



Análise e Simulação de Mercados Locais de Energia Elétrica

ALLON SOARES DA SILVA

Fevereiro de 2019

ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE MERCADOS LOCAIS DE ENERGIA ELÉTRICA

Allon Soares da Silva



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2019

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia do
Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP/IPP) e do Trabalho de Conclusão de Curso
do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC – Câmpus Florianópolis). Este trabalho foi elaborado
no âmbito do acordo internacional de Dupla Titulação entre o Instituto Superior de
Engenharia do Porto (Portugal) e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina (Brasil) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia pelo ISEP/IPP e de Engenheiro
Eletricista pelo IFSC.

Candidato: Allon Soares da Silva, Nº 1171910, 1171910@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professora Doutora Isabel Cecília Correia da Silva Praça Gomes
Pereira, icp@isep.ipp.pt, e Professor Doutor Everthon Taghori Sica, sica@ifsc.edu.br

Coorientação: Professor Doutor Sérgio Filipe Carvalho Ramos, scr@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2019

*Dedico este trabalho aos meus pais Alcilenia e Evaldo, sem eles nada na
minha vida seria possível...*

Agradecimentos

Não posso deixar de agradecer ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) pela formação acadêmica de excelência que me foi proporcionada através, principalmente, de seu corpo docente. Agradeço também ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP/IPP) que, através do acordo internacional de Dupla Titulação e de seu corpo docente me proporcionaram um aprendizado técnico e social inenarrável. Agradeço ainda ao Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento (GECAD) pela estrutura proporcionada para o desenvolvimento de trabalhos voltados à pesquisa.

Gostaria de agradecer a todos os professores que de alguma forma contribuíram para minha formação acadêmica e social. Nomeadamente, agradeço à professora Dra. Eng. Isabel Praça, ao professor Dr. Eng. Everthon Sica e ao professor Dr. Eng. Sérgio Ramos pelas valiosas contribuições, disponibilidade e grande empenho para concretização da presente dissertação.

Certamente agradeço muito ao Me. Eng. Bruno Canizes, ao Dr. Eng. Tiago Pinto e Me. Eng. Gabriel Santos pelo valioso suporte sempre que precisei. Agradeço pela postura profissional e empenho despendido para contribuir com o presente trabalho.

Aos meus pais, Alcilenia Batista Soares e Evaldo Rosa da Silva, dedico imensa gratidão por todo o suporte psicológico, financeiro e ao amor que me proporcionaram. Certamente sem eles nada faria sentido na minha vida. Agradeço também às minhas irmãs Talita, Michele e Aline, assim como aos meus familiares e amigos, que me ajudaram de alguma forma no meu desenvolvimento.

Também agradeço à Betina Michielin e sua família, pela torcida e apoio em momentos que precisei.

Resumo

Os mercados locais de energia elétrica são uma tendência latente na evolução dos aspetos relacionados à comercialização de energia elétrica em todo o mundo. Consumidores produtores e outros agentes que podem compor um mercado local de energia devem ser legitimados num contexto mercadológico de acordo com um modelo de negócios que possa prever a interação do mercado local com o mercado grossista.

Desta forma, a presente dissertação apresenta uma revisão bibliográfica sobre os mercados de energia elétrica do Brasil e de Portugal e analisa o potencial de disseminação de mercados locais de energia nestes contextos. Além disto, apresenta, ainda, um modelo de negócio para mercados locais, na perspectiva de um órgão municipal licenciado, que descreve as diretrizes para a interação entre agentes de um mercado local de energia e mercado global. É, também, apresentada uma revisão bibliográfica sobre técnicas ligadas à inteligência artificial e apoio à decisão na conjuntura de mercados de energia elétrica. É discutido o balanço de energia em nível local e a definição dos preços de compra e venda de energia de acordo com simulações usando técnicas de previsão e descoberta de conhecimento.

O órgão municipal licenciado é um agente estratégico para a operação de um mercado local de energia, seguindo as linhas do modelo de negócios proposto e a configuração do modelo municipal. Agentes em nível local devem interagir com o mercado grossista por meio da figura do órgão municipal licenciado. O simulador MASCEM, desenvolvido pelo GECAD, é utilizado para modelar o comportamento de diferentes entidades que participam dos mercados de eletricidade e simular os preços de compra e venda de energia no modelo de negócios proposto. Desta forma, é viabilizada a análise da inserção de mercados locais em diferentes contextos mercadológicos.

Dois estudos de caso são realizados para destacar diferentes abordagens do órgão municipal licenciado. A primeira abordagem descreve uma posição liberalizada da entidade para que os agentes no mercado local possam interagir mais objetivamente com o mercado grossista. Na segunda abordagem, a interação com o mercado grossista de energia é restrita ao órgão municipal licenciado. Os dados utilizados no estudo de caso são provenientes da cidade

modelo definida e baseada num modelo físico da cidade inteligente GECAD-BISITE constituída a partir da cidade de Salamanca na Espanha.

Palavras-Chave

Mercados locais de energia, órgão municipal licenciado, mercado grossista, mercado de energia brasileiro, mercado de energia português, modelo de negócio, simulador MASCEM.

Abstract

Local energy markets are a latent trend in the evolution of aspects related to the commercialization of electric energy around the world. Prosumers and other agents that can compose a local energy market must be legitimized in a market context according to a business model that can predict the interaction of the local market with the wholesale market.

In this way, the present dissertation presents a bibliographical review on the energy markets of Brazil and Portugal and analyses the potential of dissemination of local energy markets in these contexts. In addition, it presents a business model for local energy markets from the perspective of a licensed municipal entity which describes the guidelines for the interaction between agents in a local and global market context. A literature review on techniques related to artificial intelligence and decision support in the conjuncture of electric energy markets is also presented. It also describes the energy balance at the local level and the definition of energy purchase and sale prices according to simulations using forecasting and knowledge discovery techniques.

The fully licensed municipal utility is a strategic agent for the operation of a local energy market according to the lines of the proposed business model. Agents at the local level, such as local generators, prosumers, municipal generators, and traditional consumers, must interact with the wholesale market through the figure of the fully licensed municipal utility. The MASCEM simulator, developed by GECAD, is capable of modelling the behaviour of different entities that participate in electricity markets, such as market facilitators, producers, consumers and market operators. MASCEM is a fundamental tool for the definition of energy purchase and sale prices in the proposed business model and analysis of the insertion of local markets in different market contexts.

Two case studies are conducted to highlight different approaches of the fully licensed municipal utility. The first approach describes a liberalized position of the entity so that agents in the local market can interact more objectively with the wholesale market. In the second approach, the interaction with the wholesale energy market is restricted to the fully licensed municipal utility. The data used in the case studies are derived from the model city

defined and based on a physical model of the smart city GECAD-BISITE constituted from the city of Salamanca in Spain.

Keywords

Local energy markets, fully licensed municipal utility, wholesale market, Brazilian energy market, Portuguese energy market, business model, MASCEM simulator.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XVII
ACRÓNIMOS	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	2
1.2.MOTIVAÇÕES	2
1.3.OBJETIVOS	3
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO DE DISSERTAÇÃO.....	3
2. MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL E DE PORTUGAL	5
2.1.ESTRUTURA GERAL DO MERCADO DE ENERGIA BRASILEIRO	12
2.1.1. <i> Mercado de Curto Prazo no Brasil</i>	15
2.1.1.1. PREÇO DE LIQUIDAÇÃO DE DIFERENÇAS	15
2.1.1.2. MECANISMO DE REALOCAÇÃO DE ENERGIA	17
2.1.1.3. BALANÇO ENERGÉTICO	18
2.1.2. <i> Ambientes de Contratação Livre e Regulada</i>	20
2.2.ESTRUTURA GERAL DO MERCADO DE ENERGIA PORTUGUÊS	21
2.2.1. <i> Operadores de Mercado</i>	23
2.2.2. <i> Agentes de Mercado</i>	24
2.2.3. <i> Precificação da Energia Elétrica no MIBEL</i>	25
2.3.ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MERCADOS DE ENERGIA DO BRASIL E DE PORTUGAL	27
3. MERCADOS LOCAIS DE ENERGIA	31
3.1.ASPETOS DE PRODUÇÃO DISTRIBUÍDA.....	34
3.2.ENTIDADES DOS MERCADOS LOCAIS	37
3.2.1. <i> Delineamento de Mercados Locais de Energia</i>	37
3.2.2. <i> Rede Local de um Mercado Local de Energia</i>	42
3.3.MODELOS DE NEGÓCIOS PARA MERCADOS LOCAIS.....	44
3.4.MODELOS DE NEGÓCIOS PARA O SETOR ELÉTRICO.....	48
3.4.1. <i> Modelos de Hall e Roelich</i>	50
3.4.2. <i> Delineamento de Um Novo Modelo de Negócios para Mercados Locais</i>	55

3.5. ANÁLISE CRÍTICA DE MERCADOS LOCAIS	62
4. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APOIO À DECISÃO NO CONTEXTO DE MERCADOS DE ENERGIA	65
4.1. DATA MINING	66
4.1.1. Clustering	68
4.1.1.1. TIPOS DE TÉCNICAS	69
4.1.1.2. MÉTODOS	71
4.1.2. Classificação	79
4.1.2.1. ÁRVORE DE DECISÕES	79
4.1.2.2. VIZINHO MAIS PRÓXIMO	80
4.1.2.3. MÉTODO DE MÁQUINA DE VETORES DE SUPORTE	81
4.1.3. Regressão	82
4.2. MACHINE LEARNING	83
4.3. SIMULAÇÃO DE MERCADOS DE ENERGIA	86
4.4. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR MASCEM	88
4.4.1. Visão Geral do MASCEM	88
4.4.2. Estratégias para Definição de Ofertas	90
4.4.2.1. ESTRATÉGIA PARA A DEFINIÇÃO DE POTÊNCIA	91
4.4.2.2. ESTRATÉGIA PARA A DEFINIÇÃO DE PREÇO	92
4.4.3. Integração e Interconectividade	93
5. CASO DE ESTUDO	97
5.1. DESCRIÇÃO DO MODELO DE CIDADE	97
5.2. SIMULAÇÕES	101
5.2.1. Preços de Compra e Venda	102
5.2.2. Cenário 1 - Negociação Intramercado Local	103
5.2.3. Cenário 2 - Negociação no Mercado Grossista	105
5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS	110
6. CONCLUSÕES GERAIS E PERSPETIVAS FUTURAS	113
6.1. CONCLUSÕES	113
6.2. CONTRIBUTOS	115
6.3. TRABALHOS FUTUROS	116
ANEXO A. CURVAS DE GERAÇÃO DOS AGENTES DO MERCADO LOCAL CONSIDERADO NA SIMULAÇÃO	125
ANEXO B. CURVAS DE DEMANDA DOS AGENTES DO MERCADO LOCAL CONSIDERADO NA SIMULAÇÃO	127

Índice de Figuras

Figura 1	Modelos de organização básica do mercado grossista [4]	10
Figura 2	Relação do módulo mecanismo de realocação de energia com o cálculo de exposição e apuração de diferenças [10]	18
Figura 3	Balanço energético da energia comercializada no mercado de curto prazo [11]	19
Figura 4	Esquema geral do balanço energético brasileiro [11]	19
Figura 5	Relações percentuais de propriedade entre operadores no MIBEL [20]	24
Figura 6	Mapa com dimensões geográficas do mercado brasileiro e do MIBEL	28
Figura 7	Esquema estrutural do projeto e-Price [27]	33
Figura 8	Diagrama de blocos proposto em [29]	35
Figura 9	Possíveis categorizações de mercados locais de energia [32]	37
Figura 10	Ilustração de um sistema elétrico com a aplicação da abordagem CPSA [33]	40
Figura 11	Modelo de comunicação num CMS [33]	41
Figura 12	Representação gráfica da interação da interface I-DEMS com a operação da <i>microgrid</i> [36]	43
Figura 13	Camadas de negócios [37]	44
Figura 14	Modelo <i>Canvas</i> de Osterwalder [38]	46
Figura 15	Modelo <i>Canvas</i> de IDEO [39]	47
Figura 16	Modelo <i>Canvas fluidminds</i> [40]	48

Figura 17	Modelo clássico [42]	51
Figura 18	Modelo de agregação local [42]	52
Figura 19	Modelo municipal [42]	53
Figura 20	Modelo ponto-a-ponto com unidade de balanceamento local [42]	54
Figura 21	Algoritmo elementar para a obtenção de dados no mercado local proposto	57
Figura 22	Modelo <i>Canvas</i> proposto para implementação de um mercado local	60
Figura 23	Classificação de modelos de previsão de preços [48]	67
Figura 24	Características do método <i>k-means</i> [52]	72
Figura 25	Exemplificação de um conjunto de dados com diferentes densidades [50]	73
Figura 26	Exemplo de classificação de pontos no algoritmo DBSCAN [52]	74
Figura 27	Mapas de auto-organização representados através de estrutura hexagonal e grade de pontos [50]	76
Figura 28	Passos da etapa de atualização dos neurônios tomando por base o neurônio W_i [50]	78
Figura 29	Tópicos abordados no campo de estudos relacionado a machine learning [69]	85
Figura 30	Sequência de negociação para mercados de eletricidade no horizonte de um dia [61]	88
Figura 31	Esquema colaborativo entre sistemas multiagentes independentes [64]	95
Figura 32	Esquema do sistema elétrico estruturado para o mercado local de energia	99

Índice de Tabelas

Tabela 1	Estruturas de competição no setor elétrico [5]	7
Tabela 2	Comparação entre ambientes de contratação livre e regulado [12]	20
Tabela 3	Resumo comparativo entre o mercado de energia brasileiro e o MIBEL	29
Tabela 4	Descrição de áreas do modelo Canvas proposto por Osterwalder [38]	45
Tabela 5	Descrição de áreas do modelo Canvas proposto por IDEO [39]	46
Tabela 6	Descrição das áreas do modelo fluidminds [40]	47
Tabela 7	Descrição de áreas do modelo Canvas proposto para mercados locais	59
Tabela 8	Descrição dos agentes para definição do mercado local de energia	98
Tabela 9	Resumo dos resultados obtidos a partir da simulação de negociação intramercado local	103
Tabela 10	Efetividade de comercialização de acordo com a sistemática de negociação no mercado local	112

Índice de Gráficos

Gráfico 1	Injeção de potência em função da velocidade do vento	101
Gráfico 2	Efetividade da comercialização de montantes de energia elétrica intramercado considerando os grupos de agentes	104
Gráfico 3	Proporção percentual de lucros e custos relacionados à comercialização de energia elétrica entre agentes no mercado local de energia	105
Gráfico 4	Curvas de demanda para compra no mercado grossista	107
Gráfico 5	Curvas de demanda efetivamente comprada no mercado grossista	107
Gráfico 6	Montantes de energia não efetivamente comprados no mercado grossista	108
Gráfico 7	Curvas de demanda para venda no mercado grossista	109
Gráfico 8	Curvas de demanda efetivamente vendida no mercado grossista	109
Gráfico 9	Montantes de energia não efetivamente vendidos no mercado grossista	110

Acrónimos

ACL	– Ambiente de Contratação Livre
ACR	– Ambiente de Contratação Regulado
ALBidS	– <i>Adaptive Learning for Strategic Bidding System</i>
AMES	– <i>Agent-based Modelling of Electricity Systems</i>
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE	– Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CMS	– <i>Cluster Management System</i>
CNAEE	– Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica
CPSA	– <i>Clustering Power System Approach</i>
EDP	– Energias de Portugal
EMCAS	– <i>The Electricity Market Complex Adaptive System</i>
ERSE	– Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FERC	– <i>Federal Energy Regulatory Commission</i>
GAPEX	– <i>Genoa Artificial Power Exchange</i>
I-DEMS	– <i>Intelligent Dynamic Energy Management System</i>
MASCEM	– <i>Multiagent Simulator of Competitive Electricity Markets</i>
MIBEL	– Mercado Ibérico de Electricidade
OMI	– Operador de Mercado Ibérico

- ONS – Operador Nacional do Sistema
- PLD – Preço de Liquidação de Diferenças
- Projeto RE-SEB – Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro
- SEPIA – *Simulator for Electric Power Industry Agents*
- SREMS – *The Short-Medium run Electricity Market Simulator*

1. INTRODUÇÃO

A constante evolução de setores elétricos espalhados por todo o globo é evidente. Tal evolução é notória em virtude da necessidade de melhorar os serviços relacionados ao fornecimento de energia elétrica e acompanhar inovações tecnológicas relacionadas à engenharia eletrotécnica e às tecnologias de comunicação.

Mercados locais de energia são uma tendência em que os consumidores assumem uma postura mais próxima de um cliente, ao passo que podem definir a quem comprarão a energia elétrica necessária para suprir sua demanda energética, mas também são tidos como fornecedores, pois podem vender sua produção. A comercialização local de energia transcende tal postura através da possibilidade de vender energia elétrica gerada através de *microgrids*¹, *nanogrids*² ou até *picogrids*³. Vale ressaltar também a possibilidade de adoção de políticas de *net metering*, caso seja interessante do ponto de vista econômico.

Em virtude do conceito de mercados locais de energia ser um tanto quanto emergente, a relação que tais mercados devem ter diante da ossada grossista é um campo de estudo com elevado potencial bibliográfico. Diante deste fato, é notável que estruturas de mercado

¹ Rede estruturada considerando produção distribuída e gestão inteligente da geração.

² Rede implementada no nível dos circuitos e considera geração de energia a partir de atividades de lazer.

³ Pequenas redes utilizadas no carregamento dispositivos eletrônicos.

focadas na comercialização energia elétrica são ambientes complexos e que dispõem um altíssimo volume de dados gerados num fluxo igualmente elevado. Exemplos disto são as estruturas de mercado estabelecidas no Brasil e em Portugal, exploradas mais à frente.

Para que seja possível tomar decisões coerentes relacionadas à compra ou venda de energia elétrica de acordo com um modelo de negócios e na conjuntura de mercados locais de energia, se faz relevante o uso de técnicas sofisticadas de *forecasting*. Dentre os vários simuladores de mercados de energia encontrados na literatura, o *Multiagent Simulator of Competitive Electricity Markets* (MASCEM) se mostra extremamente promissor, do ponto de vista técnico, para simular mercados locais de energia, razão pela qual foi usado nos cenários apresentados nesta dissertação.

Sendo assim, o presente trabalho foca-se na realização de um estudo sobre mercados locais de energia que relaciona a interação tida com o mercado grossista, modelos de negócios para mercados locais e técnicas relacionadas a *data mining* e *machine learning*, tendo em vista as mais valias que trazem a este contexto.

1.1. DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

De acordo com Lakatos e Marconi [1], a delimitação de um estudo acontece a partir do ato de colocar limites a uma investigação científica. Deste modo, os limites do presente estudo podem ser determinados por meio de três tópicos: assunto (i); extensão (ii) e série de fatores (iii).

O assunto (i) focal da presente dissertação é relacionado aos mercados locais de energia elétrica e ligações com mercados num contexto global. Neste sentido, sobre a extensão (ii) do estudo, são considerados os mercados de energia estabelecidos no Brasil e em Portugal. A série de fatores (iii) define-se como a aplicação de técnicas utilizadas no segmento de inteligência artificial e descoberta de conhecimento fundamentais para que sejam criados diferentes cenários referentes à operação de mercados locais de energia. O nível de profundidade bibliográfica adotado define-se como sendo o necessário para que os estudos de caso sejam fundamentados.

1.2. MOTIVAÇÕES

O desenvolvimento da presente dissertação se deu em virtude de um conjunto de motivações. Tais motivações podem ser evidenciadas a partir da necessidade de dedicação, por parte da comunidade científica, focada no desenvolvimento de estudos referentes aos mercados locais de energia.

A linha de estudo relacionada aos mercados locais de energia é considerada emergente no mundo. Ainda não é realidade nos mercados de energia instaurados no Brasil e em Portugal, mas é um campo que dispõe de grande potencial de desenvolvimento em virtude da crescente disseminação de geração renovável de energia elétrica. Além disto, o uso de técnicas de inteligência artificial com grande potencial de inovação se traduz em uma motivação evidente e que pode ser visto como um conhecimento diferenciado para um engenheiro eletrotécnico. Outro fator motivador relevante é a expansão de horizontes acerca dos mercados de energia elétrica, em particular os mercados locais.

1.3. OBJETIVOS

A presente dissertação dispõe de cinco objetivos principais. São eles:

- Revisar o estado da arte sobre a organização de mercados de energia elétrica;
- Realizar estudos bibliográficos sobre a organização de mercados de energia elétrica estabelecidos no Brasil e em Portugal;
- Analisar estruturas de mercados locais de energia elétrica e a aplicação de modelos de negócios;
- Estudar técnicas de análise de dados no contexto de mercados de energia elétrica;
- Analisar, a partir de simulações realizadas com base em dados reais, mercados locais de energia.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO DE DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por seis capítulos. Estes são desenvolvidos ao longo do trabalho para que os objetivos supracitados sejam alcançados.

O capítulo 1 descreve uma contextualização sobre os temas abordados. Além disto, descreve também os objetivos e a estrutura do trabalho desenvolvido.

No capítulo 2 é realizada uma revisão do estado da arte no que se refere aos mercados de energia elétrica. As estruturas mercadológicas levadas em consideração são referentes ao mercado de energia brasileiro e ao mercado de energia português. Uma análise comparativa entre estes dois mercados é realizada e apresentada neste capítulo.

Tendo em vista que mercados locais de energia são entendidos como o foco da presente dissertação, o capítulo 3 discorre sobre diferentes estruturas desta modalidade de comercialização local de energia. Além disto, modelos de negócios são descritos para embasar a proposta de um modelo de negócios focado na implementação de mercados locais, de acordo com a bibliografia consultada. É realizada também uma análise crítica sobre tais estruturas tidas como foco da dissertação.

Já no capítulo 4 são abordados aspetos relacionados à inteligência artificial para dar suporte à decisão na conjuntura de mercados de energia. É realizada uma breve revisão de simuladores de mercados de energia elétrica e uma descrição do simulador MASCEM. Neste capítulo é apresentada a base teórica, de acordo com a literatura, para que os estudos de caso sejam estruturados.

O capítulo 5 discorre propriamente sobre o estudo de caso que relacionam mercados locais, interações com o mercado grossista, análise intramercado local e técnicas de descoberta de conhecimento de acordo com estratégias de *forecasting*, implementadas no simulador MASCEM. A partir das simulações do caso de estudo, são obtidos resultados sobre a dinâmica de mercados locais de energia e é realizada uma análise dos mesmos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais e perspectivas de trabalhos futuros. Tais conclusões são baseadas nos contributos apresentados, resultados obtidos e nas análises realizadas.

2. MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL E DE PORTUGAL

Do ponto de vista histórico, setores elétricos em todo o planeta evoluíram a partir de uma estrutura verticalizada de monopólios estatais ou privados. Tais empresas monopolistas eram responsáveis por gerir os componentes primários relacionados ao suprimento de energia elétrica, como geração, transmissão, distribuição, entre outros. O desempenho dos monopólios regulados variava dependendo do país em questão, sendo notável que países mais economicamente desenvolvidos apresentavam melhor *performance*. Em contrapartida, países desenvolvidos apresentavam elevados custos na estruturação e operação dos setores de eletricidade [2].

É importante destacar os mercados de energia elétrica que se formaram na década de 80 do século XX, durante o processo de liberalização de setores elétricos. Tais mercados eram, essencialmente, alicerçados através de sistemas elétricos com geração termoelétrica movida a combustíveis fósseis e com geração nuclear. Em mercados de energia elétrica baseados na geração termoelétrica comumente ocorre a comercialização da energia considerando um curto prazo. Este fato se dá pois centrais geradoras termoelétricas são elementos chave na

formação do preço da energia, culminando numa considerável previsibilidade no preço da energia elétrica. Sendo assim, nota-se a existência de uma tendência de que o preço horário seja formulado a partir de centrais térmicas com custos variáveis, geralmente mais onerosos, para que a demanda energética seja atendida. É possível inferir que nestes mercados de energia os preços associados ao consumo de energia elétrica estão vinculados diretamente aos preços dos combustíveis utilizados na geração termoelétrica [3]. Mas esta é uma circunstância que não se sustenta por muito tempo em virtude dos avanços que tecnologias relacionadas ao desenvolvimento sustentável estão alcançando.

Quando determinado mercado de energia acaba por configurar elevados custos associados ao investimento e à operação, ocorre a elevação das tarifas de consumo de energia elétrica ou a necessidade de implementação de subsídios por parte do Estado. Levando em consideração esta ótica, nota-se que ao longo do tempo certas atividades de setores elétricos de certos Estados foram sendo transferidas para instituições de capital privado. Este fato veio a instaurar uma transformação radical no panorama de mercados de energia elétrica distribuídos pelo mundo [4].

Desta forma, considerando a existência de uma concorrência plena em determinado mercado de energia elétrica e uma planta de geração fundamentalmente térmica, os preços da energia elétrica apresentam uma tendência de se igualar aos custos médios de produção. Caso os preços da energia elétrica tendam a superar os custos médios de produção de forma substancial, novos geradores de energia elétrica, que apresentam características mais eficientes, serão atraídos para o mercado e serão impostos preços mais competitivos. Desta forma, haverá o restabelecimento da igualdade de equilíbrio entre preços da energia elétrica e custos médios de produção. A ocasião onde os preços da energia elétrica estão abaixo do custo médio da produção acarreta na desativação de plantas geradoras e os preços relacionados ao consumo de energia elétrica são elevados em virtude da redução da oferta. No mesmo sentido, haverá o restabelecimento da igualdade de equilíbrio entre preços da energia elétrica e custos médios de produção [3].

Hunt e Shuttleworth [5] apontam que a indústria de energia elétrica pode ser segmentada em quatro estruturas. Tais estruturas são descritas na Tabela 1 e nos parágrafos seguintes.

Tabela 1 Estruturas de competição no setor elétrico [5]

	Modelo 1	Modelo 2	Modelos 3	Modelo 4
Características	Monopólio	Monopsónio ⁴	Competição no atacado	Competição no varejo
Competição na geração	Inexistente	Considerável	Considerável	Considerável
Escolha do varejista	Inexistente	Inexistente	Considerável	Considerável
Escolha do consumidor	Inexistente	Inexistente	Inexistente	Considerável

Na Tabela 1, o modelo 1 é definido como monopólio tradicional vinculado às empresas que são verticalmente organizadas. Já o modelo 2 dispõe de competição na geração, contudo, a energia produzida por empresas geradoras é vendida com exclusividade para uma empresa compradora. A competição ocorre por meio do acesso de todos os geradores homologados às linhas de transmissão e com a definição de um preço limite (*price cap*) para a compra de energia, onde há uma única possibilidade de realizar a venda de energia elétrica produzida. Em outras palavras, cogeneradoras e produtores independentes são submetidos a certo grau de competição para suprir a demanda estabelecida pela agência compradora (comumente estatal). Ao nível de distribuição, como não existem opções de compra além da agência supracitada, é necessária a imposição de ações administrativas pela agência reguladora sobre o preço cobrado por distribuidoras e por distribuidoras sobre os consumidores finais. Ou seja, no modelo 2, assim como o modelo 1, é possível identificar que certas entidades possuem elevado poder de mercado.

O modelo 3 apresenta competição na geração e na distribuição de energia elétrica. Em outras palavras, geradoras e distribuidoras competem para vender energia. Neste modelo é essencial que as empresas de ambos os segmentos (geração e distribuição) assumam uma postura

⁴ Estrutura de mercado em que há apenas um único comprador para uma gama de vendedores.

desverticalizada e tenham livre acesso ao sistema de transmissão. Neste modelo, empresas já estabelecidas precisam competir com as empresas iniciantes de tal forma que os preços médios da energia gerada tendem a diminuir. Já no modelo 4 é possível estabelecer certa relação de semelhança para com o modelo 3, mas com a ressalva de que no modelo 4 há possibilidade de que os consumidores finais, em um nível retalhista, escolham a quem comprarão energia elétrica.

A dinâmica do equilíbrio entre preços da energia elétrica e custos médios de produção num mercado de energia não tradicional e baseado em fontes alternativas de geração de energia acaba por ser semelhante à apresentada por mercados de energia com base na geração termoelétrica, mas com ressalva quanto ao aprimoramento da eficiência da conjuntura do sistema elétrico. Do ponto de vista de inovação tecnológica, a geração tradicional muito provavelmente não irá apresentar grandes novidades. Em contrapartida, as fontes alternativas se desenvolvem a passos largos e com perspectivas de redução significativa nos custos associados à geração de energia elétrica.

De Castro *et al.* [3] aponta que a principal vantagem na criação do mercado competitivo de energia com relação ao desenho económico tradicional do setor elétrico apoia-se no potencial de redução de custos. Tal apontamento é justificado pelo fato de os agentes individuais construírem estruturas de geração de energia elétrica mais eficientes para que os custos sejam reduzidos e os lucros elevados. Vale ressaltar que o aumento da oferta acaba por reduzir os preços da energia elétrica, como elucidado anteriormente, sendo que boa parte do ganho de eficiência acaba por ser transferido para os consumidores. Esta dinâmica acaba por se mostrar mais interessante que o formato de remuneração baseado nos custos, justamente pelo estímulo implícito em relação à eficiência da operação do sistema elétrico.

Em síntese, é expectável que a reestruturação do setor elétrico de um Estado tenha por objetivo viabilizar benefícios de longo prazo para a sociedade. Tais benefícios acabam por ser distribuídos de maneira apropriada aos usuários, através de um sistema de preços capaz de refletir a alocação eficiente dos custos económicos instituídos pelo sistema de fornecimento de energia elétrica [2].

Um dos primeiros Estados que reestruturou sua conjuntura do setor elétrico foi o Reino Unido, através da proclamação intitulada de *The Electric Act* (iniciado em 1989) que serviu

de gatilho para a liberalização do setor elétrico. Posteriormente, as reformas realizadas no Reino Unido tornaram-se uma referência para outras reformas ao redor do mundo [4].

Segundo Joskow [2], os elementos principais para a implementação de estruturas de mercado são:

- A desverticalização dos segmentos de geração, transmissão, distribuição e comercialização do setor de energia elétrica;
- A privatização das empresas públicas relacionadas ao setor de energia elétrica;
- Estruturas de redes de transmissão e distribuição mantidas como monopólios naturais, sendo que as tarifas vinculadas ao funcionamento das mesmas são definidas por uma agência reguladora apontada pelo Estado;
- Operação do sistema elétrico realizada por um operador independente;
- Estruturação de um mercado grossista para que geradores de eletricidade possam vender grandes montantes de energia elétrica;
- Instauração de um ambiente competitivo no mercado retalhista e, desta forma, os consumidores dispõem de liberdade para definir o agente de quem comprarão a energia elétrica.

Na implementação de uma estrutura de mercado essencialmente competitiva torna-se evidente que a figura do consumidor é ofuscada pela definição de cliente. Entende-se que o cliente acaba por ter uma influência maior no mercado, quando comparado com um simples consumidor, justamente pelo poder de escolha agregado. Tal poder de escolha faz com que os agentes busquem aprimorar suas respectivas formas de atuação no mercado.

Estruturas de mercado de energia elétrica são comumente divididas em mercado grossista e mercado retalhista. A diferença mais evidente entre os mercados grossista e retalhista é que, no mercado grossista de energia elétrica os montantes comercializados são mais elevados e o preço por unidade comercializada é, comumente, reduzido em relação ao mercado retalhista. De maneira geral, no mercado retalhista a energia é comprada por consumidores residenciais e comerciais com baixo consumo de energia elétrica.

De acordo com De Castro *et al.* [4], o mercado grossista pode estar organizado em função de duas estruturas básicas: o esquema de comprador único e a diferenciação entre o mercado de curto e longo prazo. A Figura 1 ilustra como estas duas formas de organização são estruturadas.

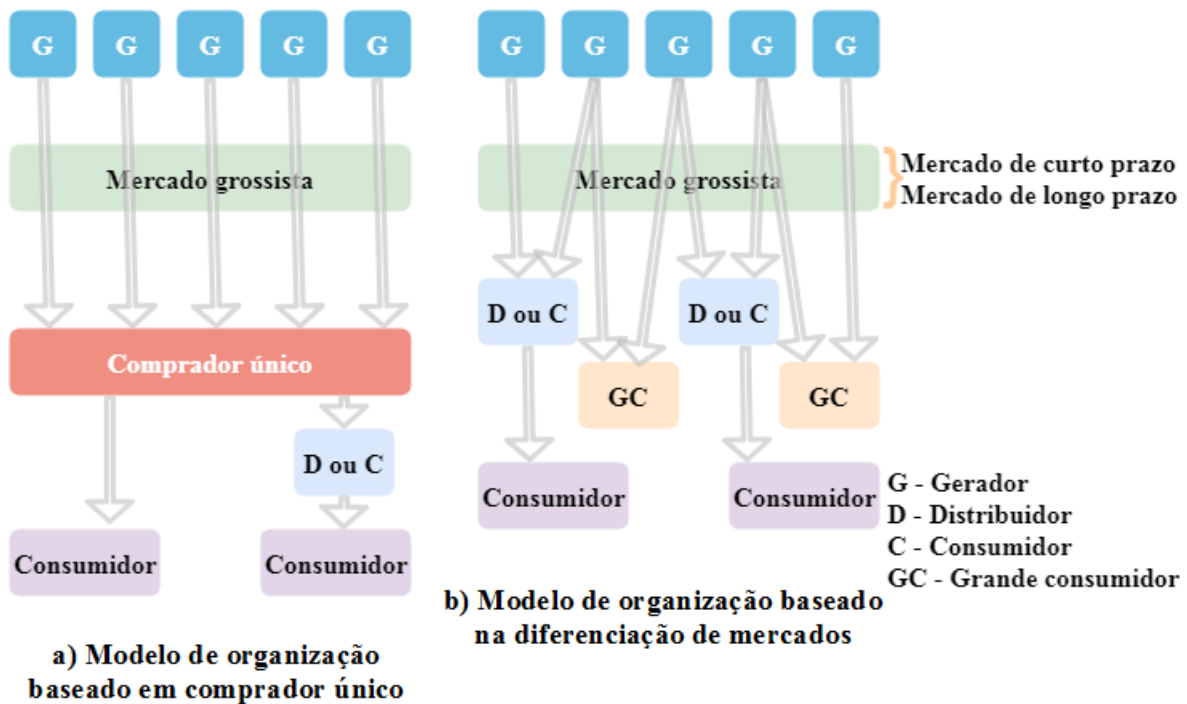


Figura 1 Modelos de organização básica do mercado grossista [4]

No modelo a), representado na Figura 1, tem-se uma empresa estatal como encarregada de repassar a energia elétrica aos consumidores finais. Tal empresa estatal normalmente é proprietária das linhas de transmissão e distribuição de energia. No segmento de geração existem produtores independentes e produtores públicos. Os produtores públicos, de maneira geral, são a parte da empresa estatal que foi desverticalizada.

Em mercados de curto prazo, como no modelo b) da Figura 1, tem-se uma maior competitividade entre agentes do setor elétrico. A ideia fundamental é aproximar ao máximo o mercado grossista de energia elétrica de um mercado de concorrência perfeita. Na teoria microeconómica existem condições consideradas fundamentais para caracterizar um mercado de energia elétrica perfeitamente competitivo [4]:

- O mercado de energia elétrica deve dispor de um número substancial e equilibrado de produtores e compradores de energia elétrica para que não haja concentração de poder de mercado;
- Os produtores não exercem influência direta no preço da energia, sendo apenas tomadores de preço, mas podem decidir fatores relacionados aos montantes produzidos;
- A energia elétrica define-se como um produto e serviço homogêneo;
- Não há restrição quanto à entrada e à saída no mercado;
- Há livre mobilidade de fatores de produção, capital e trabalho;

- Todos os agentes sempre possuem exatamente a mesma informação para tomar suas decisões.

Vale ressaltar que, em termos práticos, não existe um mercado perfeitamente competitivo, ou seja, não há ocorrência de todas as condições supracitadas de forma simultânea num mercado de energia elétrica. Com a intenção de aproximar os mercados de energia elétrica de condições perfeitamente competitivas, diversos países optaram por mercados de curto prazo. Cada mercado acaba por apresentar especificidades, contudo, num panorama geral e de acordo com Krischen e Strbac [6], as seguintes características são comuns aos mercados de energia elétrica:

- A curva de demanda forma-se tendo em vista os requerimentos de energia elétrica por parte dos consumidores e acaba por ser altamente inelástica no curto prazo. Tal curva geralmente é estabelecida a partir de prospecções de mercado em que a curva tende a ser vertical, ou seja, no curto prazo ela é inelástica ao preço. É importante ressaltar que existem casos em que os próprios consumidores podem fazer ofertas de preço e quantidade para reduzirem a demanda quando o preço de mercado atingir o valor ofertado, o que configura uma demanda flexível;
- O preço de mercado é definido a partir da interseção das curvas de oferta e de demanda num período de tempo. Conceitualmente, tal preço é definido pelo último gerador necessário para fornecer a energia demandada no momento;
- O preço do mercado é igual ao custo marginal do último gerador necessário para atender a demanda num determinado período de tempo. Desta forma, o preço do gerador é determinado pelo custo variável de produção;
- Os geradores que disponham de custos menores ou iguais ao preço de mercado se apresentam para operar, ao passo que a remuneração dos agentes despachados é realizada ao preço de mercado;
- Há um operador independente do sistema para que seja garantido o equilíbrio instantâneo da oferta e da demanda de energia elétrica.

Mercados considerados de longo prazo tendem a apresentar maior previsibilidade nas relações entre seus agentes. Os preços a serem pagos nos montantes de energia e as formas com que tais preços serão atualizados ao longo do tempo são, comumente definidos pelo agente vendedor (podendo ser um gerador, distribuidor ou comercializador) e o agente comprador.

É importante ressaltar que, na prática, mercados de energia apresentam especificidades definidas de acordo com os padrões económicos, políticos e sociais da nação (ou nações) em que o mercado está estabelecido. Nos tópicos a seguir serão discutidas tais especificidades dos mercados de energia elétrica instaurados no Brasil em Portugal.

2.1. ESTRUTURA GERAL DO MERCADO DE ENERGIA BRASILEIRO

A primeira empresa do setor elétrico brasileiro foi a Light, operando na cidade do Rio de Janeiro no início do Século XX, após a primeira experiência relacionada à iluminação por meio de energia elétrica na Estação Central da Estrada de Ferro Dom Pedro II, em 1879. Com o passar dos anos, os serviços do setor elétrico foram crescendo, contudo, não havia, ou havia pouquíssima, regulamentação relacionada ao sistema de energia elétrica brasileiro. Neste contexto, as empresas que foram surgindo para suprir a demanda por serviços relacionados ao suprimento de energia elétrica celebravam contratos de fornecimento de energia elétrica da forma que lhes era mais conveniente. As geradoras e distribuidoras definiam os valores das tarifas de energia que seriam impostas aos compradores de energia elétrica, a tensão de distribuição e a frequência, tendo em vista que não havia regulamentação da energia elétrica como produto [7].

O primeiro indício de regulamentação tarifária no Brasil foi através da “Cláusula do Ouro”, de forma que o reajuste tarifário era realizado em função da cotação do ouro vigente na época. Contudo, apenas no ano de 1934 foi expedido pelo Ministério da Agricultura o Código das Águas, onde definiu-se que o aproveitamento do potencial hidroelétrico dependia de autorização ou outorga de concessão. As tarifas passaram a ser definidas de acordo com os custos relacionados à operação e ao valor histórico dos investimentos [8].

Após a criação do Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE), em 1939, ocorreu uma crise energética que assolou o país de meados da década de 30 até o final da década de 50. Tal crise ocorreu principalmente devido ao fato de que as empresas privadas da época não reinvestiam os lucros obtidos no Brasil e um período de seca, tendo em vista que a matriz energética era fundamentalmente hídrica na época. Desta forma, iniciou-se o processo de estatização do setor elétrico primeiramente por intervenção federal e em seguida por intervenções dos estados brasileiros [8].

Na década de 60 as características técnicas do setor elétrico brasileiro evoluíram em virtude do aumento da capacidade instalada e também da malha de transmissão de energia elétrica.

Vale ressaltar que isto ocorreu em virtude da criação de instituições importantes para o setor elétrico brasileiro, como o Ministério de Minas e Energia (1960), o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (1968), Companhia Siderúrgica Nacional (1940), Vale do Rio Doce (1942), Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (1945) e a Petrobrás (1953) [7].

No período entre o começo da década de 70 e o final da década de 80 do século XX, o setor elétrico deu início às mais importantes obras relacionadas à produção de energia elétrica nacional, destacando as construções voltadas à geração hidroelétrica, o programa nuclear brasileiro, aos grandes sistemas de transmissão de energia elétrica com tensões em 440 kV e 500 kV, sistemas de supervisão e controle e a celebração do tratado de Itaipu. O setor elétrico brasileiro foi abalado na década de 80 em virtude de diversos fatores, por exemplo, o controle tarifário falho realizado para tentar controlar a inflação brasileira e o endividamento de algumas empresas do setor de energia elétrica [8].

No início da década de 90 do século XX, iniciou-se um intensivo processo de privatização no Brasil, principalmente nos setores relacionados à infraestrutura nacional. O principal gatilho para a privatização está relacionado com a ineficiência de empresas estatais em atividades administrativas. Com o objetivo de reestruturar o setor elétrico brasileiro, o Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (Projeto RE-SEB) foi implantado, de 1996 a 1998, a partir de duas premissas básicas [8]. São elas:

- Garantir que o setor elétrico brasileiro fosse economicamente viável;
- Garantir a realização de investimentos necessários para assegurar o crescimento da oferta de energia.

Em 1998 o projeto supracitado foi encerrado, contudo, serviu como base para a elaboração do Novo Modelo do Setor Elétrico. Após a implementação de tal modelo, em 2004, a regulação vigente na época foi alterada de forma substancial e acabou por impactar a geração, a transmissão, a distribuição, a comercialização e o consumo de energia elétrica no Brasil [7].

Um dos pontos cruciais do Novo Modelo do Setor Elétrico foi a segmentação do setor elétrico em subsetores, ou seja, as atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização começaram a ser operacionalizadas de forma independente, sendo que um mesmo agente é limitado a apenas poder exercer duas destas atividades. Neste contexto, acabou por surgir um novo agente no mercado de energia elétrica brasileiro, designado como

comercializador de energia elétrica. Tal agente estaria habilitado a comprar e vender energia elétrica sem necessariamente possuir uma geradora ou um consumo condizente de energia elétrica [8].

Com a reestruturação do mercado brasileiro de energia, ficou estabelecido que contratos de compra e venda de energia elétrica poderiam ser negociados livremente entre as partes envolvidas. Vale a ressalva que tais contratos deveriam ser registrados no Mercado Atacadista de Energia Elétrica e homologados na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [8].

A conceção do Mercado Atacadista de Energia Elétrica, ocorrida em 2002, deu lugar à Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), em 2004. Tal órgão acaba por ser voltado à realização de negociações de transações de compra e venda de energia elétrica dentro do território brasileiro. Se faz necessário ainda, que os agentes de mercado sejam submetidos aos procedimentos contabilísticos e referentes à liquidação financeira impostos pela CCEE [7].

Para assegurar a consistência e operabilidade das negociações considerando um mercado moldado para o curto prazo, os consumidores finais e distribuidores precisavam, obrigatoriamente, contratar 85% de sua carga ou mais, sendo que poderiam ser livremente negociados no curto prazo até 15% do valor total de demanda, observando a exposição às variações de preço do mercado. Mais tarde, tais limites foram alterados para 95% e 5%, respectivamente. A possibilidade de ter uma parcela da demanda energética sem contratação acabou por ocasionar problemas nas negociações do mercado. Os agentes de mercado passaram a atuar no mercado de curto prazo de tal forma que acabou por comprometer a expansão da oferta de energia elétrica no Brasil. O usualmente chamado “Novíssimo Modelo” alterou tal situação ao estabelecer a obrigatoriedade da contratação de 100% da demanda de energia dos consumidores [8].

Desde os primeiros indícios até a implementação do modelo considerado novíssimo, o mercado brasileiro passou por diversas modificações influenciadas por questões políticas e também técnicas. Considerando a estruturação supracitada, se faz relevante a discussão do funcionamento do mercado de curto prazo brasileiro, assim como uma abordagem sobre os ambientes de contratação em questão.

2.1.1. MERCADO DE CURTO PRAZO NO BRASIL

O mercado de curto prazo do Setor Elétrico Brasileiro acaba por desempenhar um papel fundamental na conjuntura das relações de compra e venda de energia elétrica no Brasil. Dentre todos os agentes envolvidos, se faz importante destacar a atuação da ANEEL e da CCEE.

A ANEEL entende que, de acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 622, de 19 de agosto de 2014, o mercado de curto prazo é denominado por processos relacionados à contabilização e liquidação financeira de diferenças apuradas entre os montantes de energia elétrica contratados, registrados e validados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, e montantes gerados ou consumidos efetivamente e atribuídos aos agentes da CCEE relacionados. Para elucidar os processos relacionados ao mercado de curto prazo, são abordados tópicos referentes ao Preço de Liquidação de Diferenças, ao Mecanismo de Realocação de Energia e ao balanço energético.

2.1.1.1. PREÇO DE LIQUIDAÇÃO DE DIFERENÇAS

O Preço de Liquidação de Diferenças, ou PLD, é determinado com base no custo marginal da operação, considerando a primeira semana do horizonte de planejamento. Ressalta-se que a ANEEL define valores máximos e mínimos para o PLD de forma que os mesmos devem ser respeitados. Para que o PLD seja gerado, são impostas duas etapas gerais, sendo elas: processamento e determinação.

Na etapa de processamento são aplicados dois modelos, denominados NEWAVE e DECOMP. O NEWAVE consiste num modelo de planejamento da operação de sistemas essencialmente hidrotérmicos com o objetivo de determinar metas de geração que atendam à demanda de energia elétrica e reduzam o valor esperado do custo de operação ao longo do período de planejamento. Como resultado, o modelo NEWAVE fornece uma função de custo futuro, sendo que através desta função é realizado o encadeamento com o modelo de curto prazo, chamado de DECOMP. O principal objetivo do DECOMP é determinar o despacho de geração das usinas hidráulicas e térmicas que, também, minimiza o custo de operação ao longo do período de planejamento. No modelo DECOMP é levado em consideração um conjunto de informações como carga, vazões, disponibilidades, limites de transmissão entre subsistemas e a função de custo futuro obtida através do modelo NEWAVE. Desta forma,

determina-se o custo marginal da operação, que é o principal fator para determinação do PLD [9].

A realização dos processamentos dos modelos NEWAVE e DECOMP é baseada em dados encaminhados mensalmente pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para a CCEE. Tais dados são utilizados no NEWAVE e então realiza-se o processamento do modelo para obter a função de custo futuro. Como mencionado anteriormente, tal função é necessária para o funcionamento do modelo DECOMP. A partir deste momento, realiza-se o processamento de dados, encaminhados semanalmente pelo ONS, através do DECOMP, e se constitui o suporte à operação do sistema agregado ao cálculo do PLD. Na conjuntura deste processo, é considerado que a energia é igualmente disponível em todos os pontos de consumo de um mesmo submercado. A CCEE acaba por não considerar as restrições elétricas internas dos submercados para o cálculo do PLD.

Vale a ressalva de que as restrições elétricas internas dos submercados são desconsideradas do cálculo do PLD desde que não impactem a capacidade de intercâmbio entre os submercados e não sejam decorrentes exclusivamente de atrasos na construção de linhas de transmissão e linhas de distribuição. No caso de o limite de transporte de energia entre os submercados poder ser afetado por determinada restrição elétrica interna, de forma que sua eliminação precisa de solução de planejamento, a mesma deve ser considerada no cálculo do PLD. Além disto, as restrições decorrentes exclusivamente de atrasos de linhas de transmissão ou distribuição também devem ser consideradas no cálculo do PLD [9].

Para que seja mantida a coerência no valor do PLD, é importante que não seja considerada no cálculo a energia proveniente de unidades geradoras em fase de testes. Um princípio fundamental neste contexto é de que a energia produzida por determinada unidade geradora do sistema, para ser considerada na formação do PLD, somente estará efetivamente disponível e passível de ser comercializada após a sua operação comercial.

De acordo com a CCEE [9], após a etapa de processamento inicia-se a etapa de determinação do PLD propriamente dito. Para isso, a Equação (1) descreve matematicamente como deve ser obtido o preço de liquidação das diferenças considerando um submercado s , patamar de carga r e semana w , representado por $PLD_{s,r,w}$.

$$PLD_{s,r,w} = \min \left(\max \left(CMO_{s,r,w}^{SREA}, PLD_f^{MIN} \right), PLD_f^{MAX} \right) \quad (1)$$

Onde $CMO_{s,r,w}^{SREA}$ é o custo marginal de operação sem restrição *ex ante* determinado por submercado s , patamar de carga r e semana w e os valores máximo e mínimo que o PLD pode assumir para um determinado ano f^{PLD} , compreendido entre a primeira e a última semana operativa de preços são $PLD_{f^{PLD}}^{MAX}$ e $PLD_{f^{PLD}}^{MIN}$, respetivamente. Vale ressaltar que o PLD considerando uma discretização horária é dado por $PLD_{s,r,w}$, respeitando s e o período de contabilização em questão. Ou seja, o PLD horário é calculado para cada uma das horas de um determinado patamar sendo que, na prática, o preço da hora se iguala ao PLD do patamar ao qual pertence.

2.1.1.2. MECANISMO DE REALOCAÇÃO DE ENERGIA

O mecanismo de realocação de energia é um mecanismo financeiro para que ocorra o compartilhamento dos riscos hidrológicos associados à otimização eletroenergética do Sistema Interligado Nacional (SIN) no tocante de despacho centralizado (realizado pelo ONS) das unidades de geração de energia elétrica. O objetivo principal do mecanismo de realocação de energia é permitir que todas as usinas inseridas no sistema alcancem seus respetivos níveis de garantia física⁵ sob o ponto de vista contábil, independentemente dos níveis reais de produção de energia. Nesta questão, há uma ressalva de que a geração total do mecanismo de regulação de energia não esteja abaixo do total da garantia física associada ao SIN [10].

Para que seja possível compreender de forma intuitiva como é a relação do mecanismo de realocação de energia com as demais conjunturas, a Figura 2 é apresentada.

⁵ A garantia física de uma unidade de geração corresponde a fração da garantia física do SIN. A garantia física do SIN é a carga máxima que pode ser suprida sob um risco pré-fixado de 5% de não atendimento, obtida por meio de simulações da operação, utilizando séries sintéticas de energia afluente para o sistema hidrotérmico.



MRE – Mecanismo de Realocação de Energia

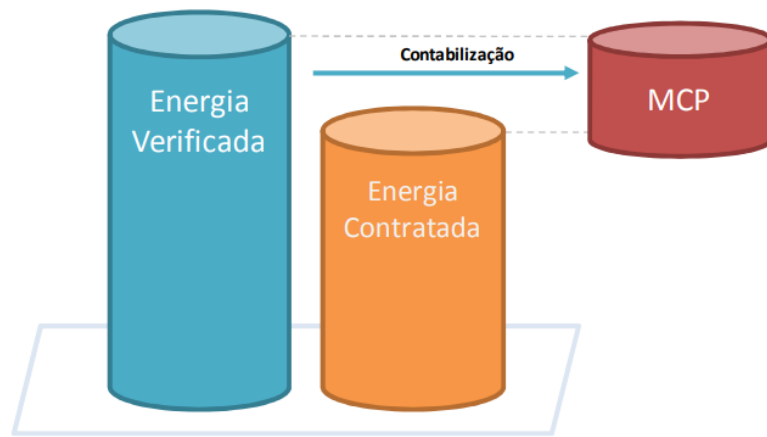
Figura 2 Relação do módulo mecanismo de realocação de energia com o cálculo de exposição e apuração de diferenças [10]

De forma objetiva, a energia consolidada das usinas participantes de tal mecanismo e estabelecida nas descrições de medição contábil é confrontada com a garantia física desses empreendimentos. Tal energia é definida nos procedimentos relacionados às garantias físicas e ajustada para o mecanismo de realocação de energia.

2.1.1.3. BALANÇO ENERGÉTICO

O balanço energético pode ser entendido como o processo onde realiza-se a contabilização dos montantes de energia elétrica que são comercializados no SIN e a liquidação financeira de valores resultantes das operações de compra e venda de energia elétrica na sistemática do mercado de curto prazo. O agente responsável por realizar a contabilização das diferenças entre valores produzidos ou consumidos para com os valores contratados é a CCEE. Tal atribuição é definida através do inciso VI do Artigo 2º do Decreto nº 5.177/2004.

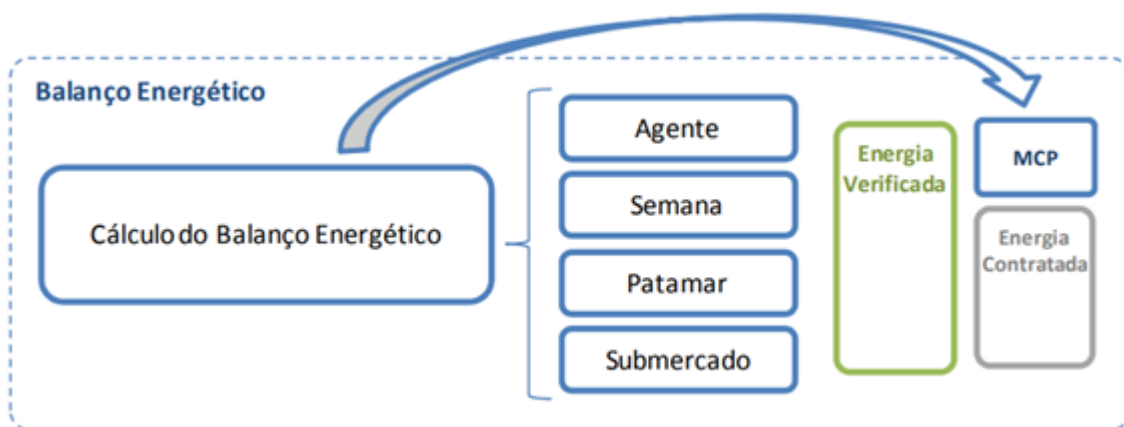
As diferenças positivas ou negativas são indexadas a cada agente e ponderadas de acordo com o PLD, determinado semanalmente para cada patamar de carga e para cada submercado tendo como base o custo marginal de operação do sistema, conforme mencionado no Tópico 2.1.1.1. [11]. Para frisar, a partir das informações de volumes contratados e medidos é possível realizar o balanço energético de cada agente da CCEE, de acordo com a Figura 3.



MCP – Mercado de Curto Prazo

Figura 3 Balanço energético da energia comercializada no mercado de curto prazo [11]

O balanço energético pode ser entendido como a questão focal referente aos processos de contabilização realizados pela CCEE. Para a realização do balanço energético são necessárias informações referentes aos contratos firmados, medição contábil e mecanismos de realocação de energia. Na Figura 4 é apresentado um esquema geral referente ao balanço energético.



MCP – Mercado de Curto Prazo

Figura 4 Esquema geral do balanço energético brasileiro [11]

Conforme a Figura 4, o cálculo do balanço energético é essencial para estruturar o mercado de curto prazo brasileiro justamente por apurar as diferenças entre a energia verificada e a energia contratada de cada agente econômico produtor e comercializador, considerando a alocação no tempo (discretização semanal), o patamar de carga (leve, médio e pesado) e o submercado (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte).

2.1.2. AMBIENTES DE CONTRATAÇÃO LIVRE E REGULADA

De acordo com a CCEE, a comercialização de energia elétrica no Brasil é realizada em duas esferas de mercado, conhecidas por Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Os contratos, em qualquer uma das esferas supracitadas, devem ser registrados na CCEE. Tais contratos são a base para a contabilização e liquidação das diferenças no mercado de curto prazo [12].

Além disto, existem quatro vertentes que diferenciam estes dois ambientes. Tais vertentes são expostas na Tabela 2.

Tabela 2 Comparação entre ambientes de contratação livre e regulado [12]

	Ambiente Livre	Ambiente Regulado
Participantes	Geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais	Geradoras, distribuidoras e comercializadoras. As comercializadoras podem negociar energia somente nos leilões de energia existente – (Ajuste e A-1)
Contratação	Livre negociação entre os compradores e vendedores	Realizada por meio de leilões de energia promovidos pela CCEE, sob delegação da ANEEL
Tipo de contrato	Acordo livremente estabelecido entre as partes	Regulado pela ANEEL, denominado Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR)
Preço	Acordado entre comprador e vendedor	Estabelecido no leilão

O consumidor livre é um agente econômico que possui demanda de energia elétrica e tensão de fornecimento suficientemente elevadas, conforme limites estabelecidos em legislação, e pode escolher seu fornecedor de energia elétrica por meio de livre negociação. O consumidor especial é aquele com demanda entre 500 kW e 3MW, que tem o direito de adquirir energia de pequenas centrais hidrelétricas ou de fontes incentivadas especiais (eólica, biomassa ou

solar) [13]. Os consumidores especiais acabam por receber incentivos financeiros em virtude da utilização de fontes especiais e que diversificam a matriz energética brasileira.

Pontos de discussão muito debatidos na área de engenharia eletrotécnica são análises de migração do mercado cativo, ou ambiente regulado, para o mercado livre, ou ambiente de contratação livre. Tal decisão pode ter impactos significativos nos gastos com eletricidade de um agente econômico com elevado consumo de energia elétrica. Contudo, vale ressaltar que tal análise de migração entre ambientes de contratação deve ser realizada através de um estudo técnico bem fundamentado para que não ocorram impactos negativos.

2.2. ESTRUTURA GERAL DO MERCADO DE ENERGIA PORTUGUÊS

As primeiras aplicações relacionadas à energia elétrica em Portugal foram evidenciadas ao final do século XIX. Desde então, surgiram diversas empresas focadas na criação de instalações elétricas no território português e que acabavam por não ter muito compromisso com a definição de políticas de interligação. Neste contexto que se verificou a necessidade de nacionalizar tais empresas de forma que o Estado estava incumbido de dirigir, orientar e intervir no setor elétrico português [14].

Em 1976 ocorreu a fusão de boa parte das empresas instauradas no setor elétrico português, resultando na empresa pública Energias de Portugal, ou EDP. A EDP era o órgão responsável por assegurar todos os processos desde a produção até a comercialização da energia elétrica e, portanto, detentora de um monopólio do setor. A partir dos anos 80 do século XX, ocorreram os primeiros avanços no processo de liberalização do setor elétrico português, pois constatou-se que a produção e a comercialização eram segmentos onde se poderia introduzir concorrência [15].

No ano de 1988, após a alteração realizada na Lei de Delimitação de Sectores, ficou definida a abertura do setor à iniciativa privada, através do Decreto-Lei nº 449/88 de 10 de dezembro. Neste contexto, o interesse público e a valorização do potencial económico nacional tinham que ser preservados. Paralelamente, em meados de 1991, iniciou-se o processo de reestruturação e fragmentação da EDP através dos Decretos-Lei nº 7/91 e nº 131/94 de 8 de janeiro e de 19 de maio, respetivamente [14].

Durante o processo de liberalização do setor elétrico em Portugal, houve a necessidade de garantir a universalidade do fornecimento de energia elétrica. Neste sentido, em 1995 foi

criada Entidade Reguladora do Sector Eléctrico (ERSE). Em 1997 sua designação foi alterada para Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos em virtude da adição de competências vinculadas a outros setores energéticos.

A separação das atividades de distribuição e de comercialização ocorreu em 2006 através da EDP Serviço Universal, S. A. e a EDP Comercial, S. A. atuando como comercializadores no mercado regulado e no mercado liberalizado, respetivamente. Contudo, a integração com outros mercados europeus de energia eléctrica, de acordo com a União Europeia, possuía diversos desafios técnicos e legislativos. Nesta conjuntura, Portugal e Espanha estabeleceram o Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL).

Sendo assim, o MIBEL é resultado de um processo de cooperação desenvolvido pelos governos de Portugal e da Espanha, com o objetivo de promover integração dos sistemas eléctricos dos dois países. Os resultados obtidos constituíram uma contribuição significativa para a concretização do mercado de energia eléctrica em escala europeia. Trata-se de um passo significativo para a construção do Mercado Interno de Energia. No processo de estruturação do MIBEL, é importante destacar quatro momentos importantes, sendo eles: a celebração do Protocolo de colaboração entre as Administrações espanhola e portuguesa, em Novembro de 2001, para a criação do MIBEL; a assinatura do Acordo entre a República Portuguesa e o Reino de Espanha, em outubro de 2004, em Santiago de Compostela; a XXII Cimeira Luso-Espanhola de Badajoz realizada em novembro de 2006 e, por fim, a assinatura, realizada em Braga em janeiro de 2008, do Acordo que revê o Acordo de Santiago. Em 1 de julho de 2007 o MIBEL foi estabelecido, gerando grande expectativa com a intensão de que a sua estruturação culminaria em benefícios para os consumidores de ambos os países [16].

A estruturação do MIBEL pode ser dividida em duas vertentes distintas, sendo elas: mercado grossista e mercado retalhista. Tais vertentes são discutidas nos próximos parágrafos.

O mercado grossista do MIBEL dispõe de diferentes formas de contratação de energia. Uma das formas é o mercado de contratação à vista, ou mercado *spot*, que se subdivide em dois tipos, denominados mercados diário e intradiário. Nestes mercados são apresentadas as diversas propostas de compra e venda de energia eléctrica para o dia seguinte ao da negociação. Outra forma é através do mercado de contratação a prazo, onde são realizados acordos de fornecimento de energia considerando um horizonte futuro de produção e compra de energia eléctrica. Há ainda a forma de mercado de contratação bilateral, onde há

flexibilidade de estabelecer relações de compra e venda de energia elétrica no tempo. Por fim, há a forma do mercado de serviços de sistema que funciona em tempo real e é responsável por manter o equilíbrio entre a produção e o consumo de energia elétrica [17].

Já o funcionamento do mercado retalhista baseia-se em duas formas de contratação de fornecimento de energia elétrica. A primeira forma é através da contratação em mercado regulado, onde são aplicadas tarifas integrais reguladas. Já na segunda forma, a contratação é realizada em mercado liberalizado, onde as partes envolvidas têm o poder de definir as condições de negociação de energia. Contudo, a componente do acesso às redes continua a ser aplicada através de um preço regulado [17].

Para que seja possível estabelecer relações comparativas entre os mercados de energia elétrica no Brasil e em Portugal, é também importante discutir alguns aspetos específicos do mercado português. Para isto, são abordados os tópicos seguintes e relacionados aos operadores e agentes de mercado, assim como a sistemática voltada à precificação da energia elétrica.

2.2.1. OPERADORES DE MERCADO

Considerando a implementação do MIBEL, se fez importante que fosse estabelecido um conjunto de procedimentos, regras e condições de cunho técnico e económico entre Portugal e Espanha. Diante disto, foi necessária a criação de um Operador de Mercado Ibérico, denominado pelo acrónimo OMI, responsável pela gestão dos mercados do MIBEL. O OMI é segmentado em dois operadores relacionados, sendo eles o OMIE (núcleo espanhol), com a competência da gestão do mercado diário e intradiário, e o OMIP (núcleo português), encarregado da gestão dos mercados a prazo [18].

Os operadores de mercado OMIE e OMIP são pertencentes às sociedades OMEL (espanhola) e OMIP SGPS. Nesta conjuntura, há também a empresa OMIClear sediada em Portugal que, no âmbito do seu papel de Câmara de Compensação e Contraparte Central, presta serviços de compensação e liquidação relativamente aos contratos de derivados de energia negociados ou registrados no Mercado de Derivados OMIP [19] [20].

A Figura 5 ilustra as relações de propriedade entre os operadores e as sociedades.



Figura 5 Relações percentuais de propriedade entre operadores no MIBEL [20]

Portanto, é possível inferir que a atuação de ambos os operadores é de extrema importância para que a conjuntura do MIBEL funcione de maneira adequada. Importante mencionar que nas participações de entidades portuguesas e espanholas há certo equilíbrio, que acaba por ser de fato necessário para o bom funcionamento de tal mercado com nível ibérico.

2.2.2. AGENTES DE MERCADO

Considerando a estruturação do MIBEL na conjuntura em que Portugal está inserido, é fundamental que os agentes de mercado sejam identificados. Neste sentido, são definidos os agentes de mercado pertencentes a cada núcleo, espanhol e português.

É possível determinar como “agente de mercado” toda a pessoa física ou jurídica que intervenha nas transações econômicas e que tenha lugar no mercado de produção de energia elétrica. Desta forma, para exercer o direito de comprar e vender energia no mercado, os agentes deverão aderir às Regras de Funcionamento do Mercado de Produção de Energia Elétrica. Podem ser vistos como agentes de mercado os produtores de energia elétrica, comercializadores, consumidores e representantes [21].

É importante ressaltar os tipos de membros que compõe o MIBEL. Os agentes que participam de forma direta no Mercado de Derivados do OMIP são intitulados Membros Negociadores e Membros Compensadores. Tais membros assumem funções respectivas de acordo com a configuração do seu perfil de atuação.

Os Membros Negociadores têm possibilidade de acessar de forma direta a plataforma de negociação do OMIP e são capazes de gerir ofertas e negócios relativamente aos contratos

abertos à negociação. Tais membros podem ser categorizados de acordo com uma das seguintes opções [22]:

- *Dealer*: membro negociador autônomo que gere ofertas para o próprio ou para entidades que se relaciona;
- *Broker*: membro negociador por conta de terceiros que age com exclusividade gerindo ofertas por conta de clientes;
- *Broker-dealer*: membro negociador por conta própria e de terceiros que gere ofertas de forma autônoma ou por conta de clientes;
- *Market maker*: membro criador de mercado que atua por conta própria, tendo em vista os termos do Acordo de Criação de Mercado celebrado com o OMIP. Há uma obrigatoriedade por parte deste membro de introduzir no mercado ofertas de compra e venda com limites mínimos de quantidade e limites máximos de *spread*, para um dado número de contratos e durante um período mínimo de tempo predefinido em cada sessão de negociação.

Para ser um Membro Negociador, é importante estar legalmente habilitado, possuir capacidade de compensação e possuir recursos humanos, técnicos e operacionais adequados para realizar as operações nos mercados geridos pelo OMIP. Existem também os Intermediários de Operações Bilaterais, que são destinados a permitir a intervenção dos *brokers* ativos no mercado, podendo preservar o anonimato das contrapartes [22].

Os Membros Compensadores são participantes fundamentais nos procedimentos de compensação e liquidação das operações registradas e realizadas no OMIP. Vale destacar a atuação dos Agentes de Liquidação. Tais associados não são propriamente membros do mercado, contudo, são reconhecidos pela OMIClear e pelo OMIP para prestarem serviços de liquidação aos membros do mercado [21].

É notável que cada agente de mercado possui um papel específico para o funcionamento da conjuntura do MIBEL. Trata-se de um ambiente robusto justamente por envolver dois países (Portugal e Espanha) e que dispõe de certa complexidade.

2.2.3. PRECIFICAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NO MIBEL

A precificação da energia elétrica no contexto do MIBEL pode ser analisada de duas formas distintas. São elas: precificação no mercado de curto prazo, estruturada pelo OMIE, e a precificação no mercado de longo prazo, estruturada pelo OMIP. No mercado de curto prazo

os preços são definidos de duas formas distintas, uma para o mercado diário e outra para o mercado intradiário.

No mercado diário os preços da eletricidade são estipulados diariamente às 12 h, para as vinte e quatro horas do dia seguinte. O preço e o volume de energia numa determinada hora são estabelecidos pelo cruzamento entre a oferta e a procura, seguindo o modelo marginalista adotado pela União Europeia, com base no algoritmo EUPHEMIA, aprovado para todos os mercados europeus. Determinados agentes podem fazer ofertas de compra e venda de forma que as mesmas são aceites de acordo com uma ordem de mérito económico, restritas às capacidades técnicas das interligações entre Portugal e Espanha. Por exemplo, se, numa determinada hora do dia, a capacidade da interligação for capaz de permitir o fluxo de eletricidade negociado pelos agentes, o preço da eletricidade nessa hora será o mesmo em Espanha e em Portugal. Contudo, se nessa mesma hora a interligação se ocupar totalmente, nesse momento, o algoritmo para a fixação do preço executa um cálculo de forma que ocorre uma diferença de preços entre ambos os países. O mecanismo descrito para a formação do preço da eletricidade no mercado diário de Espanha e Portugal é denominado *market splitting* [23].

Já o mercado intradiário pode ser entendido como um mecanismo marginalista dividido em seis sessões de contratação. Tais sessões são baseadas em leilões, assim como as descritas para o mercado diário, onde o volume de energia e o preço para cada hora se determinam pela intersecção entre a oferta e a procura. Além disto, estes mercados permitem que os agentes compradores e vendedores reajustem os seus compromissos de compra e venda com uma antecedência de até quatro horas antes do tempo real. Neste contexto existem outros mercados geridos pelo Operador do Sistema nos quais se assegura de forma contínua o equilíbrio da produção e do consumo [23].

A precificação do mercado de longo prazo do MIBEL é definida de acordo com as negociações realizadas exclusivamente por membros negociadores. Vale ressaltar que os Intermediários de Operações Bilaterais também podem auxiliar no processo de negociação. Desta forma, a plataforma de negociação do OMIP é estruturada para que contratos futuros sejam negociados. Os elementos destes contratos são padronizados tendo em vista o volume de energia negociado, variação de preço, períodos, entre outros fatores. Sendo assim, quando um participante do mercado abre uma posição, apenas precisa escolher o contrato que irá

negociar, a quantidade e o preço. Uma característica chave deste tipo de contratos é que os ganhos e perdas são calculados e liquidados numa base diária [24].

É latente que a estrutura de precificação no MIBEL tem por objetivo ser transparente, garantir liquidez e eficiência ao mercado de energia elétrica. Certamente a OMIClear assume um papel fundamental no mercado ao assegurar a compensação justa e a redução de riscos que afetam as operações.

2.3. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MERCADOS DE ENERGIA DO BRASIL E DE PORTUGAL

Mercados de energia elétrica podem ser analisados de acordo com diferentes aspetos. Para que seja possível inferir uma reflexão comparativa consistente entre o mercado de energia elétrica brasileiro⁶ e o MIBEL⁷ certas perspetivas são levadas em consideração. Tais perspetivas definem-se como: dimensão, operação, definição de preços e potencial de desenvolvimento.

O mercado de energia brasileiro apresenta uma dimensão consideravelmente maior em relação ao MIBEL, tanto em relação à extensão territorial quanto em relação ao número de segmentos. Para que seja possível ter uma noção de proporcionalidade de dimensão, a Figura 6 é apresentada.

⁶ Descrito no Tópico 2.1.

⁷ Apresentado no Tópico 2.2.

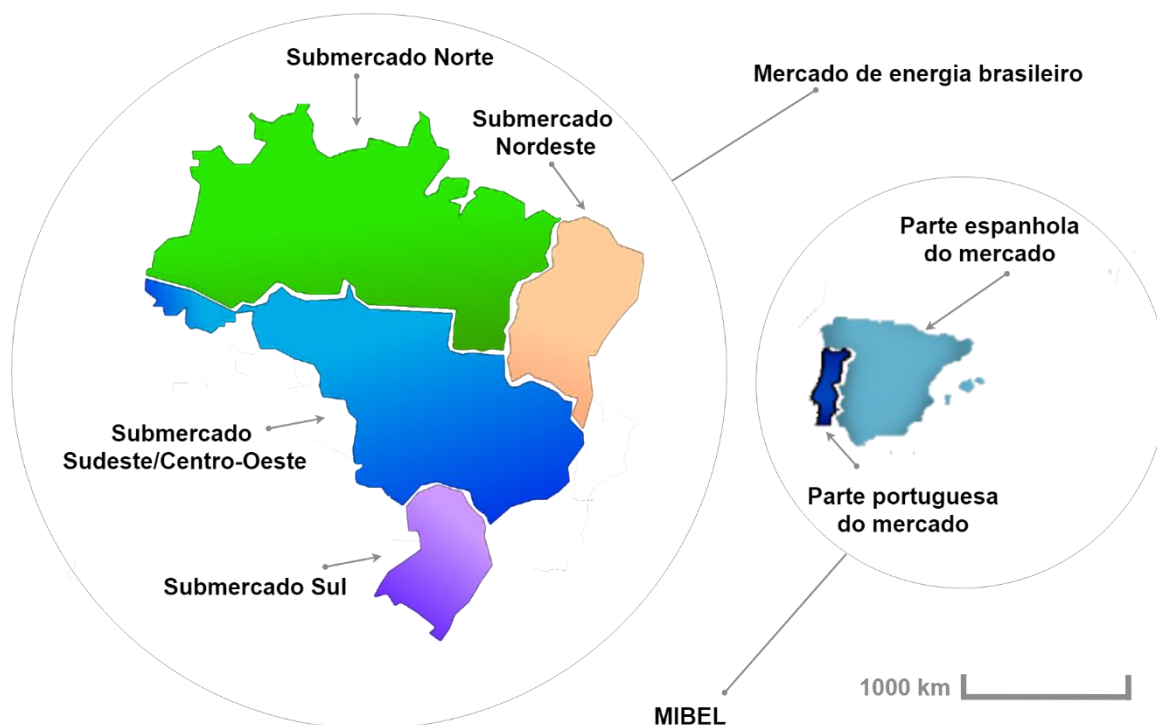


Figura 6 Mapa com dimensões geográficas do mercado brasileiro e do MIBEL

De acordo com a Figura 6, a abrangência territorial dos quatro submercados brasileiros é tamanha ao ponto de que, considerando as partes portuguesa e espanhola, seriam necessários oito mercados ibéricos para haver uma proporção territorial equivalente. A título de curiosidade, o sistema elétrico brasileiro possui uma dimensão tão extensa que poderia interligar quase que a totalidade dos países da Europa.

A operação do mercado de eletricidade brasileiro é de responsabilidade de um único operador de mercado, nomeadamente a CCEE. Este único agente é responsável por registrar contratos bilaterais a prazo e transações no mercado de curto prazo entre compradores e vendedores de energia elétrica que participam do mercado de energia brasileiro. Tais compradores e vendedores devem dispor de requisitos legais e técnicos para comprar ou vender energia no âmbito do mercado livre de energia. Já a operação do MIBEL fica a cargo do OMI, que acaba por ser segmentado em outros dois operadores de mercado, sendo eles OMIE e OMIP. O OMIE é responsável pela gestão do mercado de curto prazo (diário e intradiário) e o OMIP é incumbido do segmento mercado de longo prazo (contratos bilaterais). Mesmo dispondo de menor proporção territorial, a estrutura de operação do MIBEL é um tanto quanto mais robusta do ponto de vista analítico. Isto se justifica em virtude de a operação envolver dois países da Península Ibérica.

A definição dos preços a serem pagos energia no mercado brasileiro num horizonte de curto prazo (PLD), como descrito anteriormente, é realizada fundamentalmente em função do submercado, do patamar de carga e da semana levada em consideração. Desta forma, evidenciam-se doze preços para o PLD que podem assumir diferentes valores. Tais preços são alterados em função da relevância do consumo de energia elétrica consolidado, do submercado em questão e da alocação temporal descrita num horizonte semanal. No MIBEL, mais especificamente nas operações pertinentes ao OMIE, os preços de mercado e os volumes de energia comercializados numa determinada hora são estabelecidos através do cruzamento entre a oferta e a demanda, ou seja, trata-se de um modelo de preço marginal único. Contudo, podem haver diferenças de preço entre Portugal e Espanha no caso em que a capacidade da interligação seja excedida, ou seja, ocorre a separação de mercado.

Os mercados de energia elétrica tendem a evoluírem para acompanhar mudanças que ocorrem em virtude do desenvolvimento de tecnologias focadas na geração de energia elétrica através de fontes renováveis e da disseminação da geração distribuída. Vale ressaltar que as matrizes elétricas do Brasil e de Portugal são fundamentalmente renováveis, sendo a geração hidroelétrica a base para tais. Ambos os países são providos de condições naturais que incentivam a geração descentralizada de energia. É importante frisar que mercados locais de energia são uma tendência mundial. Como a conceção do MIBEL já dispõe de um conceito de mercado aberto e competitivo, há certa vantagem em relação ao mercado brasileiro no que diz respeito à disseminação de mercados locais de energia. Na conjuntura do mercado brasileiro de energia se faz muito presente o conceito de consumidor cativo, ou seja, que não dispõe de poder de escolha na definição do fornecedor de energia elétrica.

Levando em consideração os apontamentos supracitados, é relevante a definição de um resumo comparativo entre o MIBEL e o mercado de energia brasileiro. A Tabela 3 apresenta tal resumo.

Tabela 3 Resumo comparativo entre o mercado de energia brasileiro e o MIBEL

	Mercado de energia brasileiro	MIBEL
Dimensão	Dispõe de quatro submercados distribuídos numa grande extensão territorial	Composto a partir de dois segmentos de mercado alocados numa área oito vezes menor que o mercado brasileiro
Operação	Um único operador de mercado para os mercados de curto e longo prazos	Segmentação da operação do mercado em duas vertentes: curto prazo (Espanha) e longo prazo (Portugal)
Definição de preços	Segmentada em submercados e de acordo com o consumo e produção evidenciados em cada submercado, considerando a alocação temporal e espacial	Ocorre através do cruzamento da curva de oferta e de procura, de acordo com o modelo europeu, sendo que há segmentação do mercado quando há congestionamento nas interligações
Potencial de desenvolvimento	Mercado restrito e com forte presença de consumidores cativos de forma que mercados locais de energia estão ainda muito incipientes	Mercado aberto e susceptível à disseminação de mercados locais de energia

Neste capítulo foram descritos os mercados de energia elétrica estabelecidos no Brasil e em Portugal. Além disto, uma análise comparativa entre tais estruturas mercadológicas foi delineada. Tendo em vista tais assuntos, o capítulo seguinte discute a temática referente aos mercados locais de energia.

3. MERCADOS LOCAIS DE ENERGIA

Os mercados locais de energia elétrica podem ser entendidos como uma situação onde consumidores individuais e consumidores produtores interagem com a finalidade de negociar energia elétrica numa determinada vizinhança. A idealização de tal situação é relativamente simples. Contudo, para a implementação prática de um mercado local, algumas barreiras técnicas devem ser ultrapassadas. Tais barreiras tangenciam temas relacionados à produção distribuída, mercados de energia elétrica e modelos de negócios, acabando por conceber linhas de pesquisa importantes para estudos de mercados de energia elétrica.

A mudança de paradigma relacionada à alteração do modelo de produção de energia elétrica tido como centralizado para o modelo considerando produções descentralizadas é latente. Tal mudança técnica tende a impactar significativamente como as transações de compra e venda de energia elétrica são realizadas no contexto de mercados de energia elétrica. Tendo em vista o avanço da produção descentralizada de energia elétrica, não é uma utopia a situação onde a maioria das unidades de consumo de eletricidade também disponham de unidades particulares para produção de energia, através de painéis fotovoltaicos, geradores eólicos ou em algum outro formato de geração não-tradicional. Tais unidades particulares

de produção de energia elétrica são comumente utilizadas para suprir a demanda particular do consumidor produtor em questão. Indo além, o excedente pode ser utilizado para suprir a demanda da vizinhança. Neste contexto, a necessidade de comercializar tais excedentes localmente se evidencia. Com a produção sendo realizada de forma local, os custos relacionados à transmissão da energia elétrica (perdas técnicas) poderiam ser significativamente reduzidos. Além disto, a dinâmica da geração de energia elétrica por meio de recursos renováveis pode ser aprimorada através do compartilhamento de informações de montantes gerados em mercados locais, tendo em vista que a geração de energia através de recursos renováveis apresenta certa volatilidade associada às condições climáticas, como velocidade do vento, incidência solar e temperatura no local [25].

O desenvolvimento de mercados locais culmina na necessidade de um aprimoramento de aspetos relacionados à gestão pelo lado da demanda e pode estar associado ao desenvolvimento de cidades inteligentes. Diversos estudos na área de sistemas elétricos de energia apontam que no futuro as cidades inteligentes serão ambientes extensos e de alta complexidade no que diz respeito às relações entre as entidades envolvidas no sistema elétrico. Os mercados locais podem ser vistos como facilitadores para as relações entre as partes interessadas no contexto de uma cidade inteligente. Contudo, *a priori*, não é clara a forma com que tais mercados irão operar e nem os requisitos mínimos necessários para que haja funcionalidade e geração de benefícios para os participantes do mesmo. Para contornar tal problemática desenvolvem-se projetos, como por exemplo o e-Price [26].

O projeto e-Price propõe uma abordagem de controlo baseada em preços estabelecidos através de uma estrutura metodológica coerente para garantir a viabilidade, confiabilidade e a eficiência do sistema de energia europeu no futuro. A estrutura proposta consiste na implementação de tecnologias da informação e comunicação para controlar os requisitos técnicos e soluções necessárias para um controlo baseado em preços em sistemas de energia do futuro, conforme a Figura 7 [27].

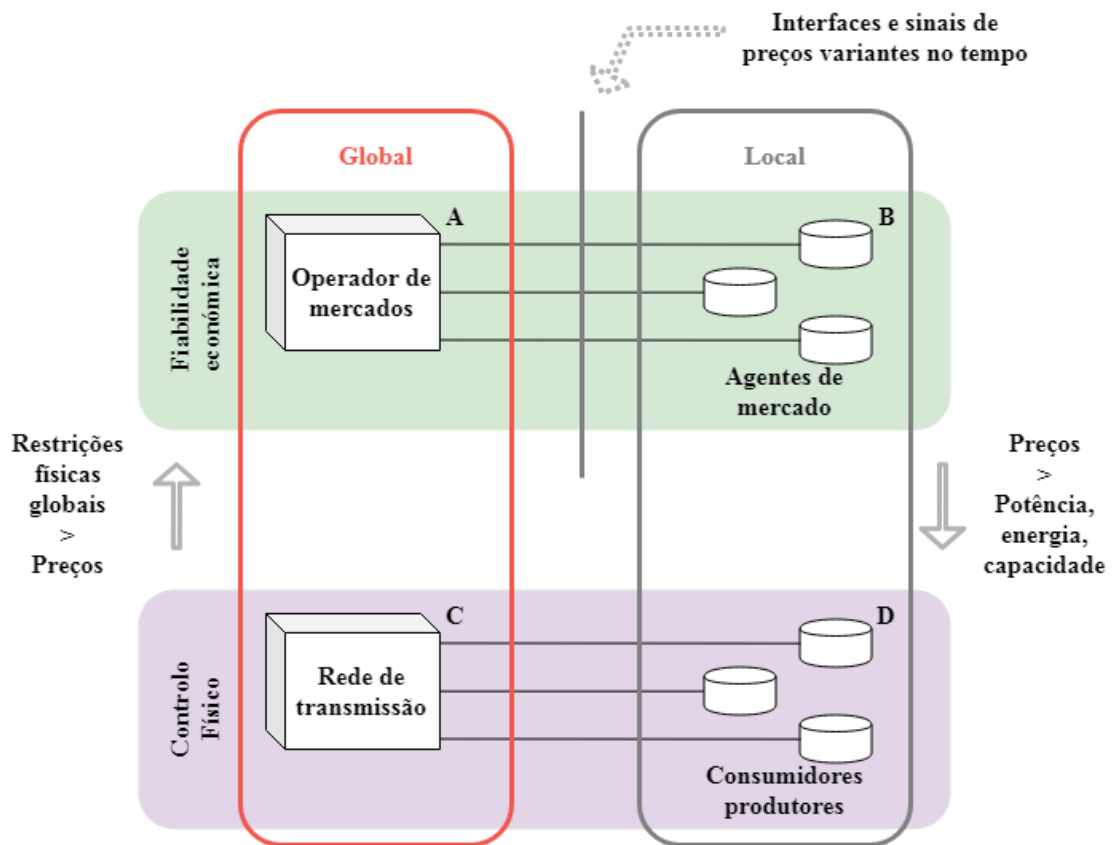


Figura 7 Esquema estrutural do projeto e-Price [27]

O sistema de energia em questão é interconectado fisicamente, conforme a Figura 7 ilustra através de C e D, e dispõe de requisitos de energia variáveis no tempo na forma de sinais proeminentes. Já num âmbito económico, os sinais de preços variantes no tempo atuam como portadores de informações proeminentes, conforme a Figura 7 ilustra através de A e B [27].

No contexto de mercados locais, é considerável que haja uma relação direta entre consumidores produtores e demais agentes de mercado. Desta forma, tais agentes acabam por assumir uma postura de facilitadores na tarefa do operador de mercados, ou seja, registrar e monitorar diversos consumidores produtores inseridos em determinados mercados locais.

As estruturas de *hardware* e *software* precisam dispor de confiabilidade para que o gerenciamento do mercado local seja viável em termos práticos. A segurança em termos de criptografia para a transferência de dados é também um ponto-chave para a integração de mercados locais com o balanço global de compra e venda de energia elétrica num sistema elétrico de energia.

Desse modo, a produção distribuída de energia elétrica, as entidades envolvidas em mercados locais e a articulação entre os mercados locais com o mercado de energia que abrange o nível de transmissão de energia em um sistema elétrico, são tópicos que carecem de análise. Ademais, um modelo de negócios se faz pertinente para haver a viabilização da expansão de mercados locais de energia.

3.1. ASPETOS DE PRODUÇÃO DISTRIBUÍDA

A produção distribuída de energia elétrica é uma tendência que acaba por desafiar a predominância dos modelos de geração centralizada de energia elétrica. A temática de produção distribuída pode ser encontrada na literatura como geração distribuída ou ainda como produção descentralizada.

De forma clara e objetiva, produção distribuída remete à geração local de energia elétrica de tal forma que a fonte geradora está próxima ao consumo. Via de regra, acaba por incitar custos de instalação por kWh maiores quando comparada com a geração tradicional centralizada. As principais vantagens dessa forma de geração evidenciam-se através da redução de custos associados às perdas na transmissão de energia elétrica e à aquisição de combustíveis fósseis. A redução do impacto ambiental referente ao uso e à depleção do estoque no capital natural de recursos naturais renováveis é, também, uma vantagem apresentada pela produção distribuída.

Pode-se identificar que as principais razões para que a geração centralizada ainda se sobreponha à produção distribuída como sendo fatores relacionados à economia de escala, eficiência, disponibilidade de combustíveis e tempo de vida útil das tecnologias empregadas neste formato de geração. A lógica consiste em aumentar a capacidade de produção, aumentar a eficiência e reduzir o custo por kWh.

Contudo, a vantagem relacionada à economia de escala, evidente na geração centralizada, apresenta uma tendência de diminuição em virtude de contínuos desenvolvimentos tecnológicos na produção distribuída. A eficiência de máquinas e tecnologias empregadas na geração centralizada é elevada e não se observa muita margem para inovação. Entretanto, o carvão, considerado o combustível fóssil mais abundante e com fornecedores estáveis por todo o globo, não é conveniente para produção distribuída, apesar de ser economicamente adequado para geração centralizada. Vale ressaltar que a estimativa de tempo de vida útil para plantas geradoras no formato centralizado está entre 25 e 50 anos, o que faz com que

tal formato permaneça sendo uma forma primária de geração de eletricidade ainda por vários anos [28].

Na literatura é possível encontrar diversos estudos com análises comparativas entre os modelos de produção distribuída e centralizada. Martín-Martínez *et al.* [29] discutem a questão sobre como a produção distribuída irá evoluir em relação à produção centralizada de energia e propõe um modelo de otimização de cunho comparativo entre estes dois paradigmas. Neste contexto, os fatores que mais afetam a comparação entre tais paradigmas, considerados pelo modelo proposto, são: custos relacionados ao investimento necessário e à operação do empreendimento; requisitos de flexibilidade; capacidade de resposta pelo lado da demanda; demanda térmica; investimento e perdas na transmissão e, por fim, estrutura de precificação de acesso. Na Figura 8 é apresentado um diagrama dos pontos em questão.

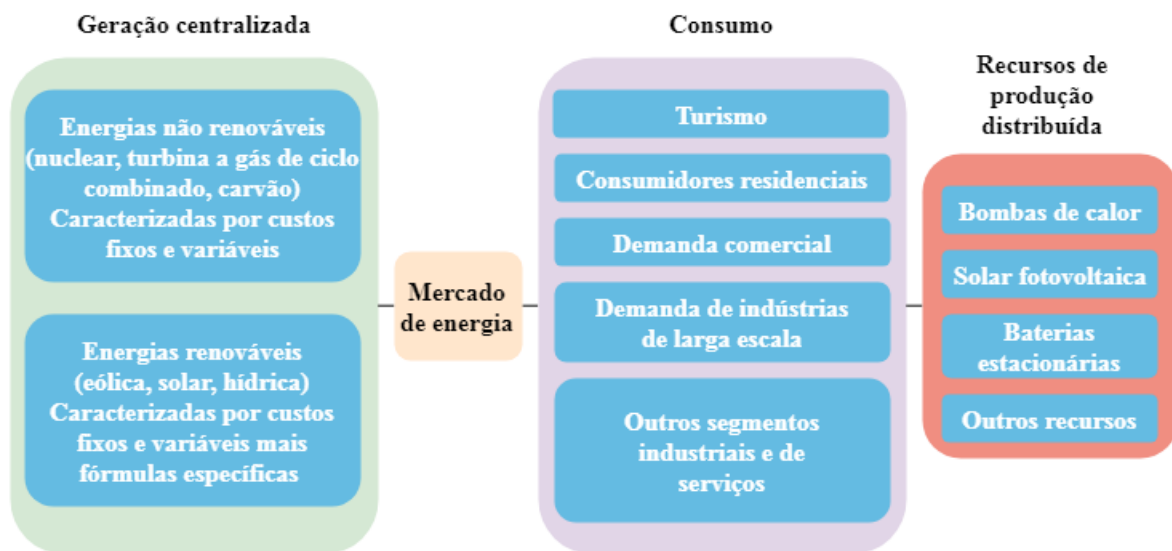


Figura 8 Diagrama de blocos proposto em [29]

Os fatores expostos no diagrama da Figura 8 são considerados pelo modelo através de variáveis que possuem o objetivo de representar o impacto de tais fatores na conjuntura comparativa entre estruturas centralizadas de geração e produção distribuída. Contudo, ressaltasse que os fatores considerados por este modelo podem ser alterados para adequação da análise realizada no sistema elétrico em questão [29].

No contexto de produção distribuída, é importante ressaltar a temática relacionada à regulação econômica deste segmento. Para estudar tal regulação econômica, vários métodos são descritos na literatura, sendo possível apontar a realização de análises de casos históricos e práticas existentes ou, ainda, fazer uso de métodos econômicos e estatísticos com a

finalidade de comparar diferentes sistemas que são estruturados em diferentes formas de regulação, ou não.

Huang e Soder [30] consideram que a sistemática dos operadores do sistema de distribuição é descrita como sendo um monopólio natural, mesmo que as decisões realizadas sejam direcionadas por aspetos regulatórios. Sendo assim, diferentes formas de regulação possuem maneiras distintas de modelagem para analisar o impacto económico sobre os investimentos na rede eléctrica. Para isto, são ressaltadas três questões regulatórias:

- Regulação sobre as perdas, pois, com o aumento da produção distribuída, as perdas no sistema também podem aumentar;
- Regulação do contingente de produção distribuída, que é uma prática comum em níveis de transmissão de energia, pode vir a ser necessária em níveis de distribuição em virtude da ampliação da produção distribuída;
- Regulação sobre taxas de conexão para produção distribuída, relacionada com os montantes que devem ser pagos para compensar alterações necessárias na rede eléctrica para a inclusão de unidades geradoras de energia eléctrica.

Apenas para elucidar, mesmo que as unidades de produção distribuída estejam mais próximas do ponto de consumo de energia em grandes centros consumidores, apresentando de fato redução de perdas, em casos específicos isto pode não ocorrer. Exemplo disto ocorre quando há produção em áreas rurais, que não consomem toda a energia gerada, e existe a necessidade de transportar a energia para o centro de consumo mais próximo. Tal transporte culmina em perdas no sistema, fazendo com que a redução de perdas vinculada à produção distribuída não seja tão significativa, ou até inexistente [31].

Adotar critérios de contingência, como o critério $n-1$ (caso um elemento do sistema avarie, o sistema ainda pode funcionar em condições aceitáveis), é essencial para que sejam atingidos bons níveis de qualidade de fornecimento de energia eléctrica. No nível de distribuição, onde a produção distribuída é mais significativa, é importante que sejam adotadas ações para regulação do fluxo de potência em casos de contingência.

É importante que o sistema para regulação sobre taxas de conexão descreva de forma coesa as exigências regulatórias impostas por governos em que os sistemas eléctricos estão submetidos. Para isso é importante que, além de aparatos tecnológicos específicos,

algoritmos robustos e bem estruturados sejam implementados para que o sistema opere de forma correta e otimizada.

3.2. ENTIDADES DOS MERCADOS LOCAIS

A geração distribuída de energia elétrica acaba por ter afetação em níveis globais e locais ao considerar o contexto de um sistema elétrico de energia, mesmo que o sistema seja essencialmente estruturado com geração centralizada. Ao realizar uma análise sistemática sobre entidades que formam um mercado local de energia elétrica é importante contextualizar a rede local e o delineamento da rede em questão. Os tópicos a seguir discorrem sobre os conceitos das entidades inseridas na concepção de mercados locais e da rede local.

3.2.1. DELINEAMENTO DE MERCADOS LOCAIS DE ENERGIA

Os mercados locais de energia podem ser categorizados de acordo com a sua localidade ou com os equipamentos que estruturam seu planeamento, implementação e operação propriamente dita [32]. A Figura 9 apresenta uma categorização ampla nesta descrição.

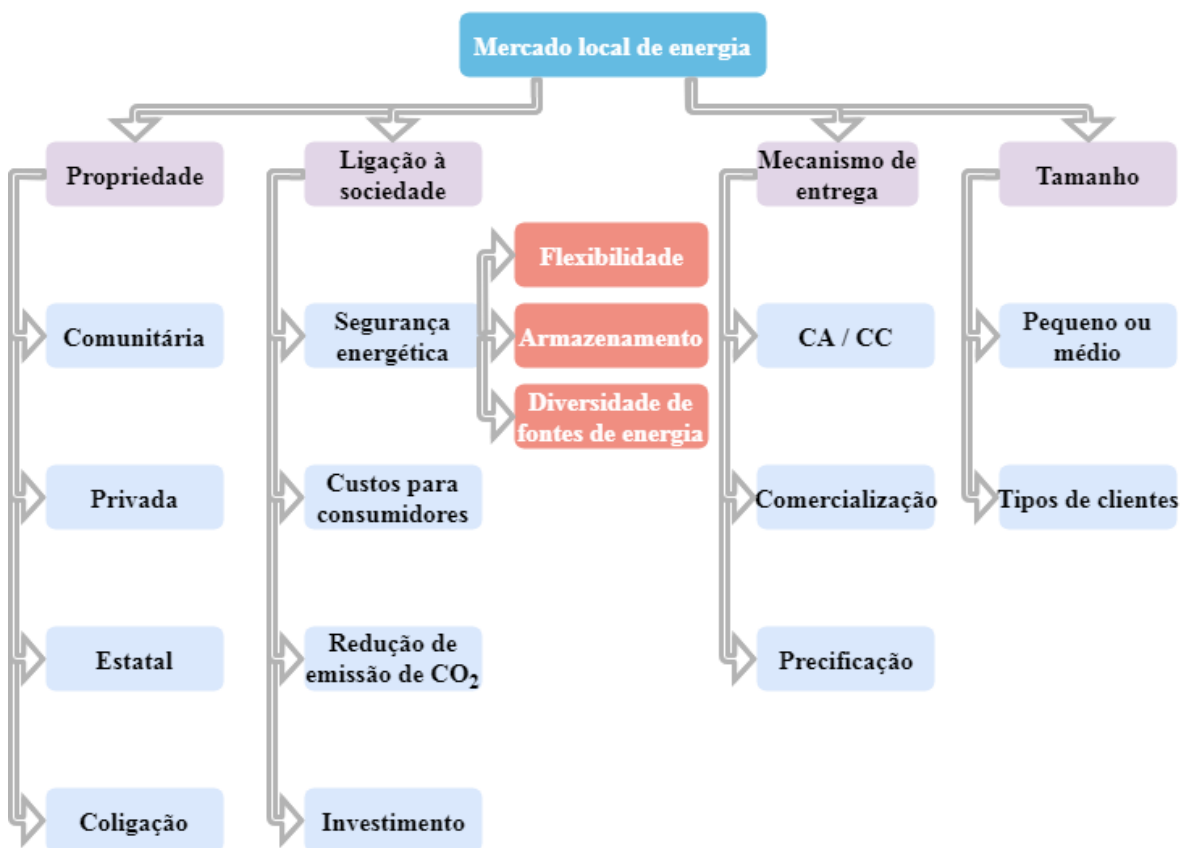


Figura 9 Possíveis categorizações de mercados locais de energia [32]

As possíveis categorizações sugeridas por Teotia e Bhakar [32], representadas na Figura 9, sugerem formas diferentes de identificar mercados locais de energia. A propriedade é um fator importante, pois está diretamente relacionada com a criação e desenvolvimento de mercados locais, ao passo que define os participantes ativos e demais partes interessadas no funcionamento de tal estrutura, como empresas privadas, órgãos governamentais, entre outras. Mercados locais de cunho comunitário enfatizam a economia obtida em custos relacionados à eletricidade e redução da utilização de recursos fósseis por parte de determinada comunidade. O setor privado pode ser um importante aliado na viabilização de mercados comunitários, ao passo que hajam benefícios para ambos os setores. A ligação à sociedade é comumente associada às reduções de demanda energética no contexto do sistema elétrico tradicional e é uma latente forma de investimento. Vale ressaltar que a conscientização da sociedade sobre a utilização racional de energia elétrica enfatiza o papel da mesma em relação ao meio ambiente. Além disso, o consumidor inserido nesta conjuntura pode sentir um alívio financeiro em virtude da redução de custos relacionados à transmissão da energia e ao balanço financeiro final. O mecanismo de entrega da energia em mercados locais está relacionado com a potência instalada, forma de onda da corrente (alternada ou contínua), tipo de carga e quantidade de energia elétrica gerada. Já o mecanismo de comercialização consiste em métodos que os agentes de mercado seguem e formas de compensação e precificação que formam a plataforma de mercado. A categorização por tamanho está relacionada com a localidade, demanda e pequenas comunidades independentes que formam um grande núcleo, podendo ser categorizadas como mercados locais de energia e compartilhar os benefícios do mesmo.

A organização de mercados locais de energia elétrica não se restringe às categorizações apresentadas na Figura 9. Exemplo disto é o mercado de energia elétrica baseado no Índice de Consumo de Energia Bitcoin, onde a precificação é dada de acordo com o reflexo do consumo de energia elétrica empregado na mineração de Bitcoins. É possível que, por exemplo, empresas proprietárias de plantas geradoras de energia elétrica considerem realizar transações em mercados locais através de criptomoedas.

A geração descentralizada é evidente num contexto de mercados locais de energia. Até 2014, mais de 1,5 milhões de geradores descentralizados foram instalados apenas na rede elétrica da Alemanha, sendo que a maior parcela de tais geradores é de propriedade privada, composta essencialmente por produtores independentes, ou *prosumers*. Apenas para constar,

o termo *prosumer* identifica um usuário de determinado sistema elétrico que atua em sua essência como consumidor e como produtor de energia elétrica através de fontes renováveis de energia, predominantemente [33].

Uma quebra de paradigma que mercados locais viriam a incitar consiste na problemática relacionada aos consumidores produtores que estruturam uma nova geração de energia e não conseguem calcular receitas concretas em virtude de tarifas fixas incorporadas à conta de energia elétrica. Para que possam vender o excedente de energia gerado, os consumidores produtores precisam participar dos mercados de energia, devendo fornecer energia elétrica sob requisitos específicos e otimizações que não dependem do tamanho da geração em questão. No âmbito de mercados locais de energia elétrica, o fornecimento pode ser realizado sobre condições individuais e precificação da energia de acordo com as condições de geração.

No estudo apresentado por Holtschulte *et al.* [33], é discutida uma abordagem sobre um sistema de energia em formato de agrupamento, denominada CPSA (acrônimo de *Clustering Power System Approach*), onde a ideia principal é repassar as funções do operador do sistema de transmissão de determinado sistema elétrico para as camadas de média e baixa tensões, gerenciadas por operadores do sistema de distribuição. A justificativa para tal redistribuição de funções é que a maior parte das unidades de geração renovável está localizada no nível de distribuição. A Figura 10 ilustra uma estrutura de mercado local de energia que considera a abordagem CPSA.

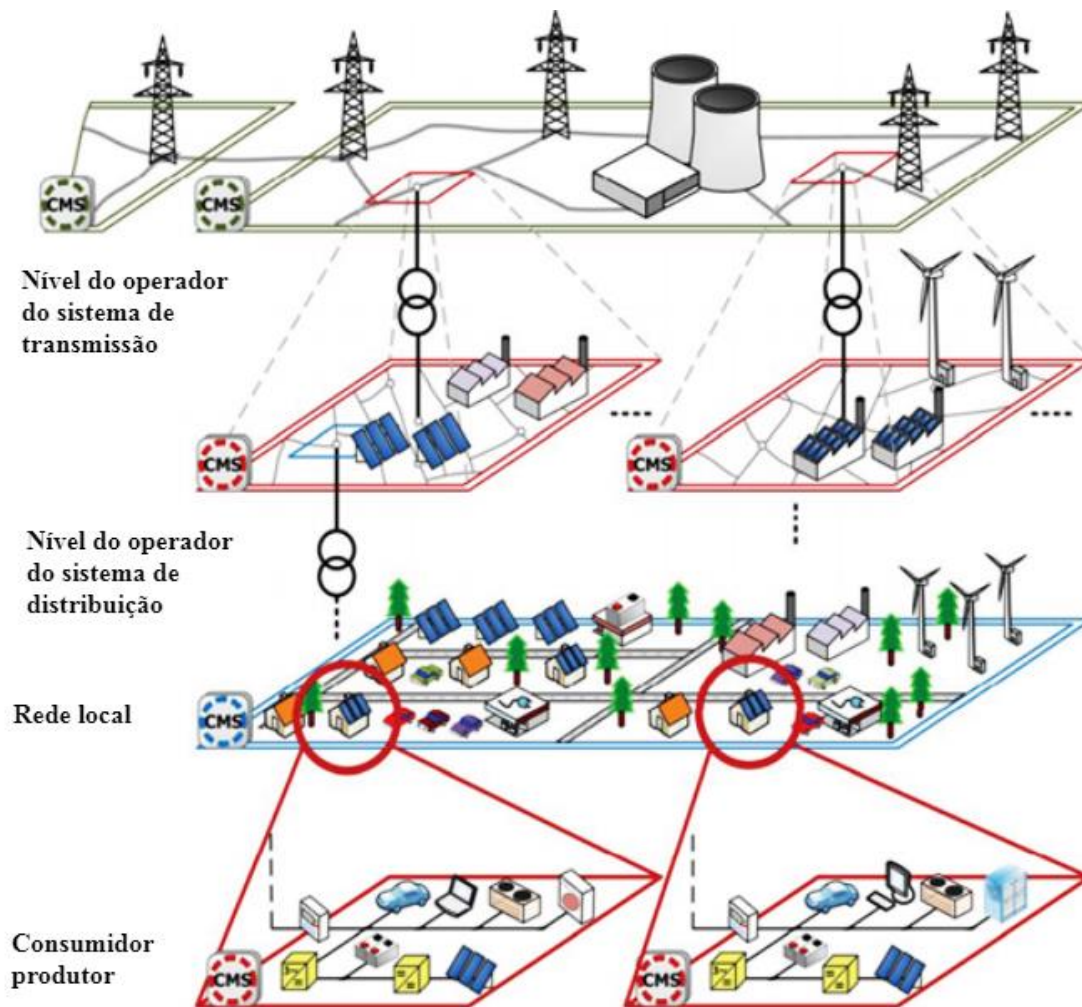


Figura 10 Ilustração de um sistema elétrico com a aplicação da abordagem CPSA [33]

A componente chave para o sistema apresentado na Figura 10 é o sistema de gerenciamento de agrupamento, denominado CMS (acrônimo de *Cluster Management System*), que pode viabilizar a implementação de estruturas de controlo. Tais estruturas de controlo estão relacionadas com condições de carga, frequência e tensão. A vantagem da implementação de tal sistema é que a rede não é limitada pelo tamanho dos agrupamentos, ao passo que uma zona residencial ou um consumidor produtor pode ser organizado em sua própria rede, como exemplificado na Figura 10. Com a implementação de estruturas baseadas em CMS, é necessário que tais sistemas sejam providos de funções voltadas à operação de mercado específicas [33].

As redes locais com CMS podem vir a organizar-se de forma própria e, por exemplo, estabelecer um regime de economia solidária. Economias solidárias podem ser concebidas de diferentes formas, contudo, os princípios são comumente relacionados com autogestão, democracia, cooperação, respeito ao meio ambiente, entre outros.

Uma importante questão relacionada a CPSA é a comunicação entre redes. A comunicação é essencial para lidar com a interoperabilidade entre agrupamentos de redes no âmbito de estabilidade do sistema. Por consequência, a comunicação é uma peça chave para que um mercado local de energia seja implementado de forma correta e eficiente. A capacidade de comunicação entre redes locais é definida pelo CMS, podendo ser implementado o *Internet Protocol* como a forma base de comunicação e, no quesito segurança, uma tecnologia de rede virtual privada. O CMS acaba por ter comunicação direta com dispositivos inteligentes inseridos nas redes e que disponham de interfaces para integração e gerenciamento do sistema implementado na rede local [34]. A Figura 11 apresenta o modelo de comunicação em questão.

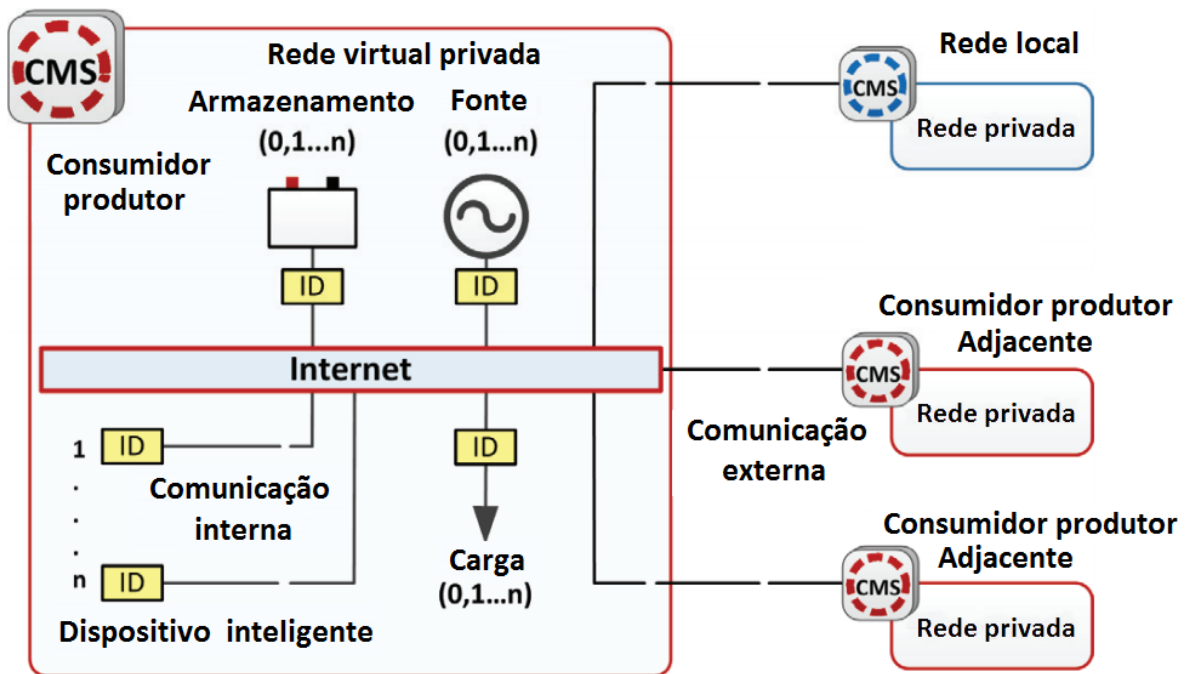


Figura 11 Modelo de comunicação num CMS [33]

Para a implementação do sistema apresentado na Figura 11, é essencial que haja um *web server* com uma interface que viabilize as estruturas necessárias para realizar o monitoramento, a comutação de circuitos e ações voltadas à segurança e à proteção. Tecnologias que se mostram essenciais para o desenvolvimento da interface estão no âmbito de programação de computadores. Linguagens de programação como PHP e SQL podem ser interpretadas como o alicerce para realizar o delineamento de uma rede local inserida em determinado mercado local de energia.

3.2.2. REDE LOCAL DE UM MERCADO LOCAL DE ENERGIA

As redes locais de um mercado local de energia devem estar de acordo com a geração, perfis de consumo e unidades de armazenamento de eletricidade e agrupadas no mercado em questão. A operação de tal rede pode ocorrer de forma independente ou em consonância com a rede global do sistema elétrico e demais redes locais. Vale ressaltar que existem determinados padrões de fornecimento de energia elétrica, que podem diferir de acordo com a legislação vigente no local, e que devem ser satisfeitos. É comum que vários mercados de energia elétrica compartilhem a mesma rede de distribuição. A dinâmica de funcionamento é dada de forma que a estrutura voltada à produção de energia elétrica da rede local gera energia quando dispõe de condições, a carga inserida na rede local consome tal energia e, havendo excedente, ocorre o armazenamento de energia para consumo em momentos em que a rede local não dispõe de condições de suprir sua demanda. Neste contexto de redes locais, é possível incorporar várias *microgrids*, *nanogrids* e até *picogrids* [32].

Em virtude da integração de redes com menor proporção, as redes locais acabam por agregar diferentes formas e níveis de geração de energia elétrica, agregando à rede certa confiabilidade, pois não se configura uma dependência direta dos preços de combustíveis, incidência solar ou disponibilidade hídrica, por exemplo. Contudo, surgem desafios inerentes ao modelo de comunicação entre as entidades. Um sistema de telecomunicações e telemetria robusto e viável técnica e economicamente deve ser parte essencial de uma rede local.

Sikdar e Rudie [35] propõem um mecanismo de mercado competitivo que pode ser implementado no nível de *microgrids*, considerando uma rede local com geração e consumo de energia elétrica. Tal mecanismo é baseado essencialmente em modelos de alocação dinâmica (*dynamic matching*) e permite que os participantes da rede em questão otimizem seu benefício próprio no processo de comercialização da energia elétrica. Além disto, o mecanismo permite a participação anônima nas negociações - limitando a possibilidade de manipulação - e não há exigência de compartilhamento de custos e informações de valor (denominada de “informação privada” na literatura relacionada à Teoria de Jogos). Além disto, o mecanismo assume que a distribuição de probabilidade das estratégias e os *payoffs* para a população de participantes são conhecidos. Quando o número de participantes é grande, esses dados podem ser facilmente construídos para um mercado que não considera aspectos de privacidade para um participante individual.

Já no trabalho proposto por Venayagamoorthy e Gautam [36], é apresentado um sistema inteligente para realizar o gerenciamento dinâmico de energia elétrica num contexto de *microgrids*. Tal sistema é denominado I-DEMS, acrônimo de *Intelligent Dynamic Energy Management System*, e pode ser implementado numa *microgrid* conforme a Figura 12.

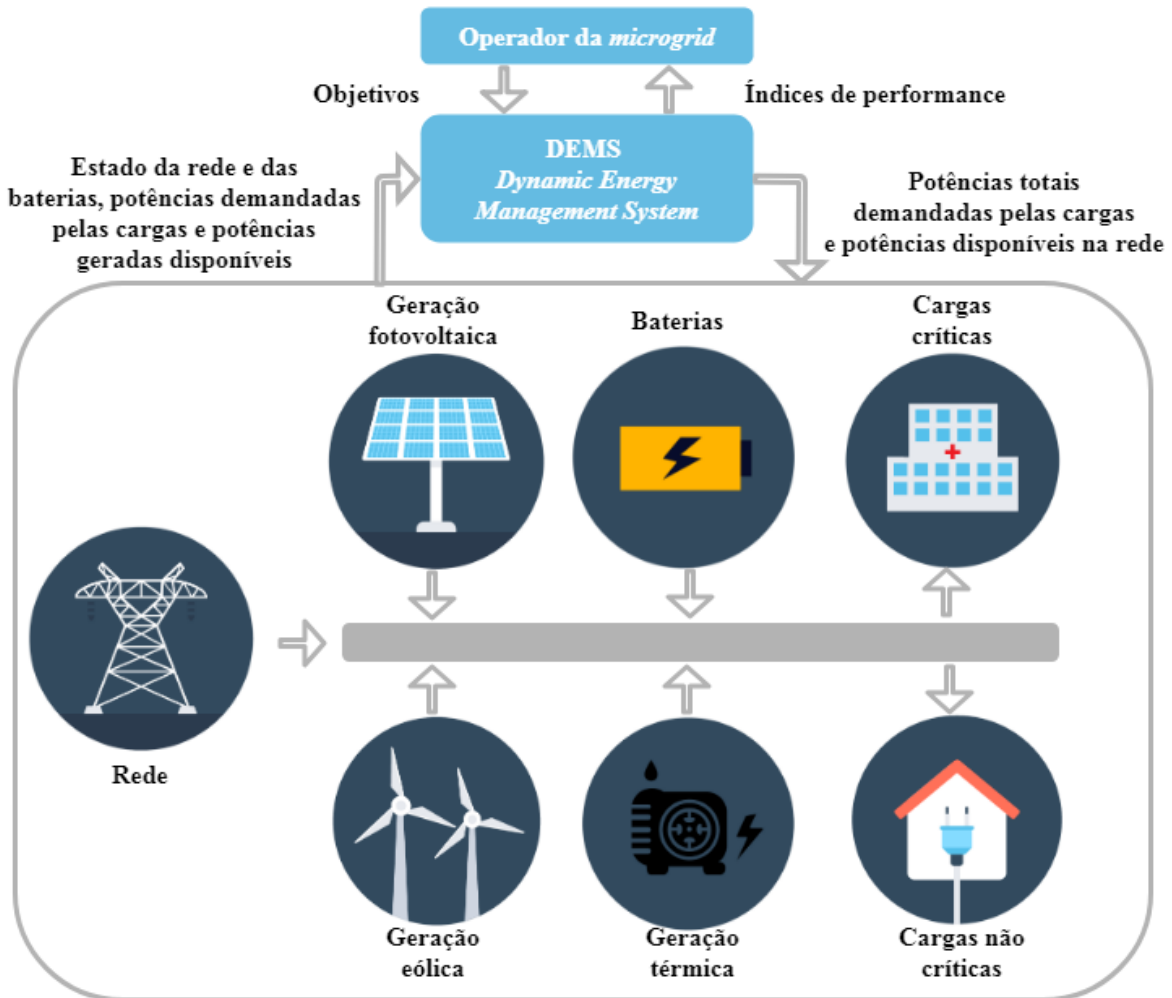


Figura 12 Representação gráfica da interação da interface I-DEMS com a operação da *microgrid* [36]

A Figura 12 apresenta um sistema híbrido com diferentes estruturas de geração de energia elétrica, tais como eólica, fotovoltaica e térmica que utiliza diesel como fonte primária de energia, podendo ser ainda mais diversificado. Além disto, tal sistema dispõe de um banco de baterias para que seja atribuída uma maior confiabilidade ao sistema, principalmente para que o fornecimento da carga prioritária disponha de maior continuidade de fornecimento de energia elétrica.

O I-DEMS dispõe de uma abordagem no contexto de árvore de decisões, culminando num despacho de energia determinístico que avalia os estados do sistema da *microgrid* e depois computa os despachos de energia em questão [36].

Nesta abordagem, há certa atenção para com a rede local em virtude da inclusão de uma carga prioritária que pode ser encontrada em certas *microgrids*. Contudo, em *nanogrids* e *picogrids* é menos latente a presença de cargas prioritárias por serem redes associadas às ossadas residenciais e pequenos comércios. Vale ressaltar que mesmo assim pode ser necessário um investimento extra nestas redes menores em virtude de cargas prioritárias inseridas de forma temporária.

3.3. MODELOS DE NEGÓCIOS PARA MERCADOS LOCAIS

Na literatura sobre modelos de negócios há certa divergência na definição de modelos de negócios e estratégia. Contudo, uma definição interessante é a de que modelos de negócios são a tradução da estratégia de um determinado agente que dispõe de determinada filosofia para estruturar um negócio visando obter lucros. Ao discutir modelos de negócios, estratégia e processos é possível concluir que todos são direcionados para problemáticas semelhantes [37]. A Figura 13 estabelece certas delimitações entre estas áreas.



Figura 13 Camadas de negócios [37]

Na presente dissertação serão discutidos modelos de negócios que podem ser aplicados na implementação de mercados locais de energia e apresentados num formato *Canvas*.

3.3.1. ESTRUTURAS DO MODELO DE NEGÓCIOS CANVAS

Um dos ícones da ontologia de modelos de negócios *Canvas* é Alexander Osterwalder. Em sua abordagem são estabelecidas nove áreas principais apresentadas num quadro. Esta forma de apresentação acaba por dar nome ao modelo. A Tabela 4 a seguir apresenta tais áreas.

Tabela 4 Descrição de áreas do modelo *Canvas* proposto por Osterwalder [38]

Segmento de Clientes	Consiste na organização de informações de clientes levando em consideração as características, demandas, enquadramento ou outras similaridades.
Oferta de Valor	Equivale ao produto ou serviço que será oferecido ao mercado, levando em consideração a forma que será apresentado.
Canais de Distribuição	Como é dada a comunicação para com cada segmento de cliente. Pode consistir em abordagens de <i>marketing</i> e logística para que seja possível alcançar o cliente e consolidar a oferta de valor.
Relacionamento	Postura assumida na interação com um determinado segmento de clientes.
Fontes de Receita	Identifica como será gerada a receita no âmbito da estrutura do negócio.
Recursos-Chave	Principais recursos que se fazem essenciais para que o modelo seja viabilizado. Podem ser de cunho financeiro, intelectual, mão-de-obra, entre outros.
Atividades-Chave	São as atividades necessárias para que ocorra a implementação do modelo de negócios.
Parcerias	Partes interessadas no negócio e que possam influenciar de forma positiva na implementação do negócio.
Estrutura de Custos	Trata-se da identificação e gestão dos custos decorrentes da operação do modelo de negócio propriamente dito.

Uma característica evidente de modelos de negócios, quando comparados com planos de negócios, é que tais modelos apresentam uma abordagem mais visual e intuitiva que acaba por facilitar discussões realizadas em grupo. A forma visual para a apresentação do modelo proposto por Osterwalder é apresentada na Figura 14.



Figura 14 Modelo *Canvas* de Osterwalder [38]

É possível verificar que há um enfoque central na oferta de valor, sendo a estrutura de custos e fontes de receita tidas como base para o modelo de negócios. No lado direito da Figura 14 é possível notar que as áreas são mais relacionadas ao cliente em si, sendo que para mercados locais evidenciam-se as relações estabelecidas para com o consumidor e/ou consumidor produtor. No lado esquerdo da Figura 14 são evidenciados os pontos mais relacionados com a dinâmica prática do negócio, ao passo que para mercados locais ficam descritos os procedimentos técnicos e equipamentos necessários para a medição, geração e transmissão de energia elétrica para determinado consumidor produtor.

Outra estrutura interessante para a implementação de mercados locais é descrita pela empresa IDEO. Tal estrutura apresenta um foco maior na estruturação de *startups* e acaba por envolver elementos de outros modelos e incorporar novas ideias. A Tabela 5 a seguir apresenta uma estruturação de cinco áreas que são consideradas nesta metodologia.

Tabela 5 Descrição de áreas do modelo *Canvas* proposto por IDEO [39]

Segmentos de Mercado	Grupo de indivíduos que acabam por obter benefícios da proposta de valor.
Modelo de Precificação	Relaciona as fontes de receita e o preço de produtos ou serviços.
Estratégia Competitiva	Foca na análise de concorrentes inseridos no mercado.
Capacidades	Define o conjunto de habilidades necessárias para que seja criada a oferta de valor.
Estratégia de Crescimento	Evidencia a forma que determinada empresa visa crescer tendo em vista vendas e estratégia da organização.

Para que seja possível evidenciar o modelo da empresa IDEO, a Figura 15 apresenta a sua estrutura levando em consideração elementos da Tabela 4 e da Tabela 5.

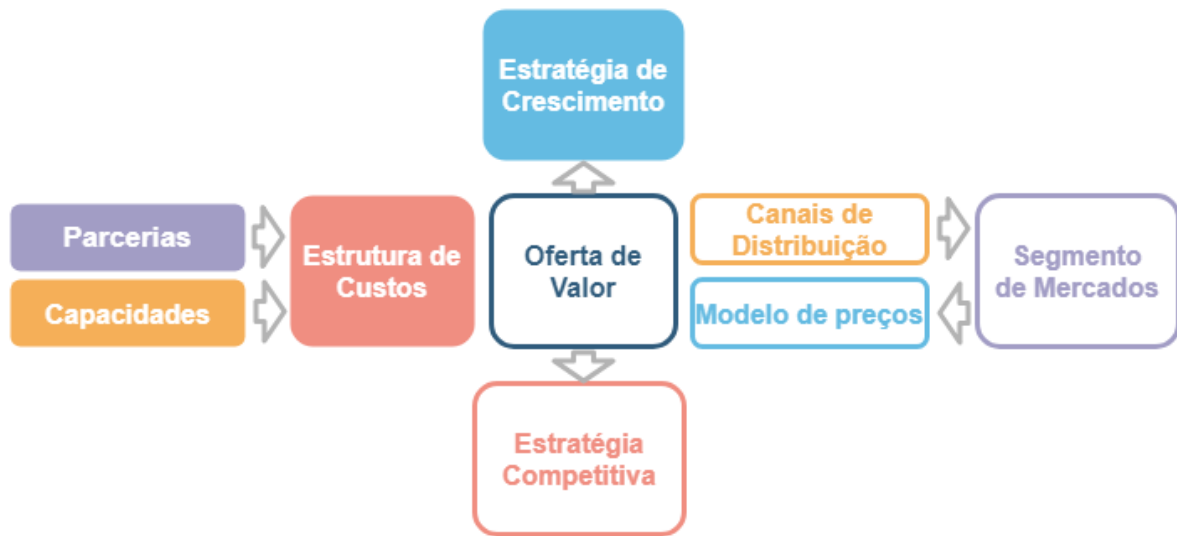


Figura 15 Modelo Canvas de IDEO [39]

A abordagem exposta pela empresa IDEO é interessante para *startups* justamente por dar atenção às estratégias competitiva e de crescimento, tendo em vista um fator limitante identificado através do conjunto de capacidades. Neste contexto, as parcerias comumente impactam a estrutura de custos de forma positiva através da obtenção de mais recursos financeiros. Este impacto acaba por dar suporte de forma indireta ao modelo de preços definido pelo segmento de mercados.

Outro modelo de negócio que vale ser descrito é o *fluidminds*. A tradução do termo *fluidminds* diz respeito à fluência de várias mentes para que, através de uma análise criativa, seja possível repensar a abordagem de negócios. Tal modelo foi proposto por Patrick Stähler e consiste em quatro blocos principais. Tais blocos são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 Descrição das áreas do modelo *fluidminds* [40]

Arquitetura de Valor	Define o que é oferecido, os valores do processo de criação, cadeia de valor, capacidades centrais necessárias, forma de alcançar e se comunicar com clientes e identificação de parceiros.
Oferta de Valor	Estipula quem são os clientes e qual o serviço que pode ser prestado para o mesmo.
Modelo de Receita	Estrutura os custos resultantes da arquitetura de valor e a forma de obter proventos.
Equipe e Valores	Evidencia as competências da equipe e a filosofia de interação entre os membros.

A estrutura *fluidminds* apresentada de forma gráfica é descrita na Figura 16.

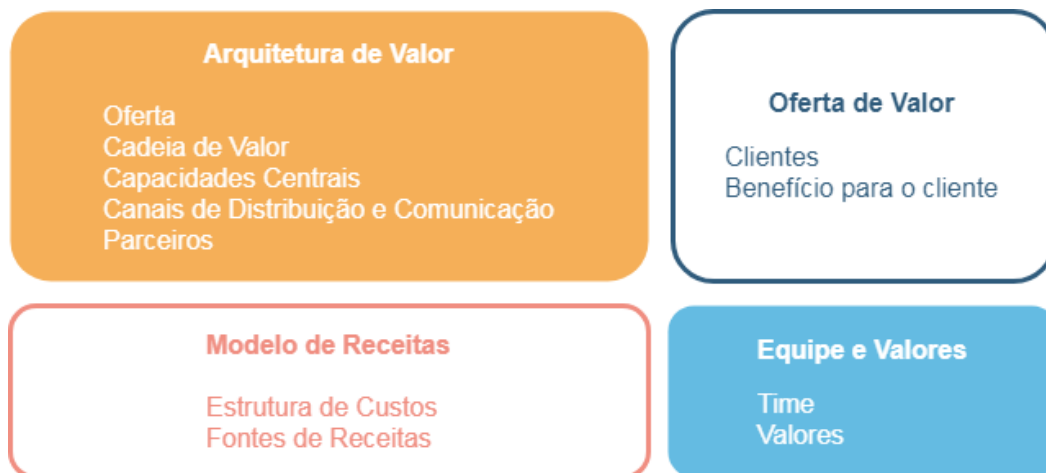


Figura 16 Modelo Canvas *fluidminds* [40]

No modelo *fluidminds* há uma busca pela quebra de paradigmas estabelecidos em empresas com filosofias mais tradicionais. Contudo, a cultura de uma empresa não é alterada de forma instantânea, sendo um desafio que tal modelo acaba por dar enfoque. Sendo assim, para que seja possível inovar numa linha de negócio, é essencial que haja o entendimento do modelo em que tal empresa está inserida ou pretende implementar para o desenvolvimento de sua atuação.

3.4. MODELOS DE NEGÓCIOS PARA O SETOR ELÉTRICO

Na revisão bibliográfica realizada por Hamwi e Lizarralde [41] são definidas três categorias de modelos de negócios relacionadas ao setor de energia elétrica:

- Modelos de negócios centrados em produtos de propriedade do cliente;
- Modelos de negócios centrados na terceirização de serviços;
- Modelos de negócios da comunidade de energia.

Os modelos de negócios centrados em produtos de propriedade do cliente apresentam como principal característica a condição onde o consumidor final compra o sistema e financia ou executa diretamente a instalação e manutenção do grupo gerador. Ou seja, o próprio consumidor compra tecnologias para a geração de energia renovável ou pode acabar por investir em tecnologias para realizar um gerenciamento pelo lado da demanda, como por exemplo medidores inteligentes e produtos focados em eficiência energética. Já os modelos de negócios centrados na terceirização de serviços apresentam como ponto focal o provimento de um serviço, nem tanto um produto. Vale ressaltar que, no setor elétrico, o conceito de serviço acaba por ser associado à eficiência energética. Desta forma, empresas focadas em serviços de eficiência energética acabam por estabelecer um modelo de negócios que entrega pacotes de serviço relacionados à energia renovável, resposta pelo lado da demanda e eficiência energética. Este segundo modelo acaba por ser uma alternativa interessante para investidores quando comparado com outros modelos que focam em tecnologias melhores ou preços mais baixos. Por fim, modelos de negócios da comunidade de energia são constituídos comumente em áreas rurais que enfatizam a geração de energia renovável. Tais áreas podem ser concentradas ou até distribuídas em casas de uma determinada comunidade. Neste modelo os consumidores podem participar de acordo com sua capacidade e a administração do mesmo pode ser realizada pelos próprios membros ou por um terceiro agente. Outra característica importante deste último modelo é que os agentes numa conjuntura local apresentam mudanças comportamentais devido ao relacionamento próximo e confiável de uns para com os outros [41].

No âmbito de modelos de negócios para o setor elétrico é possível evidenciar diferentes ofertas de valor que podem ser implementadas num contexto de um mercado local de energia. Estas ofertas de valor podem ser entendidas como tendências futuras focadas no aprimoramento de tecnologias para geração renovável de energia elétrica, amadurecimento de mercados locais instituídos num contexto integrado ao setor elétrico e atribuição de vantagens ao cliente ou consumidor.

Uma oferta de valor interessante, do ponto de vista do amadurecimento de mercados locais, é a atuação como agente facilitador no processo de instituir uma relação clara, objetiva e eficiente entre o mercado local e o mercado global. Essa oferta de valor pode ser entendida como a mesma desempenhada por um *broker*. No contexto de um mercado de energia, a figura de um *broker* acaba por ser de uma empresa, ou pessoa física, que realiza o intermédio de acordos de compra e venda de energia que podem envolver consumidores, consumidores produtores, geradoras e comercializadoras inseridas no mercado global.

Já no quesito de aprimoramento de tecnologias para geração renovável de energia elétrica, uma oferta de valor relacionada com aprimoramento do potencial do lado da demanda pode ser evidenciada através da oferta de serviços e produtos. Exemplo latente é a venda de medidores inteligentes ou instalação dos mesmos, estudos de viabilidade técnica e funcionamento condicionado do sistema perante ao sistema elétrico.

Uma oferta de valor focada na atribuição direta de vantagens ao cliente ou consumidor pode ser exemplificada como a execução de projetos de eficiência energética personalizados. Tais projetos acabam por ser muito interessantes quando se adequam às condições impostas pelo mercado local. Estas condições podem ser auferidas por tarifas dinâmicas e fatores de geração e consumo de energia elétrica.

Para que seja possível contextualizar as categorias definidas por Hamwi e Lizarralde [41] e as possíveis ofertas de valor supracitadas, é interessante analisar os cinco modelos que refletem o sistema elétrico do Reino Unido, segundo a abordagem feita por Hall e Roelich [42].

3.4.1. MODELOS DE HALL E ROELICH

Hall e Roelich [42] abordam nove modelos diferentes para caracterizar diferentes modelos de negócios com valores complexos agregados. Na presente dissertação serão discutidos apenas quatro deles, sendo possível então, estabelecer menções às categorias de modelos de negócios.

O primeiro modelo é referente à conjuntura clássica. Nesta conjuntura existe uma centralização de responsabilidades, relativas ao mercado local de energia, em um único agente, o fornecedor licenciado. As relações relativas ao fornecimento de energia elétrica, pagamentos e balanço energético são descritas na Figura 17.

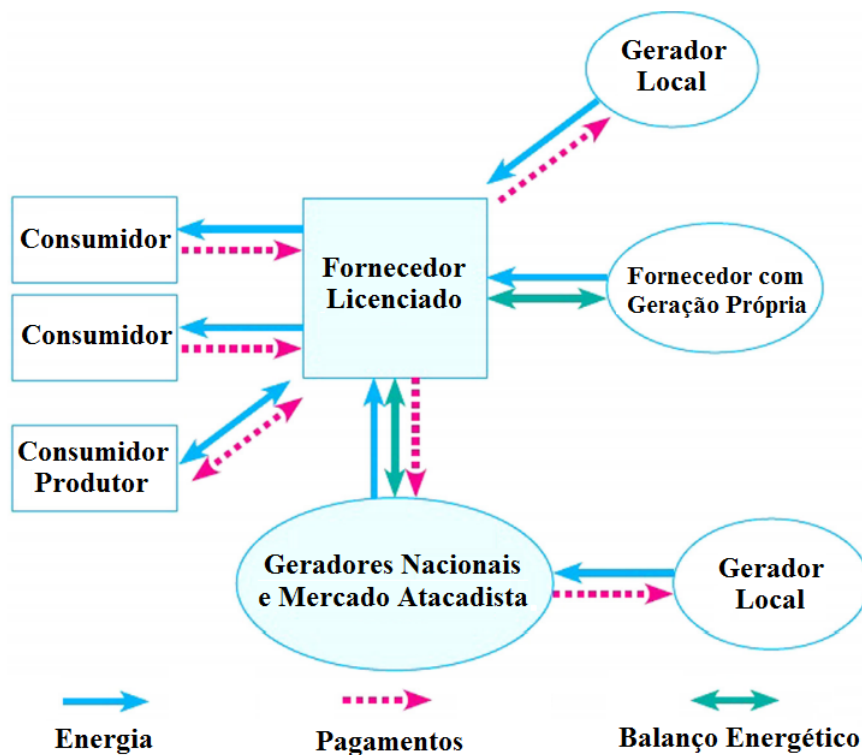


Figura 17 Modelo clássico [42]

No sistema apresentado na Figura 17 é importante ressaltar que não há muita margem para o desenvolvimento de geradores de pequeno e médio portes. Acaba por não oferecer muito incentivo no lado de serviços, além de não reter muito valor na localidade em que presta seus serviços. De maneira geral, o modelo clássico tem por objetivo prover unidades acessíveis do ponto de vista financeiro. O potencial de oferecimento de serviços personalizados para clientes acaba por ser pequeno [42].

No modelo clássico o poder de mercado acaba por ficar, de certa forma, mais concentrado num fornecedor licenciado e nos geradores nacionais vinculados a um mercado grossista. Portanto, pode-se constatar que modelos clássicos tendem a não caracterizar um modelo de negócios essencialmente competitivo.

Outro modelo interessante para ser analisado é o denominado agregação local. Para que seja possível ilustrar a dinâmica do mesmo é importante analisar a Figura 18.

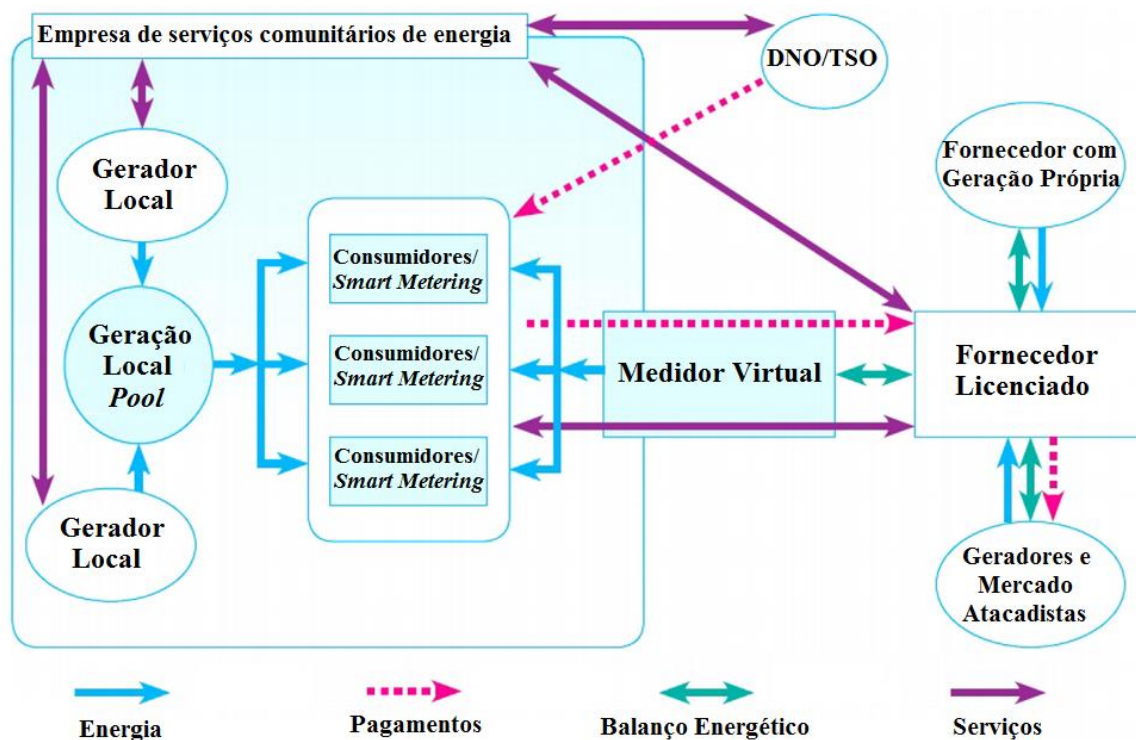


Figura 18 Modelo de agregação local [42]

O modelo de agregação local da Figura 18 propõe a realização de medições de meia hora para grupos de propriedade doméstica que permitiriam a correspondência entre demanda e a geração local por meio de uma estrutura voltada à resposta pelo lado da demanda. Pode-se dizer que o núcleo do modelo de agregação local está na relação entre a empresa de serviços comunitários de energia e a fornecedora licenciada. Neste sistema, permite-se o funcionamento de geração local sem a necessidade de geradores comunitários para obter uma licença completa, mas com a participação da empresa referida anteriormente. Além disto, os operadores dos sistemas de transmissão e distribuição (DNO/TSO) são considerados atores relacionados com a agregação de possíveis contratos voltados ao lado da demanda [42].

No modelo de agregação local é possível constatar que há uma flexibilidade considerável na estrutura do mercado local. A empresa de serviços comunitários é o agente provedor dos serviços relacionados ao fornecimento de energia aos consumidores com medição inteligente. Contudo, ainda haveria interferência de legislação superior através da figura dos operadores de transmissão e distribuição. Tal interferência não deve atingir necessariamente a negociação de preços por kWh, mas sim as características técnicas das instalações relacionadas ao mercado local. Nesse mesmo contexto, o agente central para a realização do

balanço energético, do ponto de vista prático, é a do fornecedor licenciado. A geração local *pool* vem a ser uma estrutura para minimizar o custo de operação do sistema. Isto ocorre justamente por estimular que as ofertas e lances dos geradores locais tendam ao respetivo custo marginal da operação de cada gerador local ou consumidor produtor. As ofertas e lances são consideradas atrativas caso apresentem melhores condições que as ofertadas pelo fornecedor licenciado.

Outro modelo importante é o relativo a um órgão municipal licenciado. Para ilustrar esta situação, a Figura 19 é apresentada.

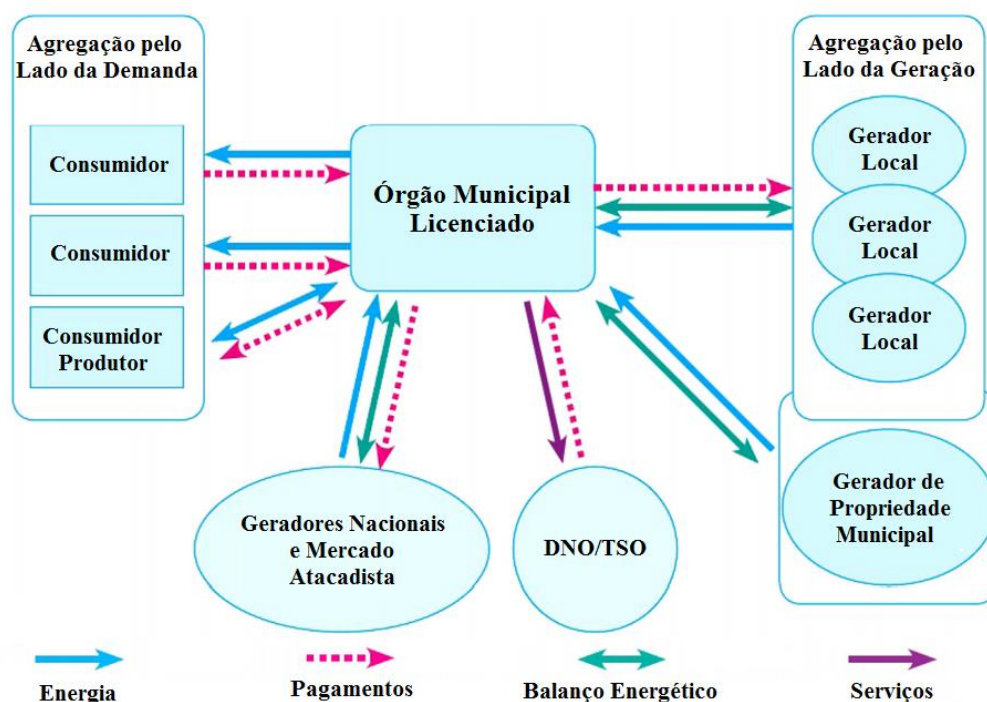


Figura 19 Modelo municipal [42]

No modelo apresentado na Figura 19 há o envolvimento de uma autoridade local que assume uma postura de autoridade fornecedora licenciada. Tal órgão está concentrado num mercado local compartilhado e realiza a concentração geográfica focada na aproximação da geração e do consumo. Outro papel importante do órgão municipal é de estabelecer novas rotas e estruturas para as gerações locais, assim como estabelecer um sistema de tarifação justo. Neste sentido, os operadores de transmissão e distribuição ainda dispõem de espaço para a prestação de serviços relacionados ao lado da demanda [42].

O modelo municipal é um mercado local de propriedade comunitária onde a ligação à sociedade é comumente relacionada com a redução dos custos para os consumidores. Como

trata-se de uma organização de poder público, é importante que haja uma legislação própria que seja coerente e bem estruturada. Neste sentido, tal legislação deve abranger relações com os operadores dos sistemas de transmissão e distribuição, mercado grossista (juntamente com geradores de abrangência nacional), agregação pelo lado da demanda e agregação pelo lado da geração.

Por fim, o modelo ponto-a-ponto com uma unidade de balanceamento local é ilustrado na Figura 20.

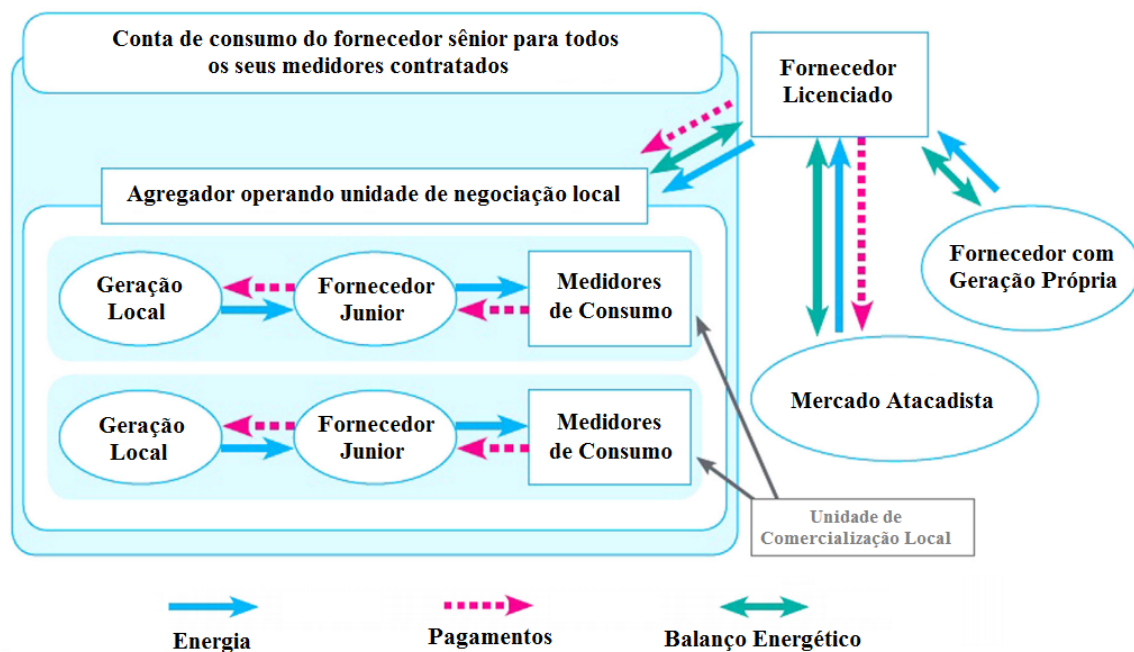


Figura 20 Modelo ponto-a-ponto com unidade de balanceamento local [42]

O modelo da Figura 20 é estruturado fundamentalmente através de uma plataforma de *software* que permite aos clientes comerciais selecionarem um conjunto de opções de geração distribuída para atender à demanda própria. Neste contexto, os fornecedores seniores poderiam registrar uma unidade de comercialização local em nome de um fornecedor júnior e considerando uma única região. Este modelo exige a criação de uma unidade de liquidação que permite os medidores de exportação e importação, dentro de uma área definida, serem consolidados separadamente. Isto acaba por agregar vantagens ao fornecedor júnior, como a possibilidade de abranger tanto o consumo quanto a produção em determinada área sem haver carga tributária recorrente e tarifas relacionadas com o balanceamento de cargas, além de facilitar a administração do fornecedor sênior de fluxos de dados associados. Vale destacar a figura de um agregador local para reunir consumidores e operar atividades

considerando o lado da demanda e com base na localização e na carga de várias partes. Os ganhos relacionados à eficiência energética não são claramente incentivados por este modelo [42].

Do ponto de vista técnico e prático, o modelo ponto-a-ponto com uma unidade de balanceamento local envolve diversos agentes diferentes, mas pode ser economicamente vantajoso para o cliente. Esta vantagem depende das condições impostas em cada unidade de comercialização local. Analisando a estrutura num panorama geral, é evidente que o fornecedor sênior, o fornecedor júnior, o agregador local e o fornecedor licenciado precisam de capital para manterem-se operativos. Este contexto pode levar a eventualidades de preços consideravelmente elevados para o consumidor.

3.4.2. DELINEAMENTO DE UM NOVO MODELO DE NEGÓCIOS PARA MERCADOS LOCAIS

Através das informações descritas na revisão de literatura abordada no presente trabalho, um novo modelo de negócios é apresentado neste tópico. Este modelo tem por objetivo descrever de forma intuitiva os pontos fundamentais necessários para a implementação e gestão de um mercado local. Para isto, a estruturação de um modelo de negócios *canvas* é levada em consideração. Como ponto de partida, é importante considerar um modelo específico para a descrição do modelo.

Considerando, deste modo, os quatro modelos apresentados, considera-se o modelo municipal apontado na Figura 19 como sendo o ponto de partida para a definição do modelo de negócios. Esta escolha se justifica pois, do ponto de vista de implementação prática, um mercado local necessita de um agente capaz de articular transações financeiras, conduzir negociações entre consumidores e produtores de diferentes níveis e atuar levando em consideração as condições técnicas da rede local. Deve também ser legitimado frente à administração pública. Vale ressaltar que, tendo em vista o conceito de produção distribuída, são agregadas vantagens técnicas em um nível municipal.

Neste sentido, são mantidas relações do órgão municipal licenciado com outros cinco segmentos. São eles: agregação pelo lado da demanda, agregação pelo lado da geração, geração municipal, operadores dos sistemas de transmissão e distribuição e os geradores em nível nacional vinculados ao mercado grossista.

O órgão municipal deve ser capaz de prover energia elétrica para consumidores tradicionais, ou seja, que não dispõem de geração própria, e receber as receitas provenientes dos mesmos. Neste mesmo sentido, são considerados os consumidores produtores. Para isso, uma estrutura de medição inteligente deve ser implantada através de um elemento chave, o microcontrolador.

A medição inteligente consiste num sistema embarcado com uma interface computacional capaz de coletar e enviar informações através de um sistema de comunicação de dados. De forma sucinta, define-se como sendo uma estrutura de telecomunicações, baseada em *hardware* e *software*, que estabelece um canal de comunicação para transmitir dados de forma remota entre estruturas de medição e a interface de monitoramento, como a apresentada na Figura 11. O intervalo de medição de potência consumida no tempo é padronizado, tido como igual ou inferior a 15 minutos.

No âmbito de modelos de negócios, o órgão municipal licenciado deve dispor de infraestrutura específica para realizar cortes e religações de energia de forma remota e obter dados relacionados ao consumo de energia elétrica. Desta forma, o sistema pode viabilizar interações com as cargas dos clientes alocados na agregação pelo lado da demanda, realizar a implementação de diferentes modalidades tarifárias e controlar perdas técnicas associadas ao sistema. Outra questão chave é a possibilidade de automatizar a faturação, ou seja, através do medidor o cliente pode consultar montantes que devem ser pagos ou até recebidos, em situações de consumidores produtores.

Levando em consideração a análise supracitada, um algoritmo elementar para realizar o envio de dados necessários para o mercado local em questão é proposto na Figura 21. Tais dados devem ser armazenados num servidor único e dedicado para a agregação de informações do mercado local.

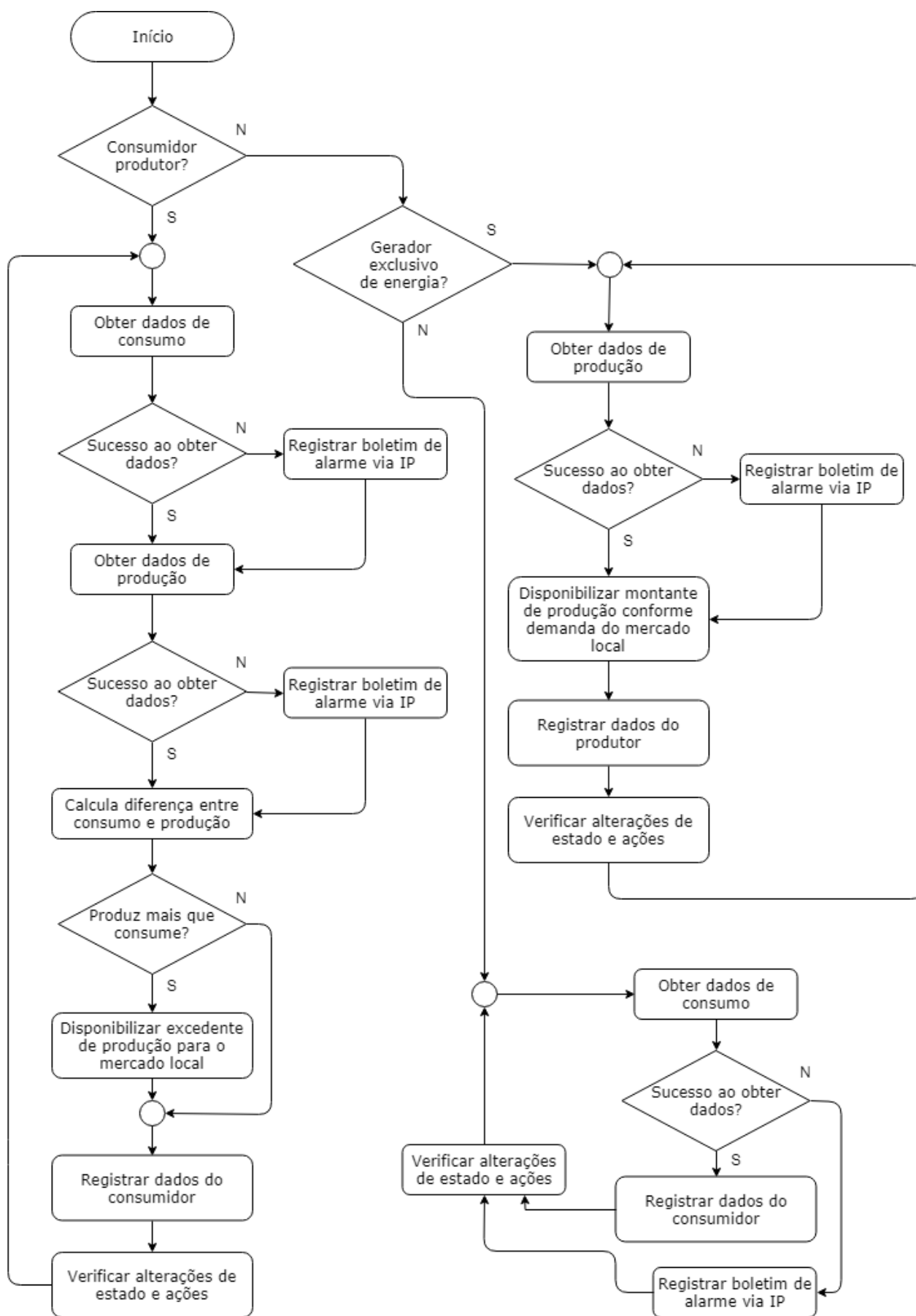


Figura 21 Algoritmo elementar para a obtenção de dados no mercado local proposto

Analisando o algoritmo elementar descrito na Figura 21 e levando em consideração a estrutura de agregação local pelo lado da demanda exposta no canto superior esquerdo da Figura 19, fica delineado, em linhas gerais, como seria o algoritmo para que os dados dos consumidores tradicionais, consumidores produtores e de geradores fossem disponibilizados para o mercado local. É evidente que consumidores que disponham de produção local precisam de um tratamento diferenciado de informação. Para a entidade municipal os dados de consumo refletem a demanda de energia elétrica requerida pelas cargas de cada indivíduo da agregação pelo lado da demanda, enquanto os dados de produção dos consumidores produtores determinam se o mesmo estará comprando ou vendendo energia elétrica. Vale ressaltar que a geração de propriedade municipal é levada em consideração para que o balanço energético num nível local seja estabelecido.

Através do registro de boletins de alarme, é possível obter informações sobre falhas e eventualidades na agregação pelo lado da demanda. Estes boletins de alarme são elementos fundamentais para o funcionamento do mercado, pois apresentam a informação base para que ações técnicas possam ser realizadas, como a necessidade de manutenção em equipamentos. Além disto, o registro de tais informações pode ser visto como uma ponte para avaliar a confiabilidade dos participantes no mercado local, ou seja, havendo a necessidade de recorrer a técnicas de *forecasting*, já existe uma base de dados com consumos e produções anteriores.

Dispondo da estrutura física tecnológica necessária e dos dados de consumo e produção da rede local, a entidade municipal começa a ter subsídios para estruturar uma articulação com o mercado grossista e geradores locais que definem a agregação pelo lado da geração. Nesta conjuntura, a Equação (2) é definida para determinar o balanço energético para o modelo proposto.

$$\sum_{n=1}^{k_{CP}} C_{CP}^n + \sum_{n=1}^{k_{CT}} C_{CT}^n = \sum_{n=1}^{k_{CP}} E_{CP}^n + \sum_{n=1}^{k_{GL}} E_{GL}^n + E_{GM} + E_{MA} \quad (2)$$

Tendo em vista a Equação (2), no que se refere ao consumo de energia, C_{CP}^n é a energia consumida pelo consumidor produtor n , considerando o número máximo k_{CP} de consumidores produtores na rede local. O termo C_{CT}^n representa a energia consumida pelo consumidor tradicional n , tendo em conta o número máximo k_{CT} de consumidores tradicionais na rede local.

Na estruturação da Equação (2) são consideradas também as formas de geração de energia na rede local, onde E_{CP}^n é a energia produzida pelo consumidor produtor n , E_{GL}^n é a energia produzida pelo gerador local n , considerando o número máximo k_{GL} de geradores locais na rede local. E_{GM} é a energia produzida através do próprio órgão municipal licenciado, ou seja, via gerador municipal, quando houver. Por fim, a energia proveniente do mercado grossista ou de geradores em nível nacional é evidenciada através do termo E_{MA} .

A Equação (2) é fundamental para a definição de montantes de energia que precisam ser gerados ou demandados no mercado grossista, tendo em vista o mercado local em questão. Definidos os montantes gerados, é importante que sejam comparados os preços relacionados às gerações E_{CP}^n , E_{GL}^n , E_{GM} e E_{MA} . Tendo definidas as relações básicas entre as partes envolvidas no mercado local, se faz importante a descrição do modelo de negócios propriamente dito.

Deste modo, sete áreas principais são consideradas nesta abordagem: oferta de valor; precificação; parcerias; recursos estruturais; recursos específicos, capacidades e relações estratégicas. A Tabela 7 discrimina estas sete áreas principais.

Tabela 7 Descrição de áreas do modelo *Canvas* proposto para mercados locais

Oferta de Valor	Fornecimento de energia elétrica aos consumidores tradicionais e consumidores produtores considerando aspetos de qualidade de energia, tipo de geração e tarifação.
Precificação	Definição de tarifas personalizadas considerando melhores condições de fornecimento e opções disponíveis de compra e venda de energia no mercado local.
Parcerias	Agentes considerados fundamentais para garantir o fornecimento de energia elétrica aos consumidores e consumidores produtores.
Recursos Estruturais	Estruturas necessárias para o funcionamento do mercado local de energia, como <i>hardwares</i> e outros equipamentos físicos.
Recursos Específicos	Recursos esporádicos, de carácter transitório ou especializados, como funcionários com formação específica, recursos financeiros e <i>softwares</i> que precisam de eventuais adaptações.

Capacidades	Alinhamento de restrições físicas, técnicas e de mão-de-obra inerentes ao funcionamento do mercado local.
Relações Estratégicas	Definições de relacionamentos com outros mercados locais e outros agentes estratégicos, como novos geradores locais ou consumidores produtores.

Neste sentido, uma estrutura *canvas* do modelo de negócios proposto é apresentada na sequência através da Figura 22.



Figura 22 Modelo *Canvas* proposto para implementação de um mercado local

Certamente que a oferta de valor pode ser entendida como o núcleo do modelo de negócios. Tendo em vista um mercado competitivo, a oferta de valor deve, no contexto de mercados locais, garantir que a energia entregue aos consumidores permaneça dentro dos padrões mínimos de qualidade requeridos pela legislação do país em questão. É importante que as informações sobre as procedências da energia fiquem disponíveis para os consumidores. Mesmo que muitos deles não se atentem a tal informação, é possível que uma parcela acabe por adaptar hábitos de consumo. Tais hábitos de consumo podem mudar também através de alterações tarifárias. Vale ressaltar que um fator crucial é que o consumidor tenha ciência do porquê da alteração da tarifa com certa antecedência.

As alterações tarifárias estão relacionadas com pagamentos. A área de precificação define basicamente a formulação do preço que deve ser pago pela energia elétrica no mercado local. Tal formulação deve considerar:

- Questões técnicas relacionadas à rede local;
- Encargos impostos por órgãos públicos;

- Taxas voltadas à operação do mercado local;
- Reservas de contingência para eventualidades ou evolução da rede;
- Preços definidos por consumidores produtores, geradores locais e geradores nacionais do mercado grossista.

A área de parcerias trata de manter um bom relacionamento entre a agregação pelo lado da demanda, agregação pelo lado da geração, os operadores dos sistemas de transmissão e distribuição e o mercado grossista. Esta área necessita de um suporte jurídico robusto para intermediar as relações no âmbito do mercado local. O foco das parcerias é a agregação pelo lado da demanda, ou seja, em consumidores tradicionais e consumidores produtores.

Na área de recursos estruturais é considerada a manutenção dos equipamentos da rede local, como transformadores, chaves seccionadoras, equipamentos de proteção, medidores, entre outros. Além disto, esta área dedica-se à estrutura de tecnologia da informação necessária para que os dados de consumo e de produção sejam fidedignos e bem empregados na definição do balanço energético.

Os recursos específicos estão relacionados com ações pontuais que o mercado possa vir a necessitar e que envolva alteração orçamentária. A contratação de um técnico em telecomunicações para uma eventual alteração no sistema de telemetria da rede local ou um consultor financeiro para melhorar a dinâmica das transações no mercado local são exemplos de aquisição de recursos específicos. Vale ressaltar que os *softwares* num mercado local devem ser seguros e flexíveis, tendo em vista que pode não ser a melhor abordagem a contratação de uma equipe exclusiva de desenvolvedores.

Para a área de capacidades são pontuadas questões administrativas e restrições de funcionamento do mercado local. Como há um órgão municipal licenciado em evidência, é importante que os recursos humanos sejam bem dimensionados para garantir que o modelo de negócios para o mercado local seja implementado de forma eficiente do ponto de vista administrativo. Nesta área também são delimitadas as questões relacionadas à expansão do mercado local, adição de novos geradores locais ou comutação de um consumidor tradicional para um consumidor produtor.

Por fim, a área de relações estratégicas visa aprimorar relações com outros mercados locais e também os geradores nacionais no mercado grossista. Negociações com outros mercados locais pode gerar benefícios para os elementos da agregação pelo lado da demanda. Esta área

também trata de representar o órgão municipal licenciado em eventos do setor elétrico e potencializar novos avanços para o mercado local.

A base para a implementação de um modelo de negócios num mercado local é o fluxo de informações correto e preciso. As informações de consumos e produções, especialmente em consumidores produtores e consumidores tradicionais, são essenciais para que sejam definidos os montantes de energia que devem ser adquiridos através de gerações locais ou mercado grossista, respeitando a condição imposta pela Equação (2). Tal aquisição deve ser realizada levando em consideração os preços mais vantajosos para os consumidores. O órgão municipal licenciado deve ser visto como uma autarquia, ou seja, dispõe de certa autonomia para tomar decisões no sentido de sua própria gestão. Esta condição é fundamental para que tal órgão municipal possa comercializar energia elétrica.

Neste contexto, o modelo de negócios proposto visa, através da definição das sete áreas expostas na Tabela 7, elencar as questões básicas para a estruturação do mercado local. Com o delineamento do mercado local, é possível ter uma visão geral da complexidade da implementação desta modalidade mercadológica, contudo, é uma tendência notável para a evolução de sistemas elétricos de energia em todo o mundo.

3.5. ANÁLISE CRÍTICA DE MERCADOS LOCAIS

Historicamente, os setores elétricos de diversos países evoluíram de diferentes formas com o intuito de melhor satisfazer as necessidades de consumidores e empresas relacionadas ao fornecimento de energia elétrica. Neste contexto, os mercados locais de energia emergiram e impõem novas dinâmicas de comercialização de energia elétrica. Tais dinâmicas apresentam um alto potencial de gerar benefícios em cadeia para diversos agentes.

Os mercados locais de energia representam um forte estímulo para a produção distribuída, que se torna cada vez mais substancial com o passar dos anos. Do ponto de vista técnico e prático, isto pode representar uma redução de perdas associadas à transmissão de energia elétrica na conjuntura de sistemas elétricos como um todo. Esta geração de energia elétrica mais próxima aos centros de consumo pode ser realizada considerando diferentes tecnologias, como produção hídrica em menor escala, biomassa ou geração fotovoltaica. A geração de energia a partir de fontes renováveis acaba por ser definitivamente uma questão favorável para a disseminação de mercados locais de energia, tendo em vista que aspectos de

comercialização associados aos consumidores produtores devem ser evidenciados num modelo específico.

Modelos de negócios são linhas de estudo que podem ajudar consideravelmente na disseminação de mercados locais de energia. A bibliografia relacionada aos modelos de negócios descreve os mesmos de uma forma generalista. Desta forma, se faz relevante que haja um modelo de negócios específico para mercados locais de energia. Através do modelo de negócios delineado⁸ é possível determinar uma metodologia para implementar e gerir um mercado local de energia elétrica.

O delineamento de mercados locais de energia leva em consideração questões técnicas, tamanho, fatores sociais e de propriedade. As questões técnicas são definidas preponderantemente pela estrutura da rede local e pelo tamanho do sistema elétrico em questão. Os aspetos sociais são de fundamental importância num mercado local de energia, pois definem um propósito ou objetivo particular baseado na postura dos agentes que compõem o mercado local. Este ponto torna-se muito interessante de ser analisado principalmente quando se leva em consideração as outras questões supracitadas (técnicas, tamanho e de propriedade) como tangentes. É evidente que um mercado local de energia com uma presença substancial de consumidores produtores apresenta uma postura mais voltada à venda de energia elétrica frente ao mercado global, quando comparado com outro mercado local composto essencialmente por consumidores tradicionais.

Os mercados locais de energia necessitam de certo desenvolvimento por parte do mercado global em que se inserem. Em outras palavras, o mercado global deve dispor de recursos técnicos para conciliar a operação de mercados locais de energia. O intuito principal do mercado local de eletricidade é estabelecer uma dinâmica juridicamente válida e que seja sustentável financeiramente para os agentes num nível local.

Vale ressaltar que um mercado local de energia deve ser autossuficiente do ponto de vista operativo e legal. Caso seja um órgão do poder público, como uma entidade municipal que seja licenciada para comercializar energia elétrica, o mesmo deve ser caracterizado como

⁸ Apresentado no Tópico 3.4.2.

uma autarquia. Portanto, a legislação num nível nacional deve prever a estruturação de mercados locais de energia.

Levando em consideração os aspectos estruturais do mercado de energia brasileiro e do MIBEL, evidenciados através da análise comparativa apresentada na presente dissertação, é notável que o mercado de energia em que Portugal está inserido apresenta maior potencial de implementação de mercados locais. Contudo, a conjuntura do modelo brasileiro de comercialização de energia precisa evoluir ao ponto de extinguir a condição de consumidor cativo, manter incentivos voltados para geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e liberalizar o mercado de eletricidade para que os mercados locais de energia possam ser uma realidade.

No presente capítulo foi realizada uma discussão acerca de mercados locais de energia elétrica. Ademais, apresentou-se uma revisão sobre modelos de negócios. No capítulo 4 é apresentada uma revisão sobre técnicas relacionadas à inteligência artificial utilizadas no apoio à decisão.

4. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APOIO À DECISÃO NO CONTEXTO DE MERCADOS DE ENERGIA

As técnicas baseadas em algoritmos são aplicadas na realização de análise de dados e de descoberta de conhecimento em diversos campos de estudo que muitas vezes transcendem a área de engenharia eletrotécnica. A palavra “algoritmo” possui várias definições. Pode ser entendida como um plano que consiste em etapas onde se estabelece, de forma precisa, uma sequência de ações com a finalidade de realizar uma tarefa previamente definida. Faz-se necessário mencionar que os parâmetros são partes importantes na composição de um algoritmo, definidos como os valores assumidos por variáveis envolvidas em cálculos matemáticos e análises lógicas. Em casos específicos, os parâmetros podem ser adaptativos, ou seja, o próprio algoritmo define os parâmetros de acordo com uma entrada de dados específica, tendo como exemplo os dados utilizados em algoritmos evolutivos [43]. Há uma imensa variedade de técnicas focadas no desenvolvimento de algoritmos no estado da arte do segmento de Teoria de Decisão. Com vistas a este fato, a presente dissertação não tem

por objetivo contemplar todas estas técnicas e sim modalidades específicas de *data mining* e *machine learning* que podem ajudar na análise de mercados de energia elétrica. Desta forma, apresentam-se as condições necessárias para viabilizar a análise e simulação de mercados locais de energia.

Neste capítulo são discutidas algumas técnicas baseadas em *data mining* e *machine learning* aplicadas em [44] [45] e descritas em [46].

4.1. DATA MINING

A quantidade de dados que mercados de energia elétrica geram anualmente torna inviável a construção eficiente de informações a partir de operadores humanos. Sendo assim, um conjunto de técnicas, com o objetivo de exploração de dados, para identificar padrões e tendências em mercados se mostram ferramentas extremamente úteis quando bem implementadas. Este conjunto de técnicas é denominado *data mining*.

As técnicas de análises de dados foram, tradicionalmente, utilizadas para tarefas específicas relacionadas à análise de regressão, agrupamento analítico, taxonomia numérica, análises multidimensionais, modelos estocásticos ou estimativas não lineares, por exemplo. Tais técnicas são orientadas para extração de dados com características essencialmente quantitativas e estatísticas. Todavia, isto pode gerar limitações, como a impossibilidade de evidenciar relações de dependência em níveis conceituais ou produzir uma justificativa do porquê tais dependências existem [46].

As técnicas no âmbito de *data mining* podem ser aplicadas para extrair conhecimento a partir de dados provenientes da medição do consumo de energia elétrica de clientes (ou consumidores) de diversas regiões do mundo. Esta abordagem permite que o suprimento de energia elétrica possa ser realizado de forma hierárquica e que sejam definidos perfis de consumo em regiões geográficas. Tais perfis individuais de consumo variam de acordo com características de poder aquisitivo, tipo de consumidor (residencial, comercial, industrial ou governamental) e ambientais. As informações extraídas através de técnicas de *data mining*, a partir dos dados de consumo de energia elétrica, viabilizam estudos de longo e curto prazos, por exemplo, para previsão de demanda de energia, planejamento da operação do sistema elétrico de energia, análise de fraudes na medição e roubos de energia [47]. Deste modo, as informações de consumo de energia elétrica vêm a ser um fator chave para mercados de

energia elétrica, pois viabilizam análises preditivas de consumo de energia elétrica e, por consequência, ajudam na previsão e definição de preços da energia elétrica.

Quando há necessidade de reestruturar o panorama energético, diferentes participantes de mercados de energia elétrica precisam definir valores a serem pagos por montantes de eletricidade. Para isto, a previsão de demanda de energia elétrica tornou-se uma ampla linha de estudo, extremamente explorada por pesquisadores e acadêmicos de diversos campos da engenharia elétrica. Vale ressaltar que, no segmento de Teoria Económica, a demanda de energia elétrica tem uma relação com o preço pago pela energia elétrica em função da elasticidade preço-demanda. Ao realizar uma revisão de metodologias focadas na previsão de preços de energia elétrica, é possível encontrar formas de classificação de modelos de previsão, conforme a Figura 23 [48].

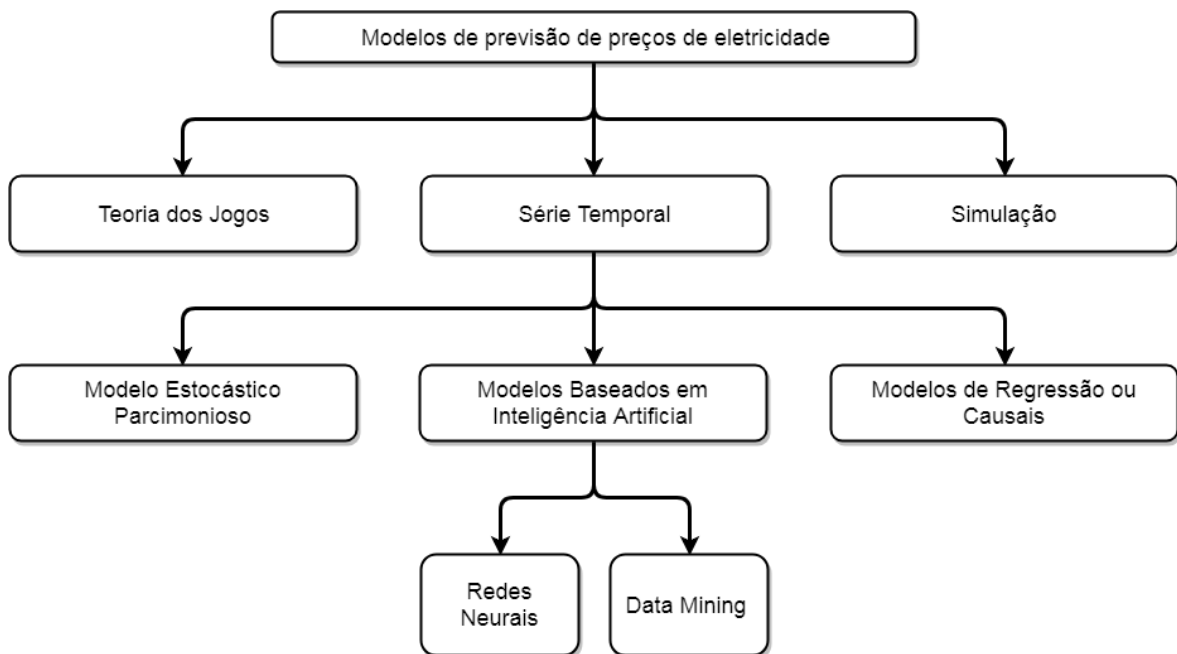


Figura 23 Classificação de modelos de previsão de preços [48]

Cada uma das abordagens descritas na Figura 23 possui vantagens e limitações, sendo que técnicas de *data mining* ganharam popularidade em virtude da interpretação de dados e viabilização de inferir conclusões pertinentes, como, por exemplo, para a análise de mercados de energia elétrica. Vale ressaltar que tais técnicas estão sendo empregadas, principalmente nos quinze primeiros anos do Século XXI, para o desenvolvimento de metodologias de previsão de preços em mercados de energia elétrica. Vale ressaltar, também,

que as informações geradas nesta filosofia podem ser utilizadas para finalidades específicas, dependendo das especificidades do mercado em questão.

Em mercados onde um indivíduo pode escolher quem será seu fornecedor de energia elétrica, há um novo campo que poder ser explorado através de *data mining*. Companhias podem extrair informações que impulsionam ações orientadas à captação de novos clientes e à elaboração de conteúdos personalizados para um determinado perfil de cliente já inserido em sua cartela de acordo com a curva de carga, posição geográfica ou condição econômica. De forma geral, setores especializados usam informações captadas com propósitos voltados à área financeira, comunicação e vendas [49]. Agentes que comercializam energia elétrica e buscam relações mais próximas do consumidor tendem a firmar posições mais competitivas no mercado.

Mesmo a filosofia de *data mining* sendo discutida desde a Década de 90 no meio científico, a necessidade e a aplicabilidade da mesma crescem consideravelmente. Esta filosofia acaba por fornecer o alicerce para outras perspectivas, como *machine learning* e Inteligência Artificial. Desta forma, algumas das principais técnicas de *data mining*, segundo Rathod e Garg [47], são discutidas nos tópicos seguintes.

4.1.1. CLUSTERING

A palavra inglesa “clustering” remete à noção de agrupamento, desta forma, o processo de *clustering* tem por objetivo a identificação de grupos naturais num conjunto de dados. Este processo acaba sendo uma opção extremamente interessante para a análise de dados de mercados de energia elétrica, pois viabiliza a possibilidade de segmentar tal mercado em partes mais evidentes e possíveis de serem analisadas com mais facilidade. Assim, os elementos que pertencem a um dado *cluster* possuem uma elevada similaridade entre eles e, elementos de *clusters* distintos devem possuir uma elevada dissimilaridade entre eles.

Uma das definições de *clustering* encontradas na literatura define tal processo como sendo uma tarefa *data mining* voltada à identificação de grupos naturais em dados. Além disto, o processo de *clustering* pode ser entendido como *data mining* não supervisionado. Tal característica viabiliza ao usuário final investigar o porquê de tais grupos terem sido formados e generalizar a singularidade de cada grupo. Contudo, vale ressaltar que não há uma variável de classe definida como alvo para ser prevista. Após o agrupamento, cada

registro é associado a um ou mais grupos. *Clustering* pode ser aplicado através de vários algoritmos diferentes, como será evidenciado em tópicos futuros ainda nesta seção [50].

Independentemente do tipo de *clustering*, existe a busca para encontrar os agrupamentos de dados de tal forma que cada um destes seja feito com certa “similaridade” dos dados passíveis de agrupamento [51]. Segundo Kotu e Deshpande [50], na questão de medição de similaridades de entre dados, uma das ferramentas mais comuns é a medição de distância euclidiana no espaço n-dimensional. A distância euclidiana entre dois pontos $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ e $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ do R^n é definida pela Equação (3).

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{v}\| = \sqrt{(u_1 - v_1)^2 + (u_2 - v_2)^2 + \dots + (u_n - v_n)^2} \quad (3)$$

Contudo, antes de partir para as formas de implementação *clustering*, é interessante definir alguns tipos de técnicas.

4.1.1.1. TIPOS DE TÉCNICAS

Algumas técnicas interessantes de serem discutidas na presente dissertação são as apontadas por Kotu e Deshpande [50]:

- Agrupamentos de particionamento exclusivo ou estrito;
- Agrupamentos sobrepostos;
- Agrupamentos hierárquicos;
- Agrupamentos difusos ou probabilísticos.

Agrupamentos de particionamento exclusivo ou estrito são os tipos mais comuns de *clustering* encontrados na literatura. Cada dado é designado para apenas um *cluster* exclusivo. Já nos agrupamentos sobrepostos, não há esta restrição de exclusividade e são conhecidos, também, como agrupamentos de panorama múltiplo. Nos agrupamentos hierárquicos há uma relação de descendência entre agrupamentos pais e filhos. Em agrupamentos difusos ou probabilísticos cada dado pertence a todos os agrupamentos, mas com a ressalva de serem classificados com diferentes graus de adesão que variam de zero até um e, ao invés de uma associação definida de dados aos agrupamentos, probabilidades de adesão são associadas aos agrupamentos [50].

Vale ressaltar também as técnicas que tomam por base os algoritmos implementados. Cada uma destas técnicas baseadas em algoritmos diferenciam-se pelo relacionamento estipulado entre os dados. São elas:

- Agrupamento baseado em protótipo;
- Agrupamento de densidade;
- Agrupamento hierárquico;
- Agrupamento baseado em modelo.

No agrupamento baseado em protótipo cada agrupamento é representado por um objeto central de dados (protótipo), ou seja, desta forma cada um dos agrupamentos é representado por um protótipo posicionado de forma central. Em agrupamentos de densidade as áreas com maior densidade de dados, definidas como áreas com mais pontos de dados por unidade de espaço, são separadas de espaços esparsos e cada área é associada a um agrupamento, ao passo que as áreas de baixa densidade são descartadas e consideradas como ruído. Já no agrupamento hierárquico, há uma hierarquia que é baseada nas distâncias euclidianas entre os dados, e existem duas aproximações básicas para a criação desta hierarquias: *bottom-up* (debaixo para cima), onde cada dado é considerado um agrupamento, sendo que após associações de tais dados ocorre a formação de um agrupamento substancial, e a aproximação *top-down* (de cima para baixo), onde o conjunto de dados é considerado um agrupamento e, ao passo que vão sendo criados tais agrupamentos, ocorrem divisões recursivas até que os dados sejam definidos como agrupamentos individuais. Além destas técnicas baseadas nos algoritmos implementados, há a técnica de agrupamento baseado em modelo, onde podem ser aplicados conhecimentos de modelos de distribuição probabilísticos e estatísticos, como os modelos Gaussiano e de Poisson, de forma que um agrupamento possui dados pertencentes à mesma probabilidade de distribuição e o parâmetro de distribuição pode ser recursivamente aprimorado [50].

As técnicas supracitadas possuem diferentes abordagens e providenciam conceitos básicos para a implementação metodológica de *data mining*. Contudo, há uma grande quantidade de estudos na literatura que avançam a fundo nestas técnicas e vão além ao implementar sistemas que agregam duas ou mais técnicas distintas. Diferentes problemáticas no âmbito de mercados de energia podem ser abordadas a partir destas técnicas, contudo, o profissional

incumbido da implementação precisa ter um conhecimento técnico na área de mercados de energia, matemática aplicada e ciências da computação.

4.1.1.2. MÉTODOS

Neste tópico serão discutidos quatro métodos *clustering* que possuem diferentes abordagens, mas com finalidade semelhante, ou seja, definir agrupamentos que apresentem certas similaridades. Os métodos aludidos posteriormente são: *k-means*, DBSCAN e mapas de auto-organização. Vale ressaltar que existem vários outros métodos, contudo, a presente dissertação será restrita aos supracitados.

Para Witten e Frank [51], o método clássico *k-means* é considerado simples de ser implementado e eficiente para propósitos computacionais. Neste método, é necessário especificar a quantidade de agrupamentos que estão sendo buscados e associar ao parâmetro k . Desta forma, tendo em vista a técnica de agrupamento baseado em protótipo, um número k de objetos centrais de dados são designados inicialmente e as diversas instâncias são associadas aos protótipos mais próximos, de acordo com a métrica de distância euclidiana ordinária determinada através da Equação (3). Então, calculam-se os pontos médios, ou objetos centrais, para os agrupamentos e realiza-se a atualização das variáveis do algoritmo. Este é tomado como um processo iterativo onde o critério de parada é a não alteração dos objetos centrais de cada agrupamento. Vale ressaltar que é possível realizar aproximações com o objetivo de aprimorar a velocidade de convergência do algoritmo, sendo uma das melhores a determinação do agrupamento vizinho mais próximo através de técnicas de aprendizado baseadas em instâncias, onde não há a necessidade de processar todos os pontos de dados de forma conjunta.

Para Aggarwal [52], o algoritmo *k-means* pode dispor de uma variação interessante ao utilizar a distância local Mahalanobis para realizar a atribuição dos objetos centrais para os agrupamentos. A distância Mahalanobis entre dois pontos considera, do ponto de vista estatístico, as nuances relacionadas à distribuição dos dados, conforme a Equação (4).

$$Maha(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \sqrt{(\mathbf{u}_1 - \mathbf{v}_1)\alpha^{-1}(\mathbf{u}_2 - \mathbf{v}_2)^T} \quad (4)$$

Onde α é a matriz de covariância dos pontos de dados do conjunto onde estão inseridos os dois pontos $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ e $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ do R^n . Na condição em que α^{-1} é a

matriz identidade, a distância Mahalanobis é a mesma que a distância euclidiana. Apenas para contextualizar, matrizes de covariância são descritas em estudos estatísticos e em teoria das probabilidades como matrizes simétricas que sintetizam as covariâncias entre n dados.

A Figura 24 ilustra dois casos com diferentes distribuições e os comportamentos do algoritmo *k-means* para estas diferentes situações.

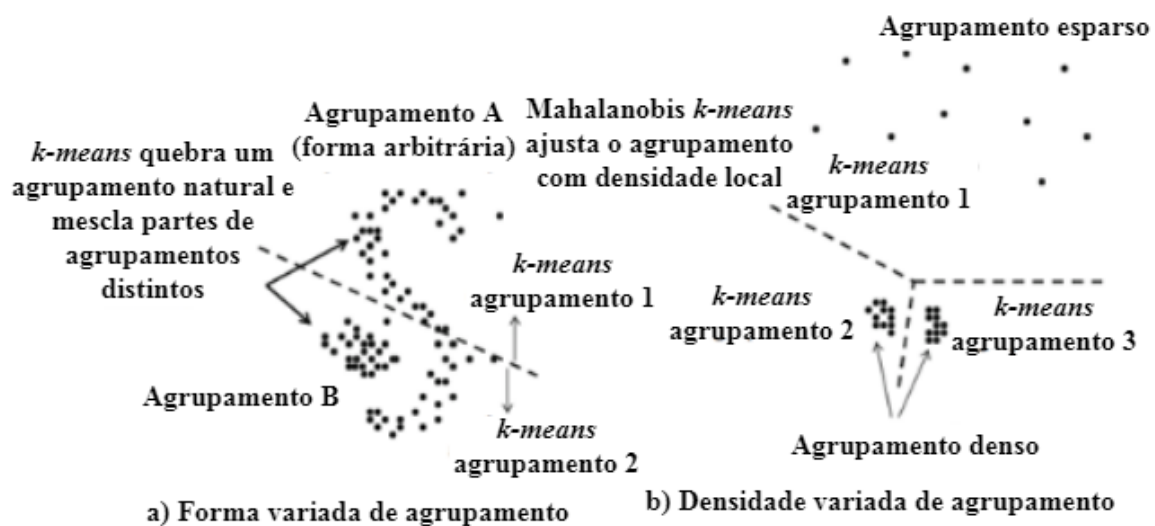


Figura 24 Características do método *k-means* [52]

A distância Mahalanobis é semelhante à distância euclidiana, exceto pela normalização que é aplicada nos dados ainda na base das correlações interatribuídas. Ambas as metodologias possuem fraquezas e proficiências, assim como demonstradas nas situações a) e b) da Figura 24. Na situação a) da Figura 24 pode-se inferir que, como a forma da distribuição não é convexa, o algoritmo *k-means* (implementado tanto através da distância euclidiana quanto via distância Mahalanobis) não age de forma apropriada no processo de formação dos agrupamentos. De forma prática, o algoritmo acaba por dividir o agrupamento A em dois e agregar uma das partes ao agrupamento B. Tal situação acaba por ser comum no método *k-means*, pois há uma tendência de encontrar agrupamentos com forma esférica. Em contrapartida, nota-se que a implementação através da distância Mahalanobis é mais apropriada em casos como na situação b) da Figura 24, justamente por causa da normalização das distâncias que é aplicada [52].

A análise da aplicação do método *k-means* deve ser avaliada com base na distribuição dos dados e na resposta passível de ser obtida. Ambos os autores supracitados apresentam

metodologias que podem ser consideradas em algoritmos voltados à extração de informações de dados gerados a partir da dinâmica de diferentes mercados de energia elétrica.

DBSCAN é o acrônimo de *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*, ou seja, refere-se ao agrupamento espacial de dados baseado em densidade de aplicações com ruído. Uma das principais características que tal método apresenta é que não há necessidade de determinar um número k de objetos, como é imposto pelo método *k-means*, pois tal método toma como base a densidade da distribuição dos dados.

Um agrupamento baseado em densidade pode servir como uma importante técnica para exploração de dados. Entende-se como “densidade”, o número de pontos de dados num espaço de n dimensões. A Figura 25 ilustra situações de diferentes densidades de dados através de uma distribuição de pontos no espaço bidimensional.

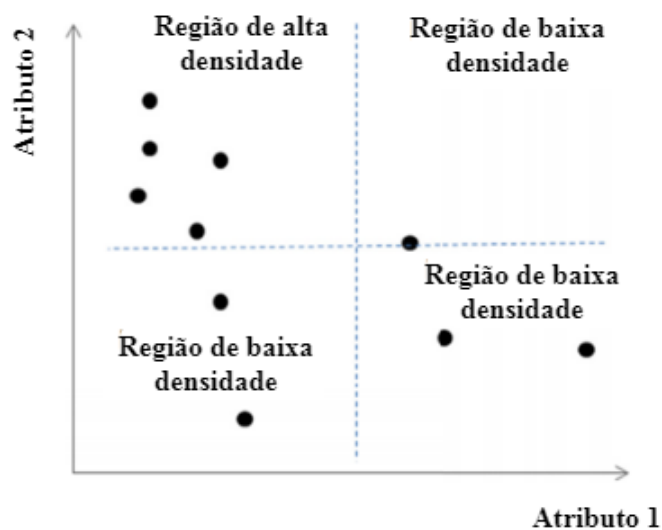


Figura 25 Exemplificação de um conjunto de dados com diferentes densidades [50]

Desta forma, o algoritmo DBSCAN cria os agrupamentos através da identificação de distribuições com elevadas e baixas densidades espaciais. De maneira análoga ao método *k-means*, é preferível que os atributos sejam numéricos pois as distâncias entre os pontos permanecem sendo necessárias [50].

Segundo Kotu e Deshpande [50], a dinâmica do algoritmo DBSCAN pode ser descrita em três passos distintos: definição de limite de densidade; classificação de pontos de dados e o agrupamento propriamente dito.

No primeiro passo, tal algoritmo inicia o cálculo de uma densidade para todos os pontos considerados na análise, através de um determinado raio ε . Desta forma, determina-se a condição de alta ou baixa densidade através de uma variável ξ que aponta o limiar de pontos, ou seja, se, para um dado ε , existe uma quantidade de pontos superior ao número descrito na variável ξ , considera-se uma área de alta densidade, caso seja menor, considera-se uma área de baixa densidade. Tanto ε quanto ξ são, comumente, parâmetros definidos pelo usuário e podem ser alterados para um determinado conjunto de dados.

Já no segundo passo, após definidos os parâmetros ε e ξ , o algoritmo DBSCAN parte para uma etapa de classificação em três diferentes categorias:

- Pontos centrais;
- Pontos de fronteiras;
- Pontos de ruído.

Na categoria de pontos centrais, são atribuídos os pontos localizados em áreas com alta densidade, ou seja, conjuntos de pontos onde o número de pontos circunscritos através do raio ε seja maior que ξ . Já na categoria de pontos de fronteiras, são atribuídos os pontos localizados nas circunferências do raio ε e pontos divisores entre áreas com alta e baixa densidades. Vale ressaltar que os pontos de fronteiras são contabilizados nas áreas de alta densidade. Por fim, a categoria de pontos de ruído abrange os pontos sobressalentes, ou seja, conjuntos de pontos onde o número de pontos circunscritos através do raio ε seja menor que ξ . Esta categorização pode ser evidenciada através da Figura 26.

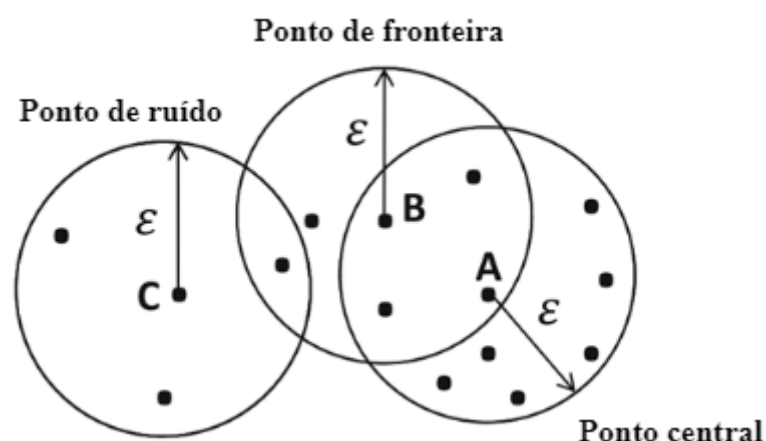


Figura 26 Exemplo de classificação de pontos no algoritmo DBSCAN [52]

Ao terceiro passo do algoritmo DBSCAN, após a classificação dos pontos de acordo com a densidade, definem-se os agrupamentos de forma direta, ou seja, através de objetos centrais distintos formam-se diferentes agrupamentos. Deve-se atentar ao fato de que se dois objetos centrais estão numa mesma área descrita pelo raio ε , então tais objetos pertencem ao mesmo agrupamento. Os agrupamentos formados são rodeados por pontos de ruído em áreas de baixa densidade, sendo que tais pontos não são classificados em qualquer agrupamento formado [50].

No algoritmo DBSCAN, os parâmetros ε e ξ estão, de certa forma, relacionados entre si. Ao definir ξ , é possível determinar o valor de ε de uma forma orientada para os dados. Nestes casos, a ideia principal é utilizar um valor de ε que consiga abranger a maior quantidade de pontos de forma a classifica-los como pontos de centrais. Para Aggarwal [52], é possível alcançar tal situação através da determinação, para cada ponto, da distância até o ponto vizinho ξ mais próximo (comumente trata-se de uma distância pequena). Logicamente, pontos com distâncias até os pontos vizinhos ξ maiores não serão consideradas pontos centrais.

O algoritmo DBSCAN, em sua concepção, acaba por ser um algoritmo interessante para manipular dados que possam ter um certo grau de incerteza associado justamente pelo fato de ignorar ruídos. Em mercados de energia, tais algoritmos tornam-se ferramentas interessantes para que possam ser realizadas análises preditivas de sistemas essencialmente fotovoltaicos ou em sistemas auxiliares de geração de energia elétrica. Tal algoritmo apresenta-se como uma boa alternativa para os agrupamentos baseados em protótipos, como o *k-means*, ao apresentar uma abordagem distinta e com maior enfoque na característica de densidade dos dados que estão sendo levados em consideração. Vale ressaltar que avaliar as características de desempenho de cada método é importante para determinar a melhor ferramenta para comparar diferentes mercados de energia elétrica.

O método análise através de mapas de auto-organização está ligado ao âmbito de redes neurais. Na verdade, mapas de auto-organização podem ser entendidos como um método que combina redes neurais e técnica de agrupamento baseado em protótipo. Neste método o objetivo é transferir todos os objetos de dados de entrada com n atributos para a rede de saída de tal forma que os objetos considerados próximos estabelecem uma relação entre si. Além

disto, este método possui um cunho gráfico com a finalidade de tornar a visualização e a interpretação do agrupamento mais evidentes.

Mapas de auto-organização foram propostos inicialmente pelo finlandês Teuvo Kohonen [53] para trabalhos em processamento de sinais, e por isso tal técnica é também conhecida como redes de Kohonen. Este método é utilizado para projetar pontos do espaço de dados n dimensionais para um espaço de redes representado, comumente, em duas dimensões.

Existem diferentes formatos de respostas que podem ser obtidas através de mapas de auto-organização, contudo, as mais comuns são estrutura hexagonal e ou grade retangular. Tais representações são apresentadas na Figura 27.

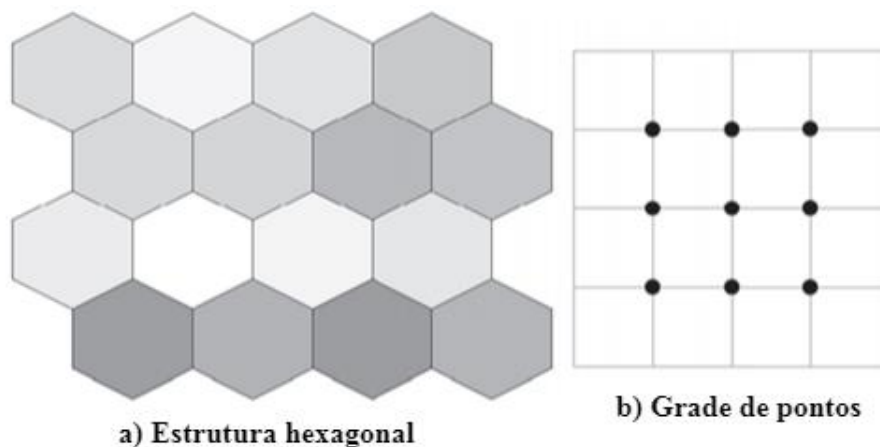


Figura 27 Mapas de auto-organização representados através de estrutura hexagonal e grade de pontos [50]

Conforme demonstra a Figura 27, cada ponto do conjunto de dados ocupa uma célula, para o caso de representação por estrutura hexagonal, ou um nó, na situação em que se aplica a representação por grade de pontos. Desta forma, são observadas as restrições de disposição de acordo com as características dos dados propriamente ditos. Remetendo ao âmbito de redes neurais, cada célula ou nó identifica-se como sendo um neurônio do sistema. Cada neurônio representado pela estrutura hexagonal possui até seis pontos vizinhos, ao passo que na representação por grade de pontos existem até quatro pontos vizinhos. As restrições de disposição supracitadas são, comumente, definidas através de similaridades apresentadas entre os dados [50].

Clustering por meio do método de mapas de auto-organização, como apontado anteriormente, é essencialmente uma rede neural e por isso aceita apenas atributos numéricos no seu funcionamento. Vale ressaltar que não há uma variável objetivo em virtude de ser um modelo de aprendizado não supervisionado, ou seja, no processo de aprendizagem é o sistema que deve observar um determinado contexto e reconhecer os padrões de forma autônoma [50]. Desta maneira, o objetivo do algoritmo é encontrar uma disposição para os neurônios que represente um agrupamento, observando as restrições topológicas do formato de representação definido. Neurônios próximos uns dos outros possuem relações de similaridades mais intensas quando comparados com neurônios que se encontram fora da vizinhança.

Segundo Kotu e Deshpande [50], é possível descrever o método de mapas de auto-organização através de seis etapas distintas: especificação da tipologia; inicialização dos neurônios; atribuição de objetos de dados; atualização de neurônios; terminação e realização do mapeamento de um novo objeto de dados.

Para a especificação da tipologia, é interessante considerar as duas opções apresentadas na Figura 27 e ter em vista que a estrutura hexagonal leva a associações mais precisas em relação à rede de grade de pontos. A inicialização dos neurônios pode ser realizada através de seleção aleatória dos objetos de dados, de forma análoga ao método *k-means*. Para realizar a atribuição de objetos de dados, faz-se necessário realizar a atribuição de cada neurônio aos vizinhos mais próximos. A determinação de vizinhos próximos pode ser realizada através da distância euclidiana, ou da distância de Mahalanobis, tendo em vista que são manipulados dados numéricos ou uma medida de cosseno para dados binários ou relacionados a documentos. A atualização de neurônios ocorre em dois passos distintos: primeiramente atualiza-se o neurônio mais próximo de maneira proporcional à diferença entre o neurônio e o objeto de dados em si, sendo que tal processo ocorre de forma semelhante ao processo de atribuição de pesos realizado em redes neurais. Ocorre, também, de maneira iterativa, deslocando o neurônio no objeto de dados, e então, no passo seguinte, são atualizados os demais neurônios vizinhos. Para ilustrar tal sistemática e melhorar a abstração deste processo, a Figura 28 demonstra os dois passos supracitados.

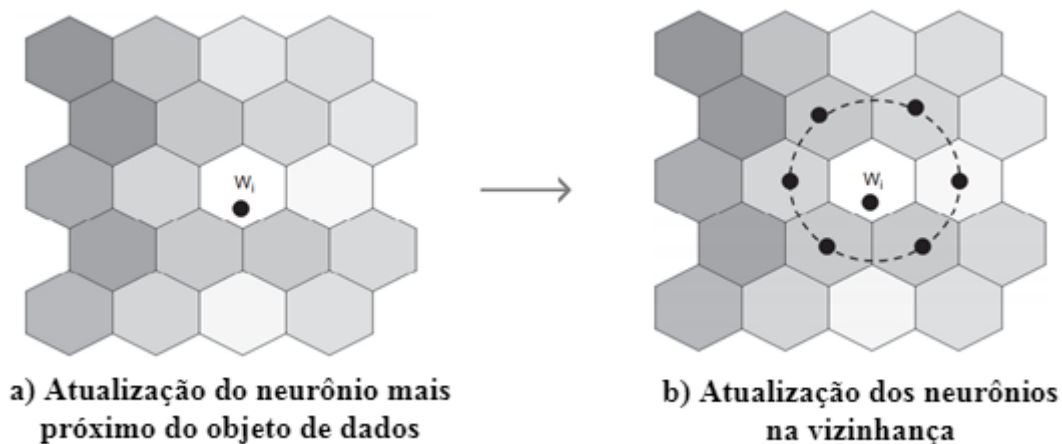


Figura 28 Passos da etapa de atualização dos neurônios tomando por base o neurônio W_i [50]

Na etapa de terminação ocorre a avaliação da convergência do algoritmo de mapas de auto-organização. Caso as atualizações dos neurônios não sejam significativas em iterações consecutivas na etapa de atualização dos neurônios, é apontada uma solução para tal agrupamento. Como não há garantia de que a solução encontrada é a ótima (situação comum em algoritmos *data mining*) é interessante executar o método diversas vezes com diferentes parâmetros iniciais e comparar os resultados. Por fim, o mapeamento de um novo objeto de dados torna-se uma tarefa facilitada ao passo que pode-se inserir tal novo objeto de forma rápida na representação designada, baseando-se na proximidade dos neurônios. Desta forma, pode-se realizar futuras análises através da observação dos objetos de dados inseridos na vizinhança deste novo elemento inserido [50].

Mapas de auto-organização dispõem de uma abordagem diferente os dois métodos descritos nos itens anteriores (*k-means* e DBSCAN), mas que acaba por fazer uso de conceitos chave, como a medida de distâncias entre elementos representativos num conjunto de dados. Pode-se notar que a implementação de tal método vem a ser mais sofisticada por necessitar de elementos gráficos específicos para que o indivíduo que está analisando os dados possa extrair conhecimento e informação dos dados. Este é um método muito interessante no desenvolvimento de aplicações voltadas aos mercados de energia elétrica, pois, como resulta numa interpretação por meios gráficos, pode vir a ser uma forma eficiente de apresentação de para um técnico interessado em tirar conclusões de mercados de energia e que não necessariamente tem conhecimento em ciência de dados.

4.1.2. CLASSIFICAÇÃO

Classificação é uma importante tarefa no campo de *data mining*. Como incitado anteriormente, em abordagens *data mining* aplicam-se diversas técnicas para que a análise de um conjunto de dados possa resultar em descoberta de conhecimento. A classificação de dados é uma das técnicas *data mining* que visa realizar o mapeamento de um conjunto de dados em grupos definidos de maneira prévia.

A técnica de classificação é uma técnica consideravelmente difundida, especialmente no campo de descoberta de conhecimento e realização de análises preditivas. Através de tal, é viabilizada a obtenção da inteligência necessária para realizar tomadas de decisão e evidenciar determinados comportamentos e tendências descritas nos dados. A classificação de dados é realizada através de duas fases distintas: a primeira, definida como “fase de processo de aprendizagem”, onde os dados são analisados e as regras e padrões são formuladas, e a segunda fase, conhecida por “fase de testes”, em que são realizados testes nos dados para que seja feito o registro da precisão de classificação dos padrões instituídos [54].

Dentre várias metodologias de classificação, é interessante destacar três delas: árvore de decisão, vizinho mais próximo e algoritmo genético máquina de vetores de suporte. Estas metodologias serão descritas na sequência.

4.1.2.1. ÁRVORE DE DECISÕES

Para Witten e Frank [9], o método de árvore de decisões segue a filosofia de “dividir para conquistar” para implementar o sistema de aprendizagem e faz uso de uma representação nodal para que os atributos sejam comparados com constantes ou entre si, ou seja, todos os nós numa representação por árvore de decisões representam um atributo de determinada instância para que seja realizada a classificação da mesma. Nós localizados nas extremidades da árvore, conhecidos como nós folhas, fornecem uma classificação para todas as instâncias que chegam até determinado nó folha. Para classificar uma instância desconhecida é realizado o encaminhamento no sentido descendente da árvore de acordo com os valores dos atributos testados em nós sucessivos e, ao alcançar um nó folha, é realizada a classificação da instância de acordo com a classe associada ao nó folha.

A forma mais comum de construir árvores de decisão é utilizando o método de particionamento *top down greedy*. Começa-se pelo conjunto de dados de treinamento e, recursivamente, encontrar e dividir características que maximizem determinado critério local. Existem diversos algoritmos que seguem tal sistemática [54].

Nesta metodologia é estabelecido um sistema hierárquico de classificação de tomada de decisão baseada em dados. Os nós são organizados, essencialmente, por critérios de divisão. Por exemplo, se num determinado mercado de energia elétrica existem trinta geradores de energia elétrica, os critérios de divisão poderiam ser “a geração de energia elétrica é feita através de fontes renováveis?” ou “a entidade que gera energia elétrica é de âmbito privado?”, entre outros critérios. É possível, também, estabelecer uma sistemática de divisões multivariadas, onde são utilizados mais de um atributo para definir o critério de divisão. Contudo, divisões multivariadas podem ser interpretadas como sendo representações de aglutinações de critérios individuais de divisão.

A sistemática utilizada pelo método de árvores de decisão é utilizada por sistemas de gerenciamento de banco de dados para acessar informações em determinado banco de dados de maneira consideravelmente eficiente. Em árvores binárias aplicadas em bancos de dados, ao passo que os nós da árvore são verificados, exclui-se a necessidade de processar outros nós que não estão de acordo com o critério de divisão. Sendo assim, torna-se um processo de funcionamento eficiente.

4.1.2.2. VIZINHO MAIS PRÓXIMO

Este pode ser visto como o método mais simples de classificação. A classificação por vizinho mais próximo pode ser utilizada, virtualmente, com qualquer tipo de dado, contando que uma função apropriada para o cálculo da distância entre os dados esteja disponível. Qualquer função de distância, ou similaridade, pode ser utilizada de acordo com cenário específico de domínio.

Neste método, os objetos vizinhos são selecionados a partir de um conjunto de dados em que a classificação correta é conhecida. Não há necessidade de realizar uma etapa de treinamento explícito neste caso, mas pode ser considerado como um conjunto de treinamento para o algoritmo. Vale ressaltar que este método é demasiadamente sensível à estrutura local do conjunto de dados [54].

Na literatura descrita por Aggarwal [52], é apontado que se faz interessante considerar as equações (3) e (4) como funções para o cálculo da distância. Indo além, a função de distância deve levar em consideração as variações de diferentes classes de objetos através de uma análise linear discriminante, ou seja, balizar o impacto da determinação das direções mais discriminantes na função de distância. Na prática, por exemplo, seria a realização de uma escolha prudente da matriz α^{-1} da equação (4).

Este método é comumente aplicado em aprendizados baseados em instância e torna-se uma escolha interessante, dependendo da aplicação, em virtude da simplicidade de implementação. Contudo, deve-se ter atenção ao fato de que o banco de dados pode vir a ser corrompido em virtude de ruídos, caso o número de máximo de vizinhos mais próximos seja muito alto para a determinação da classificação dos dados.

4.1.2.3. MÉTODO DE MÁQUINA DE VETORES DE SUPORTE

Máquinas de vetores de suporte utilizam essencialmente modelos lineares para implementar limites de classes não lineares. Vale ressaltar que o termo “máquinas” utilizado na nomenclatura do método é visto como um equívoco, já que tal método é alicerçado através de algoritmos e não de máquinas propriamente ditas. Fundamentalmente, transforma-se a entrada utilizando um mapeamento não linear, ou seja, transforma-se o espaço da instância num novo espaço. Na prática, com um mapeamento não linear e considerando uma representação gráfica, uma linha reta neste novo espaço não é descrita como uma reta do ponto de vista do espaço original. Desta forma, um modelo linear construído num novo espaço pode representar um limite de decisão não linear no espaço original [51].

Para Sharma *et al.* [54] o método de máquina de vetores de suporte entendido como um algoritmo de treinamento utilizado para preparar o classificador de dados para prever a classe de uma determinada nova amostra que será encaixada num conjunto de dados. O embasamento deste método consiste no conceito de planos de decisão que define o limite de decisão entre classes e define-se como vetor de suporte. É importante levar em consideração o princípio de minimização de risco de estrutura para evitar ajustes excessivos no funcionamento do método.

Em análises mais complexas como, por exemplo, no processo de determinação de variáveis descritas numa equação polinomial com grau elevado, o método de máquinas de vetores de

suporte é eficiente em termos de precisão de resultados. Contudo, o tempo e esforço computacional necessários para o processamento dos dados pode ser extremamente elevado e inviabilizar a aplicação de tal metodologia. Além disto, pode resultar em problemas causados por *overfitting*, ou seja, o funcionamento do modelo é muito eficiente para o conjunto de dados analisados, mas, em contrapartida, não se faz tão eficaz na previsão de novos resultados.

4.1.3. REGRESSÃO

Métodos de regressão são comumente utilizados para realizar análises preditivas em que uma função que descreve o comportamento de dados é evidenciada. A ideia base dos métodos de regressão é simplesmente prever o valor, ou classe, de uma variável dependente y através de variáveis preditoras x , aplicadas numa função tal que $y = f(x)$. Para Kotu e Deshpande [50], as técnicas mais comuns de regressão são a linear e a logística, sendo que modelos de regressão estão entre os três mais utilizados como ferramentas de análise (sendo os outros apontados como classificação e *clustering*).

Ao estruturar um modelo baseado em regressão linear, há a combinação de atributos e pesos pré-determinados, ou seja, a variável dependente y obtida através do somatório dos produtos de cada peso p pelo seu respectivo atributo a . A Equação (5) ilustra tal apontamento.

$$y = p_0 + p_1 a_1 + \dots + p_n a_n \quad (5)$$

Cada peso evidenciado na Equação (5) é calculado através dos dados de treinamento, ou seja, dados que foram utilizados para contruir o modelo.

Já na regressão logística, partindo do pressuposto de que a regressão linear pode ser utilizada para classificação, existe a realização de regressão linear para cada classe, definindo a saída igual a 1 para treinar instâncias que pertencem à classe e 0 para aquelas que não pertencem. Tem-se como resultado uma expressão linear para a classe. Este método é também denominado “regressão linear multiresponsiva” [51].

A previsão do consumo de energia elétrica acaba por ser um campo de estudo com papel fundamental no processo de tomada de decisão e planejamento por parte de instituições ligadas ao setor elétrico de determinado país. No estudo realizado por [55] são realizadas comparações entre técnicas de modelagens relacionadas a regressão e as técnicas de árvore

de decisões e redes neurais aplicadas à previsão do consumo de energia elétrica associado em clientes residenciais do mercado de energia elétrica chinês. Os métodos de regressão tem como suporte teorias estatísticas para produzir boas estimativas de acordo com certas propriedades estatísticas.

Em estudos mais simples e relacionados à administração de mercados de energia elétrica, as técnicas de regressão são empregadas para que seja possível estimar uma tendência de preços ou consumo de energia, por exemplo. Desta forma, filosofias de regressão possuem um bom campo de aplicabilidade no segmento de engenharia eletrotécnica, apesar da simplicidade associada.

4.2. MACHINE LEARNING

A literatura voltada a *machine learning* é, de forma geral, focada em metodologias de aprendizado supervisionado. Desta forma, técnicas de *data mining* estão ligadas de maneira intrínseca com a concepção de *machine learning*. Indo além, tal conjunto de metodologias pode ser visto como uma extensão de *data mining*.

Devido aos avanços nos campos de tecnologia da informação, redes de comunicação, negócios e às reduções nos custos com armazenamento e processamento de dados, houve a ocorrência de um acúmulo massivo de dados das mais variadas áreas do conhecimento. Nesse sentido, as técnicas tradicionais para análises de dados comumente chegam até apenas a descoberta de informação. Por meio de algoritmos *machine learning* é possível deduzir compreensões ótimas a partir de um conjunto de dados. Numa abordagem *machine learning*, a problemática relacionada à determinação da melhor previsão da saída, partindo das variáveis de entrada, está pautada na necessidade de definir um algoritmo suficientemente eficiente para servir como modelo em determinado contexto, como, por exemplo, a previsão dos preços dos mercados de energia elétrica [50].

Sendo assim, *machine learning* é composta por técnicas que visam descobrir e descrever padrões estruturais em dados. A tradução do termo *machine learning* para o português é “aprendizagem automática”. Do ponto de vista filosófico, o substantivo “aprendizagem” pode ser interpretado de diversas formas. No contexto de *machine learning* tem-se uma abordagem mais prática e definições de “aprendizagem” encontradas em dicionários apresentam algumas deficiências para expressar nuances relacionadas a computadores e

algoritmos. Um dos desafios enfrentados é justamente a impossibilidade de testar, de maneira virtual, se o aprendizado foi atingido ou não. Apenas para esclarecer esta afirmação: imagina-se que não há possibilidade de realizar perguntas ao computador, mesmo se havendo tal possibilidade, a habilidade de aprender não estaria sendo posta em evidência, mas sim a habilidade de responder às questões impostas. A problemática relacionada às questões de se computadores tem ou não consciência ou discernimento remete-se às questões filosóficas práticas, essencialmente. Alinhada à definição evidenciada anteriormente, pode-se entender *data mining*, do ponto de vista operacional, como sendo um processo de descoberta de padrões de forma automática (ou semiautomática) em grandes montantes de dados. Neste mesmo viés, uma definição do ponto de vista operacional para *machine learning* é “a forma que coisas aprendem quando mudam seu comportamento de maneira que faça o processo ser executado de uma forma melhor no futuro” [51].

As arquiteturas formuladas a partir de técnicas *machine learning* podem ser enquadradas em três categorias: aprendizado supervisionado; aprendizado semi-supervisionado e aprendizado não supervisionado. O enquadramento destas categorias depende da forma que o algoritmo aprendiz se comporta. De maneira geral, tal algoritmo tem por objetivo encontrar, após um processo iterativo, uma ação ótima que levando em consideração o estado de execução de determinado sistema. Tendo em vista tal objetivo, diferentes técnicas de reforço de aprendizagem, com elevado nível de complexidade, são desenvolvidas para expor tópicos específicos de diversas áreas do conhecimento.

Certos tópicos abordados em ciências da computação são aplicados em engenharia eletrotécnica e tem como base o campo de estudo ligado ao conceito de *machine learning*. Para que tais tópicos sejam exemplificados, a Figura 29 apresenta alguns conceitos relacionados a *machine learning*.

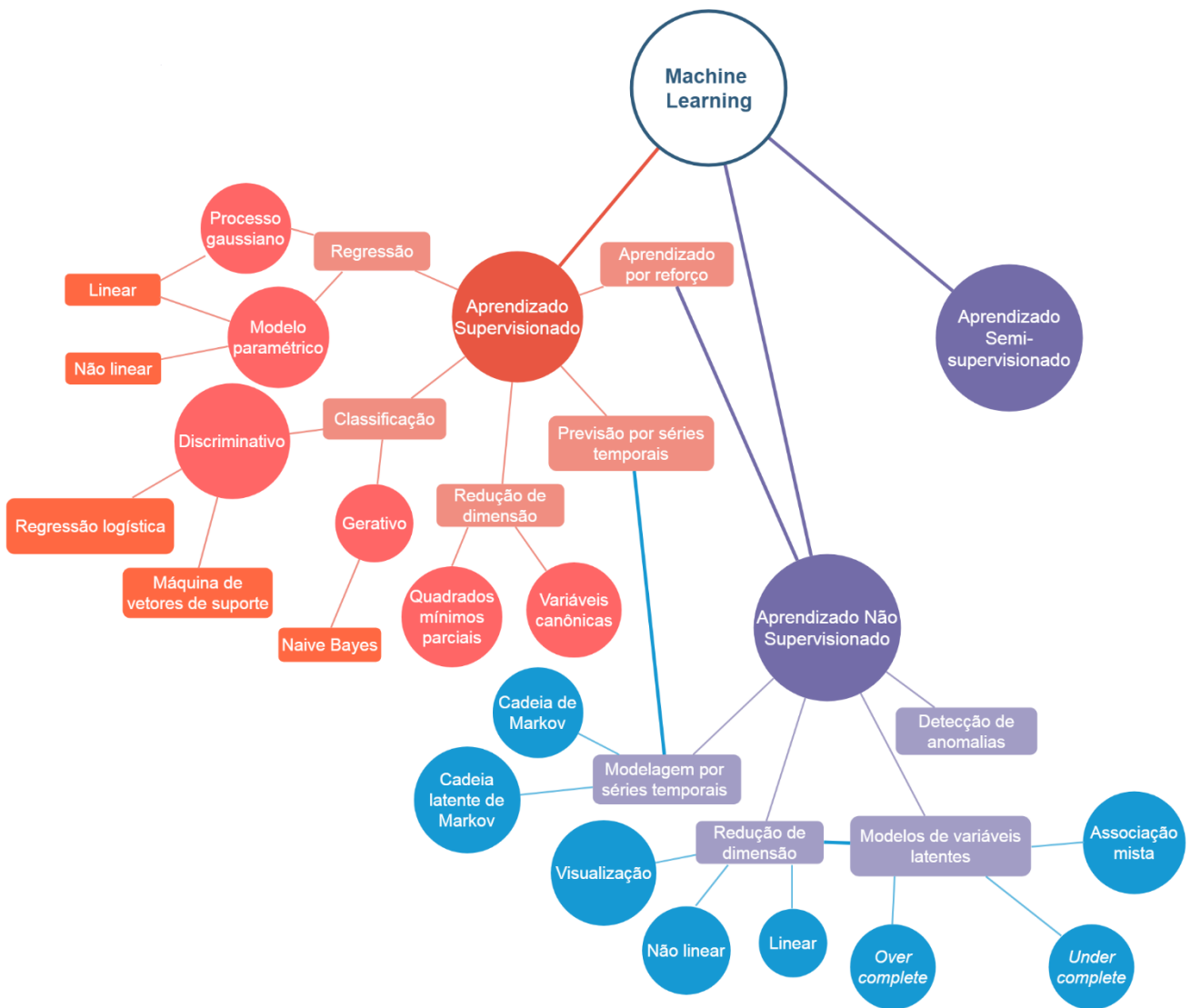


Figura 29 Tópicos abordados no campo de estudos relacionado a *machine learning* [69]

Através do diagrama apresentado na Figura 29, é possível notar que em *machine learning* ocorre a associação de diversos assuntos diferentes, mas complementares. Dentre as formas de aprendizado, destacam-se os aprendizados supervisionados e não supervisionado. No aprendizado supervisionado o foco é voltado à precisão na previsão, ao passo que no aprendizado não supervisionado o objetivo é determinar descrições compactas dos dados levados em consideração. Ambos os casos tratam de um interesse comum, que é a formulação de métodos capazes de generalizar de forma aceitável e antecipada dados que ainda não estão disponíveis. Neste cunho, é importante evidenciar a diferença entre dados utilizados para treinar um modelo e dados aplicados para a realização de testes de desempenho do modelo treinado. É importante evidenciar que o teste de performance não

deve ser utilizado para ajustar os parâmetros do modelo, ao passo que desta forma, não haveria mais uma medida independente da performance do modelo propriamente dito.

4.3. SIMULAÇÃO DE MERCADOS DE ENERGIA

Na literatura existem diversos simuladores de mercados de energia elétrica que surgiram justamente para acompanhar a constante evolução inerente aos diferentes ambientes de comercialização de energia elétrica encontrados no mundo. De maneira geral, os simuladores de mercados de energia focam na simulação das especificidades de tais mercados. Diferentes modelos de comercialização de energia elétrica, utilizando estratégias distintas, podem ser analisados e comparados. Um dos adventos dos simuladores de mercados de energia é justamente o potencial de evidenciar o impacto que determinado tipo de agente exerce sobre as transações financeiras realizadas nos mercados.

Ao pesquisar os diferentes simuladores de mercados de energia elétrica existentes na bibliografia, se faz pertinente evidenciar seis simuladores que se destacam. São eles:

- EMCAS (*The Electricity Market Complex Adaptive System*);
- AMES (*Agent-based Modelling of Electricity Systems*);
- GAPEX (*Genoa Artificial Power Exchange*);
- SREMS (*The Short-Medium run Electricity Market Simulator*);
- SEPIA (*Simulator for Electric Power Industry Agents*);
- MASCEM.

O EMCAS [56] faz uso de uma abordagem baseada em agentes com estratégias adaptativas e focadas na aprendizagem. O intuito é abranger as características específicas de mercados reestruturados. Tal simulador permite a realização de simulações de mercados de energia elétrica num período de tempo que pode variar de horas até décadas, incluindo mercados *pool* e contratação bilateral.

No AMES [57] é possível realizar estudos experimentais com foco em mercados grossistas de energia. Os moldes dos mercados considerados são com base na concepção de mercado da *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC). Basicamente este *software* utiliza um banco de testes de agentes com operadores de energia elétrica, de forma que ocorre o aprendizado numa configuração estratégica para testar experimentalmente as medidas de

eficiência do mercado e o poder de mercado do vendedor. Vale ressaltar que o AMES segue a filosofia de código-aberto.

Já o GAPEX [58] também pode ser visto como um simulador baseado na estruturação de agentes para a demonstração de como ocorrem transações financeiras relacionadas a montantes de energia elétrica. Tal *software* é implementado em linguagem de programação MATLAB e permite a criação de trocas artificiais de energia, reproduzindo os procedimentos de compensação de um mercado de energia.

O SREMS [59] é baseado essencialmente na teoria dos jogos. Este simulador é capaz de apoiar a análise de cenários, considerando curto e médio prazos, para avaliar o poder de mercado de agentes em situações específicas. É estruturado de uma forma muito interessante, tendo em vista que o SREMS provê: o cálculo de preços de fabricantes; a carga inelástica hora a hora e zona por zona; a rede em forma de árvore com limites de trânsito; programação mensal de plantas de armazenamento de bombeio de hidrocarbonetos; a representação altamente realista de usinas térmicas; a possível cota designada para contratos bilaterais físicos, dependendo da participação dos produtores e da atitude de risco. Trata-se de um simulador muito interessante para o mercado de energia elétrica italiano.

Já o SEPIA [60] é um simulador voltado à plataforma Microsoft Windows e segue a filosofia de uma arquitetura *Plug and Play*, permitindo que os usuários criem simulações envolvendo várias máquinas numa rede, ou numa única máquina, usando diversas unidades de processamento. Tal simulador também é orientado à estruturação de agentes e necessita do número de agentes, seus comportamentos, interações e mudanças durante a simulação.

Os simuladores supracitados são referências importantes para estudos do comportamento e modelagem de mercados de energia. Considerando o contexto de mercados locais, como o MASCEM mostra-se como uma excelente opção para realizar a análise e a simulação de mercados locais de energia, se faz pertinente uma descrição mais detalhada desta ferramenta.

4.4. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR MASCEM

O simulador utilizado na presente dissertação é o MASCEM, desenvolvido pelo GECAD. Tal simulador aborda a complexidade relativa à modelagem de mercados de energia elétrica através de algoritmos de aprendizagem de reforço estruturados a partir de mecanismos de

data mining e algoritmos relacionados à aprendizagem de automática, ou *machine learning*. Ressalta-se que o MASCEM evolui constantemente para acompanhar as diversas alterações a nível da comercialização da energia elétrica. Nesta conjuntura, e levando em consideração o modelo de cidade no Tópico 5.1. apresentado, é possível analisar o contexto de um mercado local envolvendo diferentes agentes.

4.4.1. VISÃO GERAL DO MASCEM

O simulador MASCEM leva em consideração a complexidade de diferentes dinâmicas de negociação apresentadas em mercados de energia elétrica a um nível europeu. Tais dinâmicas são evidenciadas, por exemplo, no Mercado Ibérico, no Mercado Central Europeu ou EPEX e no Mercado do Norte da Europa ou Nord Pool. No sentido de ilustrar as dinâmicas supracitadas, a Figura 30 é apresentada.

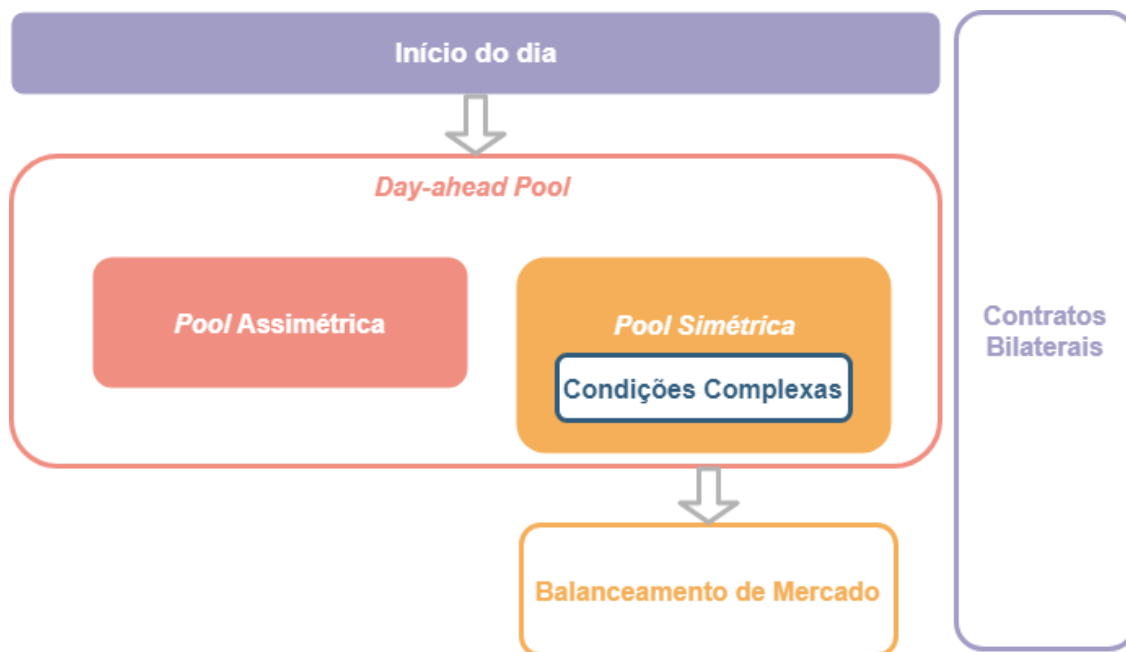


Figura 30 Sequência de negociação para mercados de eletricidade no horizonte de um dia [61]

Uma estrutura comum de sequência de negociações em mercado *pool* é apresentada na Figura 30. Desta forma, é possível notar que contratos bilaterais podem ocorrer de forma simultânea às negociações *day-ahead pool*. É importante levar em consideração que o mecanismo *pool* pode ser simétrico ou assimétrico e ainda incluir condições complexas. Considerar tais condições complexas é imprescindível para a realização do balanceamento de mercado [61].

Ao contrário das ferramentas tradicionais, o MASCEM não evidencia um único tomador de decisão com um único objetivo para todo o sistema. Ao invés disto, é permitido aos agentes que representam as diferentes entidades independentes nos mercados de eletricidade estabelecerem seus próprios objetivos e regras de decisão [61].

De forma geral, pode-se dizer que o MASCEM faz uso de agentes de *software* para representar as diferentes entidades que participam dos mercados de eletricidade. É possível destacar as figuras de facilitador de mercado, produtores, consumidores, operador de mercado, operador de sistema e *Virtual Power Players*. Diferentes tipos de mercado e estratégias distintas são adotados. O MASCEM é um simulador que, através de métodos dinâmicos e extração de dados, permite que seus agentes façam suas próprias estratégias com base em sua história de sucessos e fracassos. Além disto, são utilizados vários modelos de suporte à decisão na simulação, tais como: técnicas de *machine learning*, teoria de jogos, análise de cenários e otimização e modelagem de técnicas de agentes [62].

Vale ressaltar que o MASCEM é uma ferramenta versátil e que abre margem para a integração com outras aplicações. Exemplo disto é a integração com o *Adaptive Learning for Strategic Bidding System*, denominado ALBidS, que se traduz numa ferramenta de apoio ao comportamento dos agentes em suas negociações para que os agentes sejam capazes de adaptar seu comportamento estratégico aprendendo com transações anteriores. Outra ferramenta que vale destaque no quesito integração ao MASCEM é o simulador de cenários realísticos RealScen [63].

Outrossim, o MASCEM é uma ferramenta de simulação para decisões de médio ou longo prazos. Desta forma, a metodologia utilizada no simulador faz uso de algoritmos de aprendizagem de reforço para a definição de lances e fornecer aos agentes uma percepção de mudanças no ambiente do mercado considerado na simulação [61].

Segundo Vale *et al.* [61], as características principais abordadas pelo simulador MASCEM são as seguintes:

- Mercados de eletricidade: contratos bilaterais, mercado a prazo, mercado *spot* podendo ser com ou sem condições complexas e com *pool* simétrica ou assimétrica e, por fim, balanceamento de mercado considerando condições complexas;

- Geração distribuída: inclusão de *Virtual Power Players*, mecanismo de classificação para analisar a contribuição dos produtores no contexto de geração distribuída e um método para distribuição de lucros entre os membros;
- Estratégia de lances: negociação de potência, preço de oferta considerando técnicas de mineração de dados, mecanismos de aprendizagem adaptativa e análise de cenário;
- Outras características, como verificação do fluxo de energia, comparações de cenários, utilização de dados reais de mercado em simulações e atualização contínua do banco de dados.

Para especificar um cenário no MASCEM é necessário definir as seguintes informações [63]:

- Data inicial e final de simulação;
- Tipos de mercados, por exemplo o mercado *day-ahead* da EPEX e o MIBEL;
- Agentes de negociação, ou seja, vendedores, compradores e *Virtual Power Players*. Cada agente requer as seguintes informações;
 - Características intrínsecas, como o tipo de tecnologia e localização;
 - Quantidade de energia negociada esperada para cada período de negociação de cada sessão, de cada dia, de cada tipo de mercado;
 - Preço desejado para cada período de negociação de cada sessão, de cada dia, de cada mercado.

Este conjunto de informações caracterizam um cenário de simulação no MASCEM. Desta forma, é notável que o MASCEM se apresenta como uma ferramenta computacional de alto nível e que cabe na proposta da presente dissertação.

4.4.2. ESTRATÉGIAS PARA DEFINIÇÃO DE OFERTAS

No contexto da simulação executada pelo MASCEM são levadas em consideração abordagens pontuais para que sejam definidas as características de cada agente. Estas abordagens se traduzem numa estratégia para simular o comportamento do mercado de acordo com diferentes estímulos.

Para isso, são levadas em consideração as características próprias de cada agente. Mecanismos de *data mining* e algoritmos baseado em *machine learning* são implementados

para realizar a previsão dos preços nos mercados de acordo com uma determinada quantidade de potência [61].

4.4.2.1. ESTRATÉGIA PARA A DEFINIÇÃO DE POTÊNCIA

De acordo com Vale *et al.* [61], os montantes de potência passíveis de serem negociados em cada mercado são otimizados para que o desempenho máximo seja alcançado. Sendo assim, a Equação (6) seguinte é levada em consideração.

$$\begin{aligned}
 & f(Spow_{M1...NumM}, Bpow_{S1...NumS}) \tag{6} \\
 & = \max \left(\sum_{M=M1}^{NumM} Spow_{M,d,p} \cdot ps_{M,d,p} \cdot Asell_M \right. \\
 & \quad \left. - \sum_{S=S1}^{NumS} Bpow_S \cdot pb_{S,d,p} \cdot Abuy_S \right)
 \end{aligned}$$

Onde $Spow_{M1...NumM}$ é o montante de potência para ser vendido em cada mercado, $Bpow_{S1...NumS}$ é o montante de potência para ser comprado em cada mercado. Ambos os montantes são referentes ao conjunto de mercados $M1, \dots, NumM$ com sessões $S1, \dots, NumS$. O dia da negociação é dado por d e o período de negociação é dado por p . São utilizadas duas variáveis booleanas, $Asell_M$ e $Abuy_S$, que definem se o agente pode comprar ou vender no contexto de M e S . Os preços esperados de compra e venda são, respetivamente, $pb_{S,d,p}$ e $ps_{M,d,p}$. O valor de $pb_{S,d,p}$ depende de S , d e p e $ps_{M,d,p}$ depende de M , d e p .

Vale ressaltar que quando o agente tenta estabelecer um contrato bilateral, a comercialização depende da quantidade de energia que está sendo negociada. Desta forma, há uma previsão que leva este fato em consideração e aplica lógica *fuzzy* na quantidade absoluta de energia. O intuito em questão é realizar a classificação numa das categorias definidas por uma estrutura *clustering*, que agrupa as faixas de valores que apresentam preços semelhantes em cada mercado.

O modelo também considera a restrição imposta pela condição de cada agente envolvido na simulação. A Equação (7) traduz tal restrição.

$$\sum_{M=M1}^{NumM} Spow_M \leq TEP + \sum_{S=S1}^{NumS} Bpow_S \quad (7)$$

Onde TEP é a produção total esperada. Em síntese, a imposição de tal restrição garante que a energia total reservada para ser vendida em todos os mercados nunca é maior do que a produção total esperada somada à energia esperada para ser comprada ao longo de todas as sessões do mercado de balanceamento.

4.4.2.2. ESTRATÉGIA PARA A DEFINIÇÃO DE PREÇO

De acordo com o trabalho apresentado por Vale *et al.* [61], o MASCEM prevê, para cada mercado, os preços de acordo com métodos estatísticos, técnicas de *data mining*, redes neurais, máquina de vetores de suporte, entre outros métodos. Vale ressaltar que nenhuma metodologia é considerada melhor para todas as situações, mas cada uma pode ser a melhor para um ou mais casos particulares simulados.

As abordagens estatísticas utilizadas levam em consideração três elementos principais. São eles [61]:

- Preços médios de mercado do mesmo dia da semana do último mês;
- Preços médios de mercado da última semana considerando apenas dias úteis;
- Preços médios de mercado dos últimos quatro meses;
- Regressão nos preços de mercado dos últimos quatro meses;
- Regressão nos preços de mercado dos últimos cinco dias úteis.

É importante mencionar que o usuário pode definir o modo de atualização estatística para realizar a simulação. As opções de atualização fornecidas são definidas de acordo com os três algoritmos de aprendizagem de reforço implementados no MASCEM, sendo que todos os algoritmos iniciam a partir do mesmo valor de confiança. Tal valor é atualizado de acordo com a especificidade do desempenho. Além disto, o usuário também pode atribuir um valor que discrimina um peso para cada estratégia.

As metodologias consideram três versões de algoritmos de aprendizagem de reforço [61]:

- Algoritmo simplificado de reforço de aprendizagem, definido através da atualização direta do valor de confiança C , no tempo t , de acordo com o valor absoluto da diferença entre a predição P e o valor real R . A Equação (8) descreve a atualização supracitada

$$C_{t+1} = C_t - |R - P| \quad (8)$$

- Algoritmo de aprendizagem de reforço Roth-Erev revisado, que inclui todos os recursos do algoritmo simplificado e um valor de ponderação W que define a importância da experiência passada para a atualização. A Equação (9) evidencia a forma de atualização Roth-Erev revisada

$$C_{t+1} = C_t \cdot W - |R - P| \cdot (1 - W) \quad (9)$$

- Algoritmo de aprendizagem baseado no teorema de probabilidade de Bayes, de forma que os valores são atualizados através da propagação da probabilidade de sucesso dado seu desempenho passado. A Equação (10) descreve a propagação da probabilidade em questão

$$EU(A|E) = \sum_i P(O_i|E, A) \cdot U(O_i|A) \quad (10)$$

Onde E é a evidência disponível, A é uma ação com resultados possíveis O_i , $U(O_i|A)$ é a utilidade de cada um dos estados de resultado dado que a ação A é tomada e $P(O_i|E, A)$ é a probabilidade de distribuição condicional sobre os possíveis estados de resultado, dado que a evidência E é observada e a ação A é tomada.

A estruturação do MASCEM dispõe de uma estrutura complexa para realizar a previsão dos preços em para diferentes estruturas de mercado de energia elétrica. Trata-se de uma ferramenta que pode evidenciar as diferentes formas de negociação e estratégias de mercado.

4.4.3. INTEGRAÇÃO E INTERCONECTIVIDADE

Desde a primeira versão, disponibilizada em 2003, diversas atualizações e aprimoramentos foram realizados no MASCEM. A versão utilizada no presente trabalho considera cinco tipos diferentes de agentes para controlar as interfaces do usuário e gerenciar as comunicações.

Os tipos de agentes são: *players*, agente principal; agente MIB; operador de mercado e operador do sistema.

Os *players* são basicamente agentes compradores, vendedores ou agregadores. O agente principal viabiliza a interação do usuário com o sistema. Trata-se basicamente do agente responsável por iniciar as entidades de mercado a partir do arquivo de entrada ou interface do usuário. É também incumbido de converter os dados de entrada nas respectivas bases de conhecimento e enviá-los aos respectivos *players* e operadores. Acaba por distribuir os vários agentes pelas máquinas disponíveis para a simulação, considerando as características das máquinas e as necessidades de processamento dos agentes. Caso o usuário decida encerrar o aplicativo, o agente principal finaliza adequadamente a simulação. O agente MIB é responsável por ler a base de informações de gerenciamento de cada máquina, criar um relatório e enviá-lo ao agente principal para que ele possa decidir quais agentes serão movidos para cada máquina [64].

O operador de mercado regula as negociações, valida e analisa as ofertas dos *players* e, dependendo do tipo de negociação, determina o preço de mercado, as ofertas aceitas e recusadas e o despacho econômico que será enviado ao operador do sistema. O operador do sistema por sua vez, examina a viabilidade técnica do ponto de vista do sistema de energia e resolve os problemas de congestionamento que possam surgir. É responsável pela segurança do sistema e por garantir que todas as condições sejam atendidas na conjuntura do sistema [64].

Esses agentes centrais permitem uma simulação simples e eficaz do mercado de eletricidade. Simulações mais avançadas e complexas podem ser realizadas através da colaboração entre diferentes sistemas multiagentes e o MASCEM. A Figura 31 apresenta tais sistemas.

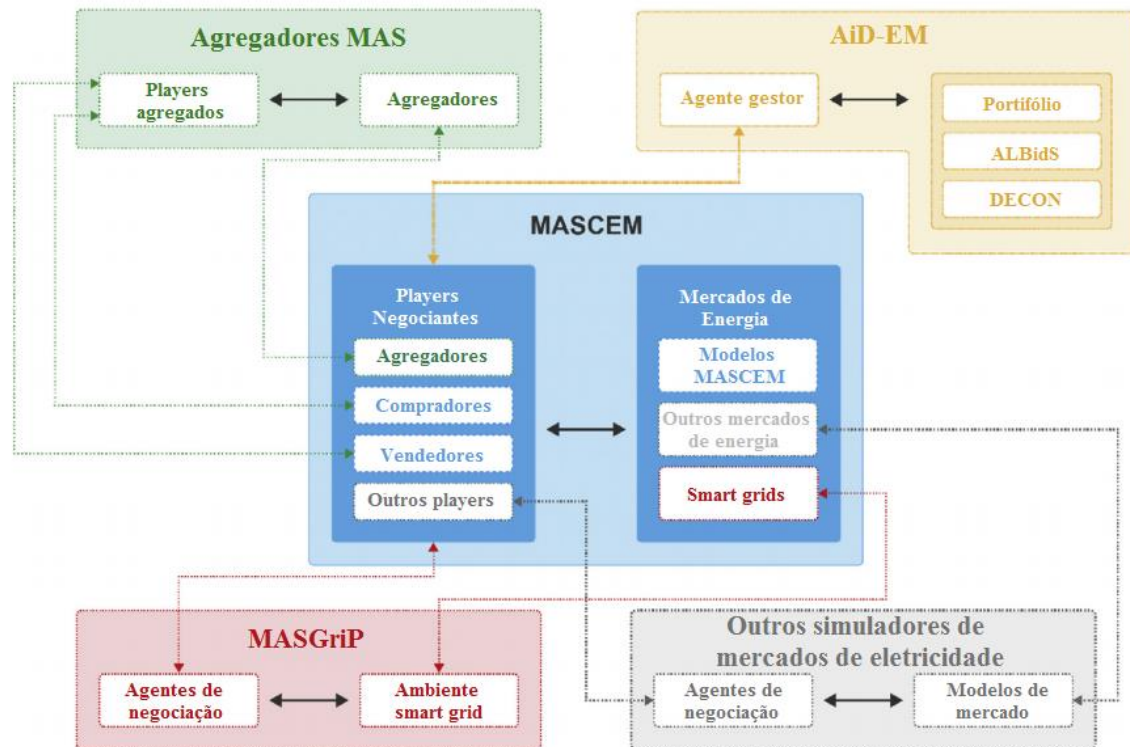


Figura 31 Esquema colaborativo entre sistemas multiagentes independentes [64]

Conforme evidenciado na Figura 31, o ambiente de simulação central fornecido pelo MASCEM pode ser estendido através da integração de *Virtual Power Players*, ou mesmo de outros pequenos compradores e vendedores que fazem parte de uma coalizão e desejam participar de negociações de mercado por conta própria. Outros *players* que atuam num ambiente de *smart grid*, no escopo do simulador MASGrIP, ou que fazem parte de outros simuladores de mercados de eletricidade no contexto de multiagentes, também podem participar das negociações do mercado de eletricidade do MASCEM. Todos esses *players* podem usar os recursos de suporte à decisão fornecidos pelo ALBidS [64].

Neste capítulo foram abordadas questões no âmbito de inteligência artificial focadas no apoio à decisão, considerando o contexto de mercados de energia, sendo destacadas com relevância as técnicas de *data mining* e *machine learning*. Tais técnicas definem a *backbone* de diversos simuladores de mercados de energia elétrica. Ademais, foi realizada uma descrição do simulador MASCEM que é a ferramenta crucial para a formulação do estudo de caso que será apresentado no capítulo 5.

5. CASO DE ESTUDO

Levando em consideração os estudos apresentados nos Capítulos 2, 3 e 4, se faz pertinente a estruturação de um caso de estudo que relacione mercados de energia no âmbito global e local, modelos de negócios aplicados a mercados locais, técnicas de análise de dados e descoberta de conhecimento.

O caso de estudo descrito neste capítulo consiste na análise da dinâmica de funcionamento de um mercado local de energia na ótica de um órgão municipal licenciado. O *software* MASCEM, que dispõe de técnicas *data mining* e *machine learning*, é o simulador utilizado para a obtenção de resultados referentes ao mercado local de energia. Um modelo de cidade com uma rede local é levado em consideração para que seja possível realizar a obtenção de dados coerentes e fundamentar o caso de estudo. Uma vez que os dados estão estruturados, são realizadas duas simulações que permitem analisar aspetos relacionados às negociações no âmbito de mercados locais.

5.1. DESCRIÇÃO DO MODELO DE CIDADE

A cidade modelo adotada para embasar o estudo de caso proposto é fundamentada a partir de um modelo físico da *smart city*, GECAD-BISITE, estruturada a partir da cidade de Salamanca na Espanha [65]. De forma sucinta, a cidade é composta por um conjunto

específico de agentes. Para que seja possível evidenciar tais partes, é apresentada uma caracterização de cada agente do cenário em estudo através da Tabela 8.

Tabela 8 Descrição dos agentes para definição do mercado local de energia

	Quant.	Número de barramentos	Identificação adotada	Representação % na geração no mercado local	Representação % no consumo no mercado local
Geradores locais	2	7, 11	GL	8,74 %	0,00 %
Consumidores produtores	10	2, 4, 5, 6, 7, 11, 12	CP	11,30 %	5,13 %
Consumidores tradicionais	5	3, 8, 10	CT	0,00 %	3,69 %
Gerador comercial de grande porte	1	9	GG	0,30 %	7,80 %
Geradores comerciais de pequeno porte	7	2, 4, 5, 6, 7, 9, 12	GP	0,00 %	79,85 %
Consumidores prioritários	2	3, 13	PR	0,38 %	3,53 %

As seis categorias que descrevem os agentes inseridos no mercado local são a base para a realização das simulações. Vale ressaltar que a representatividade remanescente de 79,28 %, referente à geração necessária para o mercado local, é suprida através da relação com o mercado de energia elétrica num nível global, como por exemplo o MIBEL. Em valores nominais, a geração e a demanda de energia comercializadas no mercado local para o período levado em consideração são de 307,34 MW e 1,14 GW, respetivamente.

Para que seja possível ilustrar a rede elétrica no modelo de mercado local considerado para o presente estudo, expõem-se na Figura 32 um esquema do sistema elétrico de energia da rede local.

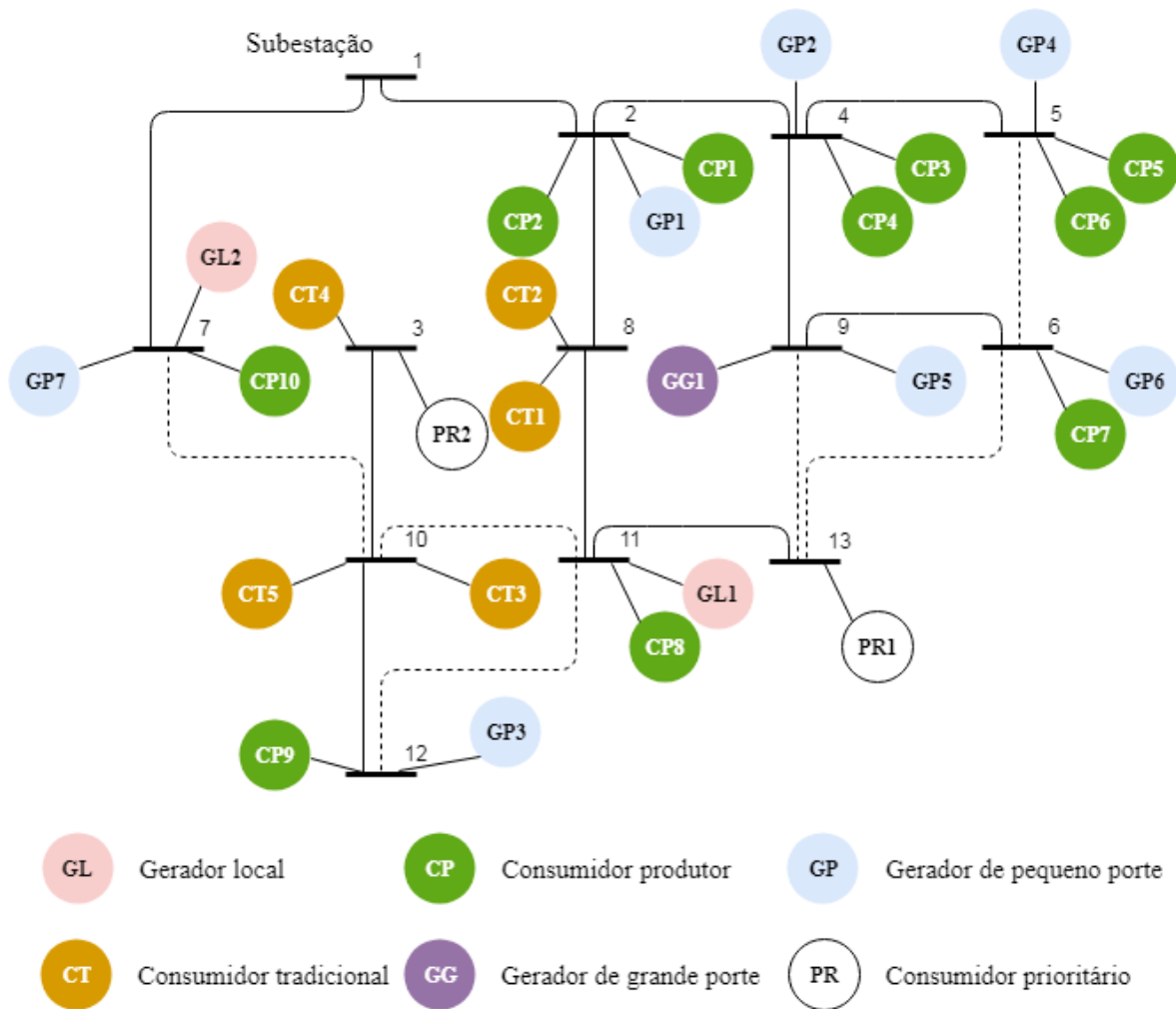


Figura 32 Esquema do sistema elétrico estruturado para o mercado local de energia

A disposição dos agentes do mercado local, apresentada na Figura 32, leva em consideração as características da cidade modelo de Salamanca, descrita por Canizes *et al.* [65].

Os dois geradores locais levados em conta são entidades exclusivamente geradoras de energia elétrica. No contexto examinado, tais geradores produzem energia elétrica através de geração eólica, ou seja, renovável. Estes geradores estão atrelados às gerações de energia de menor proporção e distribuídas em locais mais próximos de centros de consumo. Vale ressaltar que a existência de geradores locais não é uma situação imprescindível para a estruturação de um mercado local.

Os consumidores produtores são consumidores residenciais que possuem geração local e podem ser vistos como elementos principais na estruturação do mercado local. Conforme apresentado na Tabela 8, os dez consumidores produtores evidenciados no estudo são responsáveis por uma boa parte da representatividade de geração no mercado local (12,76

%). Tal produção é realizada a partir de geração fotovoltaica, podendo ser complementada através de micro e nano geração. Além disto, não se pode descartar a relevância do consumo de energia associado a estes agentes.

Já os consumidores tradicionais são consumidores que não possuem qualquer tipo de geração de energia elétrica associada. Sua representatividade no mercado local restringe-se à compra de energia de outros agentes em mercados locais ou do mercado global. Vale frisar que há uma tendência latente de que a condição de consumidor tradicional seja substituída pela condição de consumidor produtor.

No modelo de cidade considerado, é apontado um gerador comercial de grande porte. Tal gerador pode ser visto como uma grande indústria que produz uma parte de seu consumo de energia através de uma geração local com base na combustão de resíduos resultantes de seu processo produtivo. Tal agente necessita de uma considerável quantidade de energia elétrica para suprir sua demanda. Desta forma, este agente pode ser visto como um consumidor produtor que apresenta características de consumo mais substanciais.

Os geradores comerciais de pequeno porte são edifícios comerciais com geração fotovoltaica agregada, como galerias comerciais, supermercados e lojas em geral. A atividade foco deste tipo de agente não é a geração de energia elétrica, mas sim outras atividades comerciais. A condição destes geradores comerciais de pequeno porte é semelhante à situação dos consumidores tradicionais, com a ressalva de que há geração fotovoltaica que não supre o consumo de energia em período algum, ou seja, o mercado local enxerga tais agentes como sendo consumidores tradicionais de grande consumo.

Os dois consumidores prioritários são evidenciados na cidade modelo e representam um prédio do corpo de bombeiros, conectado na barra 13, e um hospital, conectado na barra 3. Consumidores prioritários apresentam características diferenciadas em relação aos outros consumidores em virtude de que a interrupção ou deterioração de qualidade de fornecimento de energia elétrica pode gerar risco de perda direta de vidas ou manutenção da segurança pública. Atrelar a geração de energia elétrica às incertezas associadas às condições climáticas acaba por não ser a melhor opção para este tipo de agente. Sendo assim, estes agentes dispõem de um regime de cogeração que utiliza diesel para gerar energia elétrica.

A partir do modelo supracitado, foram gerados dados essenciais para a realização da simulação através do MASCEM. O foco é o funcionamento do mercado local de acordo com o modelo de negócios proposto no presente trabalho e com o modelo proposto na Figura 19.

5.2. SIMULAÇÕES

As simulações foram realizadas considerando dados em intervalos horários em sete dias (168 períodos), mais precisamente entre 19/03/2017 e 25/03/2017. A dinâmica adotada foi a de mercados *day-ahead*, conhecidos como mercados diários. Além disto, dentre as funcionalidades implementadas no MASCEM, o algoritmo empregado nas simulações foi o simétrico. Deste modo, as curvas de oferta e demanda são definidas a partir das propostas sendo que a interseção destas curvas define o preço de mercado. Levando em consideração o número de períodos analisados, existem 168 curvas de oferta e demanda em cada simulação.

Foram utilizados dados históricos de incidência solar e velocidade do vento em Salamanca, na Espanha, para definir os valores das gerações eólica e solar utilizados na simulação. O Gráfico 1 descreve a injeção de potência das unidades eólicas em função da velocidade do vento considerando a respectiva distribuição probabilística.

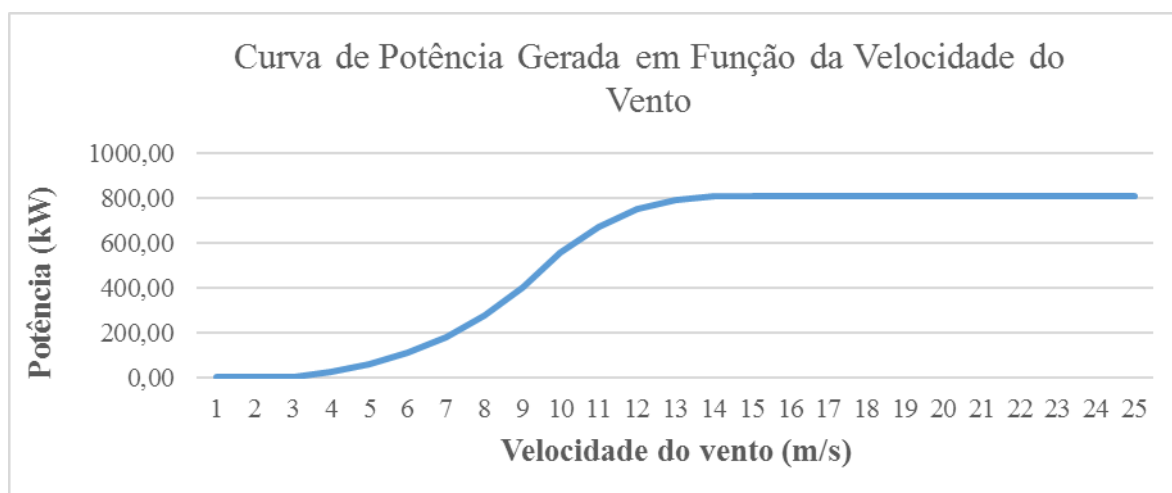


Gráfico 1 Injeção de potência em função da velocidade do vento

Através da curva apresentada no Gráfico 1 definem-se os perfis de geração eólica dos agentes GL1 e GL2 na simulação. Os perfis de geração fotovoltaica dos demais geradores são definidos a partir dos dados históricos de incidência de radiação solar e temperatura no contexto da simulação. As curvas de geração e de demanda dos agentes no mercado local

podem ser consultadas no Anexo A e no Anexo B. A simulação considera a sistemática de funcionamento do MIBEL, conforme o Tópico 2.2., para a definição de preços de mercado e possíveis posturas dos agentes.

5.2.1. PREÇOS DE COMPRA E VENDA

Para o estudo de caso considerado é imprescindível que os valores de preços de compra e venda de energia no mercado local sejam definidos. De antemão, é possível inferir que os preços de venda de energia elétrica no mercado local devem ser menores ou iguais ao preço do mercado global, estabelecido como referência para o período considerado.

A dinâmica de precificação do mercado local é definida de acordo com o tipo de investimento. Conforme apresentado no Tópico 5.1., o sistema dispõe de três modalidades de investimento, sendo elas: fotovoltaica comercial, fotovoltaica residencial e eólica.

A avaliação energética e econômica de autoconsumo de energia fotovoltaica no setor não residencial, aponta que o investimento em produção fotovoltaica para setores comerciais pode reduzir até 50 % da fatura de energia elétrica [66]. Desta forma, o preço de venda de energia no mercado local para esta modalidade é de, no mínimo, 50 % do preço do mercado global.

Levando em consideração a avaliação de energética e econômica de projetos fotovoltaicos residenciais e o preço *turn key*, ou seja, imediato, de sistemas fotovoltaicos nesta modalidade, o preço da energia é tido como 25 % maior quando comparado ao preço para a modalidade não residencial [67]. O preço de venda de energia no mercado local para a modalidade de projetos fotovoltaicos residenciais é de, no mínimo, 62,5 % do preço de referência de mercado.

Para a geração eólica, mais corriqueira no setor industrial, a avaliação energética e econômica é um pouco distinta em relação aos projetos fotovoltaicos. Para tal estimativa, devem ser considerados os custos de aquisição, custos de geração de energia elétrica, energia produzida, custo de oportunidade e tempo de vida útil [68]. Desta forma, ao observar a razão do preço de venda estimado de mercado e o preço da energia efetivamente gerada por fonte eólica, tida na análise energética e econômica apresentada por Macedo *et al.* [68], pode-se definir que o preço de venda de energia no mercado local é de no mínimo 80,9 % do preço do mercado global.

Os preços máximos para compra de energia no mercado local são os preços do mercado global. Esta definição entra em consonância com a premissa de que os preços de venda de energia elétrica no mercado local devem ser menores ou iguais aos preços do mercado global.

5.2.2. CENÁRIO 1 - NEGOCIAÇÃO INTRAMERCADO LOCAL

Para realizar a simulação dos processos de negociação num contexto intramercado local, os dados provenientes do modelo de cidade, descrito no Tópico 5.1., são estruturados de tal forma que é possível evidenciar a postura de cada um dos agentes que compõe tal configuração local de comércio de energia. São referidos 27 agentes agrupados em 6 grupos, conforme a Tabela 8, e um agente *retailer*⁹ representado pelo órgão municipal licenciado. Estes 28 agentes que devem interagir entre si e com o mercado grossista para que seja possível suprir suas respectivas demandas de energia, efetuar vendas de energia e simular custos e lucros associados ao mercado local de energia.

Os resultados provenientes da simulação da negociação intramercado local no MASCEM refletem, essencialmente, aspetos relacionados à energia elétrica (montantes demandados e gerados) e preços relacionados (custos e lucros). Para que seja possível ter uma noção geral da simulação realizada, considerando o período entre 19/03/2017 e 25/03/2017, a Tabela 9 a seguir apresenta um resumo dos valores obtidos e com uma discretização por agente.

Tabela 9 Resumo dos resultados obtidos a partir da simulação de negociação intramercado local

	Compra de energia	Venda de energia	Custos	Lucros
Geradores locais (GL)	Não se aplica	Não se aplica	0 €	0 €
Consumidores produtores (CP)	5,59 MW	14,13 MW	259,56 €	627,03 €
Consumidores tradicionais (CT)	42,25 MW	Não se aplica	1709,08 €	0 €

⁹ Agente que tem por objetivo obter a energia elétrica necessária para suprir a demanda local.

Gerador comercial de grande porte (GG)	76,10 MW	4,00 MW	3444,05 €	187,44 €
Geradores comerciais de pequeno porte (GP)	791,09 MW	Não se aplica	36448,19 €	0 €
Consumidores prioritários (PR)	33,43 MW	4,07 MW	1533,24 €	183,27 €

Os resultados apresentados na Tabela 9 levam em consideração as curvas de geração e de demanda de energia apresentadas, respetivamente, no Anexo A e no Anexo B. Para evidenciar a efetividade da comercialização de energia demandada e de energia gerada no contexto de cada agente, o Gráfico 2 é apresentado na sequência.

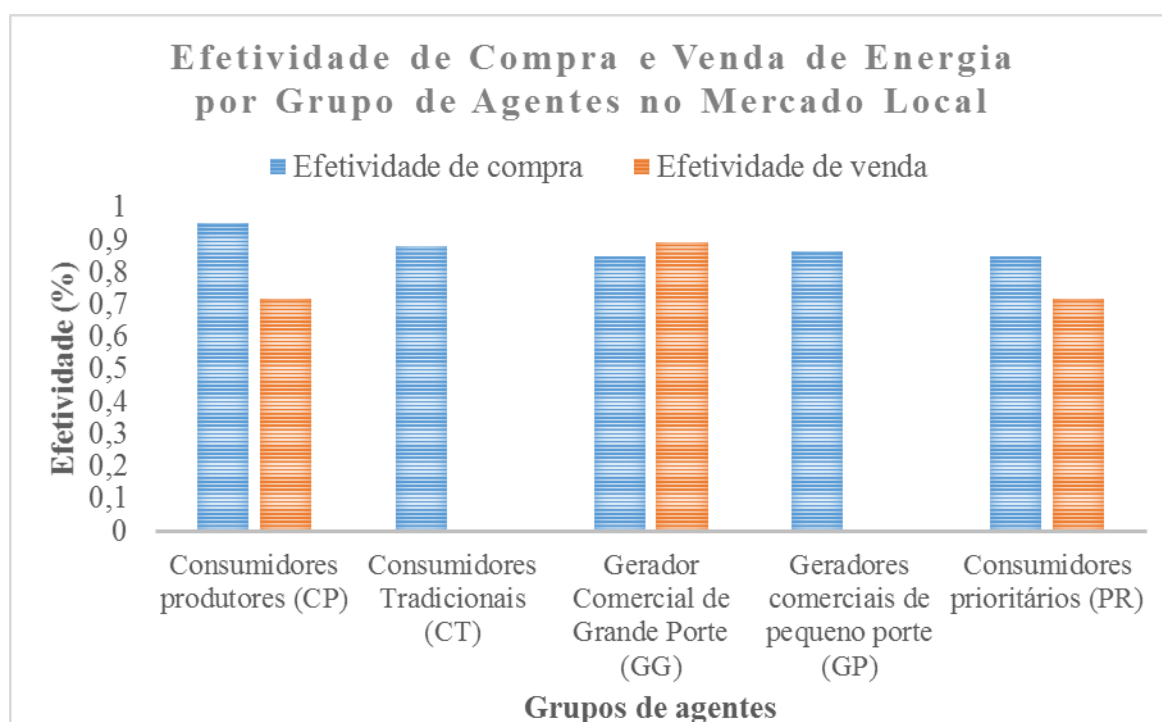


Gráfico 2 Efetividade da comercialização de montantes de energia elétrica intramercado considerando os grupos de agentes

Através da interpretação do Gráfico 2 é possível observar o comportamento dos agentes de acordo com seu respetivo grupo. Os agentes GL, ou geradores locais, não estão evidenciados pois não conseguiram realizar a venda de suas produções. Os agentes CP salientam a maior efetividade de compra de energia elétrica no mercado local, em contrapartida apresentam a menor efetividade na venda de sua energia produzida. Os agentes CT, como não geram energia, não apresentam efetividade de venda, apenas em relação à compra de energia. Os agentes GP compartilham da situação dos agentes CT. O agente GG é o único em que a

efetividade de venda supera a efetividade de compra no mercado local. Os agentes PR possuem as menores efetividades relacionadas ao mercado local de energia na conjuntura de um órgão municipal licenciado.

Se faz pertinente analisar a proporção de lucro e custo relacionados aos agentes do mercado local de energia, conforme a Tabela 9. Os agentes GL não apresentaram lucro por, novamente, não conseguirem realizar a venda de sua geração. O Gráfico 3 a seguir apresenta tais proporções.

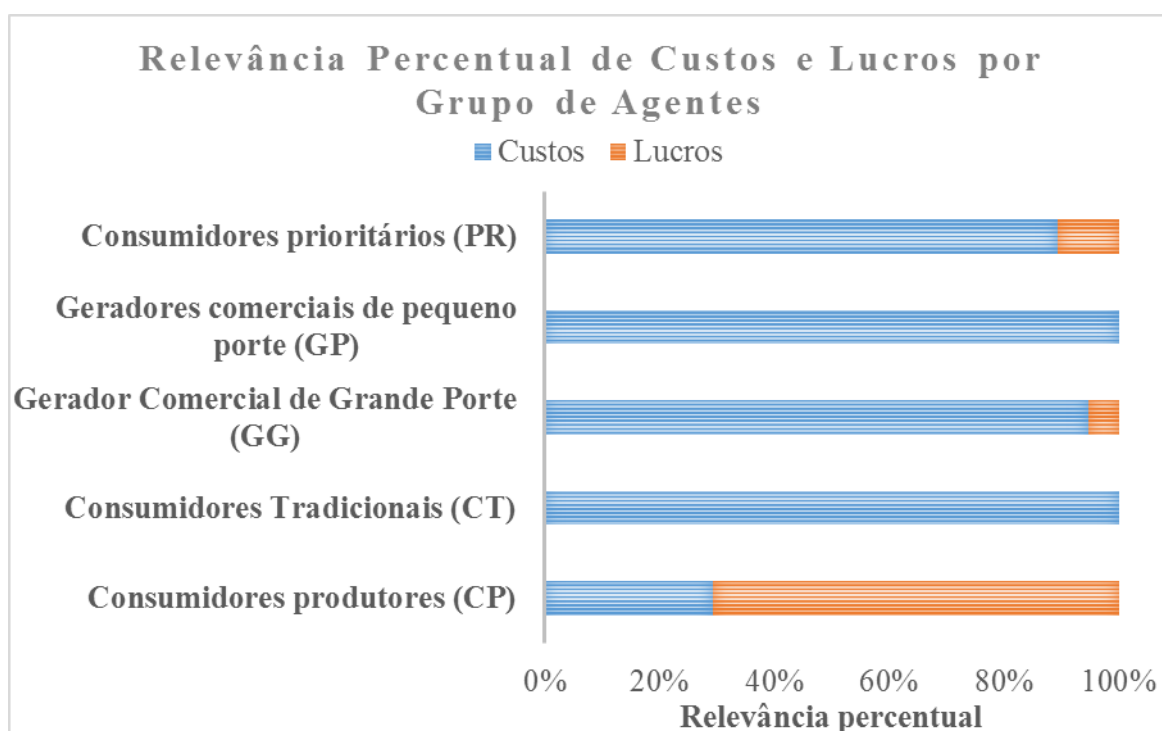


Gráfico 3 Proporção percentual de lucros e custos relacionados à comercialização de energia elétrica entre agentes no mercado local de energia

Através da análise do Gráfico 3 é possível destacar a valia do mercado local para cada grupo de agentes, tendo em vista a relação monetária proveniente do comércio de energia. Este indicativo é importante para configurar o perfil de cada grupo de agentes no mercado local.

5.2.3. CENÁRIO 2 - NEGOCIAÇÃO NO MERCADO GROSSISTA

Em um segundo contexto, o órgão municipal licenciado exerce maior influência sobre os agentes locais. Sendo assim, as relações comerciais no âmbito de energia elétrica entre o mercado local e o mercado global são intermediadas por tal órgão. Para simular este cenário os dados provenientes do modelo de cidade, descrito no Tópico 5.1., são compilados de tal

maneira que o órgão municipal licenciado representa todos os demais agentes do mercado local de energia frente ao mercado grossista. Ao total foram considerados 826 agentes, incluindo o órgão municipal licenciado, para que a simulação de negociação no mercado grossista seja condizente. Neste âmbito, o representante do mercado local de energia foi segmentado em agente comprador e agente vendedor para negociar no mercado grossista.

De forma análoga à abordagem realizada para o intramercado local, a negociação no mercado grossista considera o período entre 19/03/2017 e 25/03/2017. A diferença principal em relação ao caso anterior consiste na modelagem do mercado grossista, realizada a partir de dados provenientes do MIBEL. Considerando que a quantidade de dados resultantes para análise não é tão volumosa quanto o caso anterior, é possível realizar uma abordagem mais focada no agente, no que se refere à energia elétrica comercializada e sua precificação.

A energia demanda pelo mercado local pode ser descrita através de uma curva da potência em função das horas do dia. Além disto, a atuação do mercado local dispõe de uma curva para compra e outra para a venda de energia elétrica no mercado grossista. Pondo em destaque a compra de energia elétrica neste contexto, o Gráfico 4 e o Gráfico 5 são apresentados na sequência.

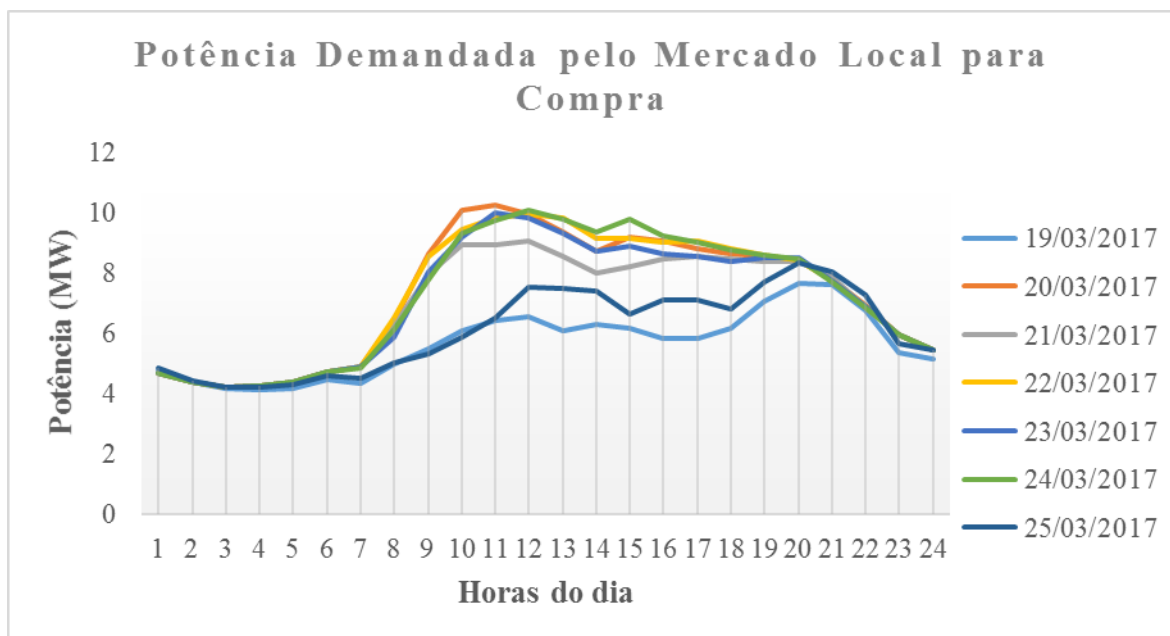


Gráfico 4 Curvas de demanda para compra no mercado grossista

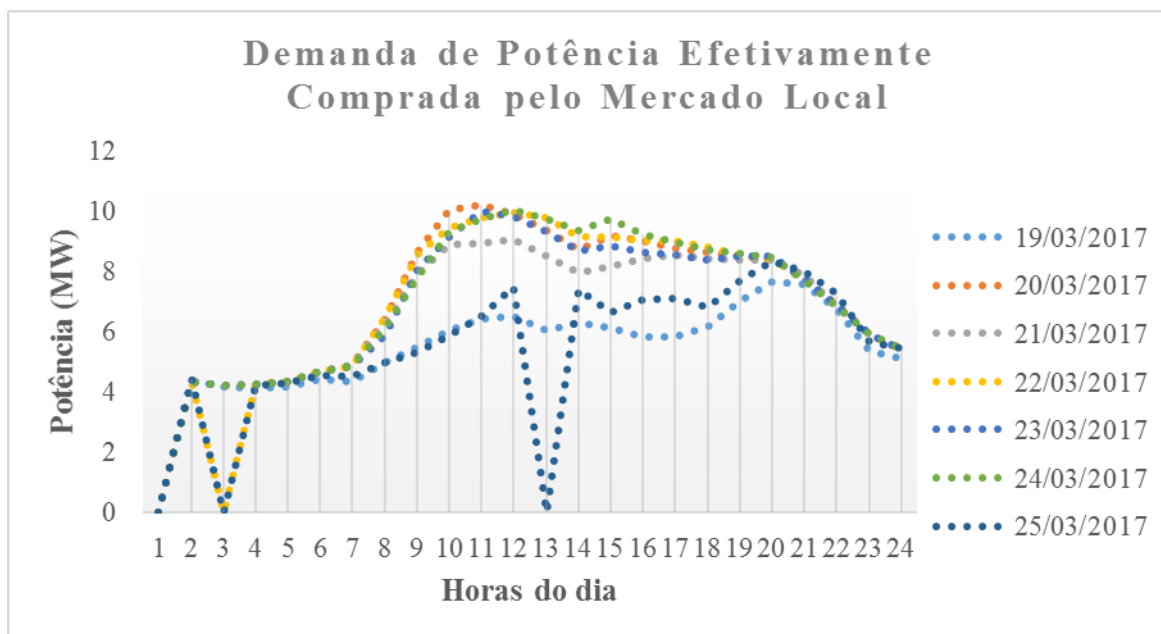


Gráfico 5 Curvas de demanda efetivamente comprada no mercado grossista

Ao analisar o Gráfico 4 e o Gráfico 5 é possível notar que a demanda para compra de energia por parte do mercado local de energia analisado pode ser segmentada em dois momentos na semana. As curvas de demanda no final de semana (19/03/2017 e 25/03/2017) apresentam valores menores de potência quando comparadas com as curvas que descrevem a demanda nos demais dias da semana. Esta situação não é necessariamente uma regra, ao passo que o consumo de energia elétrica no final de semana, em uma conjuntura local, pode ser elevado de acordo com as condições climáticas ou celebrações que atraem turistas, por exemplo. Além disto, a comparação dos gráficos supracitados evidencia a efetividade de compra de potência no mercado grossista (95,70 %). A análise dos momentos que a demanda de potência não foi comprada do mercado tido como global pode ser realizada através do Gráfico 6.

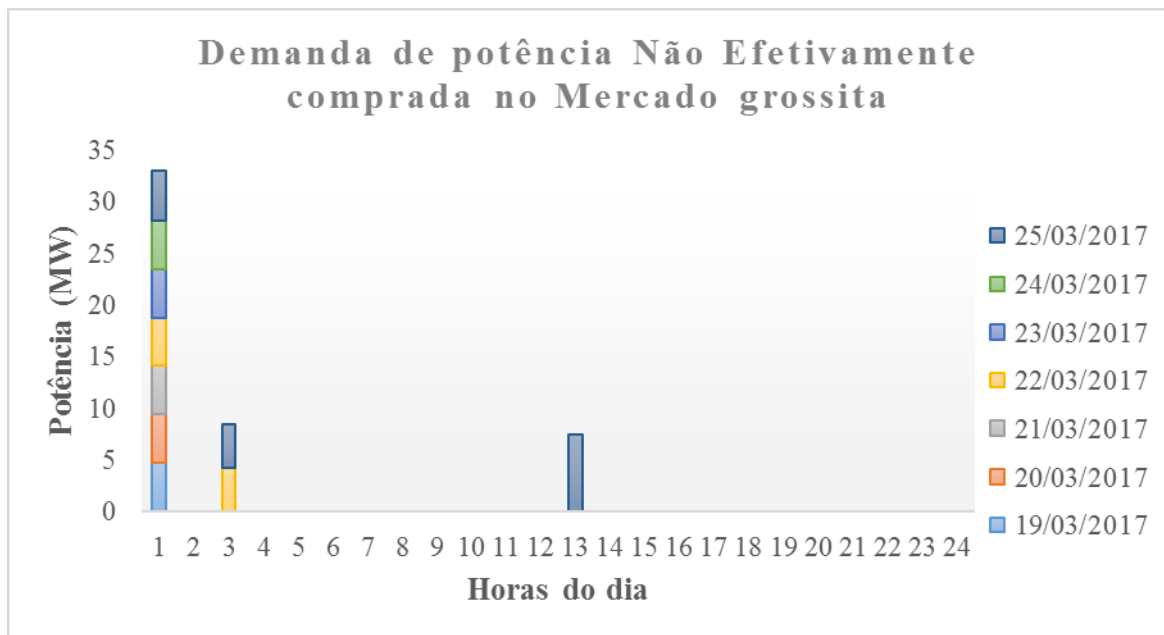


Gráfico 6 Montantes de energia não efetivamente comprados no mercado grossista

O Gráfico 6 evidencia que entre 00:00 e 01:00 ocorreu certa dificuldade em realizar a compra de energia no mercado grossista. Mesmo nesta situação, a efetividade de compra por parte do mercado local de energia é consideravelmente elevada.

Por outro lado, a venda da energia elétrica gerada no mercado local frente ao mercado grossista pode ser analisada através do Gráfico 7 e do Gráfico 8 a seguir.

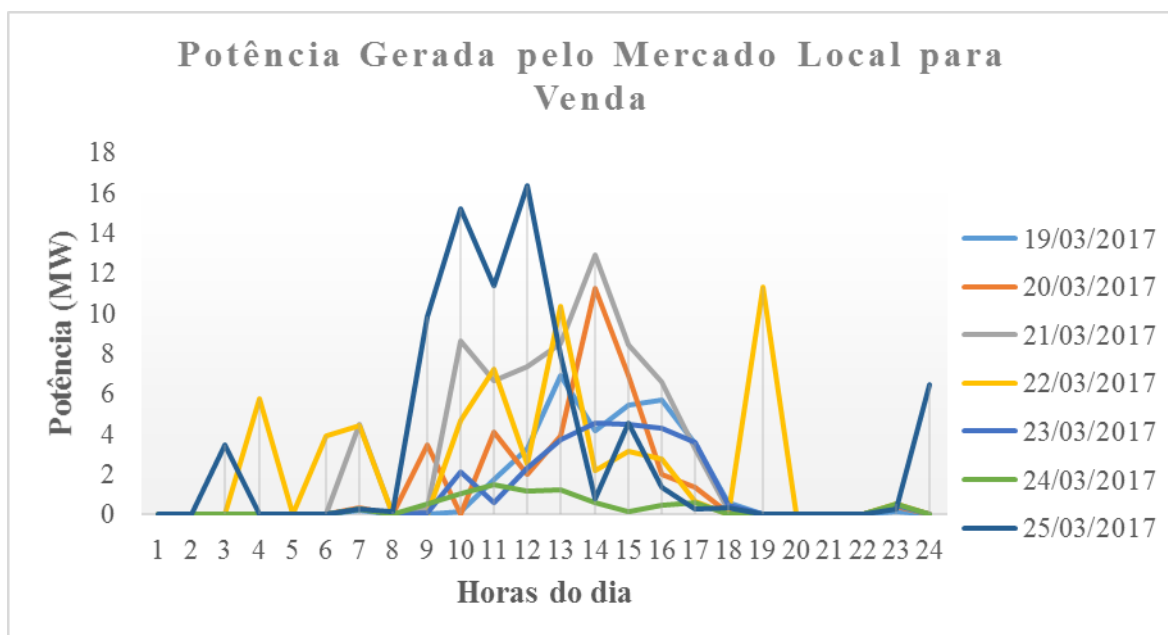


Gráfico 7 Curvas de demanda para venda no mercado grossista

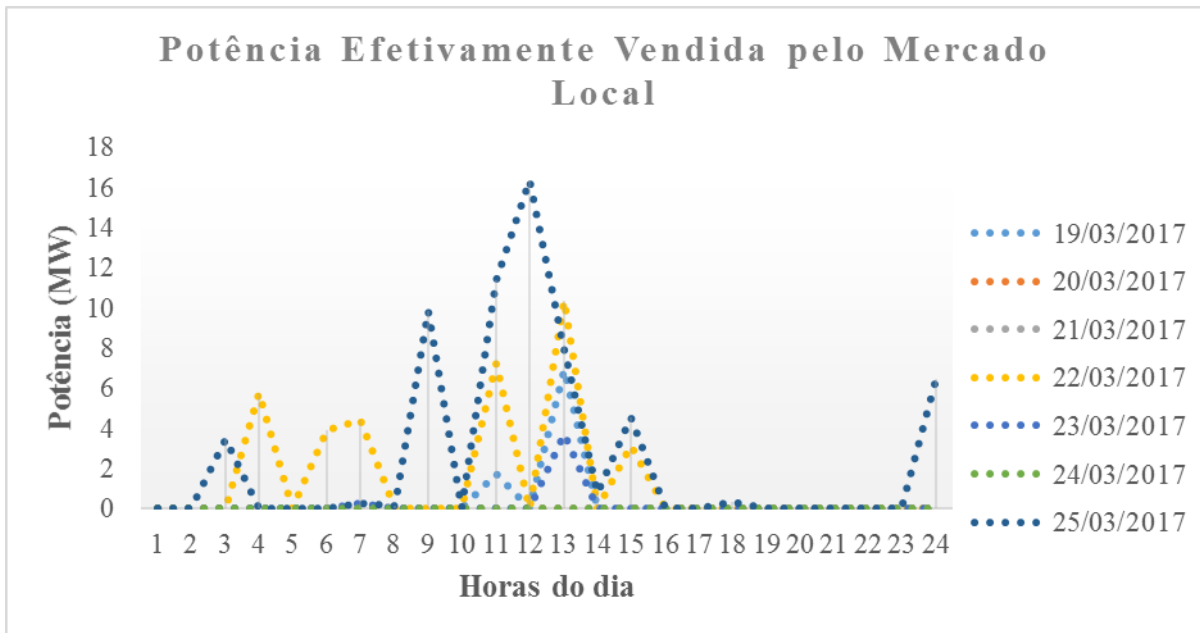


Gráfico 8 Curvas de demanda efetivamente vendida no mercado grossista

A análise do Gráfico 7 e do Gráfico 8 indica que há uma variabilidade elevada na geração de energia elétrica por parte do mercado local. Ademais, ao comparar tais gráficos fica evidenciada que a efetividade de venda de potência no mercado grossista não é muito elevada (35,34 %). Os momentos em que a potência não foi vendida no mercado grossista podem ser consultados no Gráfico 9 na sequência.

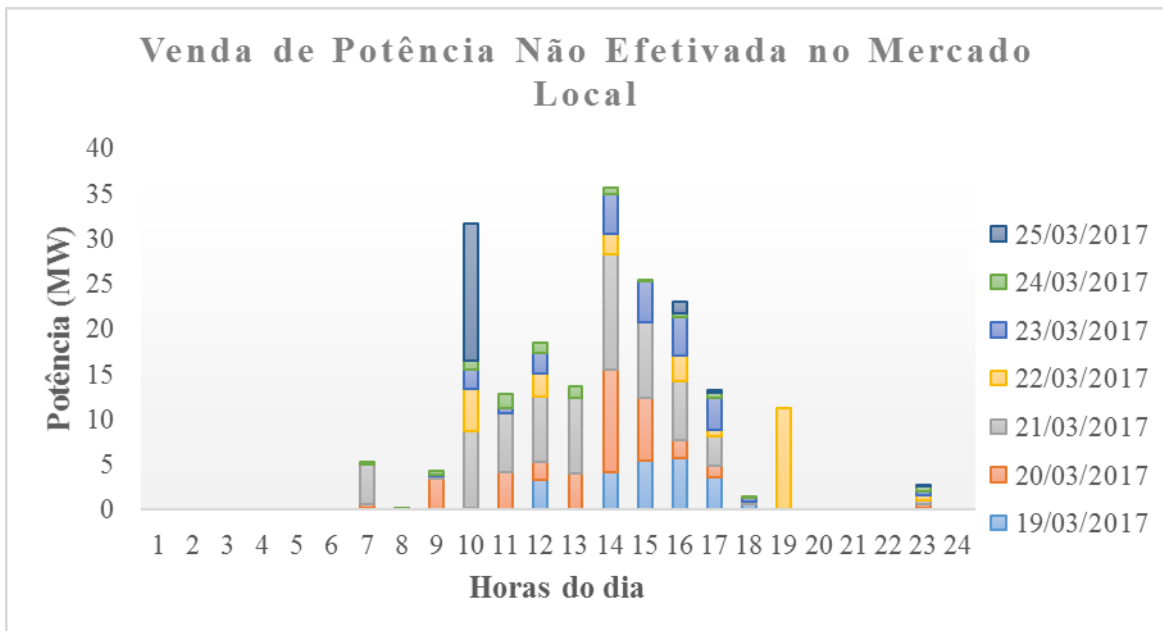


Gráfico 9 Montantes de energia não efetivamente vendidos no mercado grossista

O Gráfico 9 aponta que o período de maior acúmulo de energia não vendida é o vespertino. A magnitude máxima do montante de energia que não foi vendido pelo mercado local de energia acaba por assumir valores na ordem 35 MW, tido como preocupante, levando em consideração o período de uma semana.

5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Ao analisar os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no MASCEM, é possível apontar uma série de conclusões referentes à dinâmica de funcionamento de um mercado local de energia estruturado através de um órgão municipal licenciado. As duas perspectivas de negociação estudadas, intramercado local e mercado grossista, são fundamentais para compreender a postura de cada tipo de agente local, assim como a visão do mercado local frente ao mercado grossista.

De acordo com os resultados provenientes da simulação de negociação intramercado local, é possível evidenciar os perfis dos agentes locais. Os produtores locais, no período de simulação considerado, não foram efetivos na venda da energia gerada no mercado local. Este fato se justifica em virtude da volatilidade da geração eólica. Na dinâmica de mercado, de forma generalista, é evidente que incertezas em relação ao fornecimento não geram impactos positivos.

Para os consumidores produtores a estrutura do mercado local de energia é consideravelmente vantajosa. A participação de tais agentes é mais concreta na compra de energia, mas os lucros provenientes da venda de excedentes de produção fotovoltaica geram um lucro proporcionalmente considerável, conforme o Gráfico 3 demonstra.

Os consumidores tradicionais, como não dispõem de formas de geração de energia elétrica, são ativos apenas na compra de energia, ou seja, dispõem de alta efetividade de compra na conjuntura local. Os benefícios que o mercado local proporciona para agentes são provenientes da possibilidade de comprar energia elétrica a um preço menor que o imposto pelo mercado global. Vale salientar que este tipo de agente tende a ser substituído pela configuração de consumidores produtores.

Os geradores comerciais de pequeno porte, mesmo dispondo de geração fotovoltaica agregada, não geram energia suficiente para vender excedentes no mercado local. Sendo

assim, as análises realizadas para os consumidores tradicionais são válidas para este tipo de agente.

Já o gerador comercial de grande porte, de forma análoga aos consumidores tradicionais, não sofre grandes impactos em virtude da formulação do mercado local de energia. Contudo, apresenta uma considerável facilidade de vender a energia de forma local. Isto se justifica pelo fato de que sua curva de geração é regular, conforme o Anexo A. Em outras palavras, há um aceite maior por parte do mercado.

Os consumidores prioritários encaram o mercado local como positivo, mesmo que não sejam tão efetivos nas transações de compra e venda. Tais agentes precisam de altos padrões de confiabilidade de fornecimento de energia elétrica e assumem uma postura um tanto quanto conservadora, sem tanta dependência das incertezas do mercado de energia.

Os resultados obtidos a partir da simulação da negociação no mercado grossista colocam em evidência uma alternativa para a estruturação do mercado local. Neste cenário fica claro que há um maior consumo de energia no mercado local em dias de semana, em virtude da relevância dos de agentes geradores comerciais de pequeno porte que produzem uma parcela mínima de sua demanda de energia e funcionam essencialmente em horário comercial.

A simulação do caso onde o mercado local interage com o mercado grossista de forma centralizada aponta uma alta efetividade de compra. Isto se justifica pelo fato de que a agregação das demandas locais implica em maior facilidade de efetivação de compra de energia (95,70 %), frente às ofertas apresentadas no mercado grossista. Em contrapartida, a venda de energia para o mercado grossista não é tão efetiva (35,34 %) em virtude da falta de regularidade ocasionada pela agregação de gerações locais, conforme o Gráfico 7 demonstra. A Tabela 10 reflete de forma mais completa a situação supracitada.

Tabela 10 Efetividade de comercialização de acordo com a sistemática de negociação no mercado local

	Compra de energia	Venda de energia
Efetividade média intramercado local	73,20 %	58,14 %
Efetividade no mercado grossista	95,70 %	35,34 %

Através dos resultados apresentados na Tabela 10, é possível notar que a negociação intramercado local é mais efetiva que a negociação no mercado grossista no quesito venda de energia. Em contrapartida, o oposto ocorre no que se refere à compra de energia.

Neste capítulo foram contextualizadas as simulações e os resultados provenientes das mesmas conduziram aos apontamentos supracitados. Desta forma, ficam contempladas as condições necessárias para realizar as conclusões gerais e definir perspectivas para trabalhos futuros no capítulo 6.

6. CONCLUSÕES GERAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

A título de fechamento do trabalho, são apresentadas as conclusões obtidas a partir do estudo realizado. Para complementar o encerramento, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que estão relacionados com os temas discutidos.

6.1. CONCLUSÕES

A presente dissertação evidenciou temas que, ao serem alinhados, geram importantes análises para a evolução de mercados de energia elétrica em todo o mundo. Os objetivos da presente dissertação foram:

- Revisar o estado da arte acerca da organização de mercados de energia elétrica;
- Realizar estudos bibliográficos sobre a estrutura de mercados de energia elétrica estabelecidos no Brasil e em Portugal;
- Analisar a formação de mercados locais de energia elétrica e a aplicação de modelos de negócios;
- Estudar técnicas de análise de dados acerca de mercados de energia elétrica;
- Analisar, a partir de simulações realizadas com base em dados reais, a dinâmica de mercados locais de energia.

Evidenciou-se que os mercados de energia elétrica evoluíram a partir de uma estrutura de monopólios fortemente afetada pela variação dos preços de combustíveis utilizados na geração térmica de eletricidade. Com os avanços das tecnologias focadas na geração de energia elétrica por fontes renováveis, a situação supracitada alterou-se drasticamente, ao passo que não se pode deixar de lado as influências políticas e regulatórias em que determinado mercado de energia está inserido. Ao comparar as diferentes realidades mercadológicas, relativas ao segmento de eletricidade, instauradas no Brasil e em Portugal, foram estabelecidos paralelos inerentes à dimensão, à operação, à definição de preços e ao potencial de desenvolvimento. A dimensão da estrutura do mercado brasileiro evidenciada, em termos territoriais, é oito vezes maior que a do MIBEL, onde Portugal está inserido. No que se refere à operação de mercado, concluiu-se que o Brasil dispõe de uma estrutura centralizada e instaurada através de um único operador de mercado (CCEE). Em contrapartida, o MIBEL segmenta a operação de mercado entre dois operadores, um estabelecido em Portugal (OMIP) e outro na Espanha (OMIE). Já a definição de preços de compra e venda de energia no mercado brasileiro foi interpretada como essencialmente engessada em virtude de não estar atrelada de forma direta às ofertas e demandas de mercado, como se verifica no MIBEL. No quesito desenvolvimento, o MIBEL apresentou vantagem por constituir uma estrutura de mercado liberalizada e mais propícia à propagação de mercados locais de energia. Sendo assim, os objetivos da presente dissertação, relativos à organização de mercados de energia elétrica em um contexto global e nas realidades brasileira e portuguesa, foram contemplados.

A partir dos estudos apresentados sobre mercados locais de energia, concluiu-se que tais organizações locais impulsionam a produção distribuída de energia elétrica, podendo culminar na redução de perdas associadas ao fluxo de potência da rede elétrica. Os modelos de negócios foram identificados como ferramentas relevantes para que mercados locais sejam instaurados de forma prática em diferentes realidades. Foram identificadas questões relativas ao delineamento de mercados locais de energia, nomeadamente demandas técnicas, tamanho, fatores sociais e de propriedade. Através do presente estudo foi possível evidenciar as condições básicas para que a cultura de mercados locais de energia seja disseminada, como um mercado global liberalizado e autossuficiente local do ponto de vista operativo e legal. Desta forma, o objetivo relativo à análise de mercados locais de energia elétrica e aplicabilidade de modelos de negócios, previsto neste trabalho, foi cumprido.

A revisão bibliográfica sobre técnicas relacionadas à inteligência artificial e focadas no apoio à decisão no contexto de mercados de energia foi importante para compreender a dinâmica de funcionamento de ferramentas de simulação encontradas no estado da arte. Técnicas de *data mining* e *machine learning* se mostraram imprescindíveis para implementação de estratégias de *forecasting*. O MASCEM, utilizado como ferramenta de simulação, se mostrou fundamental para a realização do presente estudo. As técnicas de análise de dados no contexto de mercados de energia elétrica foram examinadas, ao passo que outro objetivo proposto foi cumprido.

As simulações realizadas a partir do caso de estudo, baseado na estruturação de um mercado local com características da cidade modelo de Salamanca, permitiram realizar uma análise sistemática de negociações no contexto de mercados locais, especificamente na organização de um modelo municipal. Dentre os grupos locais considerados, foi possível traçar diferentes perfis e definir a relevância da implementação de um mercado local de energia para cada tipo de agente. Ficou entendido que o agente que mais se beneficia de tal estrutura mercadológica é o consumidor produtor, ou *prosumer*. Considerando as duas dinâmicas de negociação (intramercado local e mercado grossista) foram destacadas as efetividades de compra e venda de energia de acordo a Tabela 10 e, portanto, conclui-se que a compra de energia no mercado grossista através de uma figura única (órgão municipal licenciado) é uma estratégia interessante. Contudo, a venda de energia através de figuras descentralizadas no contexto do mercado local gerou maior efetividade de venda. As efetividades de compra e venda de energia estão atreladas às curvas de oferta e demanda de forma que a interseção destas curvas define o preço para o período. Portanto, o objetivo de analisar mercados locais de energia com base em dados reais foi cumprido.

Diante dos argumentos apresentados, conclui-se que as análises relacionadas aos mercados locais de energia são importantes para a evolução das formas de comercialização de eletricidade. Desta forma, todos os objetivos inicialmente propostos foram contemplados.

6.2. CONTRIBUTOS

Diante das conclusões apresentadas no Tópico 6.1., é importante evidenciar de forma efetiva os principais contributos que a presente dissertação provê para a comunidade acadêmica. As principais contribuições no âmbito deste trabalho foram:

- Caracterização e análise comparativa das estruturas de mercados de energia elétrica estabelecidas no Brasil e em Portugal;
- Estudo de mercados locais de energia elétrica, tendo em vista que são organizações emergentes;
- Delineamento de um modelo de negócios específico voltado para a implementação de mercados locais de energia;
- Pesquisa meticulosa acerca de técnicas de inteligência artificial com elevado potencial de aplicação no setor elétrico;
- Descrição do simulador MASCEM focada no destaque do potencial de aplicação e robustez da ferramenta;
- Análise de um estudo de caso que, a partir de duas simulações, evidencia a postura de um órgão municipal licenciado responsável pela gestão de um mercado local de energia.

6.3. TRABALHOS FUTUROS

Se faz extremamente relevante que mais trabalhos relacionados aos mercados locais de energia sejam desenvolvidos na literatura. Esta relevância se justifica pelo fato de os mercados locais serem uma tendência efetiva na evolução da comercialização de energia elétrica.

Sendo assim, como sugestões para trabalhos futuros é pertinente:

- Simular mercados locais de energia inseridos em outras dinâmicas de comercialização de energia elétrica, como o mercado de energia Nord Pool;
- Analisar a inserção de condições complexas para agentes inseridos no contexto de mercados locais de energia e simulados no MASCEM;
- Utilizar outros simuladores de mercados de energia que tenham diferentes técnicas de análise relacionadas à inteligência artificial;
- Simular estruturas de mercados locais de energia considerando outros modelos diferentes do municipal;

Referências Documentais

- [1] M. A. Marconi e E. M. Lakatos, *Fundamentos da Metodologia Científica*, São Paulo: Atlas S.A., 2003.
- [2] P. L. Joskow, “Lessons Learned From Electricity Market Liberalization,” *The Energy Journal*, pp. 1-39, 2008.
- [3] N. de Castro, R. Brandão, N. Hubner, G. Dantas e R. Rosental, “A Formação do preço da energia elétrica: Experiências internacionais e o modelo brasileiro,” GESEL-IE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.
- [4] N. de Castro, R. Brandão, G. Dantas, P. Vardiero e P. Dorado, “Análise comparativa internacional e desenhos de mercados atacadistas de energia,” GESEL-IE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.
- [5] S. Hunt e G. Shuttleworth, “Competition and choice in electricity,” Wiley, West Sussex, 1996.
- [6] D. Kirschen e G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [7] D. Gonçalves Jr, “Novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro: análise dos mecanismos de mitigação de riscos de mercado das distribuidoras,” Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [8] F. L. Cuberos, “Novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro: análise dos mecanismos de mitigação de riscos de mercado das distribuidoras,” Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [9] C. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “Regras de Comercialização. Preço de Liquidação das Diferenças,” Rio de Janeiro, 2018.

- [10] C. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “Regras de Comercialização. Mecanismo de Realocação de Energia,” Rio de Janeiro, 2018.
- [11] C. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “Regras de Comercialização. Balanço Energético,” Rio de Janeiro, 2012.
- [12] C. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “Ambiente Livre e Ambiente Regulado,” [Online]. Available: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/ambiente-livre-ambiente-regulado?_adf.ctrl-state=njhqeix2i_5&_afrLoop=363438885001571. [Acesso em 10 Novembro 2018].
- [13] C. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “Veja se sua empresa se enquadra,” [Online]. Available: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/como-participar/participe/veja_se_enquadra_consumidor?_afrLoop=368119905143818&_adf.ctrl-state=mjm7fx130_14#!%40%40%3F_afrLoop%3D368119905143818%26_afr.ctrl-state%3Dmjm7fx130_18. [Acesso em 10 Novembro 2018].
- [14] M. I. D. Lourenço, “O sector da electricidade em Portugal,” Universidade de Coimbra, Coimbra, 2010.
- [15] J. Santana, “A concorrência no sector eléctrico,” 2003. [Online]. Available: <http://in3.dem.ist.utl.pt/master/04energy/pres3b.pdf>. [Acesso em 14 Novembro 2018].
- [16] Mercado Ibérico da Energia Elétrica MIBEL, “Mercado Ibérico da Energia Elétrica – MIBEL,” [Online]. Available: <http://mibel.com/>. [Acesso em 14 Novembro 2018].
- [17] J. G. A. Ribeiro, “Previsão de preços de eletricidade para o mercado MIBEL,” Porto, 2014.

- [18] R. E. N. S.A., “MIBEL,” [Online]. Available: <http://www.mercado.ren.pt/PT/Electr/InfoMercado/InfOp/MercOmel/Paginas/default.aspx>. [Acesso em 16 Novembro 2018].
- [19] OMIP, “Grupo OMI & MIBEL,” [Online]. Available: <https://www.omip.pt/pt-pt/content/grupo-omi-mibel>. [Acesso em 2018 Novembro 16].
- [20] OMIE, “Apresentação do OMIE,” [Online]. Available: <http://www.omie.es/pt/principal/informacao-da-companhia>. [Acesso em 16 Novembro 2018].
- [21] OMIE, “Os Agentes do Mercado,” [Online]. Available: <http://www.omie.es/pt/principal/informacao-de-agentes>. [Acesso em 16 Novembro 2018].
- [22] OMIP, “Tipos de Membros,” [Online]. Available: <https://www.omip.pt/pt-pt/content/tipos-de-membros>. [Acesso em 16 Novembro 2018].
- [23] OMIE, “Os nossos mercados de eletricidade,” [Online]. Available: <http://m.omie.es/pt/principal/mercados-e-produtos/mercado-da-electricidade/os-nossos-mercados-de-eletricidade?m=yes>. [Acesso em 6 Dezembro 2018].
- [24] OMIP, “Modelo de Mercado,” [Online]. Available: <https://www.omip.pt/pt-pt/content/modelo-de-mercado>. [Acesso em 7 Dezembro 2018].
- [25] D. Ilic, P. G. Da Silva, S. Karnouskos e M. Griesemer, “An energy market for trading electricity in smart grid neighbourhoods,” *Research gate*, pp. 1-6, 2012.
- [26] S. Karnouskos, “Demand Side Management via Prosumer Interactions in a Smart City Energy Marketplace,” *IEEE*, pp. 1-7, 2011.
- [27] e-Price, “Price-based Control of Electrical Power Systems,” [Online]. Available: <http://www.e-price-project.eu/website/TLL/eprice.php?OPIId=43>. [Acesso em 4 Julho 2018].

- [28] R. V. Gerwen, “Distributed Generation and Renewables,” em *Power Quality and Utilisation Guide*, Arnhem, KEMA Nederland BV, 2006, pp. 1-10.
- [29] M.-M. F, S.-M. A, R. M e C. Calvillo, “Centralized vs distributed generation. A model to assess the relevance of some thermal and electric factors. Application to the Spanish case study,” *Energy*, n° 134, pp. 850-863, 2017.
- [30] Y. Huang e L. Soder, “Evaluation of economic regulation in distribution systems with distributed generation,” *Energy*, n° 126, pp. 192-201, 2017.
- [31] European Regulators Group for Electricity and Gas (ERGEG), “Treatment of Losses by Network Operators an ERGEG Position Paper for public consultation,” *Leonardo ENERGY*, pp. 1-11, 2009.
- [32] F. Teotia e R. Bhakar, “Local Energy Markets: Concept, Design and Operation,” *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, pp. 1-6, 19 Dezembro 2016.
- [33] D. Holtschulte, A. S. Erlangga, E. Ortjohann, J. Kortenbruck, S. Leksawat, A. Schmelter, T. Premgamone e D. Morton, “Local Energy Markets in Clustering Power System Approach for Smart Prosumers,” *6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, pp. 215-222, 2017.
- [34] L. S, S. A, O. E, H. D, K. J e M. D, “Implementation of Communication Model and Web Services for ClusterBased Power System Operation in Smart Grid,” *Innovative Smart Grid Technologies ASIA '2015*, pp. 1-6, 2015.
- [35] S. Sikdar e K. Rudie, “Microgrid Level Competitive Market Using Dynamic Matching,” *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, pp. 1-6, 21 Agosto 2013.
- [36] G. K. Venayagamoorthy e P. K. Gautam, “Dynamic Energy Management System for a Smart Microgrid,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 27, pp. 1643-1656, 8 Agosto 2016.
- [37] A. Osterwalder, “The Business Model Ontology a Proposition In a Design Science Approach,” Université de Lausanne, Lausanne, 2004.

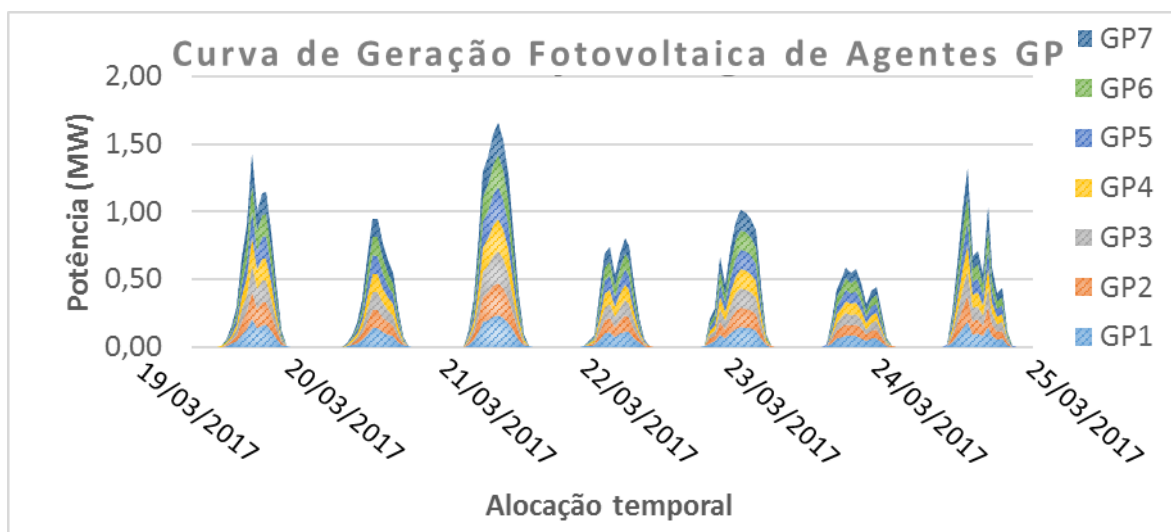
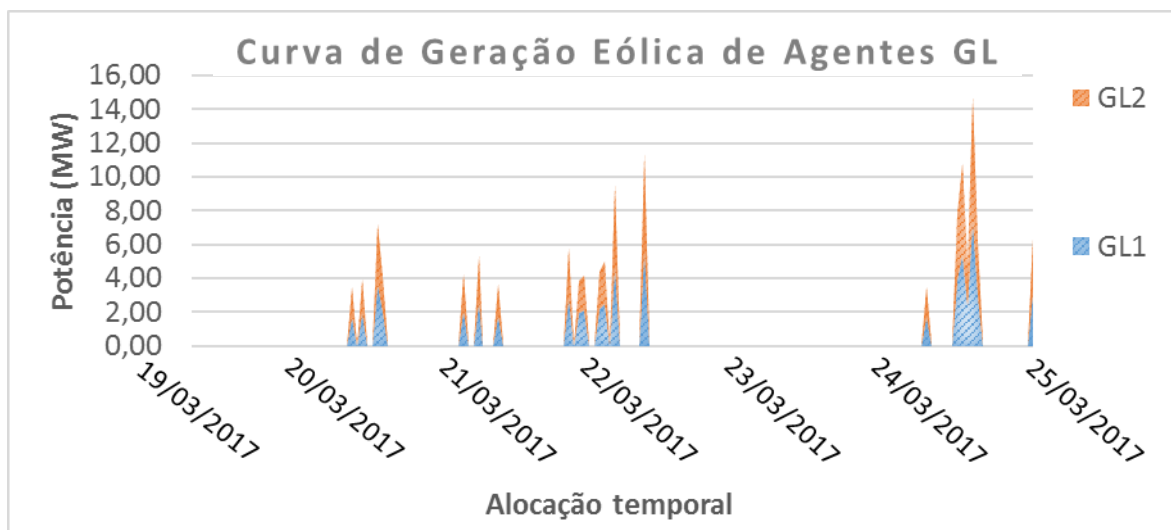
- [38] O. A, “Business Model Alchemist,” [Online]. Available: <http://businessmodelalchemist.com/>. [Acesso em 12 Outubro 2018].
- [39] LGI Consulting, “Energy System Transition Through Stakeholder Activation, Education and Skills Development,” Paris, 2016.
- [40] P. Stähler, “fluidminds,” 2018. [Online]. Available: <http://www.fluidminds.ch/en/what-we-do.htm>. [Acesso em 2018].
- [41] M. Hamwi e I. Lizarralde, “A Review of Business Models towards Service-Oriented Electricity Systems,” *Procedia CIRP*, vol. 64, pp. 109-114, 2017.
- [42] S. Hall e K. Roelich, “Business model innovation in electricity supply markets: The role of complex value in the United Kingdom,” *Energy Policy*, n° 92, pp. 286-298, 2016.
- [43] E. A. Leshik e J. Cralle, *An Introduction to Algorithmic Trading*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [44] B. Teixeira, F. Silva, T. Pinto, I. Praça, G. Santos e Z. Vale, “Data Mining Approach to support the Generation of Realistic Scenarios for Multi-Agent simulation of Electricity Markets,” *Intelligent Agents IEEE Symposium*, pp. 8-15, 2014.
- [45] F. Silva, B. Teixeira, T. Pinto, G. Santos, Z. Vale e I. Praça, “Generation of realistic scenarios for multi-agent simulation of electricity markets,” *Energy*, pp. 128-139, 2016.
- [46] R. S. Michalski, I. Bratko e M. Kubat, *Machine Learning and Data Mining: Methods and Applications*, New York: John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [47] R. R. Rathod e R. D. Garg, “Regional electricity consumption analysis for consumers using data mining techniques and consumer meter reading data,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 368-374, 2016.

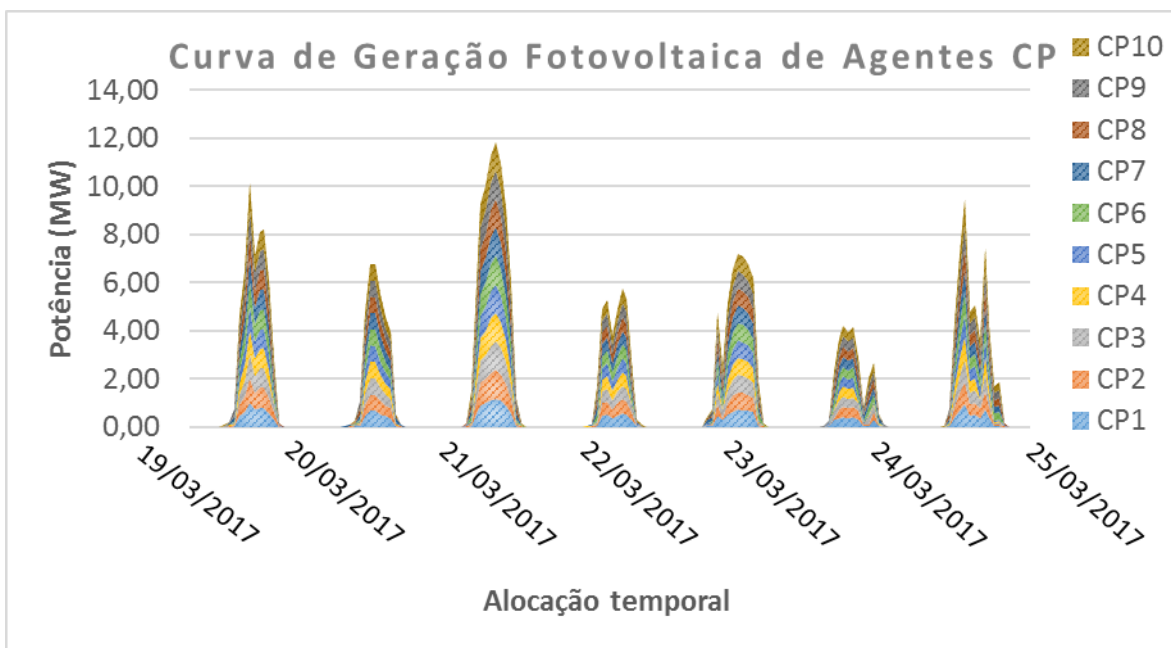
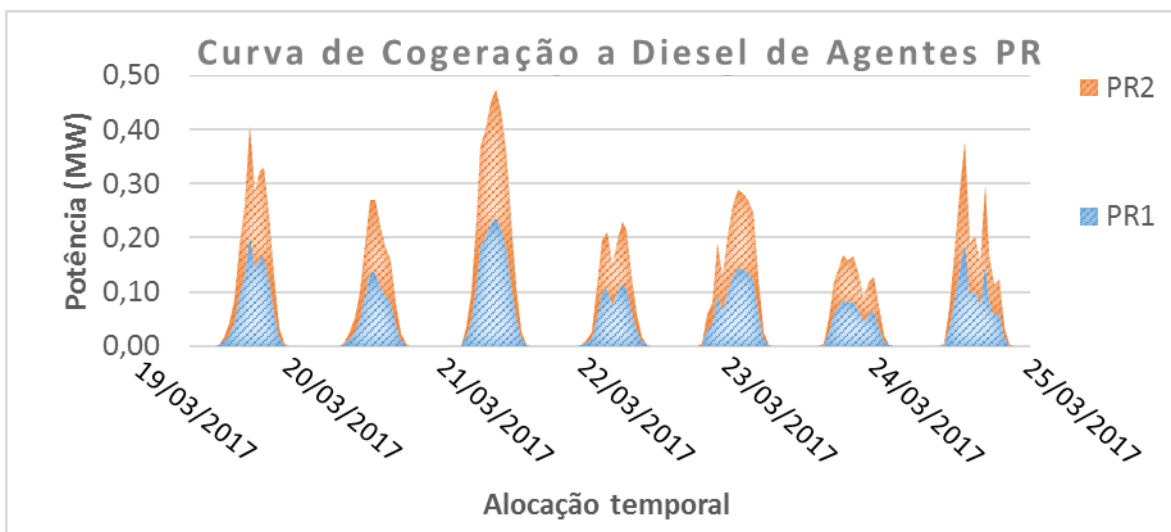
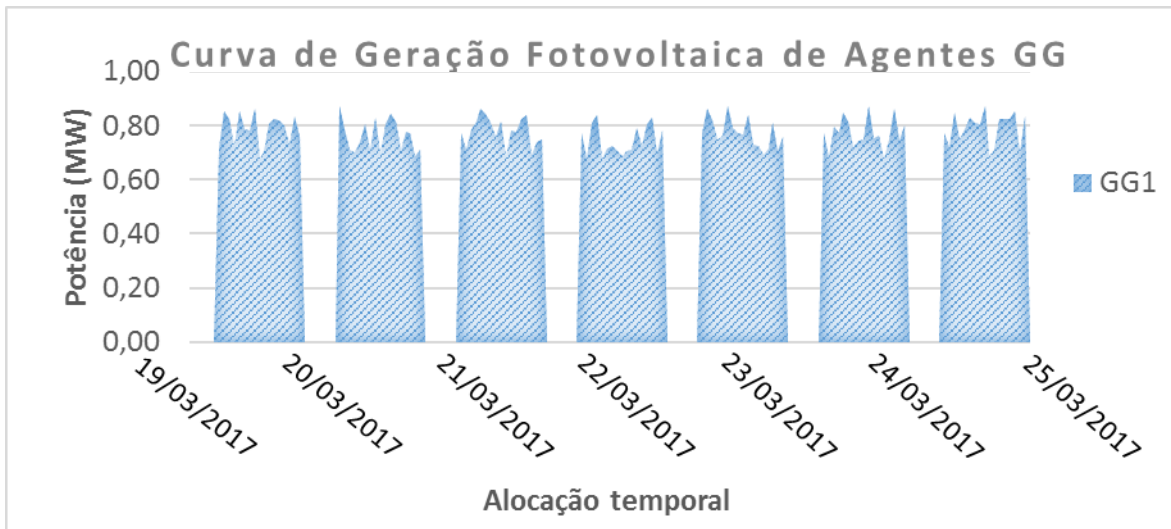
- [48] S. K. Aggarwal, L. M. Saini e A. Kumar, “Electricity price forecasting in deregulated markets: A review and evaluation,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 13-22, 2009.
- [49] C. Alexandre, P. Bocsanean, J. Mangana, J. Santos, D. Monteiro e P. Santos, “Marketing behaviors analysis in a mobile wallet solution using data mining,” *9th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, pp. 88-92, 2017.
- [50] V. Kotu e B. Deshpande, *Predictive Analytics and Data Mining*, Waltham: Elsevier Inc, 2015.
- [51] I. H. Witten e E. Frank, *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*, San Francisco: Elsevier Inc, 2005.
- [52] C. Aggarwal, *Data Mining: The Textbook*, Nova York: Springer International, 2015.
- [53] T. Kohonen, “Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps,” *Biological Cybernetics*, pp. 43, 59-69, 1 Janeiro 1982.
- [54] S. Sharma, J. Agrawal, S. Agarwal e S. Sharma, “Machine Learning Techniques for Data Mining: A Survey,” *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, pp. 1-6, 2013.
- [55] G. K. F. Tso e K. K. W. Yau, “Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks,” *Energy*, pp. 1761-1768, 15 Agosto 2005.
- [56] Koritarov e V. S, “Real-world market representation with agents,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 2, pp. 39 - 46, 2004.
- [57] H. Li e L. Tesfatsion, “Development of open source software for power market research: the AMES test bed,” *Journal of Energy Markets*, vol. 2, pp. 111-128, 2008.

- [58] S. Cincotti e G. Gallo, “The Genoa Artificial Power-Exchange,” *International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, vol. 358, pp. 348-363, 2013.
- [59] G. Migliavacca, “SREMS: a short-medium run electricity market simulator based on game theory and incorporating network constraints,” *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, pp. 813-818, 2007.
- [60] S. A. Harp, S. Brignone, B. F. Wollenberg e S. T., “SEPIA. A simulator for electric power industry agents,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 20, pp. 53-69, 2000.
- [61] Z. Vale, T. Pinto, I. Praça e H. Morais, “MASCEM: Electricity Markets Simulation with Strategic Agents,” *IEEE Intelligent Systems*, pp. 9- 17, 20 Janeiro 2011.
- [62] B. Teixeira, F. Silva, T. Pinto, I. Praça, G. Santos e Z. Vale, “Data Mining Approach to support the Generation of Realistic Scenarios for Multi-Agent simulation of Electricity Markets,” *2014 IEEE Symposium on Intelligent Agents (IA)*, pp. 8-15, 2014.
- [63] T. Pinto, F. Silva, B. Teixeira, G. Santos, Z. Vale e I. Praça, “Generation of realistic scenarios for multi-agent simulation of electricity markets,” *Energy*, vol. 116, pp. 128-139, 2016.
- [64] T. Pinto, G. Santos, I. Praça e Z. Vale, “MASCEM: Optimizing the performance of a multi-agent system,” *Energy*, nº 111, pp. 513-524, 2016.
- [65] B. Canizes, T. Pinto, J. Soares, Z. Vale, P. Chamoso e D. Santos, “Smart City: A GECAD-BISITE Energy Management Case Study,” em *Smart City: A GECAD-BISITE Energy Management Case Study*, Porto, Springer Nature, 2018, p. 92–100.
- [66] Maleitas e P. F. H., “Viabilidade Económica do Autoconsumo de Energia Fotovoltaica no Setor Não Residencial,” Faculdade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.
- [67] R. C. Torres, “Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais,” Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

- [68] C. A. A. Macedo, A. A. Albuquerque e H. F. Moralles, “Análise de viabilidade econômico-financeira de um projeto eólico com simulação Monte Carlo e avaliação de risco,” SciELO, São Carlos, 2017.
- [69] D. Barber, *Bayesian Reasoning and Machine Learning*, Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

Anexo A. Curvas de geração dos agentes do mercado local considerado na simulação





Anexo B. Curvas de demanda dos agentes do mercado local considerado na simulação

