



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE
PROGRAMAÇÃO QUADRÁTICA PARA
OTIMIZAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
EM MODELO PEER TO PEER (P2P)**

Por,
Ricardo Gontijo Pinho

Brasília, novembro de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Produção

PROJETO DE GRADUAÇÃO

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO QUADRÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM MODELO PEER TO PEER (P2P)

Por,
Ricardo Gontijo Pinho

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de
Produção

Banca Examinadora

Prof. Ph.D Reinaldo Crispiniano Garcia, UnB/EPR
(Orientador)

Prof. Dr. Annibal Affonso Neto

Brasília, 01 de novembro de 2021

Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer aos meus professores e mestres que fizeram essa jornada ser possível, principalmente, ao professor Reinaldo Garcia pela orientação, permitindo a realização deste projeto. Além do corpo técnico, gostaria de agradecer à minha família e aos meus amigos pelo suporte durante todo esse período, pois desempenharam papel crucial para a conclusão desta etapa.

Ricardo Gontijo Pinho

RESUMO

A evolução do setor elétrico passa por diversos fatores, tais como políticos, econômicos, tecnológicos e sociais. No Brasil, no período de 1980 até hoje, o mercado se transformou consideravelmente, com novas regulamentações e com a ascensão do mercado livre.

Este estudo busca analisar o comportamento de um modelo, ainda que em fase preliminar, que tem grande potencial para promover diversas alterações no arranjo atual do mercado elétrico, não só brasileiro como global. O modelo é denominado *Peer to Peer*, sua implementação está diretamente associada ao grande desenvolvimento tecnológico nos campos de energia renovável e de validação de transações em rede.

Além de deliberar sobre as possibilidades e benefícios do modelo P2P, o estudo tem como objetivo, utilizando como base o estudo de caso IEEE 14-bus, encontrar os valores ótimos das relações de cada agente. Objetiva assim determinar o valor de produção e consumo associado a cada variável, encontrando assim o valor que minimize o custo do modelo.

Por fim, a execução do modelo contou com alterações nos parâmetros. O mesmo foi resolvido utilizando programação quadrática, com a função *quadprog* do MATLAB, para obter os objetivos mencionados, tendo em vista a natureza quadrática da função proposta no artigo base. Por último, os resultados obtidos sugerem que é possível maximizar o Bem-estar social das comunidades, demonstrando a sua possível viabilidade no atual mercado do setor elétrico.

Palavras-chave: Mercado Livre de Energia Elétrica; Contratos Bilaterais; Programação Quadrática; Otimização; Modelo de energia P2P; *Peer to Peer*.

Abstract

The evolution of the electricity sector is related to different factors, such as political, economic, technological and social ones. In Brazil, from 1980 until today, the market has changed considerably, with new regulations and the rise of the free market.

This study intends to analyze the behavior of a model which has great potential to promote several changes in the current arrangement of the electricity market, not only in the Brazilian market but also in the global one. The model is called Peer to Peer, its implementation is directly associated with the great technological development in the fields of renewable energy and validation of network transactions.

Besides of deliberating on the possibilities and the benefits of the P2P model, the study aims, using the IEEE 14-bus case study as a basis, to find the optimal values of the relationships of each agent. The study intends also to determine the production and consumption value associated with each variable, thus finding the value that minimizes the cost of the model.

Finally, to run the model the parameters were changed. The model was solved using quadratic programming, with MATLAB's quadprog function, to obtain the mentioned goals, considering the quadratic nature of the implemented function. Finally, the obtained results show to be possible to maximize the total social welfare of the included communities suggesting its viability in the current energy sector market.

Keywords: Free Market of Electric Energy; Bilateral Contracts; Quadratic Programming; P2P Power Model; Optimization; Peer to Peer.

Sumário

1	Introdução	12
1.1.1	Objetivos.....	14
1.1.2	Objetivo Geral	14
1.1.3	Objetivos específicos	14
1.2	Estrutura do Trabalho	14
2	Metodologia.....	15
2.1	Classificação da pesquisa	15
2.2	Etapas do trabalho.....	17
3	Referencial Teórico	18
3.1	Funcionamento do sistema do setor de energia no Brasil.....	18
3.1.1	Atores.....	20
3.1.2	Agentes Institucionais.....	21
3.2	O Mercado Livre de Energia	23
3.2.1	O Mercado <i>Spot</i>	25
3.2.2	Contratos Bilaterais	26
3.3	Pesquisa Operacional.....	27
3.4	Programação Quadrática (QP).....	30
4	Modelos <i>Peer to Peer</i> (P2P)	32
4.1	Considerações iniciais	32
4.2	Modelos de mercado P2P	32
4.2.1	P2P Completo	33
4.2.2	Modelo baseado em comunidade	35
4.2.3	Modelo P2P Híbrido	37
4.3	Comparação	39
5	Implementação do modelo.....	40
5.1	Introdução	40
5.2	Modelagem do problema	42
5.3	Resultados e discussão.....	46
6	Conclusões e considerações finais.....	49
	Referências Bibliográficas.....	51
	APÊNDICES	55
	Apêndice 1 – Tabelas resumidas	55
	Apêndice 2 – Código utilizado para a programação do modelo inalterado.....	59
	Apêndice 3 – Código utilizado para a programação do modelo alterado.....	60

Lista de Figuras

Figura 1 - Passos a serem seguidos para uma boa pesquisa científica	17
Figura 2 – Principais organizações do setor elétrico brasileiro (1930)	19
Figura 3 - Principais organizações do setor elétrico brasileiro.....	19
Figura 4 - Atores genéricos do sistema energético.....	20
Figura 5 - Estrutura dos reguladores de mercado do setor elétrico brasileiro	22
Figura 6 – Número de agentes por classe.....	24
Figura 7 - Volatilidade do preço da energia no mercado spot alemão na modalidade <i>intraday</i>	25
Figura 8 – Oscilação do preço no mercado spot brasileiro e sua projeção para o ano seguinte.....	26
Figura 9 - Estrutura do modelo de mercado de P2P Completo	33
Figura 10 - Exemplo ilustrado de um modelo de mercado P2P completo.....	35
Figura 11 - Estrutura do modelo de mercado baseado em comunidade	35
Figura 12 - Estrutura do modelo de mercado P2P Híbrido	37
Figura 13 – Sistema de rede de 14 barramentos do IEEE	41
Figura 14 - Exemplo de parte da matriz H modelada no Google Planilhas	45

Lista de Quadros

Quadro 1 - Principais agentes institucionais do sistema elétrico	21
Quadro 2 – Agentes Reguladores do Setor de Eletricidade no Brasil	22
Quadro 3 – Modelos de organização do setor elétrico	23
Quadro 4 - Definição de Pesquisa Operacional.....	28
Quadro 5 – Etapas de abordagem em Pesquisa Operacional	28
Quadro 6 – Tipos de programação	30
Quadro 7 - Descrição de matrizes e vetores	31
Quadro 8 - Potenciais forças, oportunidades, fraquezas e ameaças dos modelos P2P.....	32
Quadro 9 – Resumo dos três modelos de mercado P2P	39

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação de cada agente.....	41
Tabela 2 – Representação simplificada da relação entre cada agente e seus limites (Matriz A e vetor b)	42
Tabela 3 - Relação entre os agentes e cada variável	42
Tabela 4- Representação simplificada da Matriz Aeq e do vetor beq.....	43
Tabela 5 - Valores de a_n e b_n	43
Tabela 6 - Representação simplificada da Matriz H.....	44
Tabela 7 - Tamanho das matrizes de cada elemento	44
Tabela 8 - Representação simplificada do vetor f	45
Tabela 9 – Valores do vetor b	46
Tabela 10 – Resultado do custo mínimo	47
Tabela 11 – Comparativo de P_{total}	47
Tabela 12 – Comparativo variáveis agente 1	48
Tabela 13 - Representação simplificada da relação entre cada agente e seus limites (Matriz A, vetor b e b alterado).....	55
Tabela 14 – Resultado para variáveis no modelo alterado	56
Tabela 15 – Resultado para variáveis no modelo inalterado	57

Lista de Equações

Equação 1 - Equação quadrática de custos	30
Equação 2 - Equação da função quadprog	30
Equação 3 - Restrições de desigualdade	30
Equação 4 - Restrições de igualdade	31
Equação 5 - Limites inferiores e superiores das variáveis	31
Equação 6 - Função objetivo genérica de modelos P2P Completo	34
Equação 7 - Restrições dos limites superiores de produção e consumo por agente	34
Equação 8 - Relação de paridade entre cada agente	34
Equação 9 - Cargas dos produtores positivas	34
Equação 10 - Cargas dos consumidores negativas	34
Equação 11 - Função objetivo de modelos P2P de Comunidades.....	36
Equação 12 - Restrições de modelos P2P de Comunidades	36
Equação 13 - Soma dos valores negociados de cada agente da comunidade	36
Equação 14 - Importação de energia	36
Equação 15 - Exportação de energia	36
Equação 16 - Restrições dos limites superiores de produção e consumo por agente	36
Equação 17- Função objetivo de modelos P2P Híbrido.....	38
Equação 18 - Resultante da exportação e importação dos agentes em P2P Completo	38
Equação 19 - Conjunto dos produtores pertencentes a P2P Completo	38
Equação 20 - Conjunto dos produtores pertencentes a P2P de Comunidades	38
Equação 21- Equação do bem estar social	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Variáveis

P_{nm}	Produção ou consumo do agente n relacionado ao agente m , em MWh .
p_n	Produção ou consumo do agente n , em MWh , no modelo de comunidade
q_n	Produção ou consumo negociado dentro de uma comunidade, em MWh .
α_n	Importação de um agente da comunidade, em MWh .
β_n	Exportação de um agente da comunidade, em MWh .

Constantes

Ω	Conjunto dos agentes do sistema.
ω_n	Conjunto que contém os parceiros de comércio de um certo agente n .
Ω_p	Conjunto de produtores do sistema.
Ω_c	Conjunto de consumidores do sistema.
Ω^u	Conjunto de agentes nos níveis inferiores.
Ω^b	Conjunto de agentes nos níveis superiores.
γ_{imp}	Coefficiente de ponderação de custo de importação de uma comunidade.
γ_{exp}	Coefficiente de ponderação de custo de exportação de uma comunidade.
γ_{com}	Coefficiente de ponderação de custo de transação por comunidade.
a_n	Parâmetro da função custo que multiplica parte quadrática, $\$/MW^2$.
b_n	Parâmetro da função custo que multiplica parte linear, $\$/MW$.
c_n	Parâmetro constante da função custo.

Funções

$f(x)$	Função a ser minimizada, no caso função objetivo.
$c_1(x)$	Restrições de igualdade e desigualdade.
C_n	Função do custo de produção.

Números

n Número de agentes/comunidades em um sistema.

m Número de agentes relacionados em uma transação.

1 Introdução

A modernização do arcabouço regulatório conta com pressões públicas e privadas que visam o progresso do atual sistema. O desenvolvimento de novas tecnologias desafia o *status quo* e possibilita a adoção de novos arranjos. No mercado global a quebra da estrutura centralizada no Estado é um fenômeno comum, sendo um movimento no mercado brasileiro. A década de 90 representou um período importante para as reformulações do setor elétrico brasileiro, fortalecendo o caminho para a implementação do mercado livre de energia. (RIZKALLA, 2018).

Além de demandas públicas e privadas pressionando o âmbito regulatório, o avanço tecnológico, fator de extrema importância, impulsiona uma tendência descentralizadora no arranjo socioeconômico, tal acontecimento pode ser notado com a ascensão da *blockchain* em diversas esferas, sendo uma delas a energética.

Um exemplo de novo arranjo é o modelo *peer to peer* (P2P), motivado pelo crescimento da energia renovável (MACHADO et al. 2020) e pela ascensão da conexão de recursos de energia distribuída (DERs) (ZHANG et al. 2018), esse permite os consumidores de energia se tornarem prosumidores, podendo tanto consumir quanto gerar energia.

O comércio de eletricidade P2P, onde os fornecedores podem competir com o operador de rede de distribuição, depende de contratos de transações diretas multilaterais entre os participantes. Diferentemente do tradicional mercado de eletricidade centralizado, as plataformas P2P não precisam armazenar energia renovável e prever a demanda de carga de todos os participantes, o que reduz riscos de segurança. (ZHOU, WU, LONG , 2018). Além disso, a plataforma P2P pode especificar regras de transação, supervisionar atividades de compartilhamento de recursos de energia e fornecer mecanismos de medição e cobrança associados. No entanto é um desafio estabelecer mecanismos de comércio justo para um mercado de eletricidade P2P. (ZHANG et al. 2019).

O fenômeno de existência de prosumidores pode ser observado especialmente com a energia solar fotovoltaica, que transformou os consumidores regulares em contribuintes ativos para o fornecimento local de eletricidade. (LUTH et al. 2018).

No mercado livre geradores em grande escala, fornecedores e consumidores industriais podem negociar energia em mercados atacadistas organizados pelo operador da rede de transporte. Porém, é impraticável para prosumidores de pequena escala participarem do

mercado de atacado, dado a complexidade e os custos de conexão ao operador da rede. (MORSTYN et al. 2019).

A atuação de prossumidores de pequena escala é viável nos mercados de varejos, sendo medidos individualmente por grandes fornecedores. Entretanto, se devidamente coordenado para moldar a demanda geral, recursos de energia distribuídos poderiam oferecer um valor significativo para sistemas de energia, aliviando a necessidade de investimentos em geração *upstream* e infraestrutura de transmissão, aumentando a eficiência da rede e a segurança energética. (MORSTYN et al. 2019).

Apesar dos sistemas de potência estarem evoluindo para uma gestão mais descentralizada, o mercado de eletricidade ainda é muito baseado em uma organização hierárquica e do topo para a base, tanto em alocação de recursos quanto em precificação o que faz com que os prossumidores (aqueles agentes que podem tanto consumir quanto produzir recursos) se comportem como receptores passivos, Hu et al (2018). Elaborar uma reorganização do mercado de eletricidade em função da gestão descentralizada e colaborativa possibilitaria uma maior influência e participação dos prossumidores. Com esse empoderamento, seria possível que as preferências desses agentes fossem implementadas, o que fortaleceria, por exemplo, energia local, fontes renováveis e baixas emissões de CO₂. Conseqüentemente, essa organização alternativa do mercado, que é, em geral, nomeada como mercados de eletricidade com o cliente no centro, deixaria de ser algo que, há 20 anos era apenas teórica e motivo de discussões acadêmicas, como disse Wu et al (1995), sobre vantagens e desvantagens dos modelos centralizados ou descentralizados.

Sendo assim, a modernização proposta pelo arranjo P2P ainda está em fase preliminar, necessitando de maior entendimento e validação, muito se devendo ao desenvolvimento tecnológico que serve como base para novas implementações. Os avanços propostos em estudos envolvendo o modelo P2P preparam uma próxima fase de novas reformas.

Nesse contexto, o presente estudo visa deliberar sobre o setor elétrico e sua evolução, observando desde o funcionamento do mercado atual, como também a ascensão de modelos mais vanguardistas, como o P2P. Para tal, será feita uma análise de um estudo de caso, considerando um modelo P2P como base, com o intuito de contextualizar e ilustrar quantitativamente as relações dos agentes, produtores e consumidores, otimizando essa relação.

1.1.1 Objetivos

O projeto tem como objetivo promover o debate sobre adoções de novos arranjos no setor elétrico explorando de forma quantitativa um modelo *peer to peer* (P2P).

1.1.2 Objetivo Geral

O projeto tem como objetivo geral implementar e analisar o modelo de produção e consumo que minimize os custos para o caso P2P.

1.1.3 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- Implementar um modelo de programação quadrática para o caso P2P.
- Determinar os valores ótimos de produção e consumo do modelo de distribuição analisado.
- Determinar o custo mínimo encontrado a partir dos valores de produção e consumo.

1.2 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado com seis capítulos. Iniciando, como primeiro capítulo, tem-se a introdução, que visa contextualizar o tema, a justificativas e objetivos (geral e específicos) do trabalho, bem como a sua estrutura. No segundo capítulo está presente a metodologia aplicada neste trabalho, com a descrição de tipos e classificações de pesquisas, bem como as etapas que foram seguidas para desenvolver a pesquisa. No terceiro capítulo apresenta-se o referencial teórico, com uma elucidação do tema, abordando de forma breve o sistema elétrico brasileiro, os mercados SPOT e contratos bilaterais. O quarto capítulo descreve o problema analisado, bem como os modelos de negociação P2P de energia. O quinto capítulo apresenta a aplicação dos modelos matemáticos e algoritmos ao problema, bem como a discussão e análise dos resultados encontrados. Por fim, o sexto capítulo traz a conclusão do projeto além de sugestão de futuros trabalhos.

2 Metodologia

Neste capítulo de metodologia será realizado a classificação da pesquisa, bem como a análise das etapas de desenvolvimento e execução seguidas para a construção da mesma.

2.1 Classificação da pesquisa

A definição de pesquisa científica: indica pesquisa científica como um processo racional e sistemático para a busca de respostas aos problemas que são propostos (GIL, 2011). A pesquisa se desenvolve por um processo constituído de várias fases, desde a formulação do problema até a apresentação e discussão dos resultados. As pesquisas científicas podem ser classificadas quanto aos seus objetivos ou quanto aos procedimentos técnicos nelas empregados.

Tratando dos objetivos, pode ser classificada como exploratória, descritiva ou explicativa: Exploratória proporciona esclarecimento em relação ao problema e traz um planejamento geralmente mais flexível. A segunda, descritiva, busca relacionar variáveis, em sua maioria quantitativas. Por fim, a explicativa possui o objetivo de identificar fatores que ajudam ou determinam a ocorrência de algo concreto.

Com relação aos procedimentos técnicos utilizados, existem sete tipos de pesquisa: bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de campo, estudo de caso e pesquisa-ação (GIL, 2011; THIOLENT, 1988). Ademais, além das classificações de Gil, também é possível classificar de acordo com a forma de abordagem do problema - quantitativa e qualitativa - e quanto à natureza básica e aplicada - segundo SILVA (2005).

A pesquisa quantitativa requer a utilização de técnicas matemáticas e estatísticas e assume que tudo pode ser quantificável, enquanto a pesquisa qualitativa é descritiva e os dados são analisados intuitivamente. Quanto à natureza, a pesquisa básica tem como objetivo criar conhecimento sem necessariamente aplicação prática, enquanto a aplicada cria o conhecimento e há aplicação prática para a solução do problema proposto (SILVA, 2005).

Assim sendo, o projeto pode ser classificado como pesquisa de natureza aplicada, abordagem quantitativa, objetivo descritivo e procedimento técnico modelagem matemática. Isto ocorre por que este trabalho se apoia em técnicas matemáticas para o mapeamento do funcionamento de um sistema produtivo (MIGUEL et al., 2010) e no software de programação MATLAB para desenvolvimento do modelo proposto.

Gil (2011) define como metodologia como um procedimento racional e sistemático cujo objetivo é construir uma proposição de respostas a questões inicialmente enumeradas. Para Gerhardt e Silveira (2009), o que importa é a validade do processo percorrido para se chegar a um fim proposto, porém, não deve ser confundido com as técnicas e métodos utilizados.

No geral, pode-se classificar as pesquisas por meio da abordagem predominante, natureza, objetivo e procedimentos técnicos utilizados (SILVEIRA e CÓRDOVA, 2009). A primeira, serve para descrever a pesquisa científica como qualitativa (onde o foco principal não é a representatividade numérica) ou quantitativa (onde o foco é a validação de premissa e avaliação dos resultados por meio de uma linguagem matemática).

Quanto à natureza, a pesquisa pode ser tipificada como básica ou aplicada. A primeira tem como premissa a geração de novos conhecimentos sem o compromisso de aplicação prevista. Já o segundo, tem como foco a resolução de problemas específicos a partir da aplicação prática em situações reais ou simuladas (SILVA E MENEZES, 2005).

No que se refere aos objetivos, as pesquisas podem ser exploratórias, descritivas ou explicativas (GIL, 2007). As exploratórias normalmente são aquelas que se relacionam com temas pouco conhecidos de forma a ampliar a familiaridade com o assunto, utilizam-se ferramentas como revisão bibliográfica sistemática e entrevistas com especialistas (GIL, 2011). Já as descritivas delimitam-se a descrever fenômenos por meio de coleta de dados que podem ser levantados por meio de questionários e observação sistemática (GIL, 2011). Por fim, as explicativas buscam trazer à luz da discussão a relação de causa e efeito entre fatores que contribuem para a ocorrência de fenômenos (GIL, 2011).

Em relação ao procedimento, segundo Filippini (1997), as técnicas de pesquisa mais comuns na temática da Engenharia de Produção são classificadas da seguinte forma:

- Modelagem matemática;
- Simulação;
- Levantamento (*survey*);
- Estudo de campo;
- Estudo de caso;
- Experimento; e
- Teórico-conceitual.

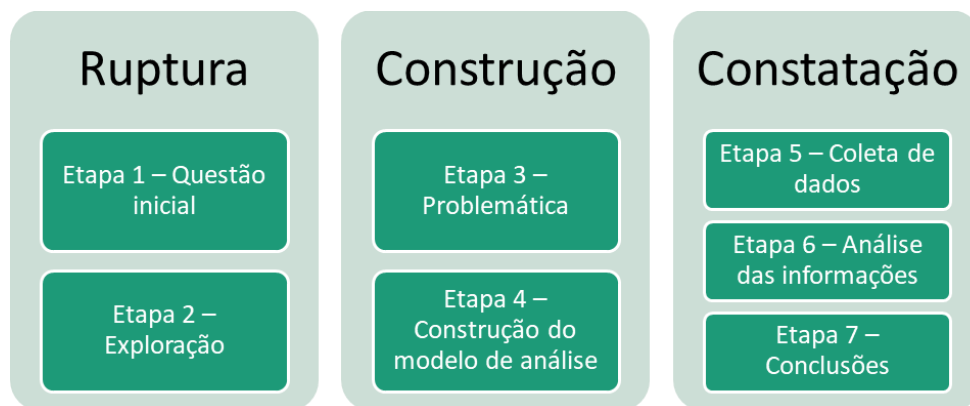
Sendo assim, diante do exposto, baseado nas classificações supracitadas, este projeto pode ser classificado como pesquisa de natureza aplicada, abordagem quantitativa, objetivo descritivo e procedimento técnico modelagem matemática, dado que se apoia em técnicas

matemáticas para o mapeamento do funcionamento de um sistema produtivo (MIGUEL et al., 2010) e no software de programação MATLAB para desenvolvimento do modelo proposto.

2.2 Etapas do trabalho

Necessariamente, as etapas apresentadas a seguir foram propostas por Gerhardt e Silveira (2009) e utilizadas na execução do presente trabalho. Elas são sete etapas elaboradas para a boa construção de uma pesquisa científica, sendo que as etapas II e III foram condensadas em um só (Figura 1).

Figura 1 - Passos a serem seguidos para uma boa pesquisa científica



Fonte: Gerhardt e Silveira (2009) - Adaptado pelo autor

Especificamente sobre este trabalho, foram seguidas as seguintes etapas:

- I. Definição do problema alvo do estudo
- II. Revisão Bibliográfica acerca do mercado de energia, seus veículos contratuais, soluções matemáticas de negociação e gestão de riscos;
- III. Construção do algoritmo de otimização de negociações de contratos de energia
- IV. Simulação do algoritmo em MATLAB para obtenção de modelos ótimos para o problema definido no estudo e coleta dos dados resultantes;
- V. Validação da consistência dos dados obtidos nas simulações anteriores;
- VI. Apresentar os próximos passos e proposições de trabalhos futuros.

3 Referencial Teórico

Neste capítulo, serão apresentados os atores e agentes do setor elétrico brasileiro, SEB, considerando suas relações com o funcionamento do sistema, e os métodos implementados para modelar o problema.

3.1 Funcionamento do sistema do setor de energia no Brasil

Uma visão global permite visualizar o mercado de energia elétrica, na maioria dos países, com uma impressão de ser uma indústria com um monopólio “natural” (CHAO; HUNTINGTON, 1998). Para isso, esse cenário requer uma grande confiança em um monopólio estatal ou privado, sujeito a regulação governamental para ter uma produção eficiente. Entretanto, com o passar das últimas décadas, o sistema do mercado de energia foi forçado a se transformar quanto a sua operação em vários países. O principal argumento da desregulamentação desse sistema de mercado é a ineficiência da regulação (STOFT, 2002).

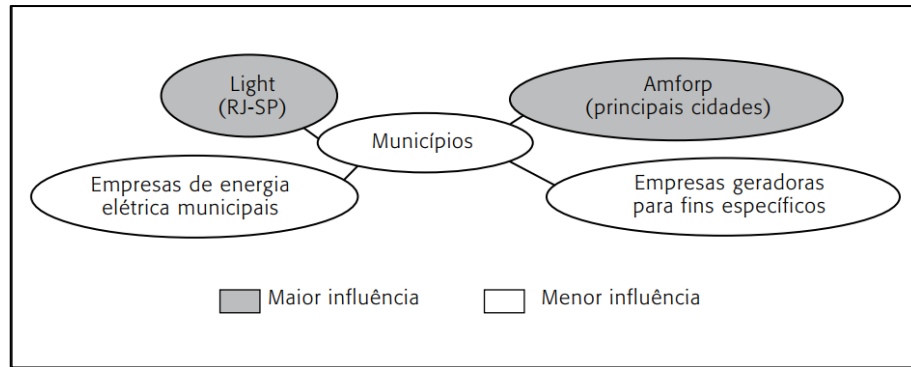
A indústria de energia surge no Brasil em meados do século XIX, mais especificamente em 1880, fomentada pela entrada de capital estrangeiro no país (GOMES E VIEIRA, 2009). A indústria de energia começa a ser expandida devido ao aumento do índice de industrialização e com o crescimento das cidades (ARAUJO, 2002).

O setor, no Brasil, início da década de 1980, alavancado pelas crises econômicas mundiais, caminhou rapidamente para maior autonomia do setor privado, ficando o setor público com principal atividade a regulamentação. A energia, de início, era limitada ao governo e às fábricas. Os mesmos autores sumarizam as fases do mercado de energia elétrica no Brasil nas seguintes etapas: monopólio privado (1880 – 1930), maior presença do Estado (1931 – 45), estado indutor (1946 – 62), modelo estatal (1963 – 79), crise institucional (1980 – 1992) e modelo híbrido (1993 – 2002). Até 1890, eram poucas as empresas que atuavam no setor de energia elétrica, porém com o fim da monarquia em 1889 e a implantação da Constituição Federal de 1891, onde tornou o Brasil uma federação composta por estados autônomos, viabilizou-se a entrada de novos agentes no mercado pouco explorado no país, a partir da liberdade de negociação entre empresas e municípios como aconteceu em São Paulo em 1899 com a chegada do grupo Light.

Como é de se esperar, houve um grande aumento da complexidade do setor elétrico brasileiro, comparado quando ainda era um sistema incipiente, em 1930. A fim de demonstrar

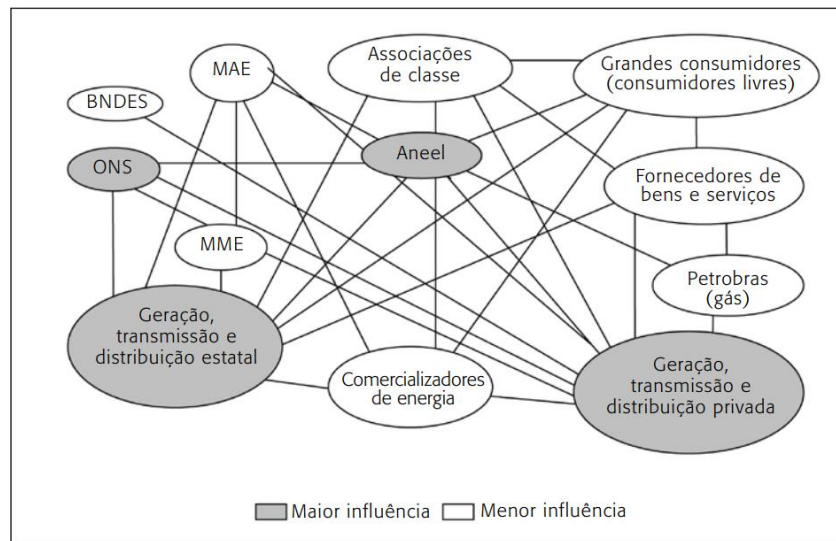
essa mudança, as próximas figuras trazem as principais organizações do setor elétrico brasileiro, em 1930 e em 2002, respectivamente.

Figura 2 – Principais organizações do setor elétrico brasileiro (1930)



Fonte: Gomes e Vieira (2009).

Figura 3 - Principais organizações do setor elétrico brasileiro



Fonte: Gomes e Vieira (2009).

As figuras 2 e 3 retratam momentos distintos, sendo a primeira representando o início do desenvolvimento do setor elétrico no Brasil e a segunda uma visão depois de anos de décadas de evolução. Dessa forma, a figura dois repercute o cenário de 1880 até 1930, onde o mercado era predominantemente privado e tinha como principal fonte de capital o estrangeiro. Com o aumento da complexidade do setor a figura 3, referente à 2002, mostra o papel do governo com a criação de uma instituição reguladora, Aneel, e a relação dos demais agentes de mercado, retrato diferente de 1930.

Após o marco da transferência de responsabilidade com as esferas pública e privada, uma das principais características do setor de energia brasileiro é a existência de agentes de

mercado, sendo eles os geradores, distribuidores, comercializadores ou consumidores de energia.

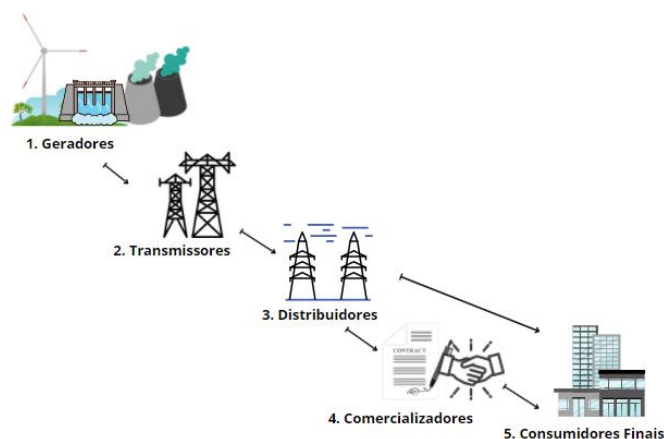
Além dessas funções, se faz necessária a participação de agentes de mercado responsáveis por regular as atividades do mercado. Isso ocorre principalmente pela importância da energia para o consumidor final e a impossibilidade de interrupção no fornecimento e por não ser possível o armazenamento de volumes expressivos de excedente de produção. Portanto, existe um trabalho constante de balanceamento entre oferta e demanda.

Conforme as mudanças e desenvolvimento do sistema de energia elétrica brasileiro, tanto a sua complexidade quanto a sua estruturação cresceram a partir do surgimento de diversos atores que se dividem principalmente, segundo a CCEE (2019), entre os agentes do mercado de eletricidade e os agentes institucionais, que serão apresentados nas duas seguintes seções.

3.1.1 Atores

No geral, os atores do setor de energia elétrica – não apenas no Sistema Elétrico Brasileiro – podem ser classificados por sua participação quanto à geração, distribuição e consumo de energia, como será apresentado nesta seção e pode ser facilmente visualizada na Figura 4, bem como por sua função institucional, abordada na próxima seção CCEE (2019).

Figura 4 - Atores genéricos do sistema energético



Fonte: ANEEL (2021) – Adaptado pelo autor

Visando trazer maior compreensão sobre os atores mencionados na Figura 4, seguindo interpretação da CCEE (2019), os pontos abaixo definem as características de cada um.

- **Companhias Geradoras (GC):** agentes que controlam a geração de energia elétrica. Esses podem atuar desde a geração de energias renováveis como não renováveis. Por exemplo, geração hidroelétrica, biomassa, nuclear, marítima, solar,

eólica, entre outras. Podem participar de comercializações por meio de concessões governamentais, serem geradores independentes ou autoprodutores.

- **Empresas Distribuidoras de Eletricidade (ESC):** exercem o papel de distribuição de energia das companhias geradoras para os consumidores finais. Em geral, os preços e condições são regulamentadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (CCEE, 2017).
- **Comercializadores:** agentes responsáveis por comercializar a energia por contratos bilaterais. Realiza tanto a compra quanto a venda de ativos no mercado de eletricidade.
- **Consumidores finais:** entes que realizam compra de energia, podem ser especiais ou livre. Os primeiros, cuja demanda varia entre 500 kW e 1,5 MW, podem exercer o direito de adquirir energia a partir de pequenas centrais hidroelétricas (PCHs) ou de fontes incentivadas, como eólica, biomassa e solar (CCEE, 2019). Já os consumidores livres são aqueles que podem escolher seu respectivo fornecedor por meio de livre negociação.

3.1.2 Agentes Institucionais

Os participantes institucionais (agentes de mercado) no setor de energia elétrica podem ser classificados da seguinte forma, seguindo Quadro 1, segundo CCEE (2019):

Quadro 1 - Principais agentes institucionais do sistema elétrico

Agentes de mercado	Classificação e atuação
Operador de Mercado	é responsável pelo gerenciamento econômico do mercado de eletricidade, responsável por administrar os preços e quantidades a serem comercializadas no mercado. Devido à complexidade e dinamicidade do mercado, deve prezar pelo balanceamento entre as proposições feitas pelos participantes.
Operador de Sistema Independente	sua função é manter a segurança do sistema de energia. É independente porque deve executar suas funções de uma forma a não favorecer qualquer dos participantes do sistema, mantendo assim um ambiente competitivo. Estabelece diretrizes apropriadas para a gestão do mercado e seus serviços auxiliares.
Companhias de Transmissão	seu objetivo dentro da dinâmica do mercado de energia é construir, manter e operar as redes de transmissão. Tem como parte dos seus ativos todo cabeamento, linhas, transformadores, dentre outros. Fazem o intermédio entre as Companhias Geradoras e as Empresas de Distribuição de Eletricidade.

Regulador de Mercado são as instâncias governamentais responsáveis por garantir um mercado eficiente de eletricidade. Responde pela determinação de regras no setor e faz a fiscalização das mesmas. Investiga os desequilíbrios dentro do mercado e abusos de poder. A .

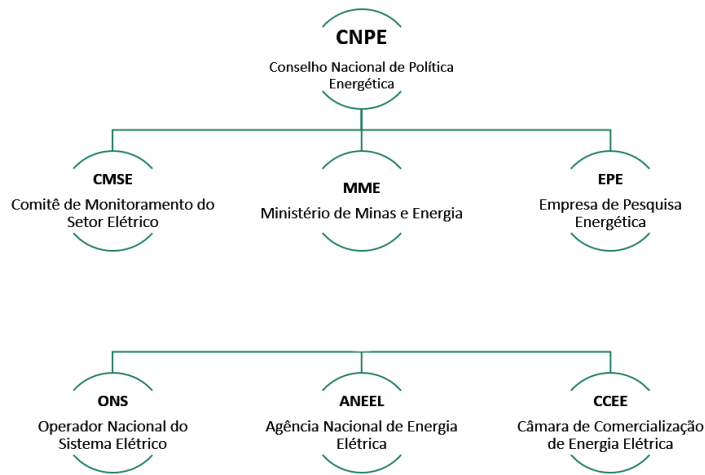
Figura 5 apresenta a estrutura dos agentes reguladores do setor de energia brasileiro e a Tabela 2, as principais atribuições de cada órgão.

Fonte: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) - adaptado pelo autor.

Também é importante entender mais a fundo sobre os reguladores de mercado do Setor Elétrico Brasileiro, bem como suas relações. Para isso, a .

Figura 5.

Figura 5 - Estrutura dos reguladores de mercado do setor elétrico brasileiro



Fonte: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) - adaptado pelo autor.

O Quadro 2, tem como intuito aprofundar a definição de cada agente institucional, representado na Figura 5, classificando e delimitando suas atuações. Sendo assim, é possível compreender a atribuição das funções dos mesmos levando em consideração o todo.

Quadro 2 – Agentes Reguladores do Setor de Eletricidade no Brasil

Agentes institucionais	Sigla	Classificação e atuação
Conselho Nacional de Política Energética	CNPE	Formulação de políticas e diretrizes de energia, de forma a promover o aproveitamento racional dos recursos energéticos, garantir o acesso a eletricidade, derivados de petróleo e biocombustíveis, entre outros. (BRASIL, 2000)
Ministério de Minas e Energia	MME	Formulação e implementação de políticas públicas para o setor de energia de acordo com as diretrizes deliberadas pelo CNPE.
Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico	CMSE	Acompanhamento e avaliação da segurança do suprimento elétrico em todo o território nacional.

Empresa de Pesquisa Energética	EPE	Prestação de serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético.
Agência Nacional de Energia Elétrica	ANEEL	Regulação e fiscalização da geração, transmissão, distribuição e comercialização de eletricidade.
Operador Nacional do Sistema Elétrico	ONS	Operação, supervisão e controle da geração de energia elétrica do Sistema Integrado Nacional e administração da rede básica de transmissão de energia elétrica no país.
Câmara de Comercialização de Energia Elétrica	CCEE	Operação regular do mercado brasileiro de energia elétrica, atuando como intermediário entre os agentes de mercado e as instituições de formulação de políticas

Fonte: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) - adaptado pelo autor.

3.2 O Mercado Livre de Energia

O mercado livre de energia no Brasil é uma construção de longo prazo, analisando um período mais recente verifica-se a evolução do setor elétrico culminando com o modelo atual e esse continuará demandando modernizações e aperfeiçoamentos.

A reestruturação do setor elétrico, teve início na década de 90, período no qual o setor era verticalizado, concentrado em estatais que atuavam desde o elo de geração até a ponta de distribuição. Nesse âmbito, a ausência de competição prevalecia afetando diretamente a eficiência do setor. (RIZKALLA, 2018).

A crise energética de 2001 evidenciou necessidades de alterações pressionando para a reformulação do setor elétrico brasileiro (SEB). Dessa forma, em 2004, o Governo Federal a partir da promulgação das Leis no10.847/04, 10.848/04 e pelo Decreto no5.163/04, fundamentou um marco importante nas reformas do setor.

O mercado de livre energia no Brasil pode ser analisado, segundo Hunt e Shuttleworth (1996) em artigo de Castro e Leite (2010), pela definição de quatro modelos de organização. **O Erro! Fonte de referência não encontrada.** 3 ilustra a visão dos autores.

Quadro 3 – Modelos de organização do setor elétrico

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Características	Monopólio	Monopsônio	Competição no atacado	Competição no varejo
Competição na geração	Não há	Significativa	Significativa	Significativa
Escolha do varejista	Não há	Não há	Significativa	Significativa

Escolha do consumidor	Não há	Não há	Não há	Significativa
-----------------------	--------	--------	--------	---------------

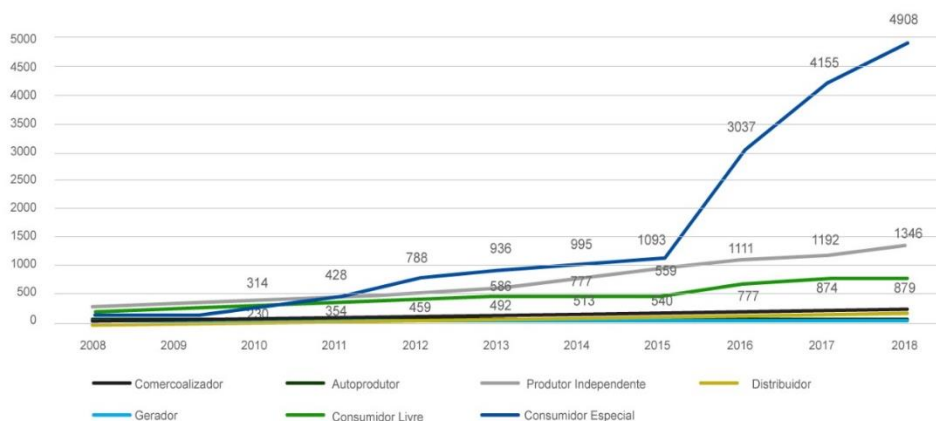
Fonte: HUNT SHUTTLEWORTH (1996, p. 22) apud CASTRO e LEITE (2010).

As reformas mencionadas, propostas a partir da década de 90, transformaram o modelo implementado no Brasil em uma adaptação dos modelos 3 e 4, incorporando a competição na geração e a livre escolha dos varejistas (CASTRO; LEITE, 2010). A adaptação dos modelos 3 e 4, representa a adoção do mercado livre de energia. Esse é caracterizado por ser um ambiente competitivo de negociação de energia onde os agentes negociam livremente todas as condições contratuais incluindo preço da energia, quantidade contratada, período de suprimento, condições de pagamento, dentre outras condições (RIZKALLA, 2018).

Os benefícios são: maior previsibilidade orçamentária, gerenciamento da energia elétrica como matéria prima, preços mais competitivos, mesmo preço para os horários de ponta e fora de ponta (GENERGIA, 2021). Tendo em vista os benefícios mencionados, em 2020 a CCEE atingiu a marca de 10 mil agentes, marco expressivo diante da pandemia da Covid-19, que exerceu grande influência no setor elétrico.

O coronavírus e suas implicações interromperam a atividade de indústrias, fábricas, shoppings, restaurantes e escolas, reduzindo o consumo de energia. O benefício de preços mais competitivos fez com que muitos agentes decidissem se deslocar do ambiente regulado para o livre. O grande crescimento do mercado mesmo em cenários adversos para diversos setores da economia, demonstrou a solidez e a possibilidade de investimentos e benefícios aos participantes (CCEE, 2020). A tendência de crescimento de agentes no mercado livre ocorre desde o começo dos anos 2000. A Figura 6 mostra a evolução dos agentes desde 2008.

Figura 6 – Número de agentes por classe



Fonte: Mercado livre de energia elétrica <https://www.mercadolivredeenergia.com.br/>

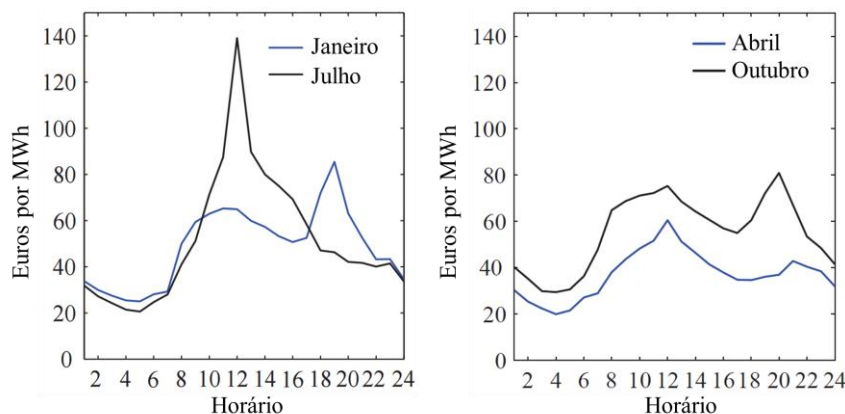
É possível observar o crescimento expressivo de consumidores especiais, assim como o constante crescimento dos produtores independentes, ambos dados estão relacionados, tendo em vista que a demanda dos consumidores especiais varia entre 500 kW e 1,5 MW. O fenômeno expressa o amadurecimento do mercado livre de energia no Brasil, mostrando que cada vez mais agentes estão aderindo essa iniciativa.

3.2.1 O Mercado *Spot*

O mercado spot é caracterizado pela comercialização e entrega no curto prazo de ativos de energia. Pode ser negociado nas modalidades *intraday* (para o mesmo dia), *day-ahead* (onde o fornecimento ocorre no dia seguinte), *intra-week* (na mesma semana) ou *week-ahead* (para a semana seguinte) (CCEE, 2012). Esse tipo de mercado permite que os produtores otimizem sua geração de curto prazo, comercializando os excedentes de produção e gerenciando a escassez na produção (quando a demanda ultrapassa a quantidade ofertada). Essa dinâmica ocasiona um maior balanceamento de carga e possibilita que os agentes de mercado cumpram suas obrigações contratuais (STOFT, 2002).

Uma das principais características desse mercado é a alta volatilidade das tarifas de energia (BESSEMBINDER; LEMON, 2002), que demanda atualizações constantes pelo operador de mercado. Isso ocorre principalmente pela impossibilidade de armazenagem de energia em grandes volumes – diferente de outras commodities, como a soja ou minério de ferro, que poderiam ser amenizados com produtos em estoque – por isso a importância do balanceamento de carga entre consumo e geração (ENRI, 2012). A Figura 7 e a Figura 8 ilustram, respectivamente, a oscilação do preço de energia no mercado de curto prazo alemão.

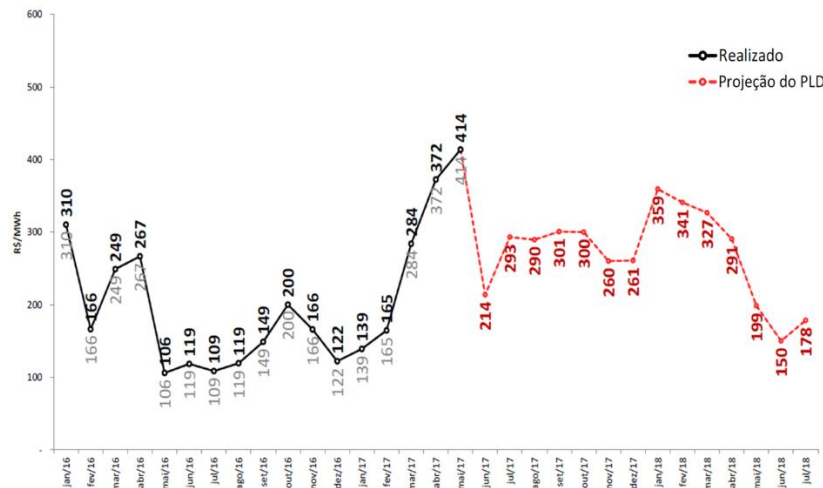
Figura 7 - Volatilidade do preço da energia no mercado spot alemão na modalidade *intraday*



Fonte: Erni, 2012 – adaptado pelo autor

Volatilidade do preço médio por hora no mercado *day-ahead* para diferentes meses com dados referentes ao período entre 1º de janeiro de 2010 e 31 de dezembro de 2011. Por exemplo, os preços por hora de janeiro foram computados como a média aritmética dos preços por hora em janeiro de 2010 e em janeiro de 2011.

Figura 8 – Oscilação do preço no mercado spot brasileiro e sua projeção para o ano seguinte



Fonte: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2017.

O mercado Spot tem seu preço recalculado continuamente pelo operador do mercado que assim como nas bolsas de valores espalhadas pelo mundo, como a B3 no Brasil e a NYSE nos Estados Unidos, tem seus valores definidos baseados nas ofertas de compra e venda de energia realizadas pelos participantes do mercado.

Além disso, Ziel, Steinert e Husmann (2014), trazem a argumentação de que as energias renováveis, especialmente energias solar e eólica, trouxeram novas forças de formação de preço em mercados spot na Alemanha, o que muito provavelmente é também verdade no Brasil, devido à característica das fontes energéticas do país.

3.2.2 Contratos Bilaterais

A modalidade de contratos bilaterais é caracterizada por um comprador e um vendedor concordando em uma certa quantidade de energia a ser transferida em um preço fixo. Segundo definição da ANEEL, o contrato bilateral é um “instrumento jurídico que formaliza a compra e venda de energia elétrica entre Agentes da CCEE, tendo por objeto estabelecer preços, prazos e montantes de suprimento em intervalos temporais determinados”. Os períodos podem variar de semanas a anos com preços pré-estabelecidos pelos agentes. Portanto, proporcionam maior estabilidade na oferta e demanda de eletricidade.

Contratos bilaterais são frequentemente usados para reduzir os riscos de preço à vista de sua incerteza e volatilidade. A alta demanda, por exemplo, culmina em um grande aumento no preço da eletricidade. Uma vez que os preços do mercado spot, devido à sua incerteza, podem ser maiores ou menores do que o previsto, os contratos bilaterais são uma ferramenta essencial para proteger e mitigar riscos.

Este tipo de contrato é negociado com base nas médias de preços esperadas de longo prazo. Apesar do contrato fornecer um meio de evitar riscos, a licitação no mercado *spot* pode oferecer a possibilidade de maiores lucros para os atores. Os preços elevados no mercado spot são favoráveis para a empresa de geração, fator que está atrelado ao maior risco de volatilidade, o que pode induzir o aumento das vendas nesse mercado e a redução de entregas na modalidade bilateral.

O mercado spot e a modalidade de contratos bilaterais apresentam características diferentes, principalmente no que diz respeito ao prazo, sendo, o primeiro, um mercado imediato e, o segundo, uma modalidade, normalmente utilizada, para maior duração. Tais características resultam em possibilidades diferentes, oferecendo uma escolha entre previsibilidade, risco e retorno. Os agentes envolvidos devem tomar decisões considerando esses fatores, sendo possível combinar as duas formas de atuação, visando maximizar o retorno.

3.3 Pesquisa Operacional

O surgimento do termo “Pesquisa Operacional”, ocorreu antes de ter sido aplicado de forma mais abrangente, segundo Correa (2010). Ele começou a ser utilizado em 1936 por cientistas da Royal Air Force, mas apenas com a Segunda Grande Guerra Mundial que realmente começou-se a utilizá-la de fato. Isto ocorreu porque era extremamente necessário a aplicação inteligente de recursos muito escassos nas inúmeras operações e atividades militares, onde a eficiência era pré-requisito. Os governos britânico e norte-americano solicitaram a cientistas e matemáticos que fizessem estudos (leia-se pesquisa) sobre as operações militares e como otimizar essas operações. Segundo Hillier e Lieberman (2013), como consequência desses estudos, garantiram-se as vitórias nas Batalhas Aéreas na Grã-Bretanha e no Atlântico Norte, igualmente auxiliando a Campanha Britânica no Pacífico. Posteriormente, a indústria viu como uma oportunidade a aplicação desses conceitos para o desenho de uma estrutura mais robusta, com menores perdas e processos mais eficazes (CORREA, 2010).

Apesar do nome do campo ser “Pesquisa Operacional”, parecendo se tratar apenas de pesquisa no sentido mais exploratório, o campo de PO faz parte de uma área do conhecimento tratada como Management Science, envolvendo o uso de uma série de técnicas com embasamento lógico-científico para tratar questões de gestão que auxiliam no processo de tomada de decisão, segundo Rodrigues et al. (2014). Diferentes, porém equivalentes, definições de Pesquisa Operacional são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Definição de Pesquisa Operacional

Autor	Definição
Hillier e Lieberman (2013)	A busca por soluções ótimas, inteligíveis e aplicáveis para problemas organizacionais a partir da utilização de modelos matemáticos.
Morse e Kimball (1951)	Método científico para prover a departamentos executivos fundamentos quantitativos para decisões referentes às operações sob seus controles.
Pocock (1959)	Metodologia científica (analítica, matemática e quantitativa) que, ao avaliar as implicações de diversos cursos de ação alternativos em um sistema administrativo, provê um fundamento aprimorado para decisões gerenciais.

Fonte: Elaborado pelo autor

Um dos métodos mais utilizados na Pesquisa Operacional para resolução de problemas é concebido a partir de 6 etapas ilustrados no Quadro 5 (HILLIER E LIEBERMAN, 2010):

Quadro 5 – Etapas de abordagem em Pesquisa Operacional

Etapa	Ação
Modelagem do Problema	Após uma observação cuidadosa do problema, é feita a sua modelagem, considerando as hipóteses a serem confirmadas e os dados relevantes;
Construção do Modelo Científico	O problema modelado deve seguir critérios tipicamente matemáticos, possuindo a essência do problema a ser resolvido e assumindo que o modelo representa problema original, bem como suas eventuais soluções; É importante salientar que todo modelo é uma forma de simplificar a realidade, por isso é importante no final dessa etapa a verificação da possibilidade de aplicação prática do modelo;
Apuração das primeiras soluções	Nessa etapa, tem-se normalmente apoio computacional para obter as soluções primárias do modelo
Teste de Hipóteses	Com a solução em mãos, são validadas as hipóteses levantadas na etapa (i) modelagem do problema;
Melhoria Contínua do Modelo	Em posse das hipóteses validadas em (iv), o modelo é aplicado mais vezes, com variações dos pontos de partidas e de variáveis relevantes, a fim de encontrar melhorias para o modelo;

Solução Ótima para o
Problema

Por fim, o modelo é implementado em situações reais, para que seja
utilizada a solução ótima para o problema.

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas situações práticas, a Pesquisa Operacional tem uma aplicabilidade vasta de temas e métodos para a resolução de problemas. Dentre essas, tem-se as mais comuns como simulação de sistemas, teoria das filas, teoria dos jogos, processos decisórios de *Markov*, análise de dados, programação linear e, não-linear como a quadrática e programação dinâmica, dentre outros (WILLIANS, 1999).

3.4 Programação Quadrática (QP)

A programação quadrática é um tipo de programação matemática utilizada para otimização de problemas. A Programação Matemática é a disciplina que estuda a minimização de funções em problemas com ou sem restrições. Matematicamente, estes problemas são enunciados como:

$$\begin{aligned} f(x) & & x \in \mathfrak{R}^n & & () \\ c_i(x) = 0 & & i = 1 \dots l & & () \\ c_i(x) \leq 0 & & i = l+1 \dots m & & () \\ x_i^l \leq x_i \leq x_i^u & & i = 1 \dots n & & \end{aligned}$$

onde x é um ponto do \mathfrak{R}^n sobre o qual são impostos os limites mínimos e máximos (restrições laterais), $f(x)$ é a função a ser minimizada e as funções $c_1(x)$ representam as restrições de igualdade e desigualdade. Assume-se que tanto a função objetivo quanto as restrições são funções contínuas no \mathfrak{R}^n . (PEREIRA, 2002).

O Quadro 6 mostra a diferença entres os tipos de programação utilizadas em modelos de otimização.

Quadro 6 – Tipos de programação

Tipos de otimização	$f(x)$	$c_1(x)$
Programação Linear	Linear	Linear
Programação Quadrática	Quadrática	Quadrática
Programação Não-linear	Linear/ não linear	Não - Linear/ Linear

Fonte: Pereira, 2002.

A programação quadrática tem como característica a função objetivo quadrática e as restrições lineares em $x \in \mathbb{R}^n$. O problema, normalmente é formulado da seguinte forma, onde os custos podem ser representados pela seguinte equação:

$$C_n(P_n) = \frac{1}{2} a_n P_n^2 + b_n P_n + c_n \quad (1)$$

Tendo em vista a natureza da função objetivo, foi utilizada a função *quadprog* do MATLAB para resolver o problema proposto. Segundo a plataforma, a função *quadprog* encontra um mínimo para um problema especificado pela equação (2) abaixo:

$$\min_x \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad (2)$$

A mesma é restringida pelas seguintes equações:

$$A x \leq b \quad (3)$$

$$Aeq \ x = beq \quad (4)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (5)$$

onde H , A , e Aeq são matrizes, e f , b , beq , lb , ub , e x são vetores.

As matrizes e vetores utilizados desempenham papéis específicos na resolução do problema, sendo primordial o entendimento de cada um observando a relação da matriz ou vetor como o todo. O Quadro 7, segundo MATLAB, descreve de forma resumida essa relação.

Quadro 7 - Descrição de matrizes e vetores

Elemento	Descrição
H	Matriz simétrica em $1/2 * x' * H * x$
f	Vetor no termo linear $f' * x$
A	Matriz em restrições de desigualdade linear $A * x \leq b$
b	Vetor em restrições de desigualdade linear $A * x \leq b$
Aeq	Matriz em restrições de igualdade linear $Aeq * x = beq$
beq	Vetor em restrições de igualdade linear $Aeq * x = beq$
lb	Vetor de limites inferiores
ub	Vetor de limites superiores

Fonte: Autoria própria

O objetivo de otimizar as variáveis de produção e consumo deve respeitar os limites impostos pelo problema abordado. No caso, as equações de restrição acima equações (3-5) desempenham o papel de delimitar as relações de transações energéticas.

A primeira matriz observada é a de restrições de desigualdade linear, A , que é multiplicada pelo vetor de variáveis x , devendo o resultado atender valores impostos por b , vetor que limita os valores da multiplicação.

4 Modelos *Peer to Peer* (P2P)

Neste capítulo serão apresentados os modelos P2P considerando suas forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. Tendo em vista as características individuais de cada um, os modelos P2P apresentam modelagens matemáticas distintas que serão detalhadas.

4.1 Considerações iniciais

O problema aqui estudado contribui com uma visão geral sobre novos modelos de mercado P2P. Este trabalho inclui a motivação e modelos indo até o desenvolvimento de futuros potenciais nesse campo (Sousa et al, 2019). Este trabalho contribui com recomendações com base em um teste de caso, que foi replicado em partes aqui neste projeto e será explicado a seguir.

Os modelos propostos para os mercados P2P até o presente momento, como já explicitado por Parag, Sovacoll (2016) e o restante da literatura, são:

1. P2P Completo
2. Baseado em comunidade
3. P2P Híbrido

As principais diferenças entre cada um são os níveis de descentralização, indo de P2P completo a um P2P hierarquizado.

4.2 Modelos de mercado P2P

Inicialmente, para uma boa análise de potenciais oportunidades e desafios sobre este tópico, foi desenvolvida uma Matriz SWOT (também conhecida por Matriz FOFA), que é baseada em Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças, mostrada abaixo na Quadro 8.

Quadro 8 - Potenciais forças, oportunidades, fraquezas e ameaças dos modelos P2P

Forças	Fraquezas	Oportunidades	Ameaças
Empoderamento de consumidores, focando em confiança, transparência e abertura do mercado	Preço de energia abaixo do ótimo, em todo sistema de energia	Democratização da energia	Obstáculos legais e regulatórios
Cientes tem uma melhor escolha da oferta e a possibilidade de produzir e vender sua própria energia	Transição potencialmente esmagadora para este mercado centrado no consumidor	Aumento da cooperação e atenção dos consumidores frente a consumo de energia renovável	Falta de energia a alguns grupos de consumidores
		Criação de novos modelos de negócios	Engajamento dos prossumidores e sua dimensão humana

Aumento da resiliência e confiabilidade do sistema	Peso da negociação e mecanismos de compensação	Crescimento do mercado do varejo de energia, com a falta de competição	Potenciais congestionamentos na rede
Potencial remoção de força de mercado de alguns agentes do mercado	Avaliação do ciclo de vida da infraestrutura de hardware	Adiar os investimentos da rede dos operadores do sistema	Dependência tecnológica (por exemplo, blockchain)
			Segurança e privacidade dos dados
			Potencial falha dos mercados, se mal estruturados

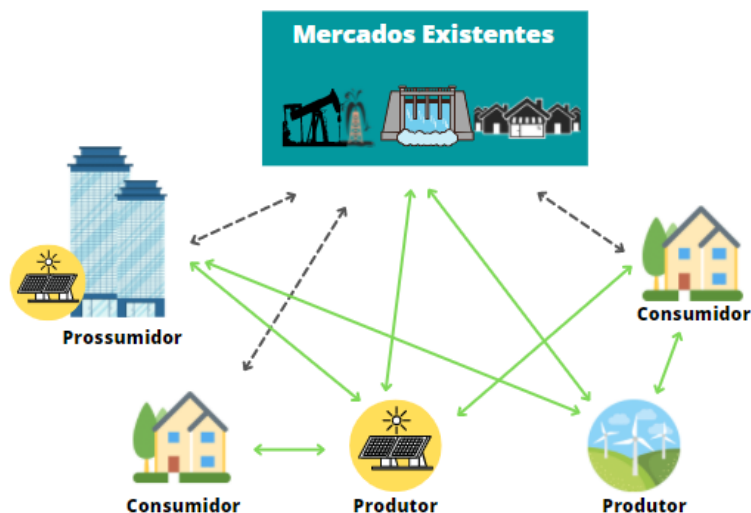
Fonte: Sousa et al. 2018 – Adaptado pelo autor.

É importante ressaltar que esses modelos são bem humanizados, uma vez que cada agente pode ser uma casa familiar, um comércio ou qualquer outra estrutura. Analisando por esse lado, consegue-se perceber porque tem-se como tão importante a opinião e engajamento de cada agente nesses modelos, segundo Brudermann, Yamagata (2018).

4.2.1 P2P Completo

O modelo P2P Completo é baseado em agentes que negociam diretamente entre si, com o objetivo de comprar e vender energia elétrica (Figura 9).

Figura 9 - Estrutura do modelo de mercado de P2P Completo



Fonte: SOUSA et al. 2018 – Adaptado pelo autor.

Assim sendo, dois agentes podem firmar um acordo entre as transações que fazem, baseado em uma certa quantidade de energia e por um certo preço, sem uma supervisão centralizada. Sorin et al. (2018) propôs um modelo P2P completo entre produtores e

consumidores que se baseia em uma economia multi-bilateral. Essa estrutura P2P inclui as vontades e preferências dos agentes consumidores, no tocante de quem vão comprar sua energia – podendo escolher a fonte como local, renovável ou qualquer outro parâmetro. Isso está em conexão com o experimento icônico do Brooklyn, uma mini rede de mercado de energia foi desenvolvida e publicada em Mengelkamp et al. (2017). Esse modelo libera um mercado local sem uma entidade central.

As pesquisas mais recentes mostram que esse modelo de mercado está ganhando momentum nos campos acadêmicos e industriais. Uma formulação matemática genérica desse modelo é apresentada nas equações (6-10).

$$\min_D \sum_{n \in \Omega} C_n \left(\sum_{m \in \Omega_n} P_{nm} \right) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \underline{P}_n \leq \sum_{m \in \omega_n} P_{nm} \leq \overline{P}_n \quad \forall n \in \Omega \quad (7)$$

$$P_{nm} + P_{mn} = 0 \quad \forall (n, m) \in (\Omega, \omega_n) \quad (8)$$

$$P_{nm} \geq 0 \quad \forall (n, m) \in (\Omega_p, \omega_n) \quad (9)$$

$$P_{nm} \leq 0 \quad \forall (n, m) \in (\Omega_c, \omega_n) \quad (10)$$

Onde: $D = (P_{nm} \in \mathbb{R})_{n \in \Omega, n \in \Omega_m}$

- P_{nm} corresponde a troca de energia entre os agentes n e m , em que um valor positivo significa uma venda/produção e, um valor negativo significa uma compra/consumo equações (9-10).

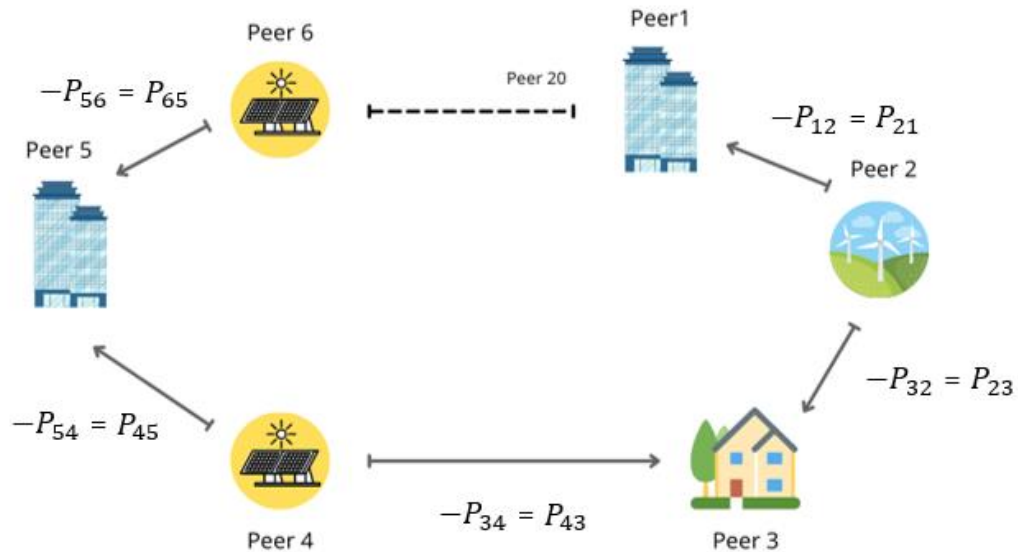
- Ω, Ω_p e Ω_c são os conjuntos para todos os agentes, produtores e consumidores, respectivamente. Assim, $\Omega_p, \Omega_c \in \Omega, \Omega_p \cap \Omega_c = \emptyset$.

O conjunto ω_n contém os parceiros de comércio de um certo agente n . As trocas bilaterais P_{nm} tem reciprocidade, como definido em (8), e por exemplo, a troca de energia entre P_{15} e P_{51} devem ser iguais, mas com sinais contrários. Em teoria, o resultado de cada negociação pode gerar preços diferentes para cada negócio em específico. A função C_n corresponde ao custo de produção (ou abertura a pagar). Uma função quadrática é comumente utilizada para representar os custos de produção/consumo, usando três parâmetros positivos, a_n, b_n e c_n .

A Figura 10 apresenta um exemplo simples a fim de ilustrar uma troca P2P entre agentes, em que 1, 3 e 5 são produtores e 2, 4 e 6 são consumidores. Entretanto, as fórmulas

apresentadas acima podem facilmente ser generalizadas para considerar os agentes como prossumidores.

Figura 10 - Exemplo ilustrado de um modelo de mercado P2P completo

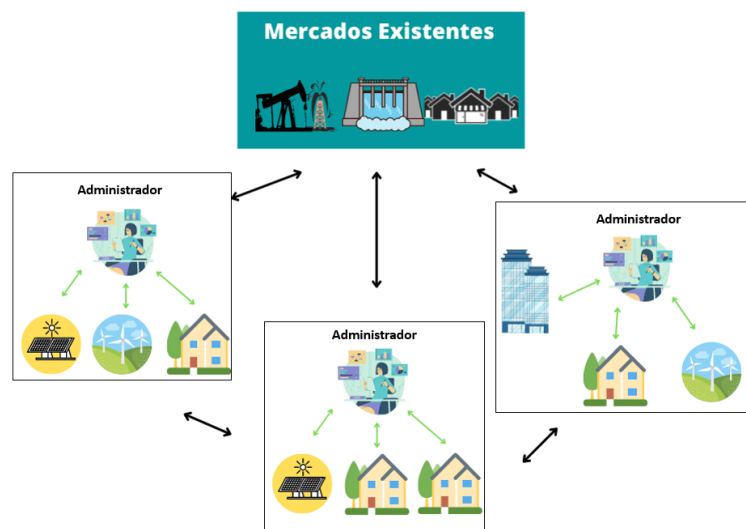


Fonte: SOUSA et al. 2018 – Adaptado pelo autor.

4.2.2 Modelo baseado em comunidade

O modelo baseado em comunidade é mais estruturado e hierarquizado, com um gerente de comunidade que maneja as trocas dentro da comunidade, bem como trabalha como um intermediador da comunidade e o restante do sistema, conforme pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Estrutura do modelo de mercado baseado em comunidade



Fonte: SOUSA et al. 2018 – Adaptado pelo autor.

Este modelo de mercado pode ser facilmente aplicado a micro redes ou a um grupo de prossumidores vizinhos, que são grupos naturais devido à sua localização (ou seja, estar geograficamente próximo). De modo mais geral, uma comunidade deve ser baseada em membros que compartilham interesses e objetivos comuns: por exemplo, um grupo de membros que estão dispostos a compartilhar energia renovável, embora não estejam no mesmo local.

$$\min_D \sum_{n \in \Omega} C_n(p_n, q_n, \alpha_n, \beta_n) + G(q_{imp}, q_{exp}) \quad (11)$$

$$\text{s.t. } p_n + q_n + \alpha_n - \beta_n = 0, \quad \forall n \in \Omega \quad (12)$$

$$\sum_{n \in \Omega} q_n = 0 \quad (13)$$

$$\sum_{n \in \Omega} \alpha_n = q_{imp} \quad (14)$$

$$\sum_{n \in \Omega} \beta_n = q_{exp} \quad (15)$$

$$\underline{P}_n \leq P_n \leq \overline{P}_n \quad \forall n \in \Omega \quad (16)$$

Onde: $D = (p_n, q_n, \alpha_n, \beta_n \in \mathbb{R})_{n \in \Omega}$.

- p_n é a produção ou consumo do agente n .

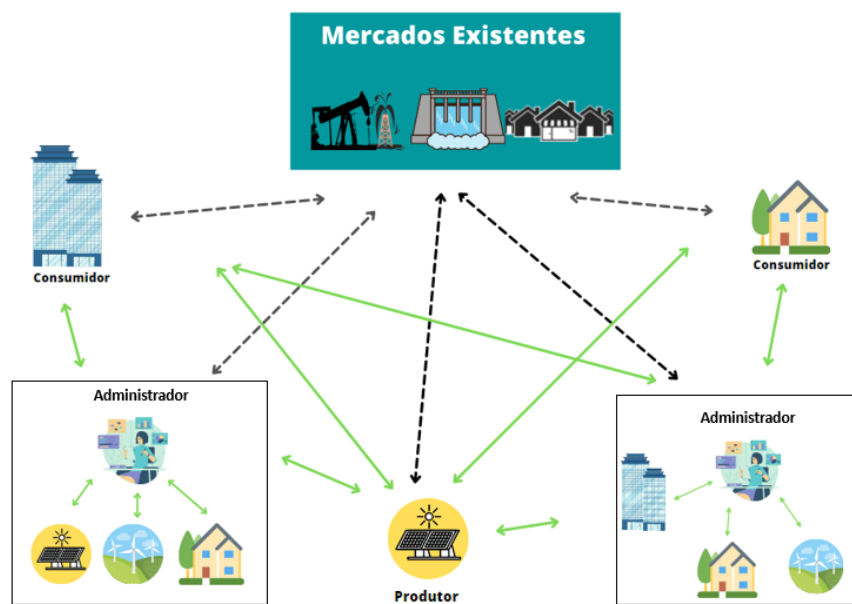
- Ω é o conjunto dos agentes do sistema.

Cada agente negocia dentro da comunidade por meio de q_n sem saber com qual membro, porque é tratado de forma centralizada pelo gerente de comunidade por meio de equação (13). Cada par também pode escolher negociar com o exterior por meio de α_n e β_n , que são, respectivamente, a importação e a exportação de energia. A soma dessas transações é administrada de forma centralizada pelo gerente da comunidade por meio de equação (14) e equação (15). A função objetivo equação (11) considera o custo associado a todas as variáveis de decisão. Começando com uma função de custo quadrática de p_n , então um custo de transação γ_{com} associado a q_n . Para α_n e β_n , pode-se usar coeficientes de ponderação γ_{imp} e γ_{exp} traduzindo a preferência do membro para o mundo exterior. O gerente de comunidade também tem uma função associada à energia trocada com o mundo exterior $G(q_{imp}, q_{exp})$. Esta função pode ser modelada de diferentes maneiras, mas a mais direta conecta-se diretamente aos preços do mercado atacadista do dia seguinte.

4.2.3 Modelo P2P Híbrido

Este modelo é a combinação dos dois modelos anteriores, terminando com diferentes camadas para comercialização de energia, conforme mostrado na Figura 12. Esta proposta é vista como uma abordagem de "boneca russa", onde, em cada camada, comunidades (ou coletivos de energia) e agentes podem interagir diretamente uns com os outros.

Figura 12 - Estrutura do modelo de mercado P2P Híbrido



Fonte: SOUSA et al. 2018 – Adaptado pelo autor.

No nível superior, encontram-se agentes individuais ou grupos de energia envolvidos em transações P2P entre si e também interagindo com os mercados existentes. No nível inferior, os coletivos de energia se comportam como o modelo baseado na comunidade apresentada anteriormente, em que um gerente de comunidade supervisiona o comércio dentro de sua comunidade. Conforme mostrado à direita da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, os coletivos de energia podem ser aninhados uns nos outros (por exemplo, edifícios e seus habitantes formando um coletivo de energia, sendo parte de outro coletivo de energia para a vizinhança). Embora não haja uma formulação matemática genérica para este projeto P2P híbrido, pode-se combinar as duas formulações anteriores para escrever uma versão simplista desse projeto. Dois níveis são assumidos nessa formulação: (i) o nível inferior só assume comunidades, (ii) o nível superior assume a negociação conforme o modelo P2P completo.

$$\min_D \sum_{n \in \Omega^u} C_n^u \left(\sum_{m \in \omega_n} P_{nm} \right) + \sum_{n \in \Omega^b} C_n^b(p_n, q_n, \alpha_n, \beta_n) \quad (17)$$

Nível superior – modelo P2P completo, restrições das equações ((6-10).

$$\sum_{m \in \omega_n} P_{nm} = q_{exp}^n - q_{imp}^n \quad (18)$$

$$\forall n \in \Omega^u \quad (19)$$

$$\forall (n, m) \in (\Omega_{co}, \omega_n) \quad (20)$$

$$\forall n \in \Omega^b$$

Em que: $D = (P_{nm} \in \mathbb{R}_{n \in \Omega^u} \mathbb{R}, p_n, q_n, \alpha_n, \beta_n \in \mathbb{R}_{n \in \Omega^b})$.

- Ω^b e Ω^u são conjuntos dos agentes nos níveis superiores e inferiores, respectivamente, enquanto $\Omega^b \cap \Omega^u = \Omega$.

No nível inferior, o gerente de cada comunidade $n \in \Omega^b$ determina a energia interna necessária q_n mais o desejo de importar energia (q_{imp}^n) ou exportar (q_{exp}^n). Então, o modelo de P2P completo é usado no modelo superior para calcular a troca ótima de energia entre os agentes $n \in \Omega^u$ – ou seja, os prossumidores e gerentes de comunidade. A soma das trocas bilaterais $\sum_{m \in \omega_n} P_{nm}$ é igualada a quantidade de q_{exp}^n menos q_{imp}^n definidos pelo gerente de cada comunidade n – equação. (17)

4.3 Comparação

A literatura tem descrito até agora em três modelos de mercado diferentes para mercados P2P, mesmo que algumas referências usem termos diferentes para descrever o mesmo tipo de estrutura de mercado. As principais vantagens, desafios e referências dos três projetos de mercado P2P são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 – Resumo dos três modelos de mercado P2P

Estrutura de mercado P2P	Principais vantagens	Principais desafios
Mercado P2P – Completo	<ol style="list-style-type: none"> 1) Total liberdade de escolha e autonomia, empoderando consumidores ativos; 2) Uso de energia alinhado com a preferência de cada agente (por exemplo, energia local ou verde); 3) Completa democratização do uso de energia 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Investimento e manutenção com Infraestrutura de TI para uma escalabilidade de todo o sistema; 2) Potencial convergência lenta na obtenção de um consenso na entrega final de energia; 3) Previsão do comportamento do sistema por operadores da rede, pela falta de controle centralizado; 4) Garantia de uma entrega de energia segura e alta qualidade
Mercado baseado em comunidade	<ol style="list-style-type: none"> 1) Melhora do relacionamento e envolvimento de membros da comunidade, pela troca de uma bem comum; 2) Mobilização da cooperação social e resiliência da comunidade; 3) Potenciais novos serviços para operadores da rede, fornecidos pelo gerente da comunidade 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Alcance das preferências de uso de energia de todos os membros da comunidade em todos os momentos; 2) Para o gerente da comunidade, é difícil de agregar os dados e gerenciar as expectativas de todos os membros; 3) Ter uma troca justa e imparcial da energia entre os membros da comunidade
Mercado P2P Híbrido	<ol style="list-style-type: none"> 1) Infraestrutura de TI e esforço computacional são escaláveis para todo o sistema; 2) Mais compatibilidade do sistema, ele pode coexistir com os outros dois modelos; 3) Mais previsível para os operadores da rede 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Coordenar trocas internas entre a comunidade com trocas entre os agentes de alto nível, como os gerentes da comunidade

Fonte: SOUSA et al. 2018 – Adaptado pelo autor.

As próximas seções descrevem o modelo implementado neste trabalho bem como os resultados e conclusões obtidos.

5 Implementação do modelo

Nesse capítulo, será apresentado o modelo de mercado de energia que foi utilizado como base para a otimização aplicando a programação quadrática. Dentre os três modelos que foram explicados no capítulo anterior, o modelo que foi implementado foi o modelo de P2P Completo.

5.1 Introdução

O teste de caso realizado propõe um caso realista para simular o modelo, porém hoje ainda não existe um teste de referência ou caso real para usar como base, além do que já feito por Sousa et al (2018).

Os modelos serão feitos com base no Sistema do IEEE de rede com 14 barramentos (IEEE 14-bus network system). Cada barramento possui um ou mais agentes, podendo esses ser consumidores ou produtores, com exceção do agente 20, que representa a rede principal e se comporta como um prosumidor – aqueles agentes que compram e vendem energia, a depender da situação ou necessidade. A Figura 13 apresenta os 14 barramentos e 20 agentes, com seus respectivos IDs e tipos. Aqueles que possuem um C são consumidores e G são geradores, divididos entre suas fontes de energia – solar, eólica, gás ou carvão.

Apesar do modelo aparentar ter linhas que se conectam e restringem o sistema, a comunicação entre qualquer um deles é livre. O barramento 7, em outros estudos, é utilizado como estoque de energia, mas não foi utilizado assim no presente estudo. O agente 20, que representa a rede principal, não possui limites de produção nem de consumo. A Tabela 1 apresenta resumidamente qual é o tipo de cada agente bem como sua fonte de energia.

5.2 Modelagem do problema

A Tabela 2 apresenta resumidamente a relação entre os agentes para os nós 1-2 e 19-20. A representação completa dessa tabela é representada no apêndice. Essa relação explicitada na matriz A , que atende as limitações das variáveis de consumo e produção. Portanto, todas as variáveis relacionadas ao agente 1, x_1 até x_{20} , que representam a conexão do agente com os demais pares, devem atender os limites de consumo do agente e esses estão especificados no vetor b . A presença de duas linhas para cada agente se deve aos seus limites máximos e mínimos de consumo ou produção, de acordo com cada um, conforme a equação.(7) Em específico para os agentes 12, 13, 14, 15 e 16, que são todos produtores de energia de fontes renováveis, conforme apresentado na Tabela 2 os limites máximos e mínimos são iguais para que o sistema priorize esses produtores aos que utilizam combustíveis fósseis. É importante observar que o agente 20, *main grid*, se comporta tanto como produtor quanto consumidor, por isso está em 4 linhas, sua capacidade não é limitada sendo verificados os valores inf em suas restrições.

Tabela 2 – Representação simplificada da relação entre cada agente e seus limites (Matriz A e vetor b)

Agentes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		b	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-19.33
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	21.70
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-86.02
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	94.20
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	≤	10.00
19	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	≤	0.00
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	inf
20	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	0.00
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	0.00
20	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	inf

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 - Relação entre os agentes e cada variável

Relação entre agentes	1.1	1.2	1.3	1.4	...	1.20	2.1	2.2	...	2.20	3.1	3.2	...	20.1	20.2	...	20.20
Variáveis	x1	x2	x3	x4	x...	x20	x21	x22	x...	x40	x41	x42	x...	x380	x381	x...	x400

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, a equação de restrição que envolve A , x e b atende a equação.(7) do artigo (SOUSA et al. 2018) que ilustra o comportamento do somatório de produção e consumo e seus limites inferiores e superiores.

Além disso, foram incorporadas, na matriz A e no vetor b , restrições que atendessem as equações (9)-(10), onde os produtores devem ter valores maiores ou iguais a zero e os consumidores valores menores ou iguais a zero. Em particular, a equação $Aeq * x = beq$

representa a equação (8), onde os valores de produção e consumo representam uma conexão bilateral resultando em um valor positivo de produção e um valor negativo de consumo que quando somados resultam em zero. A matriz A_{eq} específica justamente essa relação par a par sendo multiplicada pelo vetor x de variáveis que resulta em um valor igual a beq , vetor composto, no caso, por zeros.

Tabela 4- Representação simplificada da Matriz A_{eq} e do vetor beq

Agentes	1.1	1.2	1.3	...	2.1	2.2	2.3	...	3.1	3.2	3.3	...	beq
1.1	1	0	0		0	0	0		0	0	0		= 0
1.2	0	1	0		1	0	0		0	0	0		= 0
1.3	0	0	1		0	0	0		1	0	0		= 0
...													= 0
2.1	0	1	0		1	0	0		0	0	0		= 0
2.2	0	0	0		0	1	0		0	0	0		= 0
2.3	0	0	0		0	0	1		0	1	0		= 0
...													= 0
3.1	0	0	1		0	0	0		1	0	0		= 0
3.2	0	0	0		0	0	1		0	1	0		= 0
3.3	0	0	0		0	0	0		0	0	1		= 0
...													= 0

Fonte: Autoria própria

Além disso, as restrições de limite inferior e superior para cada variável foram incluídas nas equações da matriz A_{eq} .

Após compreender as restrições e o comportamento das variáveis, é necessário abordar a função que associa os valores de produção e consumo com seus custos. A aplicação da solução proposta por Sousa et al. (2018) tem como base para a equação de custos de produção e consumo os valores da Tabela 5:

Tabela 5 - Valores de a_n e b_n

Agente	a_n (\$/MW ²)	b_n (\$/MW)	Agente	a_n (\$/MW ²)	b_n (\$/MW)
1	1.18	50.9	11	1.54	42.9
2	0.24	37.8	12	0	0
3	0.57	43.6	13	0	0
4	1.24	50.3	14	0	0
5	1.62	30.4	15	0	0
6	0.31	27.5	16	0	0
7	4.36	46.7	17	2.51	27.7
8	1.63	33.2	18	0.15	35.5
9	5.16	55	19	3.64	30.4
10	1.96	62.1	20	-	-

Fonte: Autoria própria

Os dados mostram que os valores de a_n e b_n para os produtores de energia renovável são iguais a zero, sendo então um incentivo para seu consumo. Isso significa que esses produtores

são um *must take* sendo o consumo de sua produção prioritário.

A matriz H está associada aos valores de a_n . Dessa forma, a matriz H apresenta a relação de custo entres os elementos quadráticos da Equação Custos, sendo uma matriz 400x400, pelo fato de serem 20 agentes em um modelo P2P onde todos podem transacionar com todos respeitando as restrições impostas. O agente 20 possui uma taxa de importação e exportação de energia. Quando ele se comporta como consumidor, ele paga 185 \$/MWh, e como produtor ele vende por 205 \$/MWh. Assim sendo, esse valor foi utilizado no b_n da equação de custos, que é a matriz f .

Tabela 6 - Representação simplificada da Matriz H

Agentes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0.48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	2.48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	3.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	8.72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	3.26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	10.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.02	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.28	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-

Fonte: Autoria própria

Na prática, todas as matrizes foram modeladas no *software online* Google Planilhas, conforme exemplo presente na Fonte: Autoria própria

Figura 14 e depois passadas para o MATLAB, onde foi realizada a simulação. A Tabela 7 representa o tamanho de cada matriz demonstrando a complexidade do problema.

Tabela 7 - Tamanho das matrizes de cada elemento

Agente	Linhas	Colunas
H	400	400
f	400	1
A	442	400

b	442	1
Aeq	400	400
beq	400	1
x	400	1

Fonte: Autoria própria

Figura 14 - Exemplo de parte da matriz H modelada no Google Planilhas

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB			
25			1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6			
26		H	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	x18	x19	x20	x21	x22	x23	x24	x25	x26			
27	1.1	x1	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36		
28	1.2	x2	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
29	1.3	x3	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
30	1.4	x4	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
31	1.5	x5	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
32	1.6	x6	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
33	1.7	x7	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
34	1.8	x8	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
35	1.9	x9	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
36	1.10	x10	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
37	1.11	x11	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
38	1.12	x12	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
39	1.13	x13	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
40	1.14	x14	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
41	1.15	x15	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
42	1.16	x16	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
43	1.17	x17	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
44	1.18	x18	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
45	1.19	x19	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
46	1.20	x20	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	
47	2.1	x21																													
48	2.2	x22																													
49	2.3	x23																													
50	2.4	x24																													
51	2.5	x25																													

Fonte: Autoria própria

O vetor f está relacionada aos valores de b_n , multiplicando os elementos lineares da Equação Custos, sendo uma matriz 1x400, tendo em vista o número de variáveis de produção.

Tabela 8 - Representação simplificada do vetor f

Agente	f	Agente	f
1	50.9	12	0
2	37.8	13	0
3	43.6	14	0
4	50.3	15	0
5	30.4	16	0
6	27.5	17	27.7
7	46.7	18	35.5
8	33.2	19	30.4
9	55	20 Produtor	205
10	62.1	20 Consumidor	185
11	42.9		

Fonte: Autoria própria

Como resultado final da simulação, teremos as 400 variáveis relacionais entre cada agente, mostrando quanto cada agente comprou ou vendeu de outro, e o mínimo custo total do sistema, que é, na função *quadprog*, a expressão chamada de *fval*. E o contrário do custo total – o máximo da função – pode ser chamado de bem estar social, *social welfare*. (HUG, KAR, WU, 2015), que está denotado na equação 21.

$$SW = - \sum_{n=1}^N C_n(P_n) \quad (21)$$

5.3 Resultados e discussão

Os resultados obtidos estão baseados nas informações acima dispostas. Porém, foi feita uma simulação buscando analisar o comportamento do sistema ocorrendo uma redução do valor mínimo de consumo e de produção, ou seja, diminuindo o *lower bound*, em 20%. O resultado encontrado nessa simulação foi comparado com o resultado do sistema inalterado, afim de quantificar a variação no *fval*, resultado do custo mínimo em *single time step*, e na distribuição dos valores das variáveis x de cada agente. A Tabela 9 mostra a comparação do vetor b sem e com a alteração, sendo ela feita apenas nos valores de P_{min} .

Tabela 9 – Valores do vetor b

P		b	b alterado	P		b	b alterado
Pmin 1	≤	-19.33	-15.46	Pmin 11	≤	-13.34	-10.68
Pmax 1	≤	21.70	21.70	Pmax 11	≤	14.90	14.90
Pmin 2	≤	-86.02	-68.81	Pmax 12	≤	50.00	50.00
Pmax 2	≤	94.20	94.20	Pmin 12	≤	-50.00	-40.00
Pmin 3	≤	-45.74	-36.59	Pmax 13	≤	30.00	30.00
Pmax 3	≤	47.80	47.80	Pmin 13	≤	-30.00	-24.00
Pmin 4	≤	-6.36	-5.09	Pmax 14	≤	40.00	40.00
Pmax 4	≤	7.60	7.60	Pmin 14	≤	-40.00	-32.00
Pmin 5	≤	-9.11	-7.29	Pmax 15	≤	30.00	30.00
Pmax 5	≤	11.20	11.20	Pmin 15	≤	-30.00	-24.00
Pmin 6	≤	-25.24	-20.19	Pmax 16	≤	30.00	30.00
Pmax 6	≤	29.50	29.50	Pmin 16	≤	-30.00	-24.00
Pmin 7	≤	-8.11	-6.49	Pmax 17	≤	20.00	20.00
Pmax 7	≤	9.00	9.00	Pmin 17	≤	0.00	0.00
Pmin 8	≤	-2.72	-2.18	Pmax 18	≤	50.00	50.00
Pmax 8	≤	3.50	3.50	Pmin 18	≤	0.00	0.00
Pmin 9	≤	-5.33	-4.27	Pmax 19	≤	10.00	10.00
Pmax 9	≤	6.10	6.10	Pmin 19	≤	0.00	0.00
Pmin 10	≤	-11.93	-9.54	Pmax 20	≤	inf	inf
Pmax 10	≤	13.50	13.50	Pmin 20	≤	0.00	0.00
Pmin 11	≤	-13.34	-10.68	Pmax 20	≤	0.00	0.00
Pmax 11	≤	14.90	14.90	Pmin 20	≤	inf	inf

Fonte: Autoria própria

As alterações acima implicam em uma necessidade mínima menor de produção por parte das fontes renováveis e um menor consumo mínimo dos agentes 1 ao 11. Seguindo o que foi dito, os valores de ambos vetores b foram incorporados no modelo e comparados, a Tabela 10 mostra a resultante de custo mínimo encontrada e a Tabela 11 o comportamento de cada agente,

visando resumir as informações de cada variável, tendo em vista que são 400. Dessa forma, a tabela de comparação entre variáveis estará apresentada no apêndice.

Tabela 10 – Resultado do custo mínimo

Modelo	Custo (<i>fval</i>)	Variação
Inalterado	-5,384.30	-
Alterado	-13,820.00	256.67%

Fonte: Autoria própria

Tabela 11 – Comparativo de Ptotal

Agente	Ptotal (inalterado)	Ptotal (alterado)	Variação
1	-19.33	-16.11	20%
2	-86.02	-71.68	20%
3	-45.74	-38.12	20%
4	-6.36	-5.30	20%
5	-9.11	-7.59	20%
6	-25.24	-21.03	20%
7	-8.11	-6.76	20%
8	-2.72	-2.27	20%
9	-5.33	-4.45	20%
10	-11.93	-9.94	20%
11	-13.34	-11.12	20%
12	50	50.00	0%
13	30	30.00	0%
14	40	40.00	0%
15	30	30.00	0%
16	30	30.00	0%
17	20	20.00	0%
18	50	50.00	0%
19	10	10.00	0%
20	-26.77	-65.63	-174%

Fonte: Autoria própria

A alteração no vetor b resultou em uma variação de 256.67% do $fval$, levando o custo mínimo ótimo para -\$13.820,00, como o intuito é minimizar o custo total a variação representa um ganho. Esse entendimento pode ser observado na equação de SW, aumentando o valor de social welfare.

A análise dos resultados permite observar que os consumidores realizaram o valor de P_{min} de consumo, variando os 20%, e os produtores o valor de P_{max} de produção. A diferença entre o consumo e a produção, o excedente, foi incorporado pelo *main grid* que importou do sistema um total de 65.63 MWh.

A Tabela 12 visa ilustrar a variação nas transações realizadas pelo agente 1, consumidor, mostrando que apesar da variação de consumo representar os 20%, as relações de cada agente são otimizadas e distribuídas de forma diferente.

Tabela 12 – Comparativo variáveis agente 1

Variável	Ptotal (inalterado)	Ptotal (alterado)	Variação
x1	0	0	-
x2	0	0	-
x3	0	0	-
x4	0	0	-
x5	0	0	-
x6	0	0	-
x7	0	0	-
x8	0	0	-
x9	0	0	-
x10	0	0	-
x11	0	0	-
x12	-3.3168	-2.4807	25.21%
x13	-2.4058	-1.9047	20.83%
x14	-2.8516	-2.202	22.78%
x15	-2.4058	-1.9047	20.83%
x16	-2.4058	-1.9047	20.83%
x17	-2.1123	-1.6858	20.19%
x18	-2.8346	-2.4436	13.79%
x19	-0.9939	-0.9349	5.94%
x20	0	0	-

Fonte: Autoria própria

Por fim, conclui-se que a alteração afetou positivamente o sistema elevando o *social welfare* atendendo as restrições impostas, respeitando tanto os limites quanto a reciprocidade imposta. Dessa forma, o objetivo do projeto foi verificado contando com a otimização das variáveis, considerando cada agente, que minimizavam os custos e, conseqüentemente, maximizavam o *social welfare*.

Os resultados das 400 variáveis, x1 até x400, estão apresentados no Apêndice 1, bem como as informações para visualização de todas matrizes usadas no estudo. Os Apêndices 2 e 3 contam, resumidamente, com os códigos aplicados no *software* MATLAB.

6 Conclusões e considerações finais

O presente trabalho implementou um estudo comparativo e analisou modelos diferentes de sistemas que envolviam a dinâmica *peer to peer*. A análise feita restringiu-se ao modelo *full peer to peer*, nesse os agentes se relacionam todos com todos, devendo, entretanto, respeitar as restrições impostas.

Com o objetivo de verificar as transações entre agentes que maximizem a relação produção-consumo atrelada ao custo, foi implementado um modelo de programação quadrática. Esse relacionava parâmetros de custos com parâmetros de produção e consumo.

Diferentemente do estudo de Sousa et al. (2018), que já havia em parte analisado o modelo proposto, foram considerados valores distintos nas restrições de limite inferior. Tal alteração, visa entender o comportamento do sistema em um cenário diferente, onde os consumidores teriam um mínimo de consumo menor e os produtores poderiam atender um mínimo de produção menor.

Os resultados obtidos com as alterações foram satisfatórios. As restrições impostas foram atendidas, observando a reciprocidade de consumidor e produtor e os limites de produção e consumo.

O modelo inicial, sem modificações nos valores dos limites inferiores, obteve um resultado de *social welfare* inferior ao modelo alterado. A comparação indica que com a redução dos limites inferiores os agentes maximizaram os custos aumentando a relação com o *main grid* que passou a consumir o excedente. Esse fenômeno aconteceu pelo fato de ser mais benéfico para o sistema os produtores exportarem sua produção para o *main grid* ao invés de alocarem nos consumidores internos.

A verificação das variáveis indica uma readequação dos valores ótimos após a alteração feita, onde os agentes modificaram suas relações buscando a eficiência do sistema. Sendo assim, o objetivo de identificar as variáveis que otimizassem o modelo e encontrar o custo mínimo foi cumprido, tanto para o modelo inicial, quanto para o novo modelo proposto.

O estudo presente se limitou ao modelo *full peer to peer* e estudos futuros podem aprofundar nos demais modelos propostos por, Sousa et al. (2018), buscando entender o

funcionamento dos mesmos em cenários diversos a fim de comparar e buscar a melhor solução.

Como mencionado, esse é um tema relevante para a sociedade, estando em constante evolução e necessidade de adaptação. Portanto é de extrema importância a realização de estudos como este que guiem e incentivem soluções científicas para o aprimoramento contínuo dos arranjos energéticos.

Referências Bibliográficas

ANEEL. **Mercado contrato bilateral.** Disponível em: http://www.aneel.gov.br/busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fbusca%3Fp_auth%3DYyYTumi9%26p_p_id%3D3%26p_p_lifecycle%3D1%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_state_rcv%3D1&_101_assetEntryId=15046547&_101_type=content&_101_groupId=656835&_101_urlTitle=contrato-bilateral&inheritRedirect=true Acessado em 23/10/2021

ANEEL. **Saiba mais sobre o setor elétrico brasileiro.** Disponível em: https://www.aneel.gov.br/home?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2F&_101_assetEntryId=14476909&_101_type=content&_101_groupId=654800&_101_urlTitle=faq&inheritRedirect=true Acessado em 23/10/2021

BERTSCH, V, et al. **Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany.** Energy, 2016, vol. 114, p. 465-477.

BRASIL. Decreto nº 3.520, de 21 de junho de 2000. **Dispõe sobre a estrutura e o funcionamento do Conselho Nacional de Política Energética - CNPE** e dá outras providências. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/arquivos/conselhos-e-comites/Decreton3520de21dejunhode2000.pdf>. Acesso em: 22 out 2021.

BRUDERMANN, T., YAMAGATA, Y. **Towards an agent-based model of urban electricity sharing.** En 2014 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE). IEEE, 2014. p. 1-5.

CCEE. **Construindo um mercado inteligente de energia elétrica no Brasil,** 2012.

CCEE. **Panorama e perspectivas da comercialização de energia elétrica.** VIII Conferência do Setor Elétrico/Saneamento – Santander. Mar. 2016. Disponível em <<https://pt.slideshare.net/CCEEOficial/panorama-e-perspectivas-da-comercializacao-de-energia-eltrica>>

CASTRO, Nivalde José de; LEITE, André Luís da Silva. **Preço spot de eletricidade: teoria e evidências do caso brasileiro**. Rio de Janeiro, UFRJ, 2010. Disponível em: <https://www.ie.ufrj.br/datacenter/ie/pdfs/seminarios/pesquisa/texto0306.pdf>

ERNI, D. **Day-Ahead Electricity Spot Prices – Fundamental Modelling and the Role of Expected Wind Electricity Infeed at the European Energy Exchange**. University of St. Gallen: St. Gallen, 2012

EURELETRIC, **Prosumers - an integral part of the power system and the market**, June 2015 (Acessado em outubro de 2021) http://www.elecpor.pt/pdf/18_06_2015_Prosumers_an_integral_part_of_the_power_system_and_market_june.pdf

FORNASIER, M., KNEBEL, N. **Comercialização de energia elétrica peer-to-peer, contratos inteligentes e a regulação do acesso à energia no Brasil**. Direito e Desenvolvimento, 2021, vol. 12, no 1, p. 218-237.

ENERGIA. **Tudo Sobre Mercado Livre de Energia**. Relatório técnico. Disponível em: <http://www.genergia.com.br/media/Genergia-Mercado-Livre-de-Energia.pdf> Acessado em 20/10/2021

GERHARDT, T. E., SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

HILLIER, F. S; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

HU, J, et al. **Identifying barriers to large-scale integration of variable renewable electricity into the electricity market: A literature review of market design**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, vol. 81, p. 2181-2195.

HUG, G; KAR, S; WU, C. **Consensus+ innovations approach for distributed multiagent coordination in a microgrid**. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, vol. 6, no 4, p. 1893-1903.

MATLAB. **Quadprog**. Disponível em <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/quadprog.html> >. Acessado em 24 out 2021

MENGELKAMP, Esther, et al. **Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid**. Applied Energy, 2018, vol. 210, p. 870-880.

MORSE, P. M.; KIMBALL, G. E. **Methods of Operations Research**. The Technology Press of Massachusetts Institute of Technology, 1951.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <<https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/library/ods/agenda-2030---transformando-nosso-mundo.html>> Acesso em 22 out 2021.

PAIS, I., PROVASI, G. **Sharing economy: A step towards the reembeddedness of the economy?**. Stato e mercato, Rivista quadrimestrale (3) (2015) 347–378.

PARAG, Y., SOVACOOOL, B K. **Electricity market design for the prosumer era**. Nature energy, 2016, vol. 1, no 4, p. 1-6.

PEREIRA, M., CAMPODONICO N., KELMAN R. **Long-term hydro scheduling based on stochastic models**. Proceedings International Conference Electrical Power Systems Operations and Management – EPSOM’98, vol. 1, p. 1-22. 1998.

POCOCK, J. W. **Operations Research and the Management Consultant**. Booz, Allen & Hamilton, 1953.

RIZKALLA, F. **Migração para o mercado livre de energia: estudo de caso do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro-Escola Politécnica, 2018.

RODRIGUES, L H, et al. **Pesquisa operacional: programação linear passo a passo: do entendimento do problema à interpretação da solução**. São Leopoldo: Editora UNISINOS, 2014.

SCIENCEDIRECT. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-and-sustainable-energy-reviews/about/aims-and-scope>. Acesso em: 21/10/2021.

SELLONI, D. **Codesign for public-interest services**. Research for Development. Springer. 2017.

SILVA, E. L. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. – 4. ed. rev. atual. – Florianópolis: UFSC, 2005.

- SORIN, E., BOBO, L., PINSON, P. **Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation**. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, vol. 34, no 2, p. 994-1004.
- SOUSA, T et al. **Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review**. v1. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2019.
- THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. São Paulo: Cortez & Autores Associados, 1988.
- WU, F F., VARAIYA, P. **Coordinated multilateral trades for electric power networks: theory and implementation**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1999, vol. 21, no 2, p. 75-102.
- ZHANG, C et al. **Peer-to-Peer energy trading in a Microgrid**. Applied Energy, v. 220, p. 1-12, 2018.
- ZHOU, Y; WU, J; LONG, C. **Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework**. Applied energy, 2018, vol. 222, p. 993-1022.
- ZIEL, F., STEINERT, R., HUSMANN, S. **Efficient modeling and forecasting of electricity spot prices**. Energy Economics, 2015, vol. 47, p. 98-111.

APÊNDICES

Os códigos apresentados a seguir foram utilizados no software MATLAB para obtenção dos resultados expostos e discutidos no Capítulo 5. As tabelas apresentadas visam detalhar mais os resultados encontrados.

Apêndice 1 – Tabelas resumidas

Tabela 13 - Representação simplificada da relação entre cada agente e seus limites (Matriz A, vetor b e b alterado)

Agentes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		b	b alterado	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-19.33	-15.46
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	21.70	21.70
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-86.02	-68.81
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	94.20	94.20
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-45.74	-36.59
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	47.80	47.80
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-6.36	-5.09
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	7.60	7.60
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-9.11	-7.29
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	11.20	11.20
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-25.24	-20.19
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	29.50	29.50
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-8.11	-6.49
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	9.00	9.00
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-2.72	-2.18
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	3.50	3.50
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-5.33	-4.27
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	6.10	6.10
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-11.93	-9.54
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	13.50	13.50
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	≤	-13.34	-10.68
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	≤	14.90	14.90
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	50.00	50.00
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	-50.00	-40.00
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	30.00	30.00
13	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	-30.00	-24.00
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	40.00	40.00
14	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	-40.00	-32.00
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	30.00	30.00
15	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	-30.00	-24.00
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	≤	30.00	30.00

x33	-7.1	x93	-0.9	x153	-0.3	x213	-1.4	x273	0.0	x333	0.0	x393	-8.9
x34	-11.2	x94	-1.0	x154	-0.3	x214	-1.5	x274	0.0	x334	0.0	x394	-11.7
x35	-7.1	x95	-0.9	x155	-0.3	x215	-1.4	x275	0.0	x335	0.0	x395	-8.9
x36	-7.1	x96	-0.9	x156	-0.3	x216	-1.4	x276	0.0	x336	0.0	x396	-8.9
x37	-2.7	x97	-0.8	x157	-0.3	x217	-1.2	x277	0.0	x337	0.0	x397	-5.6
x38	-16.7	x98	-1.0	x158	-0.3	x218	-1.6	x278	0.0	x338	0.0	x398	-13.5
x39	-1.1	x99	-0.6	x159	-0.3	x219	-0.8	x279	0.0	x339	0.0	x399	-1.9
x40	0.0	x100	0.0	x160	0.0	x220	0.0	x280	11.7	x340	5.6	x400	0.0
x41	0.0	x101	0.0	x161	0.0	x221	2.5	x281	1.9	x341	2.4		
x42	0.0	x102	0.0	x162	0.0	x222	15.8	x282	7.1	x342	16.7		
x43	0.0	x103	0.0	x163	0.0	x223	7.9	x283	3.9	x343	7.5		
x44	0.0	x104	0.0	x164	0.0	x224	0.7	x284	0.6	x344	0.7		
x45	0.0	x105	0.0	x165	0.0	x225	1.0	x285	0.9	x345	1.0		
x46	0.0	x106	0.0	x166	0.0	x226	3.5	x286	2.4	x346	3.4		
x47	0.0	x107	0.0	x167	0.0	x227	0.9	x287	0.8	x347	0.9		
x48	0.0	x108	0.0	x168	0.0	x228	0.3	x288	0.3	x348	0.3		
x49	0.0	x109	0.0	x169	0.0	x229	0.6	x289	0.5	x349	0.6		
x50	0.0	x110	0.0	x170	0.0	x230	1.4	x290	1.2	x350	1.4		
x51	0.0	x111	0.0	x171	0.0	x231	1.6	x291	1.4	x351	1.6		
x52	-7.9	x112	-3.5	x172	-0.6	x232	0.0	x292	0.0	x352	0.0		
x53	-3.9	x113	-2.4	x173	-0.5	x233	0.0	x293	0.0	x353	0.0		
x54	-5.6	x114	-3.0	x174	-0.6	x234	0.0	x294	0.0	x354	0.0		
x55	-3.9	x115	-2.4	x175	-0.5	x235	0.0	x295	0.0	x355	0.0		
x56	-3.9	x116	-2.4	x176	-0.5	x236	0.0	x296	0.0	x356	0.0		
x57	-2.7	x117	-2.1	x177	-0.5	x237	0.0	x297	0.0	x357	0.0		
x58	-7.5	x118	-3.4	x178	-0.6	x238	0.0	x298	0.0	x358	0.0		
x59	-1.3	x119	-1.0	x179	-0.3	x239	0.0	x299	0.0	x359	0.0		
x60	0.0	x120	0.0	x180	0.0	x240	13.8	x300	8.9	x360	13.5		

Fonte: Autoria própria

Tabela 15 – Resultado para variáveis no modelo inalterado

Variável	P	Variável	P	Variável	P	Variável	P	Variável	P	Variável	P	Variável	P
x1	0.0	x61	0.0	x121	0.0	x181	0.0	x241	2.4	x301	2.4	x361	1.0
x2	0.0	x62	0.0	x122	0.0	x182	0.0	x242	8.8	x302	8.8	x362	1.2
x3	0.0	x63	0.0	x123	0.0	x183	0.0	x243	5.2	x303	5.2	x363	1.4
x4	0.0	x64	0.0	x124	0.0	x184	0.0	x244	0.8	x304	0.8	x364	0.5
x5	0.0	x65	0.0	x125	0.0	x185	0.0	x245	1.2	x305	1.2	x365	0.7
x6	0.0	x66	0.0	x126	0.0	x186	0.0	x246	3.0	x306	3.0	x366	1.1
x7	0.0	x67	0.0	x127	0.0	x187	0.0	x247	1.1	x307	1.1	x367	0.6
x8	0.0	x68	0.0	x128	0.0	x188	0.0	x248	0.3	x308	0.3	x368	0.4
x9	0.0	x69	0.0	x129	0.0	x189	0.0	x249	0.7	x309	0.7	x369	0.4
x10	0.0	x70	0.0	x130	0.0	x190	0.0	x250	1.5	x310	1.5	x370	0.8
x11	0.0	x71	0.0	x131	0.0	x191	0.0	x251	1.8	x311	1.8	x371	0.8
x12	-3.3	x72	-0.9	x132	-1.1	x192	-1.7	x252	0.0	x312	0.0	x372	0.0
x13	-2.4	x73	-0.8	x133	-1.1	x193	-1.5	x253	0.0	x313	0.0	x373	0.0
x14	-2.9	x74	-0.8	x134	-1.1	x194	-1.6	x254	0.0	x314	0.0	x374	0.0
x15	-2.4	x75	-0.8	x135	-1.1	x195	-1.5	x255	0.0	x315	0.0	x375	0.0
x16	-2.4	x76	-0.8	x136	-1.1	x196	-1.5	x256	0.0	x316	0.0	x376	0.0

x17	-2.1	x77	-0.8	x137	-0.9	x197	-1.4	x257	0.0	x317	0.0	x377	0.0
x18	-2.8	x78	-0.9	x138	-1.0	x198	-1.7	x258	0.0	x318	0.0	x378	0.0
x19	-1.0	x79	-0.5	x139	-0.6	x199	-0.8	x259	0.0	x319	0.0	x379	0.0
x20	0.0	x80	0.0	x140	0.0	x200	0.0	x260	3.0	x320	3.0	x380	1.1
x21	0.0	x81	0.0	x141	0.0	x201	0.0	x261	2.9	x321	2.1	x381	0.0
x22	0.0	x82	0.0	x142	0.0	x202	0.0	x262	13.8	x322	3.3	x382	0.0
x23	0.0	x83	0.0	x143	0.0	x203	0.0	x263	7.6	x323	3.1	x383	0.0
x24	0.0	x84	0.0	x144	0.0	x204	0.0	x264	0.8	x324	0.8	x384	0.0
x25	0.0	x85	0.0	x145	0.0	x205	0.0	x265	1.3	x325	1.0	x385	0.0
x26	0.0	x86	0.0	x146	0.0	x206	0.0	x266	3.8	x326	2.6	x386	0.0
x27	0.0	x87	0.0	x147	0.0	x207	0.0	x267	1.1	x327	0.9	x387	0.0
x28	0.0	x88	0.0	x148	0.0	x208	0.0	x268	0.3	x328	0.3	x388	0.0
x29	0.0	x89	0.0	x149	0.0	x209	0.0	x269	0.7	x329	0.7	x389	0.0
x30	0.0	x90	0.0	x150	0.0	x210	0.0	x270	1.6	x330	1.4	x390	0.0
x31	0.0	x91	0.0	x151	0.0	x211	0.0	x271	1.9	x331	1.4	x391	0.0
x32	-19.0	x92	-1.3	x152	-0.4	x212	-2.0	x272	0.0	x332	0.0	x392	-5.3
x33	-8.8	x93	-1.2	x153	-0.3	x213	-1.8	x273	0.0	x333	0.0	x393	-3.0
x34	-13.8	x94	-1.3	x154	-0.3	x214	-1.9	x274	0.0	x334	0.0	x394	-4.0
x35	-8.8	x95	-1.2	x155	-0.3	x215	-1.8	x275	0.0	x335	0.0	x395	-3.0
x36	-8.8	x96	-1.2	x156	-0.3	x216	-1.8	x276	0.0	x336	0.0	x396	-3.0
x37	-3.3	x97	-1.0	x157	-0.3	x217	-1.4	x277	0.0	x337	0.0	x397	-2.4
x38	-22.2	x98	-1.1	x158	-0.3	x218	-1.9	x278	0.0	x338	0.0	x398	-5.0
x39	-1.2	x99	-0.7	x159	-0.4	x219	-0.8	x279	0.0	x339	0.0	x399	-1.1
x40	0.0	x100	0.0	x160	0.0	x220	0.0	x280	4.0	x340	2.4	x400	0.0
x41	0.0	x101	0.0	x161	0.0	x221	3.3	x281	2.4	x341	2.8		
x42	0.0	x102	0.0	x162	0.0	x222	19.0	x282	8.8	x342	22.2		
x43	0.0	x103	0.0	x163	0.0	x223	9.4	x283	5.2	x343	8.6		
x44	0.0	x104	0.0	x164	0.0	x224	0.9	x284	0.8	x344	0.9		
x45	0.0	x105	0.0	x165	0.0	x225	1.3	x285	1.2	x345	1.1		
x46	0.0	x106	0.0	x166	0.0	x226	4.7	x286	3.0	x346	3.8		
x47	0.0	x107	0.0	x167	0.0	x227	1.1	x287	1.1	x347	1.0		
x48	0.0	x108	0.0	x168	0.0	x228	0.4	x288	0.3	x348	0.3		
x49	0.0	x109	0.0	x169	0.0	x229	0.8	x289	0.7	x349	0.7		
x50	0.0	x110	0.0	x170	0.0	x230	1.7	x290	1.5	x350	1.7		
x51	0.0	x111	0.0	x171	0.0	x231	2.0	x291	1.8	x351	1.9		
x52	-9.4	x112	-4.7	x172	-0.8	x232	0.0	x292	0.0	x352	0.0		
x53	-5.2	x113	-3.0	x173	-0.7	x233	0.0	x293	0.0	x353	0.0		
x54	-7.6	x114	-3.8	x174	-0.7	x234	0.0	x294	0.0	x354	0.0		
x55	-5.2	x115	-3.0	x175	-0.7	x235	0.0	x295	0.0	x355	0.0		
x56	-5.2	x116	-3.0	x176	-0.7	x236	0.0	x296	0.0	x356	0.0		
x57	-3.1	x117	-2.6	x177	-0.7	x237	0.0	x297	0.0	x357	0.0		
x58	-8.6	x118	-3.8	x178	-0.7	x238	0.0	x298	0.0	x358	0.0		
x59	-1.4	x119	-1.1	x179	-0.4	x239	0.0	x299	0.0	x359	0.0		
x60	0.0	x120	0.0	x180	0.0	x240	5.3	x300	3.0	x360	5.0		

Fonte: Autoria própria

Apêndice 2 – Código utilizado para a programação do modelo inalterado

```
%Programação quadrática aplicada a um modelo de mercado P2P Completo
%Baseado no modelo IEEE 14-bus

% link do Google Planilhas com as matrizes utilizadas:
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1WnHrGGWnIyUAXws99G5S5SlAHJT_YF9/edit?usp=sharing&ouid=106178289668893790270&rtpof=true&sd=true

function name %Nome genérico para a função

Ax = []; %Presente na aba 'Matrizes A e b' do link referido
bx = [-19.33;21.70;-86.02;94.20;-45.74;47.80;-6.36;7.60;-9.11;11.20;-
25.24;29.50;-8.11;9.00;-2.72;3.50;-5.33;6.10;-11.93;13.50;-
13.34;14.90;50.00;-50.00;30.00;-30.00;40.00;-40.00;30.00;-30.00;30.00;-
30.00;20.00;0.00;50.00;0.00;10.00;0.00;inf;0.00;0.00;inf;0.00;...;0.00];

%Os valores de [0.00,...,0.00] representam as restrições associadas as 400
variáveis de x1 até x400, sendo 400 zeros.
%Presente na aba 'Matrizes A e b' do link referido

Aeq = []; %Presente na aba 'Matriz Aeq' do link referido
beq = zeros(400,1); %Matriz é igual a zero
H = []; %Presente na aba 'Matriz H' do link referido
f = []; %Presente na aba 'Matriz f' do link referido

[x,fval] = quadprog(H,f,Ax,bx,Aeq,beq %Função quadrática

%x resultante está presente na aba 'Matriz X e fval' do link referido
%fval resultante está presente na aba 'Matriz X e fval' do link referido

end
```

Apêndice 3 – Código utilizado para a programação do modelo alterado

```
%Programação quadrática aplicada a um modelo de mercado P2P Completo
%Baseado no modelo IEEE 14-bus

% link do Google Planilhas com as matrizes utilizadas:
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1WnHrGGWGNiYUAXwS99G5S5SlAHJT_YF9/edit?usp=sharing&ouid=106178289668893790270&rtpof=true&sd=true

function name %Nome genérico para a função

Ax = []; %Matriz 442 x 400. Presente na aba 'Matrizes A e b' do link
referido
bx = [-15.46127696;21.70;-68.81;94.20;-36.59;47.80;-5.09;7.60;-7.29;11.20;-
20.19;29.50;-6.49;9.00;-2.18;3.50;-4.27;6.10;-9.54;13.50;-
10.68;14.90;50.00;-40.00;30.00;-24.00;40.00;-32.00;30.00;-24.00;30.00;-
24.00;20.00;0.00;50.00;0.00;10.00;0.00;inf;0.00;0.00;inf;0.00;....;0.00];

%Os valores de [0.00,...,0.00] representam as restrições associadas as 400
variáveis de x1 até x400, sendo 400 zeros.
%Presente na aba 'Matrizes A e b' do link referido

Aeq = []; %Matriz 400 x 400. Presente na aba 'Matriz Aeq' do link referido
beq = zeros(400,1); %Matriz é igual a zero
H = []; %Matriz 400 x 400. Presente na aba 'Matriz H' do link referido
f = []; %Matriz 400 x 1. Presente na aba 'Matriz f' do link referido

[x, fval] = quadprog(H, f, Ax, bx, Aeq, beq %Função quadrática

%x resultante está presente na aba 'Matriz X e fval' do link referido
%fval resultante está presente na aba 'Matriz X e fval' do link referido

end
```
