMOTO, 2008)

3.3.2 Tipos de Blockchains

Os blockchains podem ser categorizados em três classes distintas, de acordo com as características da rede. Estas classes, público, privada e consórcio, são operadas de forma diferente, com acessos e composições diferentes em sua plataforma (ZHENG et al., 2017), como apresentado na tabela 3.12.

Outro componente chave está na participação de novos nós na rede. Uma rede *blockchain* pública não pertence a uma organização, sendo aberta ao público e qualquer participante ativo, reconhecido como nó, possuem uma cópia do livro-razão, usando mecanismo de consenso para decidir sobre o estado das informações. As redes privadas, de forma antagônica, funcionam de forma restritiva, onde apenas um grupo de indivíduos ou organizações, adicionados por aceitação de uma autoridade central, tem acesso aos mecanismos de decisão e acesso ao livro-razão. A rede operando como consórcio, tem suas funcionalidades similares às redes privadas, contudo, os nós são adicionados através do consenso dos participantes da rede (ADAM-KALFON; SELSABILA, 2018).

Quadro 3.1 – Propriedades dos tipos de blockchain

Propriedade	Público	Consórcio	Privado
<i>Determinação do Consenso</i>	Todos Mineradores	Nós Seleccionados	Uma organização

<i>Permissão de Leitura</i>	Público	Pode ser público ou restrito	Pode ser público ou restrito
<i>Imutabilidade</i>	Difícil de Adulterar	Poder ter Adulteração	Poder ter Adulteração
<i>Eficiência</i>	Baixa	Alta	Alta
<i>Centralizado</i>	Não	Parcial	Sim
<i>Processo de Consenso</i>	Não Permissionado	Permissionado	Permissionado

Fonte: Adaptado de ZHENG et al. (2017)

3.3.3 Consenso Distribuído

O consenso dentro de um sistema *blockchain* é um de seus elementos principais e razão do sucesso de seu funcionamento de modo descentralizado. Quando uma transação ou um conjunto de transações é submetido a rede, o conjunto de nós, que desconfiam um dos outros, precisam estabelecer um consenso entre eles, para que então aceitem a informação recebida. Para se obter este consenso distribuído, existem muitos algoritmos que podem ser utilizados, os quais são escolhidos de acordo com as características e objetivos de cada *blockchain* (BASHIR, 2018; DRESCHER, 2017)

Estes tipos de algoritmos são estudados pela área de sistemas distribuídos a décadas, como mencionado na seção 3.1.3, ganhando ainda mais relevância e popularidade com o interesse por trás do *blockchain*. Comumente, os algoritmos de consenso devem atender os requisitos apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Requisitos necessários para um algoritmo de consenso

Requisito	Descrição
Acordo	Todos os nós honestos decidem sobre o mesmo valor
Conclusão	Todos os nós honestos encerram a execução do processo de consenso e, eventualmente, chegam a uma decisão

Validade	O valor acordado por todos os nós honestos deve ser o mesmo que o valor inicial proposto por ao menos um dos nós honestos
Tolerância a Falha	O algoritmo deve ser capaz de funcionar na presença de nós com falha ou maliciosos
Integridade	Nenhum nó pode tomar a decisão mais de uma vez em um único ciclo de consenso

Fonte: (BASHIR, 2018)

Os algoritmos de consenso são desenvolvidos com foco na tolerância a falha, permitindo a execução do estado inicial ao final, alcançando a aceitação dos indivíduos, sem ocasionar uma parada da rede. Este funcionamento compreende dois tipos de categorias de algoritmos, os baseados na Tolerância a Falha Bizantina (BFT) e consenso com base na eleição de um líder (BASHIR, 2018). A categoria de BFT não depende de computação intensiva, trabalhando apenas com mensagens assinadas e validando o consenso após receber uma quantidade de mensagens pré-determinada. O segundo tipo compreende a execução de uma competição eleitoral, onde o nó ganhador propõe o valor final.

Os algoritmos mais populares propostos como protocolo de consenso são o *Paxos* e o *Raft*, que utilizam a abordagem baseada em liderança para resolver o consenso distribuídos. Neste mecanismo, os nós do sistema fazem a eleição de um líder, o nó líder recebe todas as transações e faz seu registro, pedindo que os demais nós realizem o mesmo registro. Quando este líder apresenta uma falha, uma nova eleição é realizada, reiniciando este mesmo processo (HOWARD; MORTIER, 2020). Atualmente, existem outros mecanismos de consenso que são aplicados aos variados *blockchains* existentes, o Quadro 3.3 apresenta os principais algoritmos e suas descrições.

Quadro 3.3 – Algoritmos de Consenso

Algoritmo de Consenso	Descrição
Proof of Work (PoW)	Esse tipo de mecanismo de consenso se baseia na prova de que recursos computacionais adequados foram gastos antes de propor um valor para aceitação pela rede
Proof of Stake (PoS)	Este algoritmo trabalha com a ideia de que um nó ou usuário tem uma participação adequada no sistema; ou seja, o usuário investiu o suficiente no sistema para que qualquer tentativa mal-intencionada desse usuário supere os benefícios de realizar tal ataque na rede
Delegated Proof of Stake (DPoS)	Esta é uma inovação em relação ao PoS padrão, em que cada nó que tem uma participação no sistema pode delegar a validação de uma transação a outros nós por meio de votação.
Proof of Elapsed Time (PoET)	Introduzido pela Intel em 2016, o PoET usa um ambiente de execução confiável (TEE) para fornecer aleatoriedade e segurança no processo de eleição do líder por meio de um tempo de espera garantido.
Proof of Deposit (PoD)	Neste caso, os nós que desejam participar da rede devem fazer um depósito caução antes de poderem minerar e propor blocos.
Proof of Importance	Essa ideia é significativa e diferente de PoS. A PoI não depende apenas do tamanho da participação de um usuário no sistema, mas também monitora o uso e a movimentação de tokens pelo usuário para

	estabelecer um nível de confiança e importância.
Federated Byzantine Consensus	Este mecanismo é usado no protocolo de consenso estelar. Os nós neste protocolo retêm um grupo de pares confiáveis publicamente e propagam apenas as transações que foram validadas pela maioria dos nós confiáveis.
PBFT	Esse mecanismo atinge a replicação da máquina de estado, que fornece tolerância contra nós bizantinos. Vários outros protocolos, incluindo PBFT, PAXOS, RAFT e Acordo Bizantino Federado (FBA) também estão sendo usados ou foram propostos para uso em muitas implementações diferentes de sistemas distribuídos e cadeias de blocos.
Proof of Authority (PoA)	É um algoritmo de consenso baseado em reputação que introduz uma forma prática e eficiente para solucionar problemas com redes Blockchain (especialmente as privadas).

Fonte: Adaptado de ANDONI et al. (2019) e BASHIR (2018)

Os algoritmos de consenso baseados em Prova (*Proof-based*), em eleição de líder ou consenso de Nakamoto (onde o líder é eleito aleatoriamente por algoritmo) são classificados com totalmente descentralizados ou não permissionado. Os algoritmos baseados em BFT são classificados como consórcios ou permissionados. Estas duas classes diferem quanto escalabilidade da rede e performance no tempo de consenso. No primeiro caso, a rede escala através da entrada contínua de nós na rede, contudo, o tempo para atingir o consenso é lenta. No segundo caso, o mecanismo de consenso apresenta boa performance, porém costuma ter limitações de nós (BASHIR, 2018).

3.3.4 Smart Contracts

O conceito de *smart contract* foi apresentado em 1996 por SZABO (1996), criptógrafo e jurista, o qual foi responsável por apresentar o conceito da criptomoeda chamada *Bit Gold*, já mencionada neste capítulo. O conceito de SZABO (1996) indicava que quatro aspectos importantes dos contratos tradicionais poderiam ser melhorados através da utilização da tecnologia. Estes aspectos eram verificabilidade, acompanhamento, privacidade e exigibilidade (CAMPOS, 2018).

Em sua essência, os *smart contracts* são scripts escritos para executar cláusulas programadas, permitindo a estruturação de processos automatizados de transação de bens, que seguem regras pré-definidas pelas partes durante a criação do contrato (CAMPOS, 2018; SZABO, 1996). As cópias desses contratos são armazenadas em uma plataforma *blockchain*, garantindo sua segurança e imutabilidade, assim como gerenciando sua execução sem a necessidade de um acompanhamento de uma entidade (DRESCHER, 2017; WANG et al., 2019b).

Com a criação do *Bitcoin*, a ideia proposta por SZABO (1996) foi retomada, contudo não estava presente na implementação inicial do *blockchain* associado a esta criptomoeda (CAMPOS, 2018). Posteriormente este conceito viria a ser explorado com maior liberdade na plataforma *Ethereum*²², criada por Vitalik Buterin (BUTERIN, 2014a; BUTERIN; MOUGAYAR, 2017; CAMPOS, 2018). A plataforma proposta por BUTERIN (2014), diferente da proposta por NAKAMOTO (2008), forneceria um *blockchain* com uma linguagem de programação, permitindo aos usuários a criação de contratos, que dentro da plataforma, poderiam transacionar os ativos registrados e a criptomoeda criada, o Ether (BUTERIN, 2014b). Desta maneira, usuários poderiam criar contratos, gravá-los e executá-los na plataforma *Ethereum*, de forma automática e segura, realizando transações que seriam armazenadas no *blockchain* criado.

Posteriormente, outras plataformas adotaram a mesma filosofia, dando origem a novos *blockchains* com capacidade de executar *smart contracts*. Entre eles os mais conhecidos e aplicados ao setor empresarial são a plataforma *Corda*²³ e o *Hyperledger*

²² <https://ethereum.org/en/>

²³ <https://www.r3.com/corda-platform/>

*Fabric*²⁴. A plataforma *Corda* é mantida pelo consorcio R3 composto por diversas empresas do setor financeiro presentes diversos países, enquanto o *Hyperledger*, projeto que engloba outras plataformas além do *Fabric*, é mantido pela Linux Foundation, embora tenha ganhado muito apoio da IBM em sua fase inicial (VALENTA; SANDNER, 2017).

Estas plataformas com aplicações empresariais, permitem a execução de *smart contracts*, sem a necessidade de utilização de criptomoedas. Este modelo permite que estas plataformas usufruam dos benefícios alcançados com a utilização de um *blockchain*, com possibilidade de criação de *smart contracts* para diversas áreas, como *supply chain*, transportes, seguridade e saúde, que podem receber entradas de outros sistemas, mas que não transacionam ou estejam sujeitos a flutuações de criptomoedas (VALENTA; SANDNER, 2017; WANG et al., 2019b).

3.3.5 Tokens em ICOs

A criação da plataforma *Ethereum* e a presença dos *smart contracts*, permitiu o surgimento de outros novos modelos de aplicação utilizando a tecnologia *blockchain*. Em seu *white paper* a respeito dos *smart contracts*, (BUTERIN, 2014b) apresenta a possibilidade de contratos na plataforma, mencionando a possibilidade da criação de *tokens* digitais criptográficos. Os sistemas de *tokens* possibilitariam a criação de sistemas que utilizassem uma representação digital para partes de um ativo físico. Esta abstração seria um mecanismo correspondente ao desempenhado pelas ações em relação a representação de posse de parte de uma empresa (AU; POWER, 2018; CAMPOS, 2018).

Os *tokens* criados na rede, como sugerido por BUTERIN (2014b), poderiam representar partes de uma propriedade, pontos de fidelidade, títulos e demais ativos escassos. Embora existência de *tokens* em geral e mesmo os digitais, não sejam uma novidade, esta proposta se mostrou interessante ao longo do tempo, conforme mostra a listagem na Coinmarketcap²⁵, de maio de 2018, indicando que o ecossistema de *tokens* já registra mais de 5.400 *tokens* criptográficos negociados e mais de 260.000 contratos de *tokens* estão presentes na rede *Ethereum* (AU; POWER, 2018)

²⁴ <https://www.hyperledger.org/use/fabric>

²⁵ <https://coinmarketcap.com/pt-br/>

Diferente das criptomoedas, que são nativas das plataformas *blockchain* que usam este tipo de ativo, os *tokens* podem ser criados e gerenciados por *smart contracts* específicos (CHEN, 2018), estabelecendo regras, controlando a quantidade que cada usuário tem e possibilitando a troca automática a depender do tipo de contrato e finalidade do *token* (CHEN, 2018; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2016). Atualmente existem algumas categorias de *tokens*, como apresentado no Quadro 3.4, onde são descritas as características de cada categoria.

Quadro 3.4 – Tipos de *Tokens* e suas descrições

Tipo	Descrição
Utility Token	Estão associados a benefícios, como serviços exclusivos, descontos, pontos de fidelidade
Security Token	Representam partes de um ativo concreto, como participação em um negócio ou distribuição de dividendos
Protocol Token	Sua utilização reside no incentivo ou recompensas dentro da rede, como pagamento de taxas de transação, utilização de serviço.
Natural Asset Token	Representam recursos naturais ou commodities, permitindo suas negociações, como contratos futuros de petróleo ou certificados de energia renovável.
Crypto Collectibles	São utilizados para representar ativos que são únicos, singulares e não fungíveis, como obras de arte e arte digital.
Stablecoins	São lastreados em outros ativos financeiros, como moedas, commodities e outro, fornecendo um ativo digital de baixa volatilidade quando comparado as criptomoedas convencionais.

Fonte: Adaptado de TAPSCOTT; TAPSCOTT (2016)

Atualmente diversas plataformas de *blockchain* têm inserido a possibilidade de criação de *tokens*, mesmo aquelas com foco em utilização empresarial, como o caso do *Hyperledger Fabric*. Entretanto, a utilização de *tokens* dentro deste tipo de sistema é regido pelas definições das entidades controladoras, uma vez que não existe uma

criptomoeda atrelada a plataforma, o *token* pode se tornar a representação de ativos físicos de forma limitada, sendo transacionados em operações específicas, também definidas através de *smart contracts* e regras das entidades (AU; POWER, 2018). Um tipo de aplicação neste tipo de plataforma são os registros notariais, onde o *token* pode ser a representação da certidão de posse de um determinado bem, onde a transação financeira ocorre de forma tradicional, no sistema financeiro convencional, mas os registros de propriedade utilizam uma *blockchain* como plataforma segura para conter o sistema (CAMPOS, 2018).

O surgimento dos *tokens* criptográficos está permitindo o nascimento de novos modelos de captação de fundos, através da tokenização de projetos e a comercialização dos tokens, em um processo conhecido como Oferta Inicial de Moeda (*Initial Coin Offerings*, ICO). A realização de ICOs permite a empreendedores a captação de recursos, em mecanismo similar ao que o IPO (*Initial Public Offering*) representa para uma companhia de capital aberto (AU; POWER, 2018; CHEN, 2018).

Contudo, no caso dos ICOs a venda de *tokens*, ocorre de forma direta, entre os empreendedores e investidores, com mecanismos definidos por *smart contracts*. Ainda com similaridade ao mercado de ações, os tokens, dependendo de suas regras pré-definidas, podem ser negociados, com valores que apresentam flutuações dependendo do mercado e mudança na posse, em transações também registradas no *blockchain* (CHEN, 2018). Estas operações abrem caminho para uma nova economia, onde os ativos podem ser negociados entre as partes interessadas e os acordos registrados no *blockchain*, com os *tokens* como indicador de posse, o que se denomina atualmente como *Tokeneconomy* (AU; POWER, 2018).

3.1.1. Identidade Auto-Soberana

Atualmente o *blockchain* tem se mostrado uma ferramenta de interesse da área de gestão de identidade, com a possibilidade de auxiliar no desenvolvimento de sistemas de Identidade Auto-Soberana (*Self-Sovereign Identity*, SSI). O conceito de sistemas de SSI está associado a gestão dos dados de identificação por parte do usuário, onde somente ele, seria responsável por optar pelo compartilhamento destas informações com demais serviços (FERDOUS; CHOWDHURY; ALASSAFI, 2019). Diferente dos modelos tradicionais, centralizado e federado, os sistemas SSI colocam o usuário como um

elemento de poder e controle sobre sua identidade, como mostrado na Figura 3.12. Enquanto nos modelos anteriores o usuário fazia a requisição ao emissor para o fornecimento de sua prova de identidade para ser aceito em por um verificador, o sistema SSI modifica essa dinâmica. Dentro desta nova premissa, o usuário está no centro do controle de sua identidade, realizando o registro de sua identidade em uma parte que compõe o sistema e requerendo posteriormente suas informações reconhecidas pelo emissor, para então, definir quais serão passadas para o sistema que deseja realizar a verificação. Esta nova arquitetura permite que o usuário tenha controle de seus dados, seja aderente a leis de proteção e a contraparte de registro permite que o emissor e o verificador validem as informações, sem interagirem entre si.

Figura 3.12 – Participação do usuário nos modelos de identidade

Fonte: Autor. Adaptado de (PREUKSCHAT; REED, 2021)

Embora o modelo de SSI não seja dependente da utilização do *blockchain*, alguns trabalhos mostram que a inclusão da tecnologia como parte da arquitetura de um sistema de SSI pode garantir as premissas definidas para este modelo (LIU et al., 2020). Este fato se deve a adição das características do *blockchain* ao mecanismo de identificação, como a possibilidade de armazenamento seguro das informações utilizando criptografia, a imutabilidade dos dados após inseridos possibilitando a credibilidade, assim como a descentralização dos registros de identidade. Uma das arquiteturas propostas é apresentada na Figura 3.13, indicando uma camada onde é inserido o *blockchain* como parte do sistema de SSI, sendo responsável pelos registros e ocupando as funcionalidades da tradicional Autoridade de Identificação (MÜHLE et al., 2018). Esta proposição compreende a descrição anterior sobre os componentes de um sistema SSI, com a inclusão de uma *Wallet*, capaz de guardar e fornecer as credenciais para o usuário. A outra inclusão

está no componente de Blockchain, que permite o registro das informações do usuário e realiza as verificações requeridas pelo emissor de identidade e o verificador.

Figura 3.13 – Arquitetura de Sistema de Identidade Auto-Soberana

Fonte: Autor. Adaptado de MÜHLE et al. (2018)

Embora o conceito de SSI traga diversos benefícios para a tratativa dos dados do usuário e também para as interações no meio digital, onde o *blockchain* permite atender alguns pontos da LGPD e da GDPR, existem limitação para sua aplicação em alguns cenário e condições (COSTA, 2020; PREUKSCHAT; REED, 2021). Do ponto de vista técnico, será necessário a adesão de entidades governamentais em alguns casos, assim como a presença de entidade neutras de gerenciamento de identidade, como a Fundação Sovrin²⁶, em outras situações. A implementação também depende do desenvolvimento de plataformas com essa finalidade, como hoje os projetos *Aries*²⁷ e *Indy*²⁸ da plataforma *Hyperledger*, ou desenvolvimentos utilizando a plataforma *Ethereum*. As limitações de

²⁶ <http://www.sovrin.org>

²⁷ <https://www.hyperledger.org/use/aries>

²⁸ <https://www.hyperledger.org/use/hyperledger-indy>

adesão e utilização dependem da conscientização da sociedade, assim como de plataformas que apresentem facilidade para gerenciamento dos dados e entreguem valor no ciclo de vida das aplicações onde são utilizadas. No aspecto legal, algumas características devem ser aprofundadas para cumprir as regulamentações, como a LGPD, compreendendo os requisitos técnicos para utilização de sistemas de SSI (COSTA, 2020). Enquanto alguns requisitos são cumpridos com eficiência, outros pontos, como a portabilidade e o direito a correção e exclusão das informações são limitantes de algumas plataformas de *blockchain* (PREUKSCHAT; REED, 2021).

3.4 APLICAÇÕES DE BLOCKCHAIN NO SETOR ELÉTRICO

O potencial da utilização do *blockchain* em diversos setores mostra que o alcance da tecnologia pode ser grande, mudando diversos segmentos e modelos de negócio (MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2016). As características apresentadas pela tecnologia ao longo do tempo, demonstram a evolução constante do ecossistema, tornando sua aplicação factível para solucionar diferentes problemas, em camadas públicas ou privadas, adicionando confiança, transparência e automação nos processos (BUTERIN, 2014b; MOUGAYAR, 2016; TAPSCOTT; TAPSCOTT, 2016). Entre os diversos setores que podem aderir à utilização da tecnologia, o setor de energia apresenta problemas que podem encontrar no *blockchain* um caminho para as soluções, modernizando a rede atual, relações comerciais, segurança e alterando a estrutura de negócios e organizações (BRILLIANTOVA; THURNER, 2019; IMBAULT et al., 2017).

O setor de energia elétrica, ao buscar fontes renováveis e inserir cada vez mais na sua matriz os REDs, acompanha um aumento na complexidade do gerenciamento e orquestração dos ativos. De outro lado, a abertura dos mercados de energia, com baixa regulação e a penetração dos *prosumers*, possibilita que ao gerar sua energia, o consumidor consiga dar conta da sua demanda e quando produz em excesso, vendê-lo para o mercado (ANDONI et al., 2019; IRENA, 2019c). Estas duas condições são elementos já válidos para investigações de soluções, dada a necessidade de relações comerciais e financeiras em ambos os lados das transações, envolvendo agentes diferentes, que possuem interesses distintos e necessitam de segurança. Outro aspecto, está na automação da execução de contratos e entrega de energia, que possuem dinâmicas próprias ditadas pela regulação setorial, mas devem ser feitas de forma automática, como

a promovida pela execução de *smart contracts* (KHATOON et al., 2019). Processo o qual deve ser auditável por agências governamentais, com regras regidas por órgãos de regulação e que precisam de todos os arcabouços de cibersegurança, privacidade e credibilidade, onde pode-se optar pelo uso da identidade auto-soberana (AWASTHI et al., 2020; GULATI; HUANG, 2019).

A Agência Internacional de Energia Renovável (*International Renewable Energy Agency*, IRENA), em seu trabalho focado em investigar a utilização da tecnologia *blockchain* no setor elétrico (IRENA, 2019c), apresentou uma relação percentual de aplicações levantadas, como visto na Figura 3.14. Quando avaliado este resultado, observa-se que de fato a maior parte dos projetos trata das transações P2P, responsável por 36% das iniciativas, seguido de operação e gerenciamento de sistemas ligados a rede de energia elétrica, com 24%. Em percentuais menores e próximos, têm-se os seguimentos de financiamento de REDs (12%), gerenciamento e certificados de energia limpa e emissão de CO₂ (11%) e mobilidade elétrica.

Figura 3.14 – Áreas do setor elétrico com que tem projetos utilizando Blockchain

Fonte: (IRENA, 2019c)

Corroborando as informações da IRENA, o trabalho de (ANDONI et al., 2019) apresenta levantamentos das iniciativas setoriais que utilizam a tecnologia *blockchain*, assim como as plataformas mais utilizadas e mecanismos de consenso. O que se observa nestes dois trabalhos são as possibilidades de uso, em variados nichos do setor de energia,

agregando transparência, reduzindo custos, automatizando transações, ainda que existam desafios ligados a escalabilidade, consumo de energia e custo de utilização e desenvolvimento deste tipo de sistemas (ANDONI et al., 2019; BRILLIANTOVA; THURNER, 2019; DI SILVESTRE et al., 2020). A seguir são apresentados algumas das categorias de aplicações, com base nas identificadas pelo trabalho da IRENA (2019) e também de ANDONI et al. (2019), que correspondem as segmentos mais promissores e que abrigam hoje alguns dos projetos levantados.

3.4.1 Comercialização Peer-to-Peer

Em ambientes regulados, a comercialização de energia elétrica depende de uma série de entidades intermediando a venda e compra de energia entre produtores e consumidores (ANDONI et al., 2019). A complexa e tradicional está sendo substituída em alguns mercados por mecanismos e desenhos de negócio mais diretos, permitindo que o consumidor final possa optar pela origem da energia consumida, com base na tecnologia da fonte geradora utilizada. A utilização de sistemas que utilizam *blockchain* tem se proliferados neste segmento (IRENA, 2019c), pela redução da complexidade, diminuição de custos, possibilidade de transações automáticas e possibilidade de integração com outros sistemas (KHORASANY et al., 2020; LIU; WU; LI, 2019; WANG et al., 2019a). A utilização de sistemas de *blockchain* como plataformas de negociação permitem a precificação dinâmica e realização de contratos de compra e venda de energia com custo reduzido, sem uma complexa rede de intermediários e que podem ser utilizadas por consumidores finais, *prosumers* (KUMAR, 2018) e sistemas dentro do paradigma de *Smart City* (KHATTAK et al., 2020; LOMBARDI et al., 2018; YAHAYA et al., 2020).

3.4.2 Gerenciamento e Operação da Rede

As iniciativas e pesquisa na área operacional do setor elétrico, com integração do *blockchain* ao SG, estão em constante crescimento (DOS SANTOS; BERMANN, 2020; SHAFIE-KHAH, 2020), pois a integração para além dos serviços financeiros e de comercialização depende de outros componentes. Estações de recarga de veículos elétricos, comunicação com medidores inteligentes, demais dispositivos presentes na rede elétrica que possam usufruir de interligação com a TICs, são dependentes da infraestrutura existente nas cidades (LI et al., 2019a; SHAO et al., 2019). Estas conexões dentro do setor elétrico, com demais sistemas, provendo o tráfego de dados relacionados

ao setor (consumo, compra, venda, produção, metrologia, etc.) se relacionando com o conceito de Internet da Energia, que vem ganhando destaque como temática de pesquisa (WU; TRAN, 2018; WU et al., 2021). A escolha e adoção encontra nesta dimensão um limitante também técnico, que se soma aos desafios de velocidade, escalabilidade, consumo de energia e a interoperabilidade entre sistemas que usem o *blockchain* (DI SILVESTRE et al., 2020).

3.4.3 Financiamento e Desenvolvimento de Energia Renovável

A utilização de *blockchain* no segmento de financiamento e ampliação do uso de energias renováveis se mostra um caminho viável, uma vez que suas características permitem a tokenização de ativos de geração e venda de energia excedente, por exemplo (IRENA, 2019c). Esses mecanismos permitem a criação de novos modelos de negócio que não dependem do sistema financeiro convencional para o financiamento de tecnologia geradora, ou permite a utilização de linhas convencionais de crédito, mas com um tempo de retorno do investimento menor, amortizando com a venda de energia produzida.

3.4.4 Gerenciamento de Certificado de Energias Renováveis

Os Certificados de Energia Renovável (*Renewable Energy Certificate*, REC) correspondem a um instrumento que certifica que a energia gerada, quantificando para cada 1 MWh, é proveniente de fontes renováveis de energia (IRENA, 2019c). Estes certificados podem ser negociados em mercados dedicados para este tipo de ativo, onde podem ser vendidos como representação de uma determinada quantidade de energia limpa ou então negociados como crédito de carbono (PATEL et al., 2020). Atualmente, algumas iniciativas buscam utilizar a tecnologia *blockchain* como uma ferramenta para a descentralização dessas negociações, além do próprio processo de acreditação e emissão dos certificados, oferecendo novos mecanismos para estas atividades e novas dinâmicas para este segmento (HUA et al., 2020; KHAQQI et al., 2018).

3.4.5 Mobilidade Elétrica

A eletrificação da frota veicular em diversos países abre a demanda de sistemas de carregamento em vias públicas e que ofertem a possibilidade de se carregar o VE durante seu fluxo nas cidades ou estradas. A ausência de um padrão da carga imposta ao sistema

(diferente ao carregamento noturno residencial) exige que a rede elétrica tenha dinamismo frente a esta demanda, enquanto prove energia de baixa emissão de carbono e utiliza os sistemas digitais para garantir a realização da compra de energia para carregar o VE, muitas vezes de forma automática (FU; DONG; JU, 2020). Plataformas utilizando *blockchain* se mostram de grande utilidade pela aderência ao cenário, uma vez que a utilização de *smart contracts*, identificação confiável e a possibilidade de comercialização direta com geradores permite alcançar os requisitos necessários para este tipo de sistema (FU; DONG; JU, 2020; KIM et al., 2019; WANG et al., 2020).

3.4.6 Criptomoedas e Tokenização

Como se trata de uma tecnologia que está passando pela sua infância e, de forma geral, acaba sendo associada as criptomoedas e suscetível ao escrutínio público, os mecanismos regulatórios se mostram outra barreira para a implementações de soluções no mercado. O mercado de energia elétrica, em âmbito nacional, possui regulações que devem ser modificadas para a inclusão de transições P2P e a própria estrutura atual que envolve o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL) revisto, visando uma abertura maior do mercado como mostram os estudos da EPE (MME, 2019a). Abordando o lado de mercado e produtos financeiros, outras regulações devem ser avaliadas para permitir a criação e negociação de produtos, ativos e novos modelos de negócio. Em seu trabalho FILIPPI e WRIGHT (2018) avaliam os impactos e limitantes legais do *blockchain*, onde limitantes legais e regulatórios do ambiente financeiro podem impedir a inovação em setores e modelos, como a tokenização de alguns tipos de ativos ou mecanismos mais sofisticados que poderiam ser incorporados ao mercado de energia elétrica e também ao de infraestrutura.

A temática regulatória a cerca das criptomoedas e tokenização devem abrir frentes de pesquisa e discussão nos próximos anos, uma vez o mercado financeiro possui estrutura própria, com órgãos que disciplinam o setor de ativos mobiliários (ações, contratos futuros, derivativos, etc.), como no Brasil, a Comissão de Valores Mobiliários. Outro segmento financeiro está na criação das moedas digitais soberanas, como o Real Digital (OLIVEIRA, 2019) e o Yuan Digital (KHARPAL, 2021), onde atualmente a China vem pressionando a saída do *Bitcoin* do seu território em detrimento da proximidade de lançamento da sua moeda. Estes pontos se mostram importantes para um cenário futuro com o Marco Legal do Saneamento Básico, a criação de soluções baseadas

no conceito de *multi-utilities* (STEWART et al., 2018) que vem ganhando força no cenário internacional, assim como integrações envolvendo a crescente temática de Economia Circular (EMF, 2016), iniciativas que deve transacionar moedas digitais, tokens ou novos mecanismos de transação que podem envolver a tecnologia *blockchain* e que tem interface direta com o setor de energia elétrica e o futuro das cidades frente ao desenvolvimento sustentável.

3.5 APLICAÇÕES DE BLOCKCHAIN EM VIRTUAL POWER PLANTS

Como apresentado, as aplicações da tecnologia *blockchain* são variadas no setor de energia elétrica. Entretanto, esta dissertação se dedica a investigação do seguimento de VPP, considerando a utilização do blockchain como uma tecnologia habilitadora para sua inserção e operação, garantido processos seguros, transparentes e auditáveis.

O interesse da inclusão da tecnologia *blockchain* em sistemas de VPPs se mostra crescente, segundo levantamento realizado na ferramenta *Scopus*. Os primeiros trabalhos publicados datam o ano de 2017 e vêm crescendo anualmente, como apresentado na Gráfico 3.1, somando 34 artigos acumulados. Este fato demonstra a contemporaneidade deste tema e a necessidade de pesquisas dentro desta temática. Dentro do cenário nacional, não foram identificados trabalhos dentro desta temática, indicando ineditismo do tema pesquisado. A Gráfico 3.2 apresenta o levantamento dos países que têm publicado mais artigos dentro desta temática, onde a China permanece na liderança, similar a temática de VPPs de modo geral.

Gráfico 3.1 – Artigos publicados por ano sobre a temática VPP utilizando *blockchain*

Fonte: Base de dados da Scopus

Gráfico 3.2 – Publicações por país

Fonte: Base de dados da Scopus

A análise criteriosa destes trabalhos apresenta uma divisão em subtemas e abordagens distintas com alguns potenciais sinérgicos da tecnologia com as propostas apresentadas e plataformas de software de VPPs. O levantamento das palavras-chave utilizadas neste conjunto de artigos, das quais foram excluídas as palavras “*blockchain*”, “*virtual power plant*” e “*vpp*”, além de considerar palavras que foram utilizadas mais de uma única vez, permitiram obter o Gráfico 3.3. Nele são apresentadas as palavras que aparecem nestas condições de filtragem, considerando a frequência com a qual são utilizadas pelos artigos. Os três primeiros termos se tornam frequentes uma vez que os artigos de forma geral abordam os temas de comercialização ou registros operacionais por *smart contracts* utilizando a infraestrutura do SG, enquanto os *microgrids* estão relacionados diretamente com a presença de REDs em uma dada região próxima, consideração presente em alguns trabalhos.

Gráfico 3.3 – Frequência de palavras-chave para os artigos levantados

Fonte: Autor. Base de dados Scopus

Gráfico 3.4 – Quantidade de artigos para classes definidas

Fonte: Autor. Base de dados Scopus

A classe de comercialização agrupou trabalhos focados em aspectos comerciais e financeiros, em geral associado a investigações a respeito de *smart contracts* e suas dinâmicas. Os primeiros separados nesta classe apresentam uma abordagem mais generalista relacionados a comercialização, com proposição de modelo de VPP usando Hyperledger (FAN et al., 2020), exemplos de transações (OH et al., 2017), e propondo a rastreabilidade da energia produzida e exemplificando com sistemas em que funcionam em âmbito experimental (LICEAGA; SANCHIS; DEL MAR RUBIO-VARAS, 2018).

Dentro desta classe, os trabalhos de CIOARA et al. (2020) junto a SCHLUND e GERMAN (2019) apresentam investigações de comercialização, introduzindo o *blockchain* como ferramenta para operacionalizar as VPP através da integração com comunidades. Desta forma uma VPP pode utilizar os recursos de um determinado grupo de indivíduos como recurso de seu portfólio (CIOARA et al., 2020) e com a possibilidade modelos que insiram a votação como processo de tomada de decisão para parâmetros de venda da energia produzida localmente (SCHLUND; GERMAN, 2019).

Compondo a temática de comercialização, os trabalhos de HUANG et al. (2020) e WEN et al. (2020) apresentam abordagens buscando a formação de preço da energia em seu sistema de comercialização, com modelos que parametrizam *smart contracts* com os

resultados calculados. Enquanto (WANG; LIU, 2018) trata da utilização da comercialização e sua recompensa financeira como um caminho para uma maior adoção de REDs.

Os trabalhos que lidam com casos de aplicação analisam casos reais que estão sob testes na Europa (LICEAGA; SANCHIS; DEL MAR RUBIO-VARAS, 2018; MARCHI et al., 2019) e na Austrália (MARCHI et al., 2019; NINOMIYA; THOMAS, 2018) e os impactos atuais da adoção, enquanto o trabalho de KIM et al. (2019) apresenta o estudo de caso em ambiente controlado, através da construção de um *living lab* que permite geração de energia, uso de sistemas de RD, recarga de carros elétricos e testes com sua plataforma de VPP.

Alguns dos trabalhos analisados abordam simulações técnicas, como o trabalho citado anteriormente, com a criação de um *living lab* (KIM et al., 2019), mas também encontram-se testes de bancada utilizando *Raspberry Pi* e Hyperledger (GORANOVIC et al., 2019) Enquanto MNATSAKANYAN et al. (2020), em seu trabalho, apresenta uma solução de software para ser utilizada como piloto em Dubai, utilizando a rede Ethereum como *blockchain* para sua proposição. No trabalho que completa esta classe, GALICI et al. (2019) faz simulações através da criação de um modelo cyber-físico, apresentando informações mais realistas de saída, uma vez que utiliza dados reais de entrada para simular.

As tecnologias emergentes, como Inteligência Artificial (IA), IoT e *Edge Computing* se apresentam em alguns trabalhos. A IA se apresenta como possibilidade integrar uma camada do sistema de VPP para o planejamento de estações de carregamento de VE, considerando o *blockchain* como camada de segurança e execução de contratos inteligentes (WANG et al., 2020). Os trabalhos de MA et al. (2020) e LU et al. (2020) também utilizam IA e ferramentas de *Business Intelligence* (BI) dentro de uma plataforma de VPP para realizar o *matching* entre compradores e vendedores, com base nos preços de compra e venda, encontrando as negociações mais eficientes. O projeto de *living lab* já citado em outras categorias (KIM et al., 2019), implementa mecanismos que utilizam IA para realizar o planejamento do sistemas e otimização utilizando dados de produção dos painéis fotovoltaicos da instalação, sistema de RD, previsão do tempo e

carga de VE Este modulo está presente dentro da proposta de VPP apresentada pelos autores, sendo responsável por fornecer as informações para a operação.

Dentro desta categoria, existem os trabalhos que tratam da utilização de sistemas de *edge computing*, aplicados aos modelos de VPPs (LI et al., 2019b; SONG; LEE, 2020), associando estas iniciativas também a IoT e *Energy IoT*. A adoção destas soluções permite a possibilidade que o controle dos elementos da rede, como os REDs, sejam realizados pelo sistema alocado próximo aos recursos (LI et al., 2019b) com as informações posteriormente repassadas para um *blockchain*. Enquanto SONG e LEE (2020) apresentam a proposta de uso de uma solução onde o dispositivo de *edge computing* faz parte da solução de negócios, propondo que os equipamentos centralizadores, alocados próximos aos centros de carga, formem uma rede *blockchain*, sem a necessidade de mandar as requisições para servidores de *cloud*, contudo, atualizando eles posteriormente com as informações armazenadas localmente.

Um único trabalho aborda a criação de uma moeda, o RESCoin (LAZAROIU; ROSCIA, 2018), como incentivo a uso de energia sustentável, através da geração da moeda atrelada a produção de energia. Esta proposta foca nos *prosumers*, buscando uma maior inserção e retribuição para sua participação na VPP como recurso de geração.

A avaliação realizada mostra que existem possibilidades de utilizações ainda não investigadas, embora as utilizações mencionadas sejam importantes e invariavelmente estarão dentro de modelos propostos e simulados. Este trabalho apresenta novos modelos de VPP que utilizem a tecnologia *blockchain*, explorando outras possibilidades que se apresentam possíveis com suas características. As proposições dos modelos serão balizadas pelas limitações impostas em território nacional, considerando a Macrometrópole Paulista como recorte geográfico de referência. Uma vez propostos os modelos, serão averiguados os limitantes e analisados, contribuindo assim para as futuras discussões de modernização do setor elétrico brasileiro.

O desenvolvimento utilizará a metodologia *Design Science Research* (DSR), possibilitando a produção de artefatos técnicos como meios para a realização da pesquisa. Os artefatos gerados contribuem apresentando requisitos necessários para utilização da tecnologia, os testes realizados, resultados obtidos das simulações e assim, formam um

arcabouço técnico referente a temática. Os modelos propostos e os artefatos gerados irão contribuir como ponto de partida para futuras investigações, conhecendo-se os resultados obtidos e permitindo a inovação incremental dos modelos e até sua aplicação em campo, para validações reais.

4 OS REQUISITOS PARA MMP

A transição energética e a busca pela mitigação das mudanças climáticas apresentam um caminho para modificação da governança energética, trazendo para os governos locais a responsabilidade e competência para ações quanto a estratégia de energia territorial (COLLAÇO et al., 2020). Entretanto, esta abordagem rompe o modelo de políticas públicas tradicionais, aumentando a complexidade e simultaneamente criando oportunidades para uma mudança de paradigma e escolhas. Este aspecto regionalizado na tomada de decisão encontra na GD uma ferramenta de flexibilização e estratégica para atender as necessidades locais, enquanto através das fontes renováveis, reduz os impactos da utilização de energia fóssil e emissão de CO₂.

O aumento na inserção das fontes de GD afeta diretamente as localidades onde estão inseridas, dada sua premissa de instalação próxima aos centros de consumo. Esta característica exige uma investigação regional de demanda, oferta e potencial de geração de energia, além do levantamento de condições técnicas, como sistemas de TICs e a possibilidade de implantação de sistemas dentro do paradigma de SG. As informações resultantes deste tipo de levantamento permitem inferir se um projeto de VPP pode ser introduzido localmente. Motivado por esta condição, este trabalho utilizou o recorte regional da Macrometrópole Paulista, que será caracterizada adiante, como referência para avaliação da possibilidade de inserção de modelos de VPP.

Este capítulo inicia apresentando o levantamento das condições deste recorte regional, demonstrando a importância da escolha, uma vez que esta região goza de condições ímpares quando comparadas com outras localidades no território nacional. Posteriormente, são consideradas as premissas do futuro da região dentro das expectativas de modernização do setor elétrico nacional e inclusão de elementos dentro do paradigma de *Smart City*. Como último elemento, serão estabelecidos os critérios que serão empregados na proposição de modelos de VPP a serem desenvolvidos no capítulo seguinte.

4.1 A MODERNIZAÇÃO DAS CIDADES

As cidades e seus ambientes urbanos e rurais constituem um organismo em constante mudança e evolução. Pensar nesses ambientes sob o paradigma de *Smart City*

oferece um modo de analisar o momento atual e futuro, ainda que exista uma falta de consenso e diversas definições para esta temática (LIMA et al., 2020), a inclusão das TICs e a mudança da relação das cidades com sua população e suas dinâmicas são fatores de mudança esperados (DAMERI; COCCHIA, 2013; LIMA et al., 2020).

Atualmente, a agenda 2030 dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) proposto pela ONU e do qual o Brasil é signatário, tem guiado os esforços de mudanças globais, com foco em 17 objetivos diferentes (FREY et al., 2020; ONU, 2016), como apresentado na figura 4.1. No cenário internacional, diversos projetos de *smart cities* buscam atuar no atendimento de ao menos parte destes objetivos, buscando soluções inovadores e inserindo a digitalização como ferramenta para suas implementações (ANTHOPOULOS, 2017, 2019). Esta modernização da infraestrutura das cidades está apoiada sobre o uso de tecnologias emergentes como ferramenta para políticas públicas, de modo nunca antes visto, onde as dinâmicas locais podem ser conhecidas por sensoriamento e sistemas dedicados (RATTI; CLAUDEL, 2016), utilização de dados para extração de conhecimento (LIM; KIM; MAGLIO, 2018; WILLIAMS, 2020) e a busca pela segurança e privacidade de cada indivíduo e das entidades que compõe este sistema (SERRANO, 2018; SUN; ZHANG, 2020).

Figura 4.1 – Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

Fonte: NAÇÕES UNIDAS - BRASIL (2021)

Esta visão de soluções pensando no futuro do meio urbano e rural não deve ser deixado de lado ao se pensar na MMP. A complexidade da região exige ferramentas adaptativas e uma evolução de sua infraestrutura, permitindo que os ODS sejam alcançados, garantindo a sustentabilidade da região e a melhoria da qualidade de vida da população pertencentes aos municípios que a compõe. Todavia, pensar na modernização da MMP também se traduz na possibilidade de utilizar esta experiência e resultados obtidos localmente para avaliar mudanças que podem ser aplicadas em demais regiões no território nacional.

Avaliar soluções e proposições internacionais serve como ponto de partida, contudo, apenas aplicações regionais permitem averiguar quais são os limitantes de nossa infraestrutura, incluir os cenários sociais locais e pensar na formulação de políticas públicas ou nas adequações necessárias para este tipo de projeto. Diferente do exposto por Cohen (2015), enquanto internacionalmente as *smart cities* podem ser definidas em três períodos distintos e lineares, a condição latino-americana e dentro dela, a brasileira, não se mostra tão linear, justa ou mesmo inclusiva (IRAZÁBAL; JIRÓN, 2021). O cenário da MMP serve como uma referência, um local de estudo onde ao ser avaliado e vislumbrado o futuro, permite avaliar a implantação de projetos sustentáveis e modernos em diversas áreas, inclusive no setor energético, com as perspectivas de infraestrutura, do mercado nacional e sociais, como será apresentando no restante do capítulo.

4.2 MODERNIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO NACIONAL

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (PDE 2029), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apresenta uma visão para o futuro do setor de energia elétrica face a maior entrada de REDs. A avaliação da EPE indica que a inserção de REDs juntamente com a digitalização do setor tem potencial para revolucionar o setor elétrico brasileiro, contudo, existem limitantes que devem ser vencidos, os principais residem no próprio modelo atual (EPE, 2020a).

Ainda segundo a EPE, algumas peças serão necessárias para a inserção dos REDs de forma eficiente, as quais são apresentadas na figura 4.2 e suas descrições presentes no Quadro 4.1. A combinação destes setes componentes pode oferecer ao setor elétrico um

novo modelo de operação, mais moderno, acessível e flexível quanto a escolha do fornecimento de energia por parte dos consumidores.

Figura 4.2 – Componentes necessários para a modernização do setor elétrico nacional

Fonte: (EPE, 2020a)

Quadro 4.1 – Descrição dos componentes propostos pela EPE

Componente	Descrição
Isonomia entre GC e RED	A competição entre os recursos centralizados e distribuídos deve ser isonômica, principalmente com a redução de subsídios para evitar a distorção de preços e desequilíbrios advindos deles.
Mercado de Capacidades e Serviços Ancilares	Sistemas de resposta a demanda e armazenamento poderiam ser remunerados de forma adicional, incentivando a penetração desses recursos.

Tarifas Binômias e Dinâmicas	Estes modelos de tarifas permitem uma representação adequada do fornecimento e uso da rede, o que garante a sustentabilidade dos serviços de distribuição, uso de RED e o gerenciamento de consumo por parte do consumidor
Abertura do Mercado Livre	A abertura do mercado permitiria novos modelos de negócio, uma vez que os consumidores de baixa tensão poderiam comprar e vender energia no mercado
Preços Mais Granulares	Os preços granulares permitem a diferenciação entre os recursos de acordo com sua natureza, onde através do PLD horário cada recurso é valorado de acordo com a contribuição ao sistema
Agregadores	A figura dos agregadores facilita a integração e participação dos REDs através de um portfólio de fontes que podem ser operadas de forma conjunta e despachadas conforme a necessidade do sistema
Medidores Inteligentes	Os medidores inteligentes têm papel fundamental nesta mudança, pois são a interface de comunicação entre a demanda dos consumidores e o sistema, trafegando as informações determinantes para uma operação dinâmica, otimizada e permitindo novos modos de interação com as concessionárias

Fonte: Autor. Adaptado de (EPE, 2020a)

Como mencionado anteriormente, a utilização da tecnologia *blockchain* pode ser um habilitador para desafios pontuais dessa mudança. As VPPs também se mostram uma tendência nessa perspectiva da EPE, através do componente dos agregadores, que podem utilizar este tipo de plataforma.

Como também pontuado pela própria EPE, as mudanças esperadas oferecem grandes desafios para a regulamentação e implementação de um novo modelo que considere esses fatores. Contudo, esta caracterização se mostra factível quando avaliados casos internacionais de aplicação, como apresentado anteriormente. Atualmente existem limitações, que serão abordadas na caracterização da MMP, jogando luz a aspectos regionais utilizando esta região como referência.

Recentemente, em um estudo ligado ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), RAMOS et al. (2020) apresentou uma investigação de novos modelos de negócio onde poderiam estar encaixados os agregadores, fazendo referência à utilização de VPPs. Este trabalho, assim como o PDE 2029, acredita no potencial de inserção da figura dos agregadores e de VPPs como mecanismos para uma utilização mais efetiva de REDs, abordando inclusive cinco modelos de negócio que seriam possíveis de acordo com a regulamentação atual do setor. Entretanto, dois deles, que incluem sistema de RD e a presença de VPP em sistemas com ilhamento, se mostram os mais viáveis no cenário atual. Os demais modelos necessitam de uma evolução da regulamentação atual do setor, com definições a cerca de modos de operação, necessidade de investimentos em equipamentos para dar suporte aos sistemas e os impactos no setor elétrico como um todo.

Estas abordagens têm como base o Grupo de Trabalho denominado GT Modernização do Setor Elétrico (GTMSE) focado na modernização do setor elétrico, instituído pela Portaria MME nº 187 de 4 de julho de 2019. De forma mais ampla, este GT lidou com quinze temáticas que cobrem diversos aspectos do setor e que encontram na modernização a possibilidade de uma maior eficiência, qualidade e equidade. Como deixa claro em seu relatório final (MME, 2019a), o Setor Elétrico Brasileiro (SEB) tem três principais desafios em seu horizonte futuro: Financiabilidade, Contratos Legados e Transição Elétrica. Baseados nessa premissa, tal grupo foi separado em subgrupos temáticos, alguns tratando de assuntos aderentes à esta pesquisa.

4.2.1 Abertura do Mercado

A modernização do setor elétrico, através da abertura do mercado, se mostra um processo irreversível e poderá corrigir distorções envolvendo custos e riscos existente entre ambientes de contratação e viabilizar a expansão do sistema elétrico. Esta abertura poderia promover uma maior liberdade econômica dos agentes, entretanto, são necessários ampliar os mecanismos que garantem segurança energética enquanto exigem um sistema robusto para a realização das transações realizadas no mercado, considerando mudanças na formação de preço, separação de lastro e energia, garantias financeiras, simetria de informação e adimplência (MME, 2019a, 2019b).

Em meio a esta mudança, já considerando o aumento de penetração da GD, as empresas distribuidoras de energia terão que se readequar a esta mudança do setor, pensando em novos modelos de negócio. As mudanças devem ser graduais para estas empresas, uma vez que não possuem atualmente ferramentas ativas de gestão de risco de preços da contratação, resultando em portfólios descolados da eficiência destas empresas, enquanto existe flexibilidade limitada para que ajustem a contratação de energia com uma migração dos consumidores para o mercado livre (MME, 2019c). Frente a este cenário, as proposições do GTMSE incluem a adoção de tarifa binômica como primeira medida, criação de instrumentos que permitam a liquidação centralizada dos contratos regulados de energia e transição para um novo modelo de contratação de lastro e energia que possibilite uma nova forma de gestão da energia contratada. Outras propostas versam sobre a separação da comercialização de energia elétrica e dos serviços de distribuição, permitindo a criação da figura do Comercializados Regulado de Energia, que seria capaz de comercializar excedentes com todos os consumidores do sistema sem repassar perdas ou ganhos para os consumidores que optassem por se manterem cativos após a abertura de mercado (MME, 2019a).

No médio prazo, as proposições do GTMSE tratam de sinais locacionais para geradores, de modo que se torne possível optar pela geração próximo ao centro de carga caso seja economicamente vantajoso, diferenciação horária de tarifa, comercialização de toda energia no Ambiente de Contratação Livre (ACL) e a criação de agregadores de RED. O GTMSE acredita que a existência dos agregadores será essencial para a adequação dos consumidores residenciais e pequenos consumidores comerciais e industriais quanto a sua participação no mercado de energia elétrica, que se tornariam os

responsáveis por essa comercialização de energia produzida pelos *prosumers* (EPE, 2019c; MME, 2019a).

Quanto ao longo prazo, o GTMSE avalia a possibilidade da contratação bilateral de energia elétrica, utilizando *blockchain* como uma tecnologia habilitadora para a comercialização de energia entre participantes do mercado livre (EPE, 2019c).

4.2.1.1 Expansão da Instalação de Medidores Inteligentes

Atualmente como medida de curto prazo, a certificação dos Medidores Inteligentes deve ser realizada de forma mais célere, através da adoção de padrões internacionais. No médio e longo prazo os medidores inteligentes devem ser instalados de forma generalizada (EPE, 2019c). Desta forma, as trocas de dados podem ser realizadas entre as unidades consumidoras e as empresas de energia, assim como a inserção de tarifas dinâmicas no futuro (PEREYRA-ZAMORA et al., 2019). Com este recurso, as empresas podem fornecer serviços personalizados aos consumidores utilizando ferramentas de ciência de dados, *Big Data* e *Machine Learning*.

Os consumidores por sua vez podem acompanhar seu consumo em tempo real, se adequando ao longo do tempo para modelos mais complexos que podem ser oferecidos com a abertura do mercado (EPE, 2019c). O GTMSE aborda aspectos de cibersegurança que podem ser realizados sem mudanças regulatórias, porém não chega a mencionar em suas proposições, mas a troca de dados deve atender a LGPD, assim como os sistemas que processam estes dados e a governança (ALVES DOS SANTOS; BERMAN, 2021).

4.2.2 **Granularidade Tarifária**

A mudança na granularidade temporal do preço se mostra uma tendência, onde a formação de preços horários permitirá a criação de novos produtos no mercado de energia elétrica e uma aderência maior as condições operacionais do sistema elétrico (CCEE, 2019; MME, 2019a). Quanto menor essa granularidade temporal permite, maior sua capacidade de capturar as flutuações causadas pela intermitência de fontes renováveis ou a dinâmica do comportamento da carga (CCEE, 2019). Atualmente o Preço da Liquidação das Diferenças (PLD) realiza dos cálculos de forma horária²⁹, definindo assim o preço da

²⁹ https://www.ccee.org.br/portal/faces/preco_horario_veja_tambem/preco_horario

energia no mercado *spot* e como referência para negociações de contratos futuros (TOLMASQUIM, 2011). Este valor é divulgado diariamente, com preço para cada hora do dia e para os quatro submercados existentes. Esta mudança na granulidade, uma diminuição uma vez que anteriormente era calculado semanalmente, permite que o preço da energia comercializada se aproxime do custo de geração.

Além desta modificação no cálculo do PLD, a oferta de preços de energia com essa granulidade permite um aumento na viabilidade de tecnologias como RD e baterias atrás do medidor, melhor precificação de SAE e usinas hidrelétricas reversíveis assim como auxiliar o desenvolvimento de usinas híbridas e no futuro, a comercialização através dos agregadores e VPPs (MME, 2019a).

4.2.3 Usinas Híbridas e Agregadores

Desde 2017 a EPE, em conjunto com o MME, realiza estudos quanto a inserção de usinas híbridas no SEB, que poderiam aproveitar a complementariedade entre recursos, com um melhor aproveitamento (MME; EPE, 2017). Variadas combinações podem ser realizadas entre as diferentes tecnologias (eólica, solar, biomassa, gás natural, hidrelétrica, etc.), variando de usinas que estejam próximas fisicamente até plantas que estejam geograficamente distantes, situações distintas que podem resultar em inúmeras combinações. Estas combinações quanto a formação das plantas foi definindo em quatro classificações possíveis: usinas adjacentes, usinas associadas, usinas híbridas e portfólios comerciais (EPE; MME, 2018).

Analisando as proposições do trabalho da EPE, a figura da VPP se aproxima da classificação denominada Portfólios Comerciais, contudo, com diferenças quanto a contratação e a visibilidade que possui perante o mercado. As notas técnicas publicadas pela EPE (EPE; MME, 2018; MME; EPE, 2019) são destinadas aos demais modelos, que não incluem os portfólios, investigando as sinergias e limitações de usinas que estejam próximas. Este cenário indica que, futuramente, a própria EPE deverá realizar um estudo a respeito da inserção de VPPs, uma vez que estas podem ser vistas e contratadas pelo mercado similarmente a uma usina convencional, porém operando com um portfólio comercial atrelado a parte de geração.

Reflexões a cerca deste trabalho da EPE podem ser úteis na concepção de modelos e cenários com VPPs. A primeira consideração reside na dificuldade das modalidades de contrato, disponibilidade ou quantidade, uma vez que elas são dependentes da fonte ou leilão. Como existem variadas fontes dentro do portfólio de uma VPP e a contabilização de produção para cada um dos contratos opera de modo diferente, os riscos associados a produção podem ser alocados de forma incorreta. A EPE indica que a contratação por quantidade pode ser a abordagem mais adequada, para usinas híbridas e desta forma, por extensão, para as VPPs.

Outras questões que são extensíveis para VPPs são o tratamento do *curtailment* e o tratamento igualitário entre as fontes. O *curtailment* está associado a energia produzida por uma determinada fonte que não pode ser escoada, requerendo uma regulação específica e estudos para mecanismos de incentivo para adoção de sistemas de armazenamento, que poderiam ser utilizados como recurso da VPP (MME, 2019a; MME; EPE, 2019). A concepção de igualdade entre as fontes busca uma convergência nas metodologias de contabilização, cálculo de garantia física e contratação. O regramento atual considera cálculos diferentes para a Garantia Física para cada fonte, assim como são diferentes as composições de preços, dado que custos, atributos e combinações podem ter variações dentro do portfólio escolhido.

4.2.4 Inserção de *Blockchain* no Setor Elétrico

Embora o GTMSE aborde a utilização da tecnologia *blockchain* como um caminho para as transições P2P no setor elétrico, o que de fato apresenta grande utilidade, a tecnologia pode ser incluída como caminho para a elaboração de contratos dos novos produtos gerados, face essa complexidade inerente a inserção de GD (EPE, 2019d). A possibilidade de se utilizar *smart contracts*, por exemplo, permitiria a geração de padrões de contratos, elaborados, definidos e auditados pela ANEEL e CCEE (EPE, 2019c). Com esta possibilidade, poderia se garantir homogeneidade em determinados segmentos, como exemplo, contratos que devem ser utilizados para negociação entre VPP e geradores, sejam pequenas plantas ou então *prosumers*. Este tipo de procedimento garantiria uma relação isonômica com os clientes, seguindo um contrato padrão e auditável, que pode ser parametrizado com os detalhes pertinentes para cada relação comercial.

4.3 A IMPORTÂNCIA DA MMP

A Macrometrópole Paulista (MMP) corresponde a uma região delimitada pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano³⁰ (Emplasa), cobrindo 174 municípios do estado de São Paulo, dispostos em cinco regiões metropolitanas, duas aglomerações urbanas e uma unidade regional (IGC-SP, 2020a), como apresentado no Mapa 4.1. Os municípios presentes na MMP correspondem a 27% dos existentes no estado de São Paulo, contendo 30,27 milhões de habitantes, conforme dados de 2010, representando 74% da população estadual e 16% da população do Brasil (PASTERNAK; BÓGUS, 2019). A dimensão desta região e a escala de urbanização presente no território demonstra a necessidade de intenso desenvolvimento do ponto de vista da governança, planejamento e políticas públicas, compreendendo que esta forte integração entre os municípios exige um esforço integrado dos atores governamentais (NEGREIROS; MONTEIRO DOS SANTOS; ITAPURA DE MIRANDA, 2015).

Mapa 4.1 – Macrometrópole Paulista e suas regiões

Fonte: Autor. Base de dados: (IGC-SP, 2020a, 2020b)

³⁰ A Emplasa era uma empresa pública, fundada em 1975, responsável pelo planejamento da região metropolitana de São Paulo, posteriormente ficando responsável pelas outras regiões definidas, como a Macrometrópole Paulista. Foi extinta em 2019, com seu acervo deslocado para outros órgãos do governo do estado de São Paulo (<http://www.igc.sp.gov.br/produtos/emplasa.html>).

Observando-se no tempo o crescimento da MMP, vê-se a importância cada vez maior da região dentro do estado de São Paulo. Sua extensão territorial expandiu de 49.927 km² no ano de 2012 para os atuais 53.400 km², enquanto a população, a qual registrava por volta de 30 milhões de habitantes em 2010, compreende 32 milhões de pessoas atualmente. O PIB da região da MMP, que em 2009 alcançara R\$ 897.419.430, cresceu para R\$ 1.669.448.647 em 2016, representando 80% do PIB estadual e quase alcançando 30% do PIB nacional (COLLAÇO et al., 2020). Outros indicadores macroeconômicos são apresentados no Tabela 4.1, os quais indicam a importância desta região dentro do território estadual e nacional.

Tabela 4.1 — Perfil e Indicadores macroeconômicos da MMP

Indicador	Dado
Área Total MMP	53.400 km ²
População Total MMP	32.629.239 habitantes
PIB Total, a preços correntes (R\$ 1.000)	R\$ 1.669.448.647
IDHM Médio	0,75
Consumo Final Energético	31,6 MTOE
Consumo Final Energético per capita	0,97 TOE/hab
Capacidade Instalada total	4.064 MW
Emissões de CO ₂ per capita	1,7 tCO ₂ /hab

Fonte: (COLLAÇO et al., 2020)

Este cenário está intrinsecamente ligado a mudanças econômicas e produtiva ocorridas a partir da segunda metade do século XX, ocasionando a migração de economia de base industrial para um núcleo focado em serviços produtivos. Esta modificação abriu espaço para atividades do setor financeiro, serviços de comunicação e estratégicos. Contudo, a região passou a abrigar pólos de produção e conhecimento e desenvolvimento de novas tecnologias. Estas características, somada as dinâmicas econômicas locais e distribuição socioeconômica, permitiu o desenvolvimento de novas cadeias produtivas e inserção de inovações técnicas capazes de ofertar competitividade econômica para a região, o estado e também o país (NEGREIROS; MONTEIRO DOS SANTOS;

ITAPURA DE MIRANDA, 2015). O crescimento contínuo desta se reflete na qualidade de vida da população, ao mesmo tempo que evidencia um crescimento na demanda de energia utilizada pelos diversos setores econômicos e pela população.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO PANORAMA ENERGÉTICO DA MMP

4.4.1 Consumo de Energia

No levantamento presente no trabalho de SOARES (2020), os dados da Secretária de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo indica um aumento de 30% no consumo de energéticos na MMP, entre os anos de 2007 e 2018. O consumo energético da MMP correspondeu em 2017 a 73% de todo consumo do estado, se traduzindo em um montante de 31,6 MTOE/ano. Dentro deste consumo de energéticos, a eletricidade correspondeu a 8,7 MTOE (101,1TWh), consumidos pela MMP. Este consumo equivale, para o mesmo ano, a 78% da demanda de eletricidade da cidade de São Paulo e 22% de todo consumo no Brasil, sendo 129,8 TWh e 467,2 TWh, respectivamente (SOARES, 2020).

SOARES (2020) ainda realiza uma comparação que demonstra a grandeza de consumo da MMP, uma vez que em 2017 a região demandou mais energia elétrica que toda a Região Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sul, individualmente. Este fato demonstra a importância de se buscar soluções que colaborem com a segurança energética da região, atuando conjuntamente com o modelo centralizado, garantindo assim a segurança de todas as demais regiões face as mudanças climáticas e se traduza em um arcabouço de soluções para serem utilizados em outras regiões do Brasil.

Analisando as classes de consumo, SOARES (2020) apresenta o impacto do consumo de cada uma delas no consumo total da MMP. O Gráfico 4.1 apresenta o percentual de consumo, com base na demanda total da região, demonstrando a importância das classes industrial, residencial e comercial. Este levantamento se mostra importante para a compreensão da dinâmica setorial da MMP e em soluções, como as VPPs, se encaixam neste cenário.

Gráfico 4.1 – Participação na demanda de energia elétrica, por classe de consumo

Fonte: (SOARES, 2020)

4.4.2 Geração de Energia

O levantamento de dados realizado por (COLLAÇO et al., 2020), pertinente as unidades de geração presentes na MMP, permite estabelecer a capacidade instalada (CapInst) na região para cada fonte. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos com este levantamento e análise, indicando a capacidade instalada e a quantidade de usinas por fonte.

Tabela 4.2 – Capacidade Instalada para geração de eletricidade dentro da região da MMP, até 2019

Fontes Renováveis	CapInst (kW)	Número de usinas
Usina Hidrelétrica	1.306.860	13
Pequena Central Hidroelétrica	164.998	16
Central Geradora Hidroelétrica	20.704	19
Central Geradora Eólica	2	1
Usinas de micro e minigeração EOL	34	5
Central Geradora Solar Fotovoltaica	1.236	8
Usinas de micro e minigeração UFV	28.530	4949
Usina Termelétrica – Bagaço de Cana	358.241	24
Usina Termelétrica – Biogás	67.776	8
Usina Termelétrica – Biomassa	60.007	4
Total de Renováveis	2.008.378	5047
Fontes Fósseis	CapInst (kW)	Número de usinas
Usina Termelétrica – Calor de Processo	24.400	1
Usina Termelétrica – Carvão – RSU	2.700	1
Usina Termelétrica – Gás de Refinaria	204.730	3

Usina Termelétrica – Gás Natural	980.679	45
Usina Termelétrica – Óleo Combustível	213.358	5
Usina Termelétrica – Diesel	544.961	514
Usina Termelétrica – Outros derivados de Petróleo	85.188	7
Usinas de micro e minigeração UTE	275	3
<u>Total de Fósseis</u>	<u>2.056.291</u>	<u>579</u>
Total de Renováveis e Fósseis	4.064.669	5626

Fonte: (COLLAÇO et al., 2020)

Os dados analisados revelam que 50,6% da energia produzida na MMP vem de fonte fóssil, enquanto 49,4% são oriundas de fonte renovável, diferindo da matriz energética nacional, que corresponde a 83% de renováveis e 17% de não renováveis (EPE, 2020b). Verificando a disposição geográfica das usinas baseadas em utilização de combustível fóssil (ANEEL, 2020), como apresentado no Mapa 4.2. observa-se que grande parte destas usinas está alocada na região metropolitana de São Paulo, região densamente povoada e com alto grau de urbanização (SEADE, 2020) colaborando com a emissão de CO₂ pela geração de energia, somado as emissões provenientes do segmento de transporte. Este cenário demonstra a importância de se repensar as fontes de energia presentes na MMP, buscando uma transição energética e com redução do impacto climático.

Mapa 4.2 – Usinas termoeletricas que utilizam combustível fóssil na MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (ANEEL, 2020)

A composição de portfólios de geração pode ser benéfica não apenas para os clientes que optem pela instalação, mas podem colaborar com o sistema elétrico, minimizando a presença de fontes fósseis, diminuindo as perdas técnicas e aumentando a segurança energética da MMP. A formação de portfólios e a presença de agregadores, como mencionado anteriormente nesta dissertação, permitem este mesmo tipo de operação, disponibilizando a energia para a venda no mercado livre ou como participante em leilões futuros, ambas situações atreladas a modernização do setor e mudança do mercado, com sua maior abertura. Esta evolução passa pela adoção de plataformas de VPP como ferramenta de gerenciamento do portfólio e sua exploração comercial.

4.4.3 Balanço entre Oferta e Demanda

A arquitetura do Sistema Interligado Nacional (SIN) torna impossível a realização do rastreamento da origem da energia consumida, uma vez que os geradores se conectam a rede alimentando o sistema enquanto os clientes finais, conectados ao mesmo sistema, consomem energia da rede sem caracterização direta da sua origem.

Uma análise da geração endógena de energia elétrica da MMP se mostra importante, permitindo compreender a caracterização entre oferta de geração presente em seu território em contraste a energia consumida localmente. Indiretamente isso se traduz na possibilidade de avaliar a dependência da região quanto à energia fornecida pelo SIN tendo como unidades geradoras, usinas que estão localizadas distantes da região (SOARES, 2020). Em seu trabalho, SOARES (2020) demonstra que a região da MMP não é autossuficiente do ponto de vista energético, fornecendo ao SIN apenas uma parcela do consumo total da região.

Quando avaliado este cenário quanto ao balanço da MMP, somado a sua matriz de energética, como apresentada anteriormente, verifica-se que a região possui uma grande dependência da energia produzida em outros locais, enquanto sua contribuição para o SIN corresponde em sua maior parte, energia advinda da exploração de recursos fósseis. Estas duas colocações possuem desdobramentos que impactam a MMP de duas formas distintas, não sendo as únicas em uma avaliação mais profunda, que não compreendeu o escopo deste trabalho. As características desse balanço revelam que o crescimento da região está diretamente relacionado ao aumento da oferta de energia e de novos projetos

de geração, como apresentado por SOARES (2020). Complementando esta visão, o planejamento local de desenvolvimento estaria limitado quanto ao cronograma e planejamento energético de outras esferas, reduzindo assim a capacidade de tomada de decisão local, relegando o desenvolvimento à espera de investimentos em outras regiões, liberações ambientais dependendo da natureza da usina e com prazos que não pode determinar ou controlar. A mudança de governança e planejamento, considerando os estados e municípios conhecem em detalhes o cenário local e regional, deveriam desta forma ter um maior poder e tomada de decisão (SIQUEIRA; BERMANN, 2020). Esta modificação pode auxiliar a penetração de GD, aderentes aos objetivos locais e seriam benéficos para a presença de VPPs e do aumento de pequenos geradores para composição do portfólio, gerando empregos, garantindo segurança energética e movimentando a economia regional em detrimento da espera de grandes projetos de geração.

Estes fatores evidenciam a importância da penetração e avanço da GD dentro da MMP, visando a transição energética na matriz local e a diminuição da dependência do SIN. Somados a estas duas condições, baseadas na referência ao balanço, outros benefícios acentuam a maior integração deste tipo de tecnologia. A redução de perdas com as fontes próximas aos centros de consumo, flexibilidade para escalar as fontes de oferta e o aproveitamento de recursos naturais se mostram benéficos para sistema elétrico da MMP. Outro aspecto, relacionado a matriz da MMP, observa-se que para ofertar a energia ao sistema, as fontes baseadas em recursos fósseis compreende a maior parte dos recursos de geração, como apresentado anteriormente. Esta circunstância ocasiona uma emissão adicional de CO₂, para além das emissões de outros setores, dentro do território da MMP. Entretanto, esta adoção apresenta limitantes e complexidades, sejam técnicas ou regulatórias, mas que se mostram solucionáveis com a digitalização do setor e um planejamento que considere a aderência crescente a este tipo de geração, pontos que serão tratados a seguir.

4.4.4 Geração Distribuída

Analisando os dados coletados da plataforma de dados abertos do governo federal (MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, 2020), quanto as bases publicadas pela ANEEL, o número de instalações de GD para o estado de São Paulo corresponde a 38.021 unidades, onde 33,8 % destas unidades se encontra na região da MMP. Em termos de capacidade instalada, o estado de São Paulo possui 196 MW, dos quais 37 MW estão

localizados dentro da MMP. Analisar o crescimento da GD na MMP está diretamente correlacionado a estudar a expansão de sua vertente amparada pela tecnologia fotovoltaica, uma vez que esta parcela corresponde a 99,88% das instalações de GD. A penetração da GD se mostra em acelerado crescimento ao longo do tempo, como apresentado por SOARES (2020) e pode ser verificada no gráfico 4.5, com dados quantificados para a capacidade instalada de 2013 até 2018.

Gráfico 4.2 – Evolução da capacidade instalada (MW) de GD fotovoltaica na MMP

Fonte: Autor. Utilizando dados de ANEEL (2020)

Em outro levantamento realizado por SOARES (2020), a série histórica também apresenta uma mudança quanto a adoção por setores, quando verifica-se a participação das classes de consumo no número de unidades de GD fotovoltaica, como apresentado no Gráfico 4.6, entre o ano de 2013 e 2018. O setor residencial demonstra um aumento de mais de 25% em 2014, se tornando a classe com maior quantidade de instalações de unidade de GD fotovoltaica e dominando a participação desde então.

Gráfico 4.3 – Evolução das classes de consumo no número de unidades de GD Fotovoltaica na MMP

Fonte: (SOARES, 2020)

Contudo, as demais tecnologias podem ser exploradas pelos demais setores, desde que se observe uma proposta de valor e retorno financeiro pelo emprego das demais fontes e seus contextos de aplicação. Um exemplo de utilização de GD no ambiente rural está relacionado ao uso de dejetos animais para geração de biogás e seu aproveitamento para geração de energia (TINOCO et al., 2017). Este tipo de aproveitamento pode ser utilizado com outras abordagens, como o aproveitamento de biogás gerado por demais resíduos (FEIZ et al., 2020). As demais tecnologias podem ser combinadas para pequenos produtores, também permitindo a complementariedade, como um produtor rural que utilize tecnologia fotovoltaica em combinação com biogás ou biomassa (HEYDARI; ASKARZADEH, 2016). A composição de fontes pode ser economicamente viável dentro do contexto das VPP, uma vez que o consumidor final pode comercializar a energia excedente do arranjo e amortizar o valor investido.

4.5 LIMITANTES E DESAFIOS

Existem desafios e limitantes locais presentes na MMP, que delimitam este tipo de aplicação, os quais serão explorados a seguir, explicitando as barreiras que devem ser vencidas para o emprego desta tecnologia e fornecendo os requisitos necessários para optar pelo uso de VPP e como a tecnologia *blockchain* pode colaborar para os futuros modelos de aplicação.

4.5.1 Infraestrutura de Comunicação e Dados

A digitalização dos serviços oferecidos nas cidades depende diretamente da infraestrutura de comunicação e troca de dados. Essencialmente, esta camada se comporta como a via de tráfego de informações de equipamentos, permitindo a telemetria de sistemas e comunicação de forma remota, elemento importante também para projetos de VPP. Neste sentido, foram levantados os dados relacionados a MMP, observando-se serviços de *backhaul* de fibra óptica, telefonia móvel 4G e protocolos de comunicação utilizados para troca de dados no modelo M2M.

As observações realizadas sobre a oferta de *backhaul* de fibra óptica e telefonia móvel 4G mostra a MMP como um cenário privilegiado quanto ao atendimento. Apenas 7 municípios não possuem serviço de fibra óptica, conforme mostrado no Mapa 4.3, enquanto quase a totalidade da região possui acesso a este tipo de serviço. Entretanto melhores cenários podem ser encontrados, nacionalmente, no Distrito Federal e nos estados do Rio de Janeiro, Santa Catarina e Paraná possuem atendimento em todos seus municípios (ANATEL).

Mapa 4.3 – Municípios atendidos com Fibra Óptica na MMP

Fonte: Autor. Utilizando dados de TELECO (2020)

O sistema de telefonia móvel 4G apresenta uma abrangência maior, compreendendo toda a região da MMP (TELECO, 2020), demonstrando o potencial de uso desta tecnologia para a troca de dados em planos focados em sistema de IoT, por exemplo. Caso este cenário se mantenha com a chegada das redes de 5G, o potencial de novas soluções criadas com esta infraestrutura, mantendo esta cobertura, permitirá uma modernização ainda maior de sistemas integrados aos *smart grids* (HABIBZADEH et al., 2018; IBRAHIM; DONG; YANG, 2020).

Embora alguns sistemas realizem a comunicação de dados pelos protocolos de telefonia móvel, existem redes destinadas à comunicação M2M. No recorte da MMP, existem alguns desses protocolos, sendo ofertados para a conexão de sistemas de IoT e industriais que demandem troca de dados, como no caso da VPPs. As principais redes com uso focado em soluções de IoT e industrial, são da classe denominada *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), caracterizadas pelo longo alcance de comunicação e baixo consumo por parte dos dispositivos. No caso da MMP, os principais protocolos encontrados são o *Long Range* (LoRa), *Narrow Band IoT* (NB-IoT) e CAT-M, sendo as duas últimas padrões que operam sobre a infraestrutura da rede 4G. Os mapas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam, respectivamente, os municípios atendidos pela tecnologia CAT-M, NB-IoT e LoRa. Quando analisadas as áreas de cobertura de cada tecnologia, verifica-se que as tecnologias que utilizam a rede 4G como base, possuem uma cobertura ampla de municípios, alcançando quase a totalidade da MMP, enquanto a tecnologia LoRa cobre 47% dos municípios.

Mapa 4.4 – Atendimento do protocolo de comunicação CAT-M

Fonte: Autor. Base de dados: TELECO (2020)

Mapa 4.5 – Atendimento do protocolo de comunicação NB-IoT

Fonte: Autor. Base de dados: TELECO (2020)

Mapa 4.6 – Atendimento do protocolo de comunicação LoRa

Fonte: Autor. Base de dados: TELECO (2020)

4.5.2 Infraestrutura Elétrica

A infraestrutura ao longo do suprimento de energia elétrica tem importância preponderante para os projetos desenvolvidos no setor, como a implantação de VPPs dentro de um determinado contexto. Avaliando os segmentos de geração, transmissão e distribuição, pode-se compreender o estado atual do cenário da MMP. Estabelecer este panorama é importante para compreender limitações e encontrar proposições para solucionar estas barreiras.

O parque de geração da MMP compreende em sua maior parte usinas termelétricas, baseadas em utilização de combustível fóssil, como apresentado anteriormente. No mapa 4.7 são apresentadas as usinas de geração presentes na MMP, com as diversas fontes utilizadas, sem inclusão de sistemas de GD.

Mapa 4.7 – Usinas presentes na região da MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (ANEEL, 2020)

Observa-se a existência de uma concentração de usinas termelétricas na região da cidade de São Paulo, com a distribuição se espalhando ao longo de algumas regiões, enquanto as demais usinas aparecem sem muita homogeneidade. Ainda compondo os recursos de geração, o Mapa 4.8 apresenta as instalações de unidades de GD, quase em totalidade, utilizando a tecnologia fotovoltaica. Quando analisada a distribuição, encontra-se uma concentração também na região da cidade de São Paulo e arredores.

Entretanto, quando analisado através de um mapa de calor utilizando a densidade de instalações em relação ao território municipal, se tem como destaque a região de Campinas, como apresentado no Mapa 4.9.

Mapa 4.8 – Instalações de GD na região da MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (ANEEL, 2020)

Mapa 4.9 – Mapa de calor de instalações de GD na região da MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (ANEEL, 2020)

As linhas de transmissão são parte essencial da infraestrutura de transporte de energia através do SIN. Quando se consideram a agregação de fontes de geração de energia de forma a operar como uma única usina, utilizando pequenas geradores no portfólio, deve-se considerar a conexão das unidades ao sistema. Uma vez interligadas, a VPP irá operar seguindo as requisições da ONS. Considerando a região da MMP, existem diversas linhas de transmissão que cruzam o território, conforme apresentado na Mapa 4.10, indicando a possibilidade de interligação das unidades geradoras do portfólio da VPP.

Mapa 4.10 – Linhas de Transmissão presentes na MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (ANEEL, 2020)

Todavia, existem as fontes de GD que são alocadas nas proximidades das unidades consumidoras, ou nas próprias unidades, as quais são interligadas no sistema de distribuição. Neste cenário, cada município apresenta suas próprias configurações de rede de distribuição e ao longo da MMP, diversas concessionárias de distribuição operam na região, como será descrito mais adiante. Dentro desta relação, a concessionária se torna responsável por aceitar conexões em sua rede e acompanhar o acoplamento das unidades geradoras, exercendo um papel de planejamento dentro das modificações e evolução do

sistema (CASTRO; GOUVÊA; MOSZKOWICZ, 2019). O próprio GTMSE considera a necessidade, com a modernização do setor, que exista uma maior integração entre a ANEEL e o planejamentos das redes de distribuição, possibilitando o aumento na troca de informações (MME, 2019a). Outro aspecto que deve ser parte desta comunicação são os problemas associados com a inserção de GD, os quais devem ser considerados, uma vez que podem impactar o sistema de distribuição, como problemas quanto a proteção, segurança, confiabilidade e regulação de tensão. Enquanto a inserção de GD se mostra crescente, a preocupação com os impactos nas redes de distribuição e a atenção com esta mudança de paradigma imposto às redes atuais, as quais podem não estar completamente preparadas para esta mudança.

As concessionárias devem considerar os avanços tecnológicos e a possibilidade de modernização das redes existentes e expansão dos sistemas de SG. Esta modificação serão essenciais para o papel futuro das distribuidoras, permitindo a inclusão de sistemas de RD (EPE, 2019b; MOREIRA; KAGAN, 2020), utilização de ferramentas de *Business Intelligence* (BI) (FERNANDES et al., 2017; IRENA, 2018b), acompanhar as redes de distribuição em tempo real através de *Digital Twins*³¹ (TENG et al., 2021) e verificação da qualidade do serviço frente a inserção e presença de REDs (QUIROGA et al., 2016). No cenário de maior digitalização em conjunto com a abertura de mercado, as concessionárias poderão mudar seu modelo de negócio e ofertar novos serviços, não diferente, a MMP poderá se tornar um *sandbox* para testes destes modelos. Por exemplo, a presença de *living labs* (ALEXANDRAKIS, 2021; CANZLER et al., 2017; SHIN, 2019) dedicados a área de energia são factíveis e poderiam auxiliar nesta modificação do setor, através de testes reais com as premissas de modernização e com a presença de concessionárias.

Na outra ponta da infraestrutura do setor elétrico, do lado do consumidor final, a presença dos Medidores Inteligentes redefine as relações entre os clientes e as concessionárias de energia. Sua presença permite adicionar mais complexidade na dinâmica usual, permitindo conhecer o comportamento do consumidor, a comunicação

³¹ *Digital Twins* são representações virtuais de ativos e processos reais, onde alimentados com os dados reais de operação, se tornam ferramenta para simulações e previsões. Através do uso desta ferramenta, pode-se acompanhar e simular cenários para equipamentos, infraestrutura e previsões de manutenção, por exemplo.

em tempo real e de forma contínua com a concessionária, além da quantificação da energia consumida e produzida pelo consumidor, operando atualmente como *prosumer*.

Com a eletrificação da frota de automóveis e aplicações de *smart home*, espera-se a integração entre os medidores inteligentes e estes equipamentos, de modo que seu funcionamento se expanda, servindo de *gateway* de dados de outros sistemas e também realize a coordenação com sistemas de RD (KABALCI, 2016). Quando analisados os dados referentes a MMP, verifica-se uma presença tímida deste tipo de tecnologia, como apresentado na Mapa 4.11, onde são destacados os municípios da MMP que possuem iniciativas de implantação, correspondendo a 4% dos municípios apenas. A instalação destes equipamentos é determinante para modernizar as redes de distribuição e inserir a região no futuro do setor elétrico, ainda que limitado por motivos apresentados anteriormente, mais iniciativas são essenciais inclusive para a adoção de VPPs.

Mapa 4.11 – Municípios com Medidores Inteligentes instalados na MMP

Fonte: Autor. Adaptado de (NEOENERGIA, 2020; TEIXEIRA, 2021)

4.5.3 Concessionárias de Distribuição Elétrica

O número de concessionárias de energia elétrica presentes no recorte da MMP adiciona um grau de dificuldade ao se lidar com a flexibilização do sistema elétrico considerando a integração de sistemas e operações entre elas com a modernização do mercado. Atualmente a região da MMP comporta 6 concessionárias distintas (com a CPFL operando quatro empresas distintas), apresentadas no Mapa 4.12, atendendo diversas regiões e municípios, algumas vezes, de forma descontínua ao longo da distribuição geográfica.

Mapa 4.12 – Concessionárias presentes na região da MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (ANEEL, 2020)

A eletrificação da frota de veículos deve sofrer impacto desta complexidade em deslocamentos para além do perímetro urbano dos municípios. Considerando a inserção dos veículos elétricos, aliados ao comportamento dos *prosumers*, novos modelos de negócio podem estar associados à produção da própria energia com o recarregamento distante da residência, através de mecanismos de bonificação ou desconto no valor cobrado. Um levantamento realizado com os dados de emplacamento de novos veículos, realizada com informações da base de dados do DENATRAN (MINISTÉRIO DA

INFRAESTRUTURA, 2020), demonstra um número crescente de VE presentes na MMP, como apresentado no Gráfico 4.4. Os valores obtidos correspondem a soma de emplacamentos realizados em todos os municípios que compõe a MMP, caracterizados como “Veículos Elétricos de Fonte Interna”, entre os anos de 2014 e 2020.

Gráfico 4.4 – Quantidade de Veículos Elétricos na MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2020)

O crescimento no número de veículos elétricos dentro da MMP exige um aumento na quantidade de pontos de carga de veículos, contudo, atualmente a ANEEL não possui uma base de dados georreferenciadas com estas informações, embora periodicamente receba as informações através das distribuidoras. Este arcabouço de informações deverá ser aberto futuramente, permitindo acompanhar o aumento da frota veicular em âmbito municipal e da região da MMP e contratá-lo com a presença de pontos de recarga, a fim de se conhecer as características de oferta de demanda, assim como conhecer regionalmente esta região e como deve se proceder com o planejamento local.

A relação de deslocamento de veículos entre municípios da MMP tem uma importância relevante para as relações econômicas desta região (ASQUINO, 2010). Observando-se as rodovias presentes na região, como mostrado no Mapa 4.13, é possível

verificar a extensão das regiões que devem receber pontos de recarga com o crescimento da eletrificação veicular no futuro da MMP. Esta modernização e mudança de relação dependerá da troca de informações e intercâmbio de relações entre concessionárias.

Mapa 4.13 – Rodovias presentes na MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (SEADE, 2020)

4.5.4 Cibersegurança e Privacidade

A digitalização do setor de energia promove mudanças nas diversas relações e modos de trabalho entre as entidades e consumidores. Porém a adoção de sistemas digitais exige das empresas e gestores a preocupação com a cibersegurança de sistemas e privacidade dos usuários, principalmente com a regulação imposta pela LGPD. Isso se reflete no ambiente da MMP, uma vez que alguns dos principais vazamentos e invasões de sistemas de energia elétrica do país, se concentram nesta região.

Em 2020 um ataque aos sistemas da concessionária ENEL ocasionou o vazamento dos dados de 300 mil consumidores residentes na região de Osasco, cidade que pertence

a região metropolitana de São Paulo. Ainda no mesmo ano, a empresa CPFL, sediada em Campinas e que atua em diversos municípios da MMP, sofreu um ataque realizado através de um *ransomware*³², restringindo acesso ao sistema, com encriptação do armazenamento, e roubo de dados de consumidores (ALVES DOS SANTOS; BERMANN, 2021). Grupos de cibercriminosos também reivindicam invasões em empresas como Cosan³³ e EDP³⁴, sem definir sua extensão (OLIVEIRA; ROSSI, 2020).

Com a expansão dos sistemas digitais e penetração crescente de sistemas de SG, a segurança e privacidade devem ser consideradas como um dos requisitos para sistemas que apoiam o setor elétrico, como as próprias VPPs. A mitigação do risco de operação, deve garantir a segurança dos dados de empresas e clientes, além da proteção aos sistemas de monitoramento e controle de ativos. A escalada de crimes cibernéticos pode afetar não somente dados comerciais, mas também sistemas operacionais, colocando o sistema elétrico em risco.

4.5.5 Acesso dos usuários a internet

Enquanto as empresas buscam na digitalização um caminho para uma transição energética eficiente e o nascimento de novos modelos de negócios dentro do setor de energia, no outro extremo desta cadeia, o acesso a internet e sistemas digitais deve ser considerado para o sucesso da implantação dos novos modelos baseados em software. A utilização de aplicativos para verificar o consumo residencial, a possibilidade de *marketplace* (ROLIM et al., 2020) de energia e a venda de energia excedente de *prosumers* em um cenário futuro são exemplos da dependência dos meios de troca de dados e acesso a internet. A própria integração dos sistemas de VPP aos novos modelos está intrinsecamente ligada a estes sistemas e ao acesso por parte do consumidor.

Recentemente, dados apresentados pela PNAD TIC (CETIC.BR, 2020) mostram que apenas 75% da população da região sudeste tem acesso a Internet. Estas informações demonstram uma limitação quanto ao alcance de soluções digitais para os consumidores finais. Quando analisada a base de cidades do IBGE (2020), observa-se que a restrição de

³² Uma classe de *malware* responsável por invasão, bloqueio e sequestro de sistemas. Uma vez infectado, o agente malicioso realiza uma cobrança para a liberação do sistema afetado, em geral, o meio de transferência envolve criptomoedas.

³³ <https://www.cosan.com.br>

³⁴ <https://www.edp.com.br>

acesso não afeta apenas a população. Como apresentado na Mapa 4.14, existe uma variação de acesso a redes de comunicação por parte de prefeituras, por exemplo, limitando a interação entre o governo municipal e os próprios cidadãos.

Mapa 4.14 – Acesso a Internet nos municípios da MMP

Fonte: Autor. Base de dados: (IBGE, 2020)

Este cenário deve ser considerado quando da implantação de projetos que pretendem utilizar a digitalização como parte da solução, enquanto demonstram que esforços devem ser empreendidos para a inclusão da população. O acesso a internet se traduz em uma oferta maior de serviços e informações, dinamizando diversos setores, inclusive o de energia. O acesso a estes meios permite a criação de soluções e acesso por parte da população, criando espaço para o nascimento de novos modelos de negócio que podem auxiliar ao cidadão acesso mais barato à energia e utilização de ferramentas que ajudem a alcançar uma maior eficiência energética ao longo do dia.

4.6 DEFINIÇÃO DOS REQUISITOS E RESTRIÇÕES

O estado da arte das tecnologias investigadas somado ao arcabouço de informações levantados, permite estabelecer os requisitos e restrições que devem ser usados como referência para a criação dos artefatos pertinentes a este problema. Considerando a transversalidade presente na avaliação de implantação de uma VPP na região da MMP, cabe separar estas informações em três classes: Mercado, Infraestrutura e Plataforma de Software.

Estas classes permitem definir requisitos e restrições de forma segmentadas, mas que de forma conjunta, auxiliam na pesquisa dos artefatos. As restrições de Mercado permitem definir como a solução seria viável atualmente, assim como quais discussões devem ser abordadas para mudanças futuras no mercado. Por sua vez, as definições sobre Infraestrutura, são essenciais quando analisados os dados da região da MMP, uma vez que sua falta de homogeneidade demonstra a necessidade de um olhar específico para cada municipalidade. Lidar com as restrições, ou um modelo que oriente a levantá-las, se torna essencial para escolhas de implantação de soluções digitais, localmente na MMP ou de forma expandida para o território nacional no futuro. Quanto a plataforma de software, requisitos e restrições permitem a criação de artefatos focados para este segmento, sua validação e o levantamento de suas limitações, permitindo identificar soluções ao tema de VPP com utilização de *blockchain* que satisfazem o problema.

4.6.1 Mercado

O artefato deve ser submetido a dois cenários distintos para o mercado, como forma de requisito. O primeiro deve utilizar as regras atuais, enquanto o segundo deve considerar o cenário futuro usando como base o levantamento do GTMSE. Desta forma, as características de mercado permitirão entender as limitações e vantagens ou desvantagens frente a cada uma das conduções.

4.6.2 Infraestrutura

O artefato deve considerar o cenário dos melhores municípios quanto a infraestrutura, definindo assim a solução possível para a melhor condição. Desta abordagem, podem emergir as restrições para os demais municípios, oferecendo uma visão do que deve ser oferecido em termos locais para implantação da solução.

4.6.3 Plataforma de Software

O artefato deve considerar uma arquitetura modular que permita sua expansão, adequada aos requisitos de infraestrutura e que utilizem a tecnologia *blockchain* como um diferencial para o modelo, com base na revisão bibliográfica realizada. Estas condições permitirão compreender as restrições tecnológicas ao qual o artefato está limitado, uma vez que deve ser uma plataforma que deve comportar novos blocos de funções como otimizadores, previsão e operação de mercado. Para este modelo, esses módulos são suprimidos, considerando apenas as integrações com o *blockchain*, para uma avaliação segura e direcionada a pesquisa, contudo, a possibilidade de expansão pode resultar em um artefato flexível, que pode ser utilizado em futuras investigações dos demais módulos.

5 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E RESULTADOS

A investigação presente neste trabalho busca encontrar soluções técnicas para o problema de inserção de VPPs no ambiente da MMP. O ferramental utilizado compreende a aplicação da metodologia DSR, focada no desenvolvimento de artefatos que atendam nos requisitos encontrados para o problema analisado, permitindo seu projeto, desenvolvimento e avaliação com rigor científico.

Muito utilizada em áreas que demandam o desenvolvimento de soluções e projetos que auxiliem a resolução de problemas de áreas como sistema de informação e engenharia, sua aplicação se mostrou bem aderente à pesquisa realizada. Os artefatos encontrados, além de compreender as ferramentas que foram utilizadas para verificar a inclusão de VPP na região da MMP no âmbito acadêmico, podem ser aprimorados, gerando produtos para aplicações em ambiente real, colaborando assim com o desenvolvimento deste segmento no setor elétrico nacional.

5.1 CONFIGURAÇÃO DAS CLASSES DE PROBLEMAS

A transversalidade do tema de inserção de VPPs na MMP exige a classificação dos problemas em duas classes distintas, como apresentado na figura 5.1. A primeira está associada às características do projeto como um todo, como a avaliação dos requisitos locais onde são instalados os REDs, as limitações de TICs disponíveis, o melhor aproveitamento da fonte escolhida e a definição se a utilização da tecnologia *blockchain* de fato se mostra necessárias para o projeto a implantado. A segunda classe de problemas, associada a utilização do *blockchain* nos sistemas de VPP, tem como fundamento aspectos mais técnicos, definidos pelos modelos de negócio que serão utilizados, suas transcrições em contratos inteligentes e a escolha de uma plataforma que seja aderente aos critérios técnicos estabelecidos.

Estas duas classes são dependentes frente a inserção de VPPs, onde um determinado projeto deve passar pelo crivo do artefato gerado pela classe 1 para poder averiguar a plausibilidade da aplicação do artefato gerado na classe 2. Uma vez que o projeto não se mostre viável com o ferramental desenvolvido para análise, ele não deve dar prosseguimento utilizando o artefato da classe seguinte.

Figura 5.1– Classes de problemas

Fonte: Autor

5.2 IDENTIFICAÇÃO E PROPOSIÇÃO DOS ARTEFATOS

As duas classes definidas exigem artefatos diferentes, com foco em suas características e nas respostas que devem fornecer para cada um dos problemas. Na primeira classe, a solução deve auxiliar a tomada de decisão quanto a execução de projetos diante de entradas que definem cada região, enquanto a segunda classe necessita de um artefato que permita verificar a aplicação técnica da tecnologia, as características dentro do setor de energia e suas limitações. Dentro destes contextos, foram identificados dois artefatos, um para cada classe e suas proposições são descritas adiante, elucidando a justificativa de escolhas e detalhando suas características.

5.2.1 Análise Multicritério para Inserção de VPPs

O primeiro artefato proposto compreende a criação de um ferramental que permita avaliar dois aspectos essenciais da implantação de um projeto de VPP. Estes fatores correspondem aos requisitos técnicos necessários do lado da geração e a aderência do uso de plataforma de *blockchain*. As análises serão realizadas de forma distintas, uma vez que a natureza das escolhas se mostra complexa para o primeiro caso, enquanto para o segundo atende um caminho mais condicional, derivado de características do uso.

A condição de avaliação de implantação, considerando as características locais como definidoras para a presença de geradores, permite averiguar se um município ou região possui requisitos mínimos para receber uma fonte que venha a compor o portfólio de uma VPP. As características para essa avaliação, entretanto, pode ser composta pela

avaliação de múltiplos critérios, como a avaliação realizada anteriormente dos limitantes da MMP. Adotou-se para esta primeira etapa a utilização de uma ferramenta de análise multicritério, utilizando a técnica *Analytic Hierarchy Process* (AHP), amplamente conhecida na área de pesquisa operacional e utilizada em diversos trabalhos que buscam analisar a tomada de decisão na escolha de projetos (VARGAS, 2010; ZAMBON et al., 2005).

A utilização da AHP permite a tomada de decisão baseada em critérios definidos com base no problema que deve ser avaliado, os quais podem ser por vezes conflitantes, onde a técnica se destaca por exigir uma priorização das escolhas com base em um critério de coerência nas matrizes geradas (VARGAS, 2010). As escolhas realizadas com base nos municípios da MMP estão caracterizadas como cenário de multicritério, portanto, ao considerar esta análise, o artefato gerado pode auxiliar na escolha de municípios relevantes para inserção de unidades geradoras capazes de compor uma plataforma de VPP.

A segunda parte desta análise compõe um fluxograma de escolhas baseado nas características de interação dos atores, as quais são responsáveis por definir a utilização de plataformas de *blockchain*, agregando um valor a solução. O processo de verificação das características do problema, frente a adoção da tecnologia, reduz o problema de *overengineering*³⁵ e custos associados a implementação de uma solução que não trará nenhum benefício para a plataforma de VPP. As escolhas realizadas durante este processo devem fornecer informações sobre a utilização da tecnologia *blockchain*, reduzindo assim os custos e tempo de desenvolvimento de uma plataforma que não necessita da tecnologia como diferencial.

5.2.2 Prova de Conceito de uma VPP

O artefato proposto para a segunda classe de problema será uma prova de conceito, composta pelo desenvolvimento de um sistema de base computacional, representando um modelo simplificado e restrito de uma VPP. Conforme descrito anteriormente nesta

³⁵ *Overengineering* corresponde a um termo que define situações onde se opta por soluções desnecessariamente complicadas para solucionar problemas simples. As implicações deste tipo de escolha em geral acarretam aumento de custos, tempo de desenvolvimento e podem inviabilizar um projeto

dissertação, uma plataforma de VPP, incluindo seu núcleo de software, pode ser tão complexo quanto a abrangência de sua operação. Visando apenas a avaliação da tecnologia *blockchain*, optou-se pelo desenvolvimento de um domínio restrito de operação da VPP, compreendendo as funções que podem encontrar uma agregação de valor ao se aplicar a tecnologia. Estas funcionalidades compreendem a emissão e aceitação de contratos, registro operacional de geração, registro consolidado para pagamento e também, emissão de Certificados de Energia Renovável (*Renewable Energy Certificate*, REC).

5.3 PROJETO DOS ARTEFATOS PROPOSTOS

Identificados os artefatos que serão desenvolvidos, a etapa presente se trata de projetá-los, definindo as características necessárias para serem alcançados durante o desenvolvimento, assim como técnicas e ferramentas que podem ser utilizadas na etapa seguinte.

5.3.1 Protocolo de Análise Multicritério para Inserção de VPPs

O desenvolvimento do protocolo base para análise utilizará quatro critérios que foram levantados como limitação dentro da região da MMP, permitindo construir a matriz comparativa. Estes critérios são:

- Infraestrutura Elétrica
- TICs utilizados pelo Gerador
- Acesso a Internet pelos consumidores e *prosumers*
- Potencial de Inserção de fontes de GD

A escolha deles está associado ao funcionamento das fontes descentralizadas dentro de uma arquitetura de VPP, uma vez que pequenos geradores e *prosumers* dependem de sistemas de TIC e internet para comunicação, a presença de medidores inteligentes na infraestrutura se mostra essencial para os sistemas, assim como a instalação de fontes deve ser realizada em locais com potencial de geração, aumentando a viabilidade do projeto. Entretanto, deve-se ponderar que esses critérios não são os únicos que podem ser utilizados e ainda neste desenvolvimento, possuem caráter apenas explicativo. O potencial de inserção da fonte de GD, por exemplo, não é expressivo para a tomada de decisão comercial na MMP, frente ao critério econômico. Porém, sua utilização e valores

definidos, permite demonstrar o funcionamento do protocolo diante de critérios estabelecidos *a priori*.

A classificação destes critérios seguirá a escala de comparação (Escala Saaty), apresentada na Tabela 5.1, definindo o valor de importância para cada critério de avaliação utilizado (VARGAS, 2010).

Tabela 5.1 – Escala de Saaty utilizada na análise multicritério

Escala	Avaliação Numérica	Recíproco
Extremamente preferido	9	1/9
Muito forte a extremo	8	1/8
Muito fortemente preferido	7	1/7
Forte a muito forte	6	1/6
Fortemente preferido	5	1/5
Moderado a forte	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
Igual a moderado	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Fonte: (VARGAS, 2010)

5.3.2 Prova de Conceito da VPP

A simplificação utilizada para a prova de conceito restringe os componentes da plataforma de VPP a ser desenvolvida, ignorando módulos de previsão de fatores que influenciam a tomada de decisão comercial e operacional (geração, demanda, ambiente, preços), aplicando restrições ao módulo de otimização e controle, enquanto destaca a comercialização da energia, registro de dados operacionais e pagamento pela energia fornecida. Embora os demais módulos possam apresentar uma conexão relevante em uma plataforma real, esta prova de conceito busca avaliar apenas a utilização da tecnologia *blockchain*, com a arquitetura geral mostrada na Figura 5.2. Esta abordagem exclui a análise dos demais componentes, portanto, pesquisas de integração e proposições de forma ampla, não estão contidas neste trabalho.

Os dados utilizados posteriormente para testes durante o desenvolvimento e a posterior avaliação da solução, são sintéticos e adaptados da captura de informações realizada no site da ONS, através da sua interface web com informações de geração e carga diária³⁶. Contudo, a arquitetura permite um avanço futuro na integração de dados reais, consumidos através de APIs (*Application Programming Interface*) que possibilitem acesso a dados de comercializadores e geradores ou conexões com equipamentos de IoT, permitindo a comunicação e recebimentos de dados de geração, por exemplo.

Figura 5.2 – Arquitetura geral utilizada para a Prova de Conceito

Fonte: Autor

O desenvolvimento deverá considerar três atores principais, constituindo uma cadeia de fornecimento simples, representando de forma mínima um cenário de inserção de VPP. Nesta proposta, como apresentado na Figura 5.3, são definidos três atores que compreendem o cliente, VPP e geradores. A relação se traduz em uma relação contratual entre cliente e VPP para compra de energia, enquanto a relação entre geradores e VPP compreende uma relação de fornecimento. A VPP intermediando este cenário oferece ao cliente o fornecimento de energia de forma segura, advinda de fontes renováveis e com a possibilidade de rastreio desta cadeia, assegurando a origem da geração. Quanto aos geradores, seu papel compreende a inserção destas pequenas unidades em um mercado mais amplo que as comercializações diretas, dada a necessidade de grandes clientes, ao passo que coordena todos os contratos, contabiliza a geração e dispõe os pagamentos e possibilidade de ganhos com a comercialização de RECs.

³⁶ ONS – Carga e Geração: <http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>

Figura 5.3 – Atores presentes na Prova de Conceito

Fonte: Autor

Este artefato será testado através de duas ferramentas distintas, compreendendo uma abordagem experimental com simulações e outra com uma análise descritiva de cenários de aplicação.

5.4 DESENVOLVIMENTO DOS ARTEFATOS

A presente etapa considera o arcabouço de informações, tratado na fase de projeto, como base para os desenvolvimentos apresentados a seguir.

5.4.1 Desenvolvimento da Análise Multicritério

Utilizando a classificação para cada critério escolhido, considerando as generalidades da região da MMP, a matriz de comparação encontrada é apresentada na Tabela 5.2, com os valores atribuídos para o conjunto de critérios. Os princípios de escolha priorizaram o Potencial de Inserção e Infraestrutura Elétrica, critérios que são mais variantes dentro da MMP, enquanto TICs e Acesso a Internet, embora tenham variações, são mais homogêneos em grande parte dos municípios.

Tabela 5.2 – Valores atribuídos para cada critério

	Infraestrutura	TIC	Acesso Internet	Potencial Inserção
Infraestrutura	1,00	2,00	3,00	1,00
TIC	0,50	1,00	0,50	0,33
Acesso Internet	0,33	2,00	1,00	0,20
Potencial Inserção	1,00	3,00	5,00	1,00
Somatório das Colunas	2,833	8,000	9,500	2,533

Fonte: Autor

A normalização das colunas permite encontrar o vetor de prioridade para cada critério, com o posterior cálculo do autovalor (λ_{Max}) que será utilizado para calcular a consistência da tabela montada. A Tabela 5.3 apresenta o vetor de priorização normalizado e o cálculo do autovalor.

Tabela 5.3 – Valores para vetor prioridade e cálculo do autovalor

	Infraestrutura	TIC	Acesso Internet	Potencial Inserção
Vetor Prioridade	0,3283	0,1214	0,1379	0,4122
Somatório	2,833	8,000	9,500	2,533
Valor de λ_{Max}	[(0,3282*2,833) + (0,1214*8,000) + (0,1379*9,500) + (0,4122*2,533)] = 4,2567			

Fonte: Autor

Com estas informações se torna possível calcular o índice de consistência para a tabela montada, conforme apresentado por VARGAS (2010), onde CI é o índice de consistência, enquanto n corresponde ao número de critérios.

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} = \frac{4,2567 - 4}{4 - 1} = 0,0856$$

Após o cálculo do índice de consistência, calculou-se a taxa de consistência (CR), onde seu valor deve ser inferior a 10%, conforme apresentado por VARGAS (2010), onde esta condição garante a consistência da matriz montada. Caso o valor se apresente superior a 10%, a matriz deve ser reescrita, de modo que ao se recalcular todo o

procedimento, o valor de CR obedeça a condição mencionada. O cálculo de CR utiliza o valor definido com índices de consistência aleatória (RI), onde o valor atribuído a esta variável depende da quantidade critérios analisados (VARGAS, 2010).

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0856}{0,9} = 0,095$$

Este resultado garante a consistência da matriz montada para cada um dos critérios escolhidos, permitindo que os valores do vetor prioridade possa ser utilizado posteriormente para validação desta parte do artefato. O Gráfico 5.1 apresenta o peso de cada critério na escolha de projetos, quando da aplicação deste método, valores baseados no vetor prioridade calculado.

Gráfico 5.1 – Peso calculado para cada critério

Fonte: Autor

De forma complementar, foi estabelecido um fluxograma para avaliação de uso de plataformas de *blockchain* no projeto da VPP, verificando se esta tecnologia é realmente necessária ou qual das variações de plataforma devem ser utilizadas, conforme o processo de decisão apresentado por WUST e GERVAIS (2018), onde sua adaptação está apresentada na Figura 5.4. Estas duas etapas foram acopladas em um mesmo protocolo, fornecendo assim uma ferramenta para análise inicial de projetos de VPP, auxiliando a tomada de decisão quanto aos municípios da MMP que podem receber unidades

geradoras e a indicação de uso de *blockchain*, mediante as informações fornecidas pelo avaliador.

Figura 5.4 – Fluxograma para escolha de adoção de *blockchain*

Fonte: Autor. Adaptado de WUST e GERVAIS (2018)

5.4.2 Desenvolvimento da Prova de Conceito da VPP

Visando a criação da prova de conceito, escolheu-se a *stack* tecnológica apresentada na figura 5.5, que permitiu o rápido desenvolvimento do sistema, dando foco à compreensão e avaliação do *blockchain* e reduzindo o tempo de programação de partes que não afetariam diretamente esse procedimento, mas que são auxiliares ao sistema. Escolheu-se uma arquitetura de camadas para a separação das tecnologias utilizadas, o que futuramente poderá facilitar a evolução do projeto, permitindo a integração de outras ferramentas e plataformas de *blockchain*, para testes e simulações, verificações de desempenho, escalabilidade e demais características desejadas. A simulação da prova de conceito utiliza um cenário horário, para um único dia, compreendendo 24h de operação do sistema. Os perfis de geração serão descritos adiante, junto ao portfólio de unidades geradoras escolhido para a simulação.

Figura 5.5 – *Stack* tecnológica escolhida

Fonte: Autor.

5.4.2.1 Camada de Front-End

O desenvolvimento da camada de Front-End utilizou os *frameworks* React³⁷ e Bootstrap³⁸ para a prototipação de uma interface que representasse uma VPP, apresentando uma camada intuitiva para simulação, apresentando o estado atual do sistema. O *dashboard* apresenta os dados de carga e geração, global e discretizados por fontes, assim como os resultados diários para as informações de simulação.

De forma auxiliar, uma interface focada nos saldos e transações referentes a pagamentos, permite realizar uma simulação de pagamento para a unidade geradora escolhida. Este procedimento de contabilização e pagamento é realizado pela execução de *smart contracts* específicos, dentro da plataforma *blockchain*.

³⁷ React - <https://pt-br.reactjs.org>

³⁸ Bootstrap - <https://getbootstrap.com>

5.4.2.2 Camada de Back-End

Esta camada recorreu a uma simplificação para aumentar a produtividade e reduzir o tempo de desenvolvimento, uma vez que o desenvolvimento de uma API com as regras de negócio, exposição de serviço REST e comunicação com uma plataforma de *blockchain* pode demandar um longo tempo de desenvolvimento. Com esta abordagem utilizada, o fluxo de dados ocorreu dentro desta camada ocorre como apresentado na figura 5.6.

Figura 5.6 – Fluxo de dados da Prova de Conceito

Fonte: Autor

Os dados e eventos presentes no Front-End estão disponíveis através do *Realtime Database* do serviço Firebase³⁹, que permite a atualização em tempo real e fácil integração com sistemas Web e Aplicativos Móveis, diminuindo tempo de desenvolvimento. Os dados presentes nesta plataforma são enviados e recebidos pelo componente de Back-End desenvolvido utilizando a linguagem de programação Go⁴⁰. A estrutura de dados é apresentada na Figura 5.7, indicando os campos que são utilizados no *Realtime Database*, os quais são acessados pelo Front-End.

³⁹ Firebase - <https://firebase.google.com>

⁴⁰ Golang - <https://golang.org>

Figura 5.7 – Estrutura de dados presente no Firebase

Fonte: Autor.

O componente de Back-End faz a intermediação dos dados entre as demais camadas, assim como recebe os dados de simulação utilizados pelo sistema. Estes dois componentes poderiam ser unificados em um projeto futuro, originando uma API REST, por exemplo. Dentro da camada Back-End existe outro componente, denominado *client application*, o qual realiza a atividade de cliente da plataforma de *blockchain*. O desenvolvimento desta camada também utilizou a linguagem Go em seu desenvolvimento e uma biblioteca do próprio projeto do Hyperledger Fabric⁴¹ para esta comunicação. A escolha do *blockchain* ocorreu usando o fluxograma proposto, optando-se por um *blockchain* permissionado privado, uma vez que existe utilização de uma unidade certificadora, os usuários são conhecidos, contudo, tem interesses conflitantes.

5.4.2.3 Camada Blockchain

A plataforma de *blockchain* escolhida para esta camada foi o Hyperledger Fabric, na versão 2.2. Utilizou-se uma adaptação própria da rede de teste presente no pacote *fabric-samples* como sustentação a este componente. A topologia da rede é apresentada na figura 5.8, mostrando as organizações presentes nesta rede assim como a separação de cada uma.

⁴¹ Fabric SDK Go - <https://github.com/hyperledger/fabric-sdk-go>

Figura 5.8 – Topologia da rede *blockchain* utilizada

Fonte: Autor.

Inicialmente optou-se pela criação das regras de negócio em um *Smart Contract* único, contudo, os testes iniciais demonstraram que apenas um contrato seria um desafio frente às mudanças e compreensão de funcionamento. Reduzindo esta complexidade técnica, optou-se por uma abordagem onde cada contrato obedecesse ao princípio de responsabilidade única, uma boa prática vinda da programação orientada a objeto, dentro de um conjunto de princípios conhecidos na área de Engenharia de Software como SOLID. Optou-se de conjuntamente pela centralização das ações em dois contratos distintos, o *Main Contract* responsável por tarefas associadas à parte comercial e o *Oper Contract*, com tarefas associadas à parte operacional. Desta forma, os geradores aceitam os contratos, fazem consulta de seu montante de energia vendido, pagamento e emissão de REC pelo *Main Contract*. Os dados de geração, contudo, são enviados para o *Oper Contract*, que alimenta com estes dados as consolidações de energia e de quantidade de RECs a serem emitidos.

A arquitetura do Hyperledger Fabric permite assim que cada contrato tenha acesso a coleção de dados com regras definidas, permitindo em extensões posteriores que os contratos possam ser compartilhados com outras organizações, sem a necessidade de compartilhar acesso ao todo. Esta possibilidade permite a inclusão de novos atores, como entidade regulatórias, auditorias ou de processamento de informações, que podem ter acesso restrito a parte do conjunto de dados e com restrições de acesso a dados dos geradores e clientes.

A arquitetura utilizada para os testes é apresentada na figura 5.9, onde se mostrou fundamental para a segregação das responsabilidades, separando as ações comerciais, operacionais e de pagamento, permitindo a fácil modificação, manutenção e extensão da camada. O Quadro 5.1 apresenta uma descrição de cada um dos contratos e suas relações.

Figura 5.9 – Arquitetura de *smart contracts* do sistema

Fonte: Autor.

Quadro 5.1 – *Smart Contracts* e suas descrições

Contrato	Descrição
<i>Main Contract</i>	Contrato principal que recebe as requisições, armazena os dados de comercialização
<i>Oper Contract</i>	Contrato com regras e responsável pelos dados operacionais
<i>Pay Contract</i>	Contrato associado as regras relacionadas a pagamento e consolidação dos dados financeiros diários
<i>Rec Contract</i>	Contrato associado as regras de contabilização de RECs

Fonte: Autor.

5.4.2.4 Diagramas de Sequência das Operações

As sequências de operações são essenciais para compreender as interações entre atores que compõe o sistema e dos contratos inteligentes desenvolvidos, auxiliando assim o desenvolvimento do artefato. Inicialmente, a figura 5.10 apresenta a sequência de operações macro do sistema, envolvendo os três atores considerados. Dentro do contexto proposto, a VPP cria um contrato de comercialização e outro de compra de energia, onde o cliente precisa aceitar o contrato correspondente a venda de energia, enquanto o gerador aceita o contrato de venda de energia. Após o aceite dos dois contratos, a VPP autoriza o envio de informações por parte do gerador, incorporando as informações de medição a um contrato operacional. Este contrato operacional contabiliza a energia, repassando esta informação ao cliente, o qual realiza o pagamento sobre o total de energia fornecido. Após o pagamento, a VPP informa o recebimento e o montante correspondente ao fornecimento do gerador, que pode requisitar o pagamento.

Figura 5.10 – Sequência macro de funcionamento do sistema

Fonte: Autor

A interação entre o gerador e os contratos se mostrou o cenário mais complexo, uma vez que sua participação no sistema compreende o aceite do contrato de fornecimento, inserção de informações e consultas de dados de energia gerada, montante a ser pago pelo fornecimento e a contabilização de RECs. O diagrama de sequência apresentado na figura 5.11 corresponde a primeira fase de operação, apresentando a sequência de aceitação do contrato, correspondente ao *Main Contract*, com as ações posteriores de habilitação dos demais contratos e inserção do valor gerados, registrados no *Oper Contract*. Automaticamente, este contrato realiza ao longo do tempo a consolidação das informações, acumulando valor gerado e a quantidade de RECs obtidas com sua produção.

Figura 5.11 – Fase inicial de interação dos contratos

Fonte: Autor.

Os dados últimos dados de geração podem ser verificados no *Oper Contract*, apresentado na figura 5.12, de onde o gerador e também a própria VPP podem retirar as informações para a execução de *Dashboards* que apresentem a situação em tempo real quanto aos valores gerados e armazenados na rede *blockchain*.

Figura 5.12 – Consulta do dado de geração

Fonte: Autor.

Os dados consolidados nos contratos de pagamento e associados a RECs podem ser consultados, como mostrado na Figura 5.13, permitindo acompanhar sua consolidação ao longo do dia ou seu balanço ao final do dia, semana ou mês. O contrato de pagamento, referenciado como *Pay Contract*, possui também as regras de pagamento, onde o Gerador pode requisitar esta ação. O contrato *REC Contract* carrega as informações sobre geração de REC com base na energia gerada ao longo do tempo, garantindo esse registro no *blockchain*.

Figura 5.13 – Consulta de dados de pagamento e geração de RECs

Fonte: Autor.

Ambos contratos, neste artefato, carregam um funcionamento simbólico e não considera a integração com demais entidades. Uma aplicação real com este tipo de

abordagem poderia expandir o acesso e interação com demais agentes, como o sistema bancário através do *Pay Contract* e realizando pagamentos de forma automática, enquanto o *REC Contract* poderia estar associado a empresas de certificação ou comercialização de RECs.

5.4.2.5 Controle de Acesso as Informações

Os acessos aos registros dentro dos contratos foram definidos por regras onde um usuário administrador pode fazer acesso a plataforma em caráter de consulta ampla a todos os dados e criação no caso dos contratos comerciais e ações de pagamento. Os geradores por outro lado têm acesso aos seus dados, assim como inserção de informação quanto a geração de energia. Esta configuração limita e garante a responsabilidade limitada para cada ator no processo.

5.4.2.6 Segurança no acesso a Camada de *Blockchain*

Os acessos a plataforma de *blockchain* utilizam um sistema de Autoridade Certificadora, definido para operar quando constituída a rede do Hyperledger Fabric, desta forma os usuários são registrados por este componente e então realizada a geração dos Certificados para acesso. A camada de *client application* acessa esses certificados e realiza uma cópia, utilizando posteriormente para validar acesso a plataforma e assim, efetuar as operações dentro da rede e as interações com os *smart contracts*, como apresentado na figura 5.14. Os certificados gerados são armazenados no *client application*, compondo um wallet dos usuários, onde a cada requisição realizada por um usuário, escolhe-se o certificado correspondente a sua identidade e o envia. Este procedimento garante acesso apenas dos usuários registrados.

Figura 5.14 – Fluxo de geração e uso de certificados digitais

Fonte: Autor.

5.5 AVALIAÇÃO DOS ARTEFATOS DESENVOLVIDOS

5.5.1 Avaliação da Análise Multicritério

A análise será avaliada com a verificação dos resultados obtidos através da inserção das pontuações atribuídas para algumas cidades da MMP escolhidas com base em suas limitações, verificando as saídas obtidas. As cidades escolhidas estão apresentadas na Tabela 5.4, com a descrição das características consideradas. O teste considerou um cenário de inserção da tecnologia fotovoltaica como fonte a ser instalada nos municípios escolhidos, compondo o portfólio de uma VPP.

Tabela 5.4 – Características das cidades escolhidas

Cidades	Descrição
Atibaia	Possui medidores inteligentes, irradiação solar inferior a Jaguariúna
Elias Fausto	Não possui medidores inteligentes e tem acesso limitado a internet de alta velocidade
Jaguariúna	Possui medidores inteligentes
Tapiraí	Não possui medidores inteligentes e não possui conexão de fibra óptica

Fonte: Autor. Adaptado de ANEEL (2020) e IBGE (2020)

Com base nestas informações, foram atribuídos valores para cada critério comparando cada dupla de cidades, conforme pode ser visto na Tabela 5.5. Esta classificação permite se obter o vetor prioridade de cada cidade, dentro de cada critério, formando uma matriz. Esta matriz, ao ser multiplicada pelo vetor prioridade obtido na Tabela 5.3, permite a obtenção das cidades mais indicadas para a escolha, conforme apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.5 – Tabelas com pesos por características para cada cidade

Acesso a Internet					
	Tapirai	Elias Fausto	Jaguaruna	Atibaia	Vetor Prioridade
Tapirai	1,00	0,50	0,20	0,20	0,07
Elias Fausto	2,00	1,00	0,20	0,20	0,10
Jaguaruna	5,00	5,00	1,00	1,00	0,41
Atibaia	5,00	5,00	1,00	1,00	0,41

TICs					
	Tapirai	Elias Fausto	Jaguaruna	Atibaia	Vetor Prioridade
Tapirai	1,00	0,25	0,25	0,25	0,08
Elias Fausto	4,00	1,00	1,00	1,00	0,31
Jaguaruna	4,00	1,00	1,00	1,00	0,31
Atibaia	4,00	1,00	1,00	1,00	0,31

Infraestrutura Elétrica					
	Tapirai	Capivari	Jaguaruna	Atibaia	Vetor Prioridade
Tapirai	1,00	1,00	0,14	0,14	0,06
Capivari	1,00	1,00	0,14	0,14	0,06
Jaguaruna	7,00	7,00	1,00	1,00	0,44
Atibaia	7,00	7,00	1,00	1,00	0,44

Potencial de Inserção Fotovoltaica					
	Tapirai	Elias Fausto	Jaguaruna	Atibaia	Vetor Prioridade
Tapirai	1,00	0,25	0,20	0,50	0,10
Elias Fausto	4,00	1,00	1,00	1,00	0,31
Jaguaruna	5,00	1,00	1,00	2,00	0,43
Atibaia	2,00	1,00	0,50	1,00	0,22

Fonte: Autor.

Tabela 5.6 – Cálculo de prioridade de escolha para cada cidade

	Acesso a Internet	TIC	Infraestrutura	Inserção	Vetor Prioridade	Prioridade de Escolha por Cidade
Tapirai	0,07	0,08	0,06	0,10	0,08	8%
Elias Fausto	0,10	0,31	0,06	0,31	0,19	20%
Jaguaruna	0,41	0,31	0,44	0,43	0,40	41%
Atibaia	0,41	0,31	0,44	0,22	0,34	34%

Fonte: Autor.

Verifica-se que com base no peso dos critérios estabelecidos inicialmente e as informações apresentadas, o método permite a atribuição de uma pontuação por cidade, onde sua saída final possibilita a escolha das melhores cidades para a inserção de fontes fotovoltaicas que podem atender uma VPP. Quando avaliados os resultados obtidos, Jaguaruna e Atibaia tem vantagem sobre as demais por possuírem uma infraestrutura de energia elétrica onde já existem unidades com medidores inteligentes. Quando analisadas estas duas cidades e a diferença entre elas, o resultado de Jaguaruna se mostra maior pelo valor de irradiação solar superior a cidade de Atibaia. Esta avaliação permite concluir que a análise multicritério realizada permite estabelecer escolhas com base em critérios específicos que irão classificar as cidades de acordo com seus potenciais, servindo como uma ferramenta adequada para a tomada de decisão.

5.5.2 Avaliação da Prova de Conceito de VPP

Inicialmente a prova de conceito desenvolvida foi submetida a testes do tipo *white box*, com entrada de valores conhecidos e configurados de forma criteriosa para simular a operação real de uma VPP. Visando alcançar essa similaridade, escolheu-se um conjunto de REDs que poderiam compor o portfólio de uma VPP, conforme apresentado no Tabela 5.7 variando-se a tecnologia, perfil de geração e modo de operação, sendo considerada “Ativa” as principais utilizadas no sistema e “Reserva” aquela que deve atuar em momento crítico. Esta composição foi escolhida para exemplificar a utilização de fontes distintas de GD de modo complementar, utilizando a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) como referência, atribuindo a ela 2MW de potência instalada. Desta forma, em um pior cenário, ela seria capaz de suprir toda a demanda. Posteriormente as demais foram sendo ajustadas para atender a curva de carga, porém com um excedente de energia durante o dia. Esta configuração permite investigar a presença de *prosumers*, possibilitando futuras simulações mais complexas, que compreendam dinâmicas de mercado. Os dados utilizados para cada fonte, com exceção da PCH, foram retirados do portal da ONS e modificados em ordem de grandeza, sendo assim adequados para ao resultado esperado. Os dados da PCH correspondem apenas a valores que permitam complementar a geração a depender da curva de carga e buscando simular as condições com e sem despacho, testando assim a condição de fontes reservas dentro do *smart contract* de operação.

Tabela 5.7 – Conjunto de REDs utilizados na simulação

Tecnologia	Potência Considerada	Condição
Solar	2,0 MW	Ativo
Eólica	1,5 MW	Ativo
<i>Prosumer 1</i>	250,0 kW	Ativo
<i>Prosumer 2</i>	250,0 kW	Ativo
PCH	2,0 MW	Reserva

Fonte: Autor.

Os dados obtidos através do portal da ONS os dados referentes a curva de carga diária, a qual foi adaptada em ordem de grandeza com finalidade de simular um cliente que faça compra de energia junto a VPP. O gráfico 5.2 representa o comportamento da carga do consumidor para um dia operacional deste cliente fictício, enquanto o gráfico 5.3 representa o comportamento dos geradores durante este período. A tomada de dados para exibição, simulação e teste compreende um intervalo de 15 minutos em relação aos arquivos que contêm estes dados. O gráfico 5.4 apresenta as curvas de carga e de geração, com o resultado associado a combinação das fontes durante o período operacional, mostrando a característica de geração da VPP diante a requisição de carga.

Gráfico 5.2 – Curva de Carga utilizada na simulação

Fonte: Autor.

Gráfico 5.3 – Produção de energia de cada RED

Fonte: Autor.

Gráfico 5.4 – Curva de Carga e de Geração com combinação das fontes

Fonte: Autor.

Os testes iniciais mostraram atender os critérios definidos inicialmente, habilitando o sistema para a etapa de simulação. A camada de Front-End permitiu acompanhar a evolução dos dados ao longo do tempo, similar a uma operação real acompanhando os

sistemas de geração ao longo do dia, assim como a carga presente no sistema. A Figura 5.15 apresenta a interface principal de operação, permitindo iniciar e parar o sistema de simulação, acompanhar o valor de carga e de geração momentânea, além do gráfico representando estas duas grandezas ao longo do dia operativo.

Figura 5.15 – Interface principal de operação

Fonte: Autor.

Localizado abaixo da interface principal, uma segunda representação permite acompanhar o valor momentâneo de geração de cada fonte, assim como sua tecnologia e se possui a caracterização de reserva, como apresentado na Figura 5.16. Para o caso de fonte reserva, o indicador de operação atua de forma dinâmica, modificando entre o estado “Operando” e “Aguardando”, sendo o primeiro caso para o período onde o gerador está despachando no sistema e o segundo quando não efetua despacho.

Figura 5.16 – Interface representando a geração dos REDs

Fonte: Autor.

A última interface disponível na camada Front-End apresenta os valores do resumo diária da operação, conforme visto na Figura 5.17, entregando os valores acumulados de geração, geração por fonte, energia excedente, carga e quantidade de RECs emitidos no total. Este componente é dinâmico, estando oculto durante a simulação, sendo exposta ao final do ciclo operativo, sobre a interface principal. Os valores apresentados são extraídos da consolidação dos dados na camada de *blockchain*, sendo obtidos pela camada do Back-End, onde a consulta aos *smart contracts* pode desencadear uma acessão de processamento, como os cálculos para determinar a quantidade de RECs que poderiam ser emitidos neste período de simulação.

Figura 5.17 – Interface dos resultados diários

Fonte: Autor.

A sustentação promovida através do Firebase e da camada Back-End se mostrou suficiente para este tipo de prova de conceito. Contudo, no decorrer das simulações, percebe-se uma queda no desempenho do sistema, ainda que operando de modo simulado e executando requisições a cada 10 segundos. A migração desta camada, para testes mais robustos, exige uma modificação arquitetural, optando por um reprojeto que priorize o desempenho, levando-se em consideração as características deste tipo de sistema em uso real. A própria utilização do Firebase pode ser suprimida através do desenvolvimento de uma API RESTful, permitindo integrações mais estruturadas e amplas para outros sistemas. Considerando a arquitetura proposta para uma VPP com base na revisão bibliográfica, uma arquitetura condizente com a natureza deste projeto seria baseada em microsserviços. Esta adoção permitiria a integração com os demais módulos, como os de previsão e controle da geração, de forma escalável, adequando cada componentes aos requisitos computacionais exigidos.

O Back-End está composto por um módulo de leitura de arquivos CSV, os quais possuem o registro de dados utilizados para simulação, representando o ponto de entrada do sistema. A evolução deste componente, para simulações em pequena escala com fontes de geração reais, por exemplo, deve contemplar a modificação para uma arquitetura de entrada de dados advindos de sistemas de IoT. Os *smart contracts* foram executados de forma correta em cada sequência de testes realizada, assim como a comunicação entre eles com as trocas de informações para armazenamento e regras de negócio presentes em seu desenvolvimento. O sistema de Back-End conseguiu registrar e pesquisar os dados armazenados, atendendo as definições impostas para comunicação com Front-End. Simultaneamente, com a utilização de um script secundário desenvolvido para acessar diretamente os contratos gravados, foram verificadas as informações armazenadas, as quais não são disponíveis pelo Front-End, como exemplificado na Figura 5.18.

Figura 5.18 – Interface e acesso via script às informações no *blockchain*

Fonte: Autor.

Posteriormente a finalização do ciclo operativo da simulação, foram realizadas comparações entre a consolidação final e os resultados esperados, através dos cálculos realizados inicialmente para os dados utilizados na simulação. A Tabela 5.8 apresenta as comparações entre os dados diários de geração por tipo de fonte, enquanto a Tabela 5.9 apresenta os resultados globais de geração e carga, com cálculo do excedente gerado, em ambos os casos, estes dados foram obtidos na interface de Front-End e comparados com os dados utilizados para validação.

Tabela 5.8 – Comparação dos valores teóricos e os obtidos na simulação

Fontes	Teórico [kW]	Simulação [kW]
Fotovoltaico	44.022,26	44.022,20
Eólico	56.553,29	56.533,50
Prosumer	6.394,84	6.394,70
PCH	31.120,00	31.120,00

Fonte: Autor.

Tabela 5.9 – Comparação dos valores diários teóricos e os obtidos na simulação

Resultado Diário	Teórico [MW]	Simulação [MW]
Carga	138,09	138,09
Geração	110,66	110,66
Excedente	27,43	27,43

Fonte: Autor.

Os dados armazenados, mas não apresentados pelas interfaces web, foram coletados com o script secundário, acessando informações associadas aos contratos de pagamentos e verificação da contabilidade de RECs, ambos executados com regras próprias de negócio, que calculam valores a serem pagos e creditado como REC com base nos dados operacionais. A Figura 5.19 apresenta o JSON obtido para os dados presentes na camada *blockchain*, assim como os valores calculados para emissão de RECs através da produção de energia renovável pelas fontes. Comparativamente, os valores teóricos esperados para os valores de pagamento e emissão de RECs são apresentados na Tabela 5.10, mostrando que os valores obtidos na execução dos contratos estão aderentes com os dados considerados para validação desta camada. O valor utilizado para precificação da energia destes contratos corresponde a média mensal do PLD para o mês de março de 2021.

Figura 5.19 – JSON com valores presentes no *blockchain* para pagamento e emissão de RECs

Valores de Pagamento	Valores de Emissão de RECs
<pre>[{ "cin": "Contrato0", "cliente": "Cliente0", "totalgerado": "44822.280000000004", "disponibilidade": "0", "valorpagar": "199.97084350000017" }, { "cin": "Contrato1", "cliente": "Cliente1", "totalgerado": "56553.499999999998", "disponibilidade": "0", "valorpagar": "256.89427374999999" }, { "cin": "Contrato2", "cliente": "Cliente2", "totalgerado": "4194.1999999999999", "disponibilidade": "0", "valorpagar": "19.852153400000006" }, { "cin": "Contrato3", "cliente": "Cliente3", "totalgerado": "2280.5000000000014", "disponibilidade": "0", "valorpagar": "9.995771250000006" }, { "cin": "Contrato4", "cliente": "Cliente4", "totalgerado": "31120", "disponibilidade": "31", "valorpagar": "563.82" }]</pre>	<pre>[{ "rin": "Contrato0", "cliente": "Gerador0", "quantrec": "1.8342583333333335" }, { "rin": "Contrato1", "cliente": "Gerador1", "quantrec": "2.3563958333333326" }, { "rin": "Contrato2", "cliente": "Gerador2", "quantrec": "0.17475833333333333" }, { "rin": "Contrato3", "cliente": "Gerador3", "quantrec": "0.09168750000000006" }, { "rin": "Contrato4", "cliente": "Gerador4", "quantrec": "1.2966666666666666" }]</pre>

Fonte: Autor.

Tabela 5.10 – Valores teóricos para pagamentos e emissão de RECs

Contrato	Valor teórico de pagamento	Valor teórico de RECs
Contrato0	R\$ 199,97	1
Contrato1	R\$ 256,89	2
Contrato2	R\$ 19,05	0
Contrato3	R\$ 10,00	0
Contrato4	R\$ 563,82	1

Fonte: Autor.

Finalizando a análise desta camada, foram coletados os dados históricos da geração com a finalidade de verificar a possível recuperação dos dados gravados ao longo do tempo, os quais modificaram o estado do registro e foram armazenados no *ledger* da rede. Este recurso permite recuperar dados armazenados dos registros de todas as informações utilizadas nas ações dos contratos, desde histórico de geração, até registros de transações.

A Figura 5.20 representa um recorte deste histórico, com os dados retornados para a pesquisa, como informações inseridas no contrato operacional, *timestamp* da transação e o ID da transação realizada. Este tipo de operação garante o acesso as informações por parte dos usuários, como seu histórico de dados na plataforma, enquanto pode também ser utilizado pelas entidades envolvidas na rede, permitindo auditoria do sistema, estudo das informações ou outros processamentos que agreguem valor ao modelo de negócio da VPP ou transparência para o setor elétrico. Entretanto, cabe ressaltar que os registros devem ser repensados, quando compartilharem acesso, trocando informações textuais por *hashes*, garantindo que ele siga anônimo a quem acessa, mas verificável para aquele que detém e tem permissão para acessá-lo.

Figura 5.20 – Histórico de mudança dos registros no contrato operacional

```

{...},
{
  "Record": {
    "cin": "Contrato0",
    "nome": "RED0",
    "cliente": "Gerador0",
    "tecnologia": "Solar",
    "potgerada": "250.8",
    "TGerando": "1",
    "ativo": true
  },
  "txId": "23a9490679fc115a9fb11ce7698212f3b95e6f4c294e9c2ac90b92190d211f28",
  "timestamp": "2021-07-28T20:46:59.940561Z"
},
{
  "Record": {
    "cin": "Contrato0",
    "nome": "RED0",
    "cliente": "Gerador0",
    "tecnologia": "Solar",
    "potgerada": "135.2",
    "TGerando": "1",
    "ativo": true
  },
  "txId": "5ee56d235d19d210e48d12953e3972658857071bf8945a98cf399d331728274e",
  "timestamp": "2021-07-28T20:46:36.635799Z"
},
{
  "Record": {
    "cin": "Contrato0",
    "nome": "RED0",
    "cliente": "Gerador0",
    "tecnologia": "Solar",
    "potgerada": "0.8",
    "TGerando": "1",
    "ativo": true
  },
  "txId": "78d0fcadfa304568d47adbb10f891b7bf4e63e2b013d906153904cf46de4f08",
  "timestamp": "2021-07-28T20:46:13.548648Z"
},
{...}

```

Fonte: Autor.

5.6 CONCLUSÕES E GENERALIZAÇÕES

5.6.1 Conclusão sobre o Protocolo de Avaliação

O protocolo desenvolvido apresenta uma possibilidade de avaliação inicial da implantação de unidades geradoras para a composição de uma VPP no território da MMP, indicando a validade de um projeto inicial ou adesão de geradores ao portfólio da VPP como RED disponível. A utilização de análise multicritério se apresenta como uma ferramenta útil para este caso, permitindo a escolha com entradas distintas, para além das análises somente financeiras.

Entretanto, este modelo apresentado pode ser expandido, modificando a estrutura hierárquica apresentada. A inclusão de subclasses de análise pode apresentar resultados ainda mais satisfatório, que cabem uma análise mais profunda, subdividindo alguns destes critérios. Um exemplo desta modificação, por exemplo, pode ser o critério de TICs, atribuindo critérios de importância para tecnologias, uma vez que localmente podem

existir oferta de uma tecnologia apenas ou a combinação de duas ou mais tecnologias, como acontece em alguns municípios da MMP. Este tipo de critério pode ser utilizado para projetos que requerem alta disponibilidade e redundância, por exemplo.

Outra possibilidade está na inclusão de novas classes, tornando mais abrangente a análise realizada. Desta maneira, um aumento nas dimensões analisadas pode compreender critérios sociais ou expansão de GD, por exemplo. A análise multicritério pelo método AHP permite uma quantidade superior de características do que as apresentadas na proposição avaliada. Contudo, cabe ressaltar que o aumento na complexidade da análise pode exigir o desenvolvimento de novas ferramentas de caráter digital, como formulários dinâmicos ou ferramentas de software, que permitiriam um trabalho mais eficiente para analisar uma maior quantidade de critérios e cidades de forma simultânea. A possibilidade de desenvolvimento deste tipo de sistema permite a inclusão de ferramentas como *Geographic Information System* (GIS), possibilitando integrações de informações georreferenciadas como parte integrante da análise. Esta condição permitira uma aplicação ampla, que considere o uso de dados ambientais, como potencial hídrico, impactos locais e demais características que podem ser obtidas por estes sistemas e utilizado como dados de entrada ou complementares.

5.6.2 Conclusão sobre a Prova de Conceito da VPP

As avaliações da prova de conceito se mostraram satisfatórias em relação ao conjunto de informações escolhidas para sua validação, assim como a interface visual se apresentou como uma ferramenta essencial para a interação simplificada para a visualização de informações. Este conjunto de software desenvolvido pode ser portado posteriormente para uma versão acadêmica ou focada em projetos de pesquisa e desenvolvimento, permitindo investigações nas áreas de VPPs e integração de sistemas com *blockchain*, abrindo caminho para novos trabalhos e expansão do modelo. A flexibilidade da arquitetura permite, por exemplo a integração de novos módulos que compreendem uma plataforma de VPP, permitindo simulações próximas a casos reais ou até mesmo a obtenção de uma versão piloto para testes em pequenas plantas.

Contudo, a solução encontrada não abordou questões que podem ser exploradas em projetos futuros, através da utilização de *features* do próprio Hyperledger Fabric,

aumentando a complexidade e alcance do sistema. Dois exemplos imediatos, verificados durante o desenvolvimento e ligados à integração com o cenário do setor elétrico, compreendem a utilização de características como *Private Data* e utilização dos *channels* em arquiteturas mais abrangentes. O artefato desenvolvido considerou um sistema simples com duas organizações, VPP e CCEE, compartilhando todas as informações sobre os contratos e operações. Porém como mencionado anteriormente, outras entidades podem ser associadas ao sistema em um ambiente real, como a ANEEL, EPE ou outras empresas e modelos de negócio.

A utilização da *feature* de *private data* da plataforma permite a ocultação de informações para determinadas organizações, garantindo assim acesso limitado e restrito de acordo com regras de negócio e governança de dados utilizada pela VPP ou definidas pelo setor, aderentes a LGPD. A Figura 5.21 apresenta um exemplo deste uso, com a inserção da figura da EPE, considerando seu acesso limitado a dados gerais e liberando apenas dados que podem ser utilizados em levantamentos de carga e oferta de energia por fonte.

Figura 5.21 – Utilização de dados públicos e privados com inclusão da EPE

Fonte: Autor.

A possibilidade de criação de canais diferentes para conexão entre os *peers* das organizações também permite a separação da informação. Esta *feature* permite, criação de canais para finalidades específicas, permitindo acesso a contratos apenas entre as organizações interessadas. A figura 5.22 apresenta um exemplo desta possibilidade, estendendo o artefato desenvolvido, permitindo a inclusão de um banco de pagamentos e

uma comercializadora de RECs. Esta arquitetura permite o acesso destas entidades a apenas os contratos que podem fornecer informações para suas atividades, onde para a entidade bancária pode ter acesso a dados do *Pay Contract*, para realizar pagamentos, enquanto a comercializadora de RECs acessa o *REC Contract* com registros dos RECs gerados. Mesmo com a inclusão destas duas entidades, elas ficam isoladas do restante do sistema principal e das relações conhecidas pela VPP e pela própria CCEE.

Figura 5.22 – Inclusão de canais para acesso compartilhados com outros atores

Fonte: Autor.

5.6.2.1 Inclusão de Mecanismos de Identidade

O artefato proposto pode ser enriquecido com a inclusão de mecanismos de identidade auto-soberana descentralizada. Este tipo de mecanismo pode ser testado em conjunto ao software desenvolvido verificando sua aplicabilidade e conferindo aos usuários do sistema a possibilidade de gerenciar o compartilhamento de seus dados com as demais instituições. A possibilidade direta de testes utilizando o Hyperledger Indy, projeto que compõe os conjuntos de soluções Hyperledger e pode ser utilizado conjuntamente ao Hyperledger Fabric.

5.6.2.2 Limitações Identificadas do Artefato

A prova de conceito realizada demonstra algumas limitações que podem ser investigadas com o desenvolvimento de testes em ambiente próximo ao real e modificações estruturais do sistema. A primeira limitação está na aceitação das organizações em se responsabilizarem pelo controle de nós dentro da rede utilizando o

Hyperledger Fabric. A ausência desta participação ativa entregaria um sistema centralizado, gerenciado apenas pela VPP, entregando assim uma solução que poderia ser substituída por outros tipos de sistemas que não necessariamente adotem alguma plataforma *blockchain*.

A segunda limitação encontrada está na associada à interoperabilidade de sistemas com a inclusão de novos atores. Em cenários onde existe inclusão de outros atores, como os bancos e as comercializadoras de RECs, estas instituições podem estar adotando outras plataformas de *blockchain*, como Corda, Ethereum ou IOTA⁴², por exemplo. Dentro deste contexto de aplicação, se faz necessário observar se existirá alguma padronização por parte das empresas ou através de regulação do mercado através de proposição da ANEEL. Embora se torne difícil uma regulação quanto a escolhas de plataformas no setor, uma vez que cada protocolo de *blockchain* apresenta características que possam ser aderentes a um modelo de negócio, a agência reguladora pode auxiliar no desenvolvimento de padrões de interface para comunicação entre sistemas, padronização de contratos ou definições que generalizem e facilitem a troca de informação entre entidades, independente da plataforma escolhida. Um exemplo atual desta complexidade se mostra presente mesmo dentro de uma plataforma de VPP, onde a camada de negócios pode conter uma aplicação de Hyperledger Fabric, utilização de IOTA para a camada de aquisição de dados de equipamentos de IoT e necessite operar uma interface com um agente bancário para pagamentos que utiliza como plataforma que adota o Corda como *blockchain* em sua aplicação de negócios.

A mencionada composição dentro de uma VPP, com plataformas de *blockchain* diferentes, se mostra uma área para avaliação de restrições. A prova de conceito realizada pode ser avaliada futuramente com a troca da plataforma utilizada e em arquiteturas distintas, verificando a plausibilidade do uso de outra plataforma de mercado, identificando ganhos de performance, escalabilidade e no modelo de negócio adotado para o modelo em análise. Os custos envolvidos com cada plataforma pode ser um diferencial de aplicação e diferente entre cada escolha realizada. O artefato aqui desenvolvido incorporaria o custo de escala desta rede e do armazenamento, com valores sendo desembolsados pelos envolvidos na rede, mantendo os nós das organizações, de

⁴² <https://www.iota.org>

forma operacional e comportando o armazenamento necessário da plataforma. Um exemplo de contraste deste modelo está na utilização do Ethereum, onde as entidades não necessitariam arcar com custo de manter a plataforma. Entretanto, os custos de transações através dos contratos ou de *tokens* gerados pela rede seria um parâmetro a ser incluído no modelo de negócios, uma vez que a precificação do *gas* tem um caráter dinâmico e deve ser pago, assim como outras taxas, nas execuções da rede⁴³. Portanto, deve se averiguar de forma detalhada a modelagem do sistema que se pretende desenvolver, os custos ao longo do tempo das escolhas realizadas e o perfil de operação do mercado.

5.6.3 Generalização dos Artefatos Desenvolvidos

Os artefatos desenvolvidos se mostram viáveis para aplicação ao problema, permitindo averiguar as escolhas das fontes de geração, sua viabilidade nos municípios diante do cenário tecnológico. Entretanto, para análises financeiras, o artefato deve ser aprimorado, considerando variáveis de financiamento das fontes, *payback* por parte dos investidores e também o custo de investimento em sistemas de TIC ou Infraestrutura elétrica.

A prova de conceito da VPP se mostra adequada para integração da plataforma de *blockchain*, desde que a análise inicial apresente esta necessidade. Outras análises são necessárias para a inclusão dos demais módulos, compondo uma plataforma completa de VPP, que utilize o *blockchain* com diferencial perante o mercado, mas seja capaz de interagir com o restante do sistema.

5.7 MODELOS DE ADOÇÃO PARA A MMP

A generalização apresentada pode ser utilizada para a inserção de sistemas de VPP na MMP, embora este modelo na regulação atual do mercado possa ser empregado sem a utilização da plataforma de *blockchain*, funcionando como, as já mencionadas, usinas híbridas. A agregação de valor da generalização se mostra maior quando analisados os cenários futuros do setor de energia elétrica, com uma maior abertura do mercado, como previsto pela EPE. As condições discutidas para a modernização do setor permitem

⁴³ <https://ethereum.org/en/developers/docs/gas/>

modelos onde a junção entre VPP e *blockchain* entreguem um valor maior a esta classe de problemas e mude as dinâmicas atuais dentro do setor.

Considerando a maior abertura do mercado de energia, com a possibilidade de migração dos consumidores para o Mercado Livre, ou modelo aproximado, as relações dos pequenos produtores, *prosumers*, pequenas comunidades e demais entidade que produzem energia tende a mudar. Não de forma diferente, a MMP comporta grande parte dos atores que produzem energia e podem funcionar como fontes de GD dentro deste ambiente. Esta característica se beneficia do modelo de VPP e os modelos propostos buscam utilizar maximizar a chance de adoção das VPP e crescimento da oferta de energia renovável em caráter de GD, com contrapartidas financeira e social. A generalização demonstra a possibilidade técnica para adoção de plataformas de VPP que utilizem *blockchain*, incluindo características que hoje poderiam ser integradas com a CCEE, como o gerenciamento e compartilhamento de contratos e a medição física de energia realizada.

5.7.1 Modelo para Pequenos Geradores

O primeiro modelo proposto procura absorver o aumento de pequenos geradores, possibilitando o fechamento de grandes contratos de fornecimento e remunerando os participantes. Este modelo apresenta-se como o mais direto em termos de aplicação, por ter aplicações análogas em outros locais do mundo, ainda que sem a aplicação de *blockchain*. Este tipo de modelo viabilizaria a remuneração para micro e minigeradores que podem compor o portfólio de geração da VPP.

A utilização do *blockchain* para este modelo permite o registro das informações de cada gerador em modelo M2M, desenvolvimento de sistemas de pagamento, fiscalização de contratos, rastreamento da energia e auditoria segura de toda a operação e comercialização. A participação da ANEEL e da CCEE neste modelo pode ajudar a modelagem dos *smart contracts*, gerando contratos competitivos e não abusivos, ao mesmo tempo que poderiam simular e auditar os resultados, acompanhando de perto a dinâmica do setor e prevendo mudanças ou regras. Um exemplo desta dinâmica está no acompanhamento de regras específicas para tecnologias de geração, considerando custos, incentivos e crescimento no mercado.

Os resultados financeiros obtidos com a comercialização da energia podem reduzir o *payback* sobre o investimento na tecnologia de geração, facilitando assim o crescimento na adoção deste tipo de sistema por pequenas entidades, de *prosumers* residenciais até empresas que desejem entrar no segmento de geração. As tecnologias adotadas podem ser diferenciadas, com precificação clara nos contratos, assim como suas configurações quanto atuação no portfólio, como fonte principal ou reserva, sendo remunerada de acordo com o tipo de operação e garantindo a segurança do fornecimento de energia. As regras presentes nos contratos podem definir a operação de cada fonte, como representado na Figura 5.23, regrando a geração, o *curtailment*, composição complementar e demais parâmetros regulados ou definidos pelos OSDs.

Figura 5.23 – Representação de VPP com REDs e seus contratos diferenciados

Fonte: Autor.

Ao definir regras e precificações, assim como criar regras de complementariedade, este cenário pode beneficiar a inserção de outras tecnologias de GD que explorem o potencial local onde se encontram instaladas, como Biomassa e PCHs, com mecanismos que compensem a sazonalidade e criação de regras distintas e dinâmicas de acordo com as características técnicas, regionais e de mercado. Este modelo se mostra aplicável para a MMP uma vez que em sua região existem potenciais pouco explorados para fontes de geração como eólica, biomassa e PCHs.

5.7.2 Modelo para Viabilização de Projetos de GD

Utilizando a possibilidade de tokenização de ativos físicos, este modelo considera a utilização deste tipo de mecanismo para a viabilização de projetos de GD através da

emissão de *Security Tokens*. Este contexto poderia representar uma posição ativa de um agregador para montar o portfólio de sua VPP ou de outras empresas que desejem entrar no setor, permitindo a construção de geração de energia ou sua expansão ao longo do tempo. A dinâmica seria dividida em etapas, como demonstrado na Figura 5.24, onde em um momento inicial do projeto da unidade de geração, a empresa responsável pela VPP poderia aportar um percentual do custo e realizar a emissão de *tokens* como parte da captação financeira visando a viabilização do projeto. Os *tokens* emitidos podem ser negociados através de uma *Exchange*, similar a uma bolsa de valores, focadas neste segmento, permitindo a compra e venda destes ativos.

Figura 5.24 – Dinâmica para tokenização de ativos de geração

Fonte: Autor.

Posteriormente, os investidores poderiam negociar e vender seus *tokens* ou mantê-los como parte de seus ativos financeiros, recebendo dividendos referentes a geração de energia ou resultados da VPP. A regra de pagamento e de retorno deste investimento seriam descritos através de *smart contracts*, permitindo que em sua emissão as regras dos *tokens* sejam conhecidas. Este mesmo procedimento de captação de recursos pode ser utilizando quando uma expansão da VPP for requerida ou planejada. Esta relação, como apresentada na figura 5.25, permite o aumento do parque de geração da VPP, nas variadas tecnologias que elas optem por operar, como solar e eólica presentes na figura. A dinâmica deste modelo compreende a distribuição do lucro, após a liquidação de contratos, de modo que pode ser integrado com sistemas de *blockchain* responsáveis pela comercialização e execução de contratos. A associação destas duas etapas, permite a execução contratual por um sistema presente no mercado, atendendo os mecanismos definidos por órgão reguladores, os quais podem informar a plataforma quanto ao montante de lucro obtido na operação e as regras de distribuição de acordo com a posse dos *tokens* negociados.

Figura 5.25 – Relação de agentes de mercado dentro deste modelo

Fonte: Autor.

O modelo proposto apresenta a possibilidade de aplicação dentro da MMP como viabilizador para projetos de GD de fontes que ainda apresentam baixa participação na matriz de geração da região. Esta aplicação permitiria o avanço de tecnologias menos populares ou mais custosas que a utilização da fotovoltaica, assim como viabilização de projetos locais de biogás para pequenos produtores rurais. Este tipo de ativo se assemelha às ações e também aos fundos imobiliários, ativos negociados atualmente no mercado financeiro.

Os *tokens* poderiam compor uma nova classe de investimento, sendo negociado em *exchanges* dedicadas a projetos de infraestrutura ou na bolsa de valores diretamente. Esta natureza, entretanto, requer uma pesquisa mais aprofundada quanto a relação de normas associadas a CVM e como seria operacionalizada, regulada e fiscalizada este tipo de operação. Os *smart contracts* vinculados a estes ativos podem conter regras específicas com o modelo de negociação e características relacionadas com a tecnologia utilizada no projeto, como incentivos, prazos para retenção do ativo ou características quanto aos dividendos. Dentro do artefato desenvolvido, este tipo de modelo pode ser testado com a

inclusão de outro contrato, expandindo o comportamento testado, conforme mostra a Figura 5.26. Esta extensão pode incluir o mecanismo de pagamento considerando as regras do contrato relacionado aos *tokens*, enquanto a simulação de negociação pode adaptar *tokens* do padrão ERC-20⁴⁴ para um modelo próximo ao mencionado.

Figura 5.26 – Extensão da Prova de Conceito para inclusão de *smart contract* com regras de *tokens*

Fonte: Autor.

5.7.3 Modelo Social

O último modelo proposto busca explorar a flexibilidade presente no artefato desenvolvido para impactar socialmente o setor de energia elétrica. Para este contexto, duas condições devem ser observadas e podem ser aplicadas com utilização do *blockchain* como tecnologia habilitadora de um funcionamento similar ao projeto de cVPP europeu, mas com características condizentes com o cenário nacional. A proposição considera pelo lado da geração fontes oriundas de entidades com finalidade sociais ou que pretendem ofertar energia com custos diminutos para públicos vulneráveis. Esta condição pode ser alcançada com entidades comunitárias que consigam adquirir fontes de GD com baixo custo ou sejam passíveis do recebimento de incentivos, modificação das regras de implantação dos sistemas SIGFI, Organizações Não Governamentais (ONGs) ou cooperativas agrícolas que produzem biogás.

⁴⁴ <https://ethereum.org/en/developers/docs/standards/tokens/erc-20/>

O somatório de energia fornecida por estas entidades, através de uma VPP, poderiam ser ofertado a consumidores residenciais, pequenas cooperativas locais ou mesmo para comerciantes locais. O regramento deste fornecimento pode seguir a mesma dinâmica do que as cVPPs na Europa, com votação quanto a finalidade do fornecimento ou uma regra geral, focada no atendimento em públicos específicos. A venda da energia pode ser rastreada, permitindo mecanismos de auditoria quanto ao destino do fornecimento, contudo, sem expor a identidade do consumidor, através de um cadastro prévio e da inclusão deste consumidor em um sistema de identidade auto-soberana, de forma que dentro deste sistema ela possa ter benefícios como a compra de energia mais barata.

Ainda dentro deste modelo, a comercialização de energia para comerciantes locais pode ser convertida não apenas em dinheiro e redistribuído entre a comunidade ou entidade de fornecimento, mas também pode conter regras de bonificação no estabelecimento. Mecanismos auxiliares de retorno financeiro, facilitado pela VPP, como a comercialização dos RECs, seriam diretamente convertidos nestas bonificações. A Figura 5.27 apresenta um exemplo das possíveis dinâmicas mencionadas, as quais podem ser exploradas em pesquisas futuras, investigando a possibilidade de operação desta classe de VPPs como uma *Decentralized Autonomous Organization* (DAO). Operando desta forma, seria possível atingir a redução de custos das transações e da presença de um intermediário, possibilitando um modelo financeiramente adequado para este segmento.

Figura 5.27 – Modelo social e seus atores

Fonte: Autor.

6 CONCLUSÕES

As VPPs se mostram uma temática contemporânea, com a tendência de aumento crescente no âmbito de pesquisa e desenvolvimento, inserção no mercado e mudança de paradigma na gestão dos REDs. A transição energética e a digitalização cada vez mais presentes, encontram neste tema a possibilidade de desmaterializar as grandes usinas de geração. Os projetos tradicionais de usinas, como hidrelétrica e termoeletricas demandam muito investimento e geram impacto socioambiental onde são inseridas, dois fatores que podem ser mitigados com a inserção de VPP e o crescimento das unidades de geração agregadas ao seu portfólio. A utilização de *blockchain*, em plataformas que demandem esta tecnologia, apresenta um grande potencial para mudar os modelos de negócio atuais, não apenas conferindo segurança nas transações, mas também possibilitando novas dinâmicas dentro do setor, como a tokenização de ativos. Esta pesquisa, através dos resultados obtidos, apresenta contribuições em diferentes segmentos que abrangem a temática investigada. Desta forma, as conclusões foram separadas de acordo com o espectro de problemas onde se encaixam.

6.1 CONTRIBUIÇÕES PARA AVALIAÇÃO DE PROJETOS E TECNOLOGIAS

O uso de análise multicritério se apresentou como um arcabouço ferramental que poder ser aprimorado e expandido para avaliar outros projetos de GD, com novos atributos e mais aderentes as métricas que desejam ser avaliadas. Desta maneira, sua aplicação pode ser definida para atribuir peso por região geográfica, tecnologia, rendimento, custo ou qualquer outro atributo que seja importante na fase inicial de avaliação. Esta técnica pode ser associada a outras ferramentas, permitindo a criação de sistemas especialistas que auxiliem a escolha de projetos e locais para inserção de GD.

6.2 IMPLICAÇÕES NA REGIÃO DA MMP

No âmbito da inserção na MMP, o cenário atual do setor elétrico apresenta desafios para todas as esferas de governo com o agravamento das mudanças climáticas e mudança nos ciclos hidrológicos, fragilizando assim a matriz energética e colocando sob perigo o fornecimento ao longo do tempo. Este contexto mostra a necessidade de se repensar a utilização das tecnologias de geração, sua gestão, o planejamento visando a segurança energética e inserção crescente de GD. Como apresentado, a MMP atualmente demanda

um percentual grande de energia gerado nacionalmente, o que a torna uma das regiões mais dependentes do sistema e assim mais impactada com essas mudanças. Dentro deste contexto, devem ser pensados novos modelos para garantir a segurança energética e aumento de penetração da GD, onde as VPPs ganham importância.

A MMP goza de um ambiente com viabilidade tecnológica superior a outras regiões para este tipo de projeto, contudo, como apresentado neste trabalho, o ferramental de análise é essencial para a escolha adequada das cidades frente aos seus potenciais de geração, limitantes técnicos e demais critérios que se mostre importantes para a região. Entretanto, a infraestrutura de *smart grid* na região demanda mais investimentos, para avançar na modernização dos serviços e das relações de atores do setor. Um destes exemplos mais característicos e abordados neste trabalho está relacionado a presença dos medidores inteligentes. A quantidade de municípios dentro da MMP que utiliza este tipo de sistemas corresponde a uma fração pequena e ainda assim, alguns dos projetos se apresentam em caráter de P&D não atendendo a totalidade do município onde são realizados os projetos.

6.3 DESDOBRAMENTOS COLATERAIS

Considerando o ecossistema atual da utilização do *blockchain* e das finanças descentralizadas (*Decentralized Finance*, DeFi), algumas temáticas poder ser consideradas para pesquisas futuras. Um exemplo está na utilização de criptomoedas, segmento que não fez parte do escopo deste trabalho por se tratar de um tema atualmente cercado de incertezas. Enquanto alguns países tentam regulamentá-las, outros tem escolhido se manter distantes e até mesmo evitá-la, dando preferência a futura inclusão de sua própria moeda digital, como no caso da China. Em âmbito nacional, o Banco Central tem estudado o desenvolvimento do real digital, que deve ocupar lugar como uma moeda digital, mas sem as mesmas características das criptomoedas quanto a sua descentralização de controle, o que de forma geral, se apresenta como limitante perante os governos e a economia tradicional.

Outro tema não tratado neste trabalho diz respeito a moedas complementares ou sociais (moedas não reconhecidas dentro do sistema financeiro tradicional), as quais fazem parte de alguns segmentos da sociedade, como comunidades vulneráveis,

auxiliando no desenvolvimento local e auxiliando troca de valores com bancos comunitários. A tecnologia *blockchain* e criptomoedas ou tokens podem ser utilizados localmente envolvendo o mercado local com a geração e comercialização de energia dentro de microgrids. Diferente de sistemas P2P de comercialização que utilizam a moeda corrente e reconhecida, mecanismos sociais podem ser desenvolvidos aplicando-se VPPs com impacto social local utilizando moedas complementares e impulsionando o local, contudo, esse tipo de aplicação exige mais estudos e investigações com a utilização mais profunda de modelos microeconomias e demais validações.

6.4 PESQUISAS E TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa desenvolvida abre caminho para novas investigações com elementos e abordagens não tratadas neste trabalho. O protótipo desenvolvido pode ser modularizado para ser explorado e avançar em seu desenvolvimento. Essa continuidade permitiria o desenvolvimento dos módulos de controle e de previsão, os quais podem ser acoplados ao desenvolvimento atual e fornecendo um sistema de VPP que pode ser aplicado, estudado e reproduzido no ambiente acadêmico ou melhorado para se tornar um produto comercial. Atualmente o Brasil conta com poucas iniciativas neste sentido e esta evolução do sistema permitiria manter o país na vanguarda do desenvolvimento de sistemas para controle de REDs e novos modelos de negócios visando a transição energética.

Outro caminho de investigação compreende outros elementos relacionado aos REDs, para além de unidades de geração de energia. Novos componentes que estarão presentes nas redes elétricas do futuro, como armazenamento, veículos elétricos e sistemas de resposta a demanda, podem ser incorporados. Esta inclusão permitirá avaliar o comportamento de cada tecnologia e sua capacidade de auxiliar uma VPP quanto ao fornecimento de energia, porém não se limitando apenas a esta abordagem. Por se tratar de um sistema desenvolvido para atuar utilizando a tecnologia *blockchain*, se torna possível avaliar a utilização de *smart contracts* como ferramentas para novos modelos de negócio. Considerando as características da utilização de armazenamento de energia, as precificações dinâmicas e bonificações do uso de sistemas de resposta a demanda e o comportamento dual dos veículos elétricos, com a possibilidade de consumo ou fornecimento de energia, as interações se mostram complexas. Esta mudança de relações e o dinamismo imposto ao setor elétrico, permite um campo profícuo para investigações

diversas com a junção entre tecnologia e modelo de componente, possibilitando vislumbrar e conhecer os impactos, possibilidades e o futuro das redes elétricas inteligentes que podem utilizar o *blockchain* em diversas camadas das aplicações setoriais, desde que, se mostrem viáveis.

7 BIBLIOGRAFIA

- ABB. **ABB technology for virtual power plant in China**. Disponível em: <<https://new.abb.com/news/detail/66079/abb-technology-for-virtual-power-plant-in-china>>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- ADAM-KALFON, P.; SELSABILA, E. M. Blockchain, A Catalyst for New Approaches in Insurance. **Blockchain, a catalyst for new approaches in insurance**, p. 6–44, 2018.
- ADU-KANKAM, K. O.; CAMARINHA-MATOS, L. M. **Towards collaborative Virtual Power Plants: Trends and convergence Sustainable Energy, Grids and Networks**, 2018.
- AHMAD, T.; ZHANG, D. Using the internet of things in smart energy systems and networks. **Sustainable Cities and Society**, v. 68, n. December 2020, p. 102783, 2021.
- AL-TURJMAN, F.; ABUJUBBEH, M. IoT-enabled smart grid via SM: An overview. **Future Generation Computer Systems**, v. 96, p. 579–590, 2019.
- ALAHYARI, A.; EHSAN, M.; MOUSAVIZADEH, M. S. A hybrid storage-wind virtual power plant (VPP) participation in the electricity markets: A self-scheduling optimization considering price, renewable generation, and electric vehicles uncertainties. **Journal of Energy Storage**, v. 25, n. July, p. 100812, 2019.
- ALEXANDRAKIS, J. Cycling towards sustainability: The transformative potential of urban design thinking in a sustainable living lab. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 9, n. October 2020, p. 100269, 2021.
- ALVES DOS SANTOS, J.; BERMANN, C. **Os impactos da lei geral de proteção de dados no setor de energia brasileiro**. IX Congresso Luso-Brasileiro para Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável. **Anais...Anais do Pluris 2021 Digital**, 2021
- ANDERSEN, P. B. et al. Using service oriented architecture in a generic virtual power plant. **ITNG 2009 - 6th International Conference on Information Technology: New Generations**, n. PECon 08, p. 1621–1622, 2009.
- ANDONI, M. et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 100, n. February 2018, p. 143–174, 2019.
- ANDRESS, J. Cryptography. In: **The Basics of Information Security**. [s.l.] Elsevier,

2014. p. 69–88.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL - SIGA**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

ANTHOPOULOS, L. Smart utopia VS smart reality: Learning by experience from 10 smart city cases. **Cities**, v. 63, p. 128–148, 2017.

ANTHOPOULOS, L. **Smart City Emergence**. [s.l.] Elsevier, 2019.

ANTONOPOULOS, A. M. **Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Cryptocurrencies**. 1st. ed. [s.l.] O'Reilly Media, Inc., 2014.

ARENA. **Australia's largest virtual power plant ramps up in South Australia**. Disponível em: <<https://arena.gov.au/news/australias-largest-virtual-power-plant-ramps-up-in-south-australia/>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

ASQUINO, M. S. A importância da macrometrópole paulista como escala de planejamento de infraestruturas de circulação e de transporte. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 12, n. 1, p. 83, 31 maio 2010.

AU, S.; POWER, T. **Tokenomics: The Crypto Shift of Blockchains, ICOs, and Tokens**. [s.l.] Packt Publishing, 2018.

AVILA, E. et al. Energy management of a virtual power plant with a battery-ultracapacitor based Hybrid Energy Storage System. **Proceedings - 2017 IEEE Southern Power Electronics Conference, SPEC 2017**, v. 2018- Janua, p. 1–6, 2018.

AWASTHI, M. K. et al. Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 127, n. December 2019, p. 109876, 2020.

AWERBUCH, S.; PRESTON, A. **The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive Aspects of the Emerging Industry**. [s.l.: s.n.].

BARINGO, L.; RAHIMIYAN, M. **Virtual Power Plants and Electricity Markets**. Cham: Springer International Publishing, 2020.

BASHIR, I. **Mastering Blockchain, Second Edition: Distributed ledger technology, decentralization, and smart contracts explained**. Second Edi ed. [s.l.] Packt Publishing, 2018.

- BEHI, B. et al. Cost – Benefit Analysis of a Virtual Power Plant Including Solar PV , Flow Battery , Heat Pump , Case Study. **Energies**, 2020.
- BENČIĆ, F. M.; ŽARKO, I. P. Distributed Ledger Technology: Blockchain Compared to Directed Acyclic Graph. **Proceedings - International Conference on Distributed Computing Systems**, v. 2018- July, p. 1569–1570, 2018.
- BORLASE, S. **Smart grids : infrastructure, technology, and solutions**. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- BRILLIANTOVA, V.; THURNER, T. W. Blockchain and the future of energy. **Technology in Society**, 2019.
- BURGER, S.; CHAVES-ÁVILA, J. P. The Value of Aggregators in Electricity Systems Carlos Batlle , and Ignacio J . Pérez-Arriaga. **MIT Center for Energy and Environmental Policy Research**, v. CEEPR WP 2, n. January, p. 29, 2016.
- BUTERIN, V. Ethereum White Paper. **Etherum**, 2014a.
- BUTERIN, V. A next-generation smart contract and decentralized application platform. **Etherum**, 2014b.
- BUTERIN, V.; MOUGAYAR, W. The Business of Blockchain. **Computing in Science and Engineering**, 2017.
- CAMPOS, E. M. **Criptomoedas e Blockchain - O direito no mundo digital**. Rio de Janeiro: Editora Lumen Juris, 2018.
- CANZLER, W. et al. From “living lab” to strategic action field: Bringing together energy, mobility, and ICT in Germany. **Energy Research and Social Science**, v. 27, p. 25–35, 2017.
- CASTRO, N. DE; GOUVÊA, A. R.; MOSZKOWICZ, M. Desafios das distribuidoras de energia elétrica frente à difusão dos recursos energéticos distribuídos. **Agência CanalEnergia**, p. 5, 2019.
- CCEE. **Relatório do Grupo Temático - Mecanismos de Formação de Preço**. Brasília: [s.n.].
- CETIC.BR, C. G. DA I. NO B. **TIC DOMICÍLIOS: Pesquisa Sobre o Uso das Tecnologias de Informação e Comunicação nos Domicílios Brasileiros**. São Paulo: Cetic.br, 2020.

CGEE, C. DE G. E E. E. **Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional**. [s.l: s.n.].

CHAKRABORTY, S. et al. Smart meters for enhancing protection and monitoring functions in emerging distribution systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 127, n. October 2020, p. 106626, 2021.

CHEN, Y. Blockchain tokens and the potential democratization of entrepreneurship and innovation. **Business Horizons**, v. 61, n. 4, p. 567–575, 1 jul. 2018.

CHEN, Y. et al. Decentralized Provision of Renewable Predictions within a Virtual Power Plant. **arXiv**, v. XX, n. X, 2020.

CIOARA, T. et al. Smart grid management using blockchain: Future scenarios and challenges. **Proceedings - RoEduNet IEEE International Conference**, v. 2020-Decem, 2020.

COHEN, B. **The 3 Generations of Smart Cities From 1.0 to 3.0**. Disponível em: <<https://www.smartcitieslibrary.com/the-3-generations-of-smart-cities/>>. Acesso em: 10 maio. 2021.

COLLAÇO, F. M. DE A. et al. Understanding the Energy System of the Paulista Macrometropolis: first step in local action toward climate change. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, n. December, 2020.

COLTHORPE, A. **New York utility Con Edison recognises value of home energy storage with new virtual power plant**. Disponível em: <<https://www.energy-storage.news/news/new-york-utility-con-edison-recognises-value-of-home-energy-storage-with-ne>>. Acesso em: 27 mar. 2021.

COSTA, B. S. Identidade autossobrerana para além do hype. 2020.

COULOURIS, G. et al. **Distributed Systems: Concepts and Design**. 5th. ed. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 2013.

DAMERI, R. P.; COCCHIA, A. Smart City and Digital City : Twenty Years of Terminology Evolution. **X Conference of the Italian Chapter of AIS, ITAIS 2013**, 2013.

DI SILVESTRE, M. L. et al. Blockchain for power systems: Current trends and future applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, n. January 2019, 2020.

DIELMANN, K.; VAN DER VELDEN, A. Virtual power plants (VPP) - A new perspective for energy generation? **Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists - Modern Techniques and Technologies, MTT' 2003**, p. 18–20, 2003.

DOS SANTOS, J. T. A.; BERMANN, C. **Energia nas Cidades Inteligentes : o Blockchain integrado ao Smart Grid**. XII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. **Anais...SBPE**, 2020

DRESCH, A. et al. **Design Science Research: Método de pesquisa para avanço da Ciência e Tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DRESCHER, D. **Blockchain Basics: A Non-Technical Introduction in 25 Steps**. 1st. ed. USA: Apress, 2017.

EMF. Intelligent Assets: Unlocking the Circular Economy Potential. **Ellen MacArthur Foundation**, p. 1–25, 2016.

ENERGYLOCALS. **SA Virtual Power Plant - FAQs**. Disponível em: <<https://energylocals.com.au/sa-virtual-power-plant-faqs/>>. Acesso em: 27 mar. 2021.

ENERGYWEEK. **AES Tietê & CERTI Foundation: Virtual Power Plant with Focus on C&I Clients Aggregation and Energy Market: Platform Development**. Disponível em: <<https://www.energyweek.fi/awards/aes-tiete-certi-foundation-virtual-power-plant-with-focus-on-ci-clients-aggregation-and-energy-market-platform-development/>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2019** Site EPE. [s.l: s.n.].

EPE. **Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético** No EPE-DEE-NT-022/2019-r0. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-389/NT_EPE_DEE-NT-022_2019-r0.pdf>.

EPE. **Relatório do Grupo Temático Inserção de Novas Tecnologias - 2º Relatório - Identificação de alterações legais e infralegais**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/36070/525274/Inserção+de+Novas+Tecnologias.pdf>>.

EPE. **Relatório do Grupo Temático - Inserção de Novas Tecnologias - 1º Relatório -**

Diagnóstico. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/documents/36070/525274/Inserção+de+Novas+Tecnologias.pdf>>.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029.** Brasília: [s.n.].

EPE. Balanço Energético Nacional 2020. **Rio de Janeiro : EPE**, p. 7–295, 2020b.

EPE; MME. **Estudos de Planejamento da Expansão da Geração - Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento EPE-DEE-NT-011/2018-r0.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>.

FAN, M. et al. **Peer-Peer Electricity Transaction and Integrated Regulation of VPP Based on Blockchain.** 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). **Anais...IEEE**, 30 out. 2020 Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9347041/>>

FEIZ, R. et al. Key performance indicators for biogas production—methodological insights on the life-cycle analysis of biogas production from source-separated food waste. **Energy**, v. 200, p. 117462, jun. 2020.

FERDOUS, M. S.; CHOWDHURY, F.; ALASSAFI, M. O. In Search of Self-Sovereign Identity Leveraging Blockchain Technology. **IEEE Access**, v. 7, p. 103059–103079, 2019.

FERNANDES, F. et al. Intelligent energy management using CBR: Brazilian residential consumption scenario. **2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, SSCI 2016**, v. 318912, n. 318912, 2017.

FERNÁNDEZ-CARAMÉS, T. M.; FRAGA-LAMAS, P. A Review on the Use of Blockchain for the Internet of Things. **IEEE Access**, v. 6, n. May, p. 32979–33001, 2018.

FILIPPI, P. DE; WRIGHT, P. A. **Blockchain and the Law: The Rule of Code.** USA: Harvard University Press, 2018.

FREY, K. et al. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o planejamento ambiental na Macrometrópole Paulista.** Santo André: Editora UFABC, 2020.

FU, Z.; DONG, P.; JU, Y. An intelligent electric vehicle charging system for new

energy companies based on consortium blockchain. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121219, 2020.

GALICI, M. et al. A cyber-physical platform for simulating energy transactions in local energy markets. **2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019**, p. 2–7, 2019.

GAO, Z. et al. Access mode of EVs to grid based on VPP. **IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC Asia-Pacific 2014 - Conference Proceedings**, p. 1–5, 2014.

GHAVIDEL, S. et al. A review on the virtual power plant: Components and operation systems. **2016 IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON 2016**, p. 1–6, 2016.

GOLEM FACTORY GMBH. **The Golem Project Crowdfunding Whitepaper**. Disponível em: <<https://golem.network/crowdfunding/Golemwhitepaper.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2021.

GORANOVIC, A. et al. Hyperledger Fabric Smart Grid Communication Testbed on Raspberry PI ARM Architecture. **IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS**, v. 2019- May, p. 2019–2022, 2019.

GOUGHERI, S. S. et al. Optimal participation of a virtual power plant in electricity market considering renewable energy: A deep learning-based approach. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 26, p. 100448, 2021.

GULATI, H.; HUANG, C. T. Self-Sovereign Dynamic Digital Identities based on Blockchain Technology. **Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON**, v. 2019- April, 2019.

HABIBZADEH, H. et al. Sensing, communication and security planes: A new challenge for a smart city system design. **Computer Networks**, v. 144, p. 163–200, 2018.

HANSEN, A.; STAGGS, J.; SHENOI, S. Security analysis of an advanced metering infrastructure. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, v. 18, p. 3–19, 2017.

HAQUE, M. M.; WOLFS, P.; ALAHAKOON, S. Active Power Flow Control of Three-Port Converter for Virtual Power Plant Applications. **2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy, PESGRE**

2020, p. 1–6, 2020.

HEYDARI, A.; ASKARZADEH, A. Optimization of a biomass-based photovoltaic power plant for an off-grid application subject to loss of power supply probability concept. **Applied Energy**, v. 165, p. 601–611, 2016.

HOWARD, H.; MORTIER, R. Paxos vs Raft: Have we reached consensus on distributed consensus? **Proceedings of the 7th Workshop on Principles and Practice of Consistency for Distributed Data, PaPoC 2020**, 2020.

HUA, W. et al. A blockchain based peer-to-peer trading framework integrating energy and carbon markets. **Applied Energy**, v. 279, n. September, p. 115539, 2020.

HUANG, D. et al. Consortium blockchain-based decentralized energy trading mechanism for virtual power plant. **2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020**, p. 3084–3089, 2020.

HUANG, Y. et al. An Edge Computing Framework for Real-Time Monitoring in Smart Grid. **Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Industrial Internet, ICII 2018**, n. Icii, p. 99–108, 2018.

IBGE. **Cidades@**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 23 abr. 2021.

IBRAHIM, M. S.; DONG, W.; YANG, Q. Machine learning driven smart electric power systems: Current trends and new perspectives. **Applied Energy**, v. 272, n. June, p. 115237, 2020.

IEA. Digitalization & Energy. **Digitalization & Energy**, 2017.

IEA, I. E. A. Global EV Outlook 2018. v. 2012, n. 2, p. 17, 2018.

IGC-SP. **Sistema de Informações Metropolitanas**. Disponível em: <<https://geo.emplasa.sp.gov.br/Mapa?contexto=emplasageo>>. Acesso em: 14 nov. 2020a.

IGC-SP. **Coleção Emplasa**. Disponível em: <<http://www.igc.sp.gov.br/produtos/emplasa.html>>. Acesso em: 9 set. 2020b.

IMBAULT, F. et al. **The green blockchain: Managing decentralized energy production and consumption**. Conference Proceedings - 2017 17th IEEE International

Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2017. **Anais...2017**

INTERREG NORTH-WEST EUROPE. **cvPP - Community-based Virtual Power Plant: a novel model of radical decarbonisation based on empowerment of low-carbon community driven energy initiatives**. Disponível em:

<<https://www.nweurope.eu/projects/project-search/cvpp-community-based-virtual-power-plant/>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

IRAZÁBAL, C.; JIRÓN, P. Latin American smart cities: Between worlding infatuation and crawling provincialising. **Urban Studies**, v. 58, n. 3, p. 507–534, 19 fev. 2021.

IRENA. **Accelerating the Energy Transition through Innovation**. [s.l: s.n.].

IRENA. **Power system flexibility for the energy transition: Part 1, Overview for policy makers**. [s.l: s.n.].

IRENA. **Power system flexibility for the energy transition: Part 2, IRENA FlexTool methodology**. [s.l: s.n.].

IRENA. **Innovation landscape brief: Aggregators**. Abu Dhabi: [s.n.].

IRENA. **Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables. Summary for policy makers**. Abu Dhabi: [s.n.].

IRENA. Innovation landscape brief: Blockchain. **International Renewable Energy Agency**, 2019c.

IRENA. **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050**. [s.l: s.n.].

IRENA. **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050**. [s.l: s.n.].

JOHNSON, J. et al. Design and Implementation of a Secure Virtual Power Plant. n. September, p. 243–287, 2017.

KABALCI, Y. A survey on smart metering and smart grid communication. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 302–318, 2016.

KAGAN, N. AL. **Redes elétricas inteligentes no Brasil : análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação**. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. DE; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2a Edição ed. São Paulo: Blucher, 2010.

KAHLEN, M. T.; KETTER, W.; VAN DALEN, J. Electric Vehicle Virtual Power Plant Dilemma: Grid Balancing Versus Customer Mobility. **Production and Operations Management**, v. 27, n. 11, p. 2054–2070, 2018.

KASAEI, M. J.; GANDOMKAR, M.; NIKOUKAR, J. Optimal management of renewable energy sources by virtual power plant. **Renewable Energy**, v. 114, p. 1180–1188, 2017.

KATZ, J.; LINDELL, Y. **Introduction to Modern Cryptography, Second Edition**. 2nd. ed. [s.l.] Chapman & Hall/CRC, 2014.

KAZIČKOVÁ, T.; BUHNOVA, B. ICT architecture for the Smart Grid: Concept overview. **2016 Smart Cities Symposium Prague, SCSP 2016**, p. 16–19, 2016.

KHAQQI, K. N. et al. Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application. **Applied Energy**, v. 209, n. July 2017, p. 8–19, 2018.

KHARPAL, A. **China has given away millions in its digital yuan trials. This is how it works**. Disponível em: <<https://www.cnbc.com/2021/03/05/chinas-digital-yuan-what-is-it-and-how-does-it-work.html>>. Acesso em: 1 abr. 2021.

KHATOON, A. et al. Blockchain in energy efficiency: Potential applications and benefits. **Energies**, v. 12, n. 17, p. 1–14, 2019.

KHATTAK, H. A. et al. Dynamic pricing in industrial internet of things: Blockchain application for energy management in smart cities. **Journal of Information Security and Applications**, v. 55, p. 102615, 2020.

KHORASANY, M. et al. Paving the Path for Two-Sided Energy Markets: An Overview of Different Approaches. **IEEE Access**, v. 8, p. 223708–223722, 2020.

KIM, Y. M. et al. Intelligent micro energy grid in 5G era: Platforms, business cases, testbeds, and next generation applications. **Electronics (Switzerland)**, v. 8, n. 4, 2019.

KODIDALA, V. S. S. J. et al. Big Data analysis of demand side management for Industrial IOT applications. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, 2021.

KOLENC, M. et al. Virtual power plant architecture using OpenADR 2.0b for dynamic charging of automated guided vehicles. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 104, n. May 2017, p. 370–382, 2019.

- KUMAR, N. M. Blockchain: Enabling wide range of services in distributed energy system. **Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 7, n. 4, p. 701–704, 2018.
- LAZAROIU, C.; ROSCIA, M. RESCoin to improve Prosumer Side Management into Smart City. **7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2018**, v. 5, p. 1196–1201, 2018.
- LESZCZYNA, R. Cybersecurity and privacy in standards for smart grids – A comprehensive survey. **Computer Standards and Interfaces**, v. 56, n. September 2017, p. 62–73, 2018.
- LI, Y. et al. Design and management of a distributed hybrid energy system through smart contract and blockchain. **Applied Energy**, v. 248, n. April, p. 390–405, 2019a.
- LI, Y. et al. Research on Coordination Control System of Virtual Power Plant Based on Blockchain. **APAP 2019 - 8th IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection**, p. 1377–1383, 2019b.
- LICEAGA, A. M.; SANCHIS, P.; DEL MAR RUBIO-VARAS, M. New Business Models as Drivers of Distributed Renewable Energy Systems. **Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2018**, 2018.
- LIM, C.; KIM, K. J.; MAGLIO, P. P. Smart cities with big data: Reference models, challenges, and considerations. **Cities**, v. 82, n. April, p. 86–99, 2018.
- LIMA, E. G. et al. Smart and sustainable cities: The main guidelines of city statute for increasing the intelligence of Brazilian cities. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 3, 2020.
- LIU, Y. et al. Blockchain-based identity management systems: A review. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 166, n. May, p. 102731, 2020.
- LIU, Y.; WU, L.; LI, J. Peer-to-peer (P2P) electricity trading in distribution systems of the future. **Electricity Journal**, v. 32, n. 4, p. 2–6, 2019.
- LOMBARDI, F. et al. A blockchain-based infrastructure for reliable and cost-effective IoT-aided smart grids. **IET Conference Publications**, v. 2018, n. CP740, 2018.

- LU, J. et al. Smart contract for distributed energy trading in virtual power plants based on blockchain. **Computational Intelligence**, n. March, p. 1–11, 2020.
- LUO, Z.; HONG, S. H.; DING, Y. M. A data mining-driven incentive-based demand response scheme for a virtual power plant. **Applied Energy**, v. 239, n. January, p. 549–559, 2019.
- MA, R. et al. Study on the Transaction Management Mode of Virtual Power Plants Based on Blockchain Technology. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC**, v. 2020- Septe, 2020.
- MACDOUGALL, P. et al. Applying machine learning techniques for forecasting flexibility of virtual power plants. **2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2016**, 2016.
- MACIEJOWSKA, K.; NITKA, W.; WERON, T. Day-ahead vs. Intraday—Forecasting the price spread to maximize economic benefits. **Energies**, v. 12, n. 4, p. 1–15, 2019.
- MARCHI, B. et al. The disruptive potential of blockchain technologies in the energy sector. **Eceee Summer Study Proceedings**, v. 2019-June, n. June, p. 899–906, 2019.
- MATTIOLI, R ; MOULINOS, K. **Communication Network Interdependencies in Smart Grid**. [s.l: s.n.].
- MELIANI, M. et al. Control system in the smart grid: State of the art and opportunities. **2020 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management, LOGISTIQUA 2020**, p. 0–5, 2020.
- MILLS, D. et al. Distributed Ledger Technology in Payments, Clearing, and Settlement. **Finance and Economics Discussion Series**, v. 2016, n. 095, 2016.
- MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Estatísticas - Frota de Veículos - DENATRAN**. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/estatisticas-frota-de-veiculos-denatran>>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO. **Portal Brasileiro de Dados Abertos**. Disponível em: <<https://dados.gov.br>>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- MIT ENERGY INITIATIVE. **Utility of the future: An MIT Energy Initiative response to an industry in transition**. [s.l: s.n.].

MIT ENERGY INITIATIVE. **The future of the electric grid**. [s.l: s.n.].

MME. **Relatório do Grupo de Trabalho da Modernização do Setor Elétrico**.

Brasília: [s.n.]. Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/documents/36070/525274/Relatório+do+GT+Modernização+do+Setor+Elétrico.pdf/b49d5558-ad36-d268-c2e2-2f0e5331a6b4>>.

MME. **Relatório do Grupo Temático - Abertura de Mercado**. Brasília: [s.n.].

MME. **Relatório do Grupo Temático - Sustentabilidade dos Serviços de Distribuição**. Brasília: [s.n.].

MME; EPE. **Estudos de Planejamento da Expansão da Geração - Avaliação da Geração de Usinas Híbridas Eólicas-FotovoltaicasEPE-DEE-NT-025/2017-r0**. [s.l: s.n.].

MME; EPE. **Estudos de Planejamento da Expansão da Geração - Usinas Híbridas no Contexto do Planejamento EnergéticoEPE-DEE-NT-029/2019-r0**. Rio de Janeiro: [s.n.].

MNATSAKANYAN, A. et al. Blockchain-integrated virtual power plant demonstration. **2020 2nd International Conference on Smart Power and Internet Energy Systems, SPIES 2020**, p. 172–175, 2020.

MOMOH, J. **Smart grid : fundamentals of design and analysis**. Hobokenm, N.J.: Wiley, 2012.

MOREIRA, H. L.; KAGAN, N. Applications of Demand Response on Smart Grids. **Proceedings of the 2020 IEEE 27th International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2020**, p. 9–12, 2020.

MORENO, B.; DÍAZ, G. The impact of virtual power plant technology composition on wholesale electricity prices: A comparative study of some European Union electricity markets. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 99, n. August 2018, p. 100–108, 2019.

MOUGAYAR, W. **The Business Blockchain: Promise, Practice, and Application of the Next Internet Technology**. [s.l.] Wiley, 2016.

MOURIK, R. M. et al. **The impact of the institutional context on the potential contribution of new business models to democratising the energy system**. [s.l.]

Elsevier Inc., 2019.

MOUTIS, P.; HATZIARGYRIOU, N. D. Decision trees aided scheduling for firm power capacity provision by virtual power plants. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 63, p. 730–739, 2014.

MÜHLE, A. et al. A survey on essential components of a self-sovereign identity. **Computer Science Review**, v. 30, p. 80–86, 2018.

NAÇÕES UNIDAS - BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**.

NAKAMOTO, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. **Consulted**, 2008.

NEGREIROS, R.; MONTEIRO DOS SANTOS, S.; ITAPURA DE MIRANDA, Z. Nova escala de planejamento, investimento e governança na macrometrópole paulista. **Revista Iberoamericana de Urbanismo**, n. 12, p. 121–135, 2015.

NEIVA, A. C. DE B. et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: Simulações 2013**. Rio de Janeiro: Cepel, 2017.

NEOENERGIA. **Neoenergia leva medidores inteligentes ao interior de São Paulo**. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/pt-br/sala-de-imprensa/noticias/Paginas/neoenergia-leva-medidores-inteligentes-ao-interior-de-sao-paulo-.aspx>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

NGUYEN-DUC, H.; NGUYEN-HONG, N. A study on the bidding strategy of the Virtual Power Plant in energy and reserve market. **Energy Reports**, v. 6, p. 622–626, 2020.

NINOMIYA, Y.; THOMAS, S. **Digitalization and the Energy Transition : Virtual Power Plants and Blockchain Part 1 of the GJETC Study on Digitalization and the Energy Transition**. [s.l: s.n.].

OH, S.-C. et al. Implementation of blockchain-based energy trading system. **Asia Pacific Journal of Innovation and Entrepreneurship**, v. 11, n. 3, p. 322–334, 2017.

OLIVEIRA, R.; ROSSI, M. **No submundo da internet, prospera o lucrativo negócio de chantagear empresas em meio à pandemia**. Disponível em: <<https://brasil.elpais.com/tecnologia/2020-07-03/no-submundo-da-internet-prospera-o-lucrativo-negocio-de-chantagear-empresas-em-meio-a-pandemia.html>>. Acesso em: 3 abr. 2021.

OLIVEIRA, V. A. DE A. **Moeda eletrônica do Banco Central: uma introdução**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2019.

ONS, O. N. DO S. **Política organizacional: Proteção de dados pessoais e privacidade**. [s.l: s.n.]. Disponível em:
<http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/POL.PRIV_Proteção-de-Dados-Pessoais-e-Privacidade.pdf>.

ONU. 17 Objetivos para Transformar o Nosso Mundo. **Guia sobre Desenvolvimento Sustentável**, 2016.

OTHMAN, M. M.; HEGAZY, Y. G.; ABDELAZIZ, A. Y. Electrical energy management in unbalanced distribution networks using virtual power plant concept. **Electric Power Systems Research**, v. 145, p. 157–165, 2017.

PASETTI, M.; RINALDI, S.; MANERBA, D. A virtual power plant architecture for the demand-side management of smart prosumers. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 8, n. 3, 2018.

PASTERNAK, S.; BÓGUS, L. M. Macrometrópole paulista: estrutura sócio-ocupacional e tipologia dos municípios – Mudanças na primeira década dos anos 2000 | São Paulo macro-metropolis: socio-occupational structure and typology of its municipalities – Changes in the first decade of the . **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 21, n. 2, p. 431, 11 abr. 2019.

PATEL, D. et al. Carbon Credits on Blockchain. **2020 International Conference on Innovative Trends in Information Technology, ICITIIT 2020**, 2020.

PEREIRA, E. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2 Edição ed. São Jose dos Campos: INPE, 2017.

PEREYRA-ZAMORA, F. H. et al. An Infrastructure of Dynamic Tariff Management and Demand Response applied to Smart Grids using Renewable Energy Resources and Energy Storage Systems. **2019 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Latin America 2019**, 2019.

PINNA, A.; RUTTENBERG, W. Distributed ledger technologies in securites post-trading. **Ocassional Paper Series**, n. 172, p. 1–12, 2016.

POLGARI, B. et al. New market roles changing the electricity market model. **International Conference on the European Energy Market, EEM**, 2017.

- PREUKSCHAT, A.; REED, D. **Self-Sovereign Identity - Decentralized digital identity and verifiable credentials**. [s.l.] Manning Publications, 2021.
- PUDJANTO, D.; RAMSAY, C.; STRBAC, G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. **IET Renewable Power Generation**, v. 1, n. 1, p. 10, 2007.
- QUIROGA, G. A. et al. Study of the Distributed Generation impact on distributed networks, focused on quality of power. **Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP**, v. 2016- Decem, p. 855–860, 2016.
- RAAB, A. F. et al. Virtual power plant control concepts with electric vehicles. **2011 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP 2011**, 2011.
- RAMOS, D. S. et al. New commercial arrangements and business models in electricity distribution systems: The case of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, n. September 2019, p. 109468, 2020.
- RASHIDIZADEH-KERMANI, H. et al. A stochastic short-term scheduling of virtual power plants with electric vehicles under competitive markets. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 124, n. June 2020, 2021.
- RATTI, C.; CLAUDEL, M. **The City of Tomorrow – Sensors, Networks, Hackers, and the Future of Urban Life**. [s.l.] Yale University Press, 2016.
- RAUCHS, M. et al. Distributed Ledger Technology Systems: A Conceptual Framework. **SSRN Electronic Journal**, n. August, 2018.
- REKIK, M. et al. Geographic routing protocol for the deployment of virtual power plant within the smart grid. **Sustainable Cities and Society**, v. 25, p. 39–48, 2016.
- REUTERS EVENTS. **Con Edison to pilot \$15 million virtual power plant project**. Disponível em: <<https://www.reutersevents.com/renewables/energy-storage/con-edison-pilot-15-million-virtual-power-plant-project>>. Acesso em: 15 mar. 2020.
- RIVERA, R.; ESPOSITO, A. S.; TEIXEIRA, I. Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. **Revista do BNDES** 40, p. 43–84, 2013.
- ROLIM, L. A. G. et al. Marketplace descentralizado para a Geração Distribuída –

estrutura, governança e contribuições para o debate regulatório. **Revista Brasileira de Energia**, v. 26, n. 2, p. 18–28, 2020.

SABOORI, H.; MOHAMMADI, M.; TAGHE, R. Virtual power plant (VPP), definition, concept, components and types. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC**, p. 1–4, 2011a.

SABOORI, H.; MOHAMMADI, M.; TAGHE, R. Virtual power plant (VPP), definition, concept, components and types. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC**, 2011b.

SADEGHIAN, O. et al. Risk-constrained stochastic optimal allocation of energy storage system in virtual power plants. **Journal of Energy Storage**, v. 31, n. August, p. 101732, 2020.

SCHLUND, J.; GERMAN, R. A distributed ledger based platform for community-driven flexibility provision. **Energy Informatics**, v. 2, n. 1, 2019.

SEADE. **GEOSEADE**. Disponível em: <<https://portalgeo.seade.gov.br>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

SERRANO, W. Digital Systems in Smart City and Infrastructure: Digital as a Service. **Smart Cities**, v. 1, n. 1, p. 134–153, 2018.

SHABANZADEH, M.; SHEIKH-EL-ESLAMI, M. K.; HAGHIFAM, M. R. Risk-based medium-term trading strategy for a virtual power plant with first-order stochastic dominance constraints. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 11, n. 2, p. 520–529, 2017.

SHAFIE-KHAH, M. **Blockchain-Based Smart Grids**. [s.l.] Academic Press, 2020.

SHAO, W. et al. A grid connection mechanism of large-scale distributed energy resources based on blockchain. **Chinese Control Conference, CCC**, v. 2019- July, p. 7500–7505, 2019.

SHIN, D. H. A living lab as socio-technical ecosystem: Evaluating the Korean living lab of internet of things. **Government Information Quarterly**, v. 36, n. 2, p. 264–275, 2019.

SINGH, S.; YASSINE, A. Big data mining of energy time series for behavioral analytics and energy consumption forecasting. **Energies**, v. 11, n. 2, 2018.

SIQUEIRA, A. M. Q.; BERMAN, C. Fundamentos do planejamento energético centralizado e do descentralizado. **Revista Brasileira de Energia**, v. 26, n. 1, p. 33–44, 2020.

SLEMAN SALIBA, MARC ANTOINE, J. O. Virtual power plants - Distributed generation is not a threat , it ' s an opportunity Executive summary. **White Paper**, n. ABB, p. 8, 2017.

SOARES, R. S. **A difusão da geração distribuída fotovoltaica na macrometrópole paulista**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2020.

SONG, Y. J.; LEE, J. K. A blockchain and internet of things based architecture design for energy transaction. **Journal of System and Management Sciences**, v. 10, n. 2, p. 122–140, 2020.

STALLINGS, W. **Cryptography and Network Security: Principles and Practice**. 4th. ed. USA: Prentice Hall Press, 2005.

STEINIGER, H. **Virtual Power Plants: Bringing the Flexibility of Decentralized Loads and Generation to Power Markets**. [s.l.] Elsevier Inc., 2017.

STEWART, R. A. et al. Integrated intelligent water-energy metering systems and informatics: Visioning a digital multi-utility service provider. **Environmental Modelling and Software**, v. 105, p. 94–117, 2018.

SUN, M.; ZHANG, J. Research on the application of block chain big data platform in the construction of new smart city for low carbon emission and green environment. **Computer Communications**, v. 149, n. August 2019, p. 332–342, 2020.

SWAN, M. **Blockchain: Blueprint for a new economy**. [s.l: s.n.].

SZABO, N. **Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets**.

TAPSCOTT, D.; TAPSCOTT, A. **Blockchain Revolution**. [s.l: s.n.].

TEIXEIRA, P. A. **Enel SP vai instalar 300 mil medidores inteligentes**. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53162022/enel-sp-vai-instalar-300-mil-medidores-inteligentes-esse-ano>>. Acesso em: 17 mar. 2021.

TELECO. **Teleco - Inteligência em Telecomunicações**. Disponível em: <<https://www.teleco.com.br>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

TENG, S. Y. et al. Recent advances on industrial data-driven energy savings: Digital

twins and infrastructures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, n. August 2020, 2021.

TINOCO, C. M. M. et al. **Análise de viabilidade econômica da geração de energia elétrica por biomassa provinda de propriedades rurais**. XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...**Joinville: ABEPRO, 2017

TOLMASQUIM, M. T. **Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro**. Rio de Janeiro: Synergia, 2011.

TOWNSEND, R. M. Distributed Ledgers. **Distributed Ledgers**, n. April, 2020.

UGARTE, J. L. R. Distributed ledger technology (DLT): introduction. **Banco de España**, n. Economic Bulletin, p. 11, out. 2018.

UNFCCC; IRENA; UN ENVIRONMENT. Accelerating SDG 7 Achievement, Policy Brief 15: Interlinkages between energy and climate change. p. 13, 2018.

VALENTA, M.; SANDNER, P. Comparison of Ethereum, Hyperledger Fabric and Corda. **Frankfurt School Blockchain Center**, 2017.

VAN SUMMEREN, L. F. M. et al. Community energy meets smart grids: Reviewing goals, structure, and roles in Virtual Power Plants in Ireland, Belgium and the Netherlands. **Energy Research and Social Science**, v. 63, n. May 2019, p. 101415, 2020.

VARGAS, R. V. Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process - AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. **PMI Global Congress 2010 - North America**, p. 1–22, 2010.

VORICK, D.; CHAMPINE, L. **Sia: Simple Decentralized Storage**. Disponível em: <<https://sia.tech/sia.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2021.

WAN, L.; ZHANG, Z.; WANG, J. Demonstrability of Narrowband Internet of Things technology in advanced metering infrastructure. **Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2019, n. 1, 2019.

WANG, D.; LIU, Z. Virtual power plant trading method based on smart contract. v. 4, n. 11, p. 128–132, 2018.

WANG, H.; RIAZ, S.; MANCARELLA, P. Integrated techno-economic modeling, flexibility analysis, and business case assessment of an urban virtual power plant with

multi-market co-optimization. **Applied Energy**, v. 259, n. September 2019, p. 114142, 2020.

WANG, N. et al. When energy trading meets blockchain in electrical power system: The state of the art. **arXiv**, p. 1–21, 2019a.

WANG, S. et al. Blockchain-Enabled Smart Contracts: Architecture, Applications, and Future Trends. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems**, v. PP, p. 1–12, 2019b.

WANG, X. et al. A Review on Virtual Power Plant Concept, Application and Challenges. **2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, ISGT 2019**, p. 4328–4333, 2019c.

WANG, Z. et al. AEBIS : AI-Enabled Blockchain-Based Electric Vehicle Integration System for Power Management in Smart Grid Platform. p. 226409–226421, 2020.

WEN, Z. et al. Virtual power plant trading strategy based on block-chain to satisfy clean energy partiality. **2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020**, p. 3004–3010, 2020.

WILLIAMS, S. **Data Action**. [s.l.] The MIT Press, 2020.

WU, J.; TRAN, N. K. Application of blockchain technology in sustainable energy systems: An overview. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 9, p. 1–22, 2018.

WU, Y. et al. Digitalization and decentralization driving transactive energy Internet: Key technologies and infrastructures. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 126, n. PA, p. 106593, 2021.

WUST, K.; GERVAIS, A. Do you need a blockchain? **Proceedings - 2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology, CVCBT 2018**, n. i, p. 45–54, 2018.

XIAO, C. et al. Multi-period data driven control strategy for real-time management of energy storages in virtual power plants integrated with power grid. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 118, n. October 2019, p. 105747, 2020.

YAHAYA, A. S. et al. Blockchain based sustainable local energy trading considering home energy management and demurrage mechanism. **Sustainability (Switzerland)**, v.

12, n. 8, 2020.

YANG, J. et al. The Internal Resource Aggregation Strategy of Virtual Power Plants Based on Different Basic Configurations. **2018 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2018 - Proceedings**, p. 666–672, 2019.

YOKOYAMA, R.; NARA, K. New Concept of Energy Delivery Network for Practical Use of Distributed Generations and Customer Services - Committee Report of Iee Japan. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 36, n. 20, p. 55–60, 2003.

YOU, S. et al. A Market-Based Virtual Power Plant. p. 460–465, 2009.

YU, S. et al. **Uncertainties of virtual power plant: Problems and countermeasures** *Applied Energy*, 2019.

ZAJC, M.; KOLENC, M.; SULJANOVIĆ, N. Virtual power plant communication system architecture. In: **Smart Power Distribution Systems**. [s.l: s.n.].

ZAMBON, K. L. et al. Análise de decisão multicritério na localização de usinas termoeletricas utilizando SIG. **Pesquisa Operacional**, v. 25, n. 2, p. 183–199, 2005.

ZHENG, Z. et al. An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. **Proceedings - 2017 IEEE 6th International Congress on Big Data, BigData Congress 2017**, p. 557–564, 2017.

ZHOU, K.; YANG, S.; SHAO, Z. Energy Internet: The business perspective. **Applied Energy**, v. 178, p. 212–222, 2016.

APÊNDICE A – PROTOCOLO DE ESCOLHA DE CIDADES UTILIZANDO MÉTODO MULTICRITÉRIO

Protocolo Multicritério para Escolha de RED para VPP													
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Área Analisada MMP </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Tecnologia Avaliada Fotovoltaica </div>													
Cálculo dos Critérios a Serem Avaliados													
	TIC	Infra	Acesso Internet	Potencial Fonte	Vprioridade								
TIC	1,0	6,0	9,0	1,0	0,469825405								
Infra	0,2	1,0	1,0	0,2	0,074329453								
Acesso Internet	0,1	1,0	1,0	0,2	0,067750506								
Potencial Fonte	1,0	5,0	5,0	1,0	0,388094636								
CI		0,018	CR		0,020								
Consistente													
Avaliação das Cidades Por Critério													
TIC	Tapirai	Elias Fausto	Jaguaríuna	Atibaia	Vprioridade								
Tapirai	1,0	0,5	0,2	0,2	0,071767001								
Elias Fausto	2,0	1,0	0,2	0,2	0,101867336								
Jaguaríuna	5,0	5,0	1,0	1,0	0,413182832								
Atibaia	5,0	5,0	1,0	1,0	0,413182832								
CI		0,029	CR		0,032								
Consistente													
Infra	Tapirai	Elias Fausto	Jaguaríuna	Atibaia	Vprioridade								
Tapirai	1,0	0,3	0,3	0,3	0,076923077								
Elias Fausto	4,0	1,0	1,0	1,0	0,307692308								
Jaguaríuna	4,0	1,0	1,0	1,0	0,307692308								
Atibaia	4,0	1,0	1,0	1,0	0,307692308								
CI		0,000	CR		0,000								
Consistente													
Acesso Internet	Tapirai	Elias Fausto	Jaguaríuna	Atibaia	Vprioridade								
Tapirai	1,0	1,0	0,1	0,1	0,061951754								
Elias Fausto	1,0	1,0	0,1	0,1	0,061951754								
Jaguaríuna	7,0	7,0	1,0	1,0	0,438048246								
Atibaia	7,0	7,0	1,0	1,0	0,438048246								
CI		-0,007	CR		-0,007								
Consistente													
Potencial Fonte	Tapirai	Elias Fausto	Jaguaríuna	Atibaia	Vprioridade								
Tapirai	1,0	0,3	0,2	0,5	0,086360399								
Elias Fausto	4,0	1,0	1,0	1,0	0,308404558								
Jaguaríuna	5,0	1,0	1,0	2,0	0,384793447								
Atibaia	2,0	1,0	0,5	1,0	0,220441595								
CI		0,023	CR		0,026								
Consistente													
Prioridade na Escolha das Cidades													
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="background-color: #f4a460;">Tapirai</th> <th style="background-color: #f4a460;">Elias Fausto</th> <th style="background-color: #f4a460;">Jaguaríuna</th> <th style="background-color: #f4a460;">Atibaia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">8%</td> <td style="text-align: center;">19%</td> <td style="text-align: center;">40%</td> <td style="text-align: center;">33%</td> </tr> </tbody> </table>						Tapirai	Elias Fausto	Jaguaríuna	Atibaia	8%	19%	40%	33%
Tapirai	Elias Fausto	Jaguaríuna	Atibaia										
8%	19%	40%	33%										

APÊNDICE B – DIAGRAMA DE ESTRUTURAÇÃO DOS *SMART CONTRACTS* UTILIZADOS

Diagrama *Main Contract*

Diagrama *Oper Contract*

Diagrama *Pay Contract*

Diagrama *REC Contract*