TESE DE DOUTORADO Nº 303

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA BASEADA EM SISTEMA MULTIAGENTE PARA OBTENÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO PARQUE GERADOR DE ELETRICIDADE POR MEIO DOS LEILÕES DE ENERGIA NOVA

Rafaella de Souza Henriques

DATA DA DEFESA: 29/08/2019

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA BASEADA EM SISTEMA MULTIAGENTE PARA OBTENÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DO PARQUE GERADOR DE ELETRICIDADE POR MEIO DOS LEILÕES DE ENERGIA NOVA

Rafaella de Souza Henriques

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Rodney Rezende Saldanha

Belo Horizonte - MG

Agosto de 2019

Henriques, Rafaella de Souza.
H519d Desenvolvimento de uma ferramenta baseada em sistema multiagente para obtenção da configuração do parque gerador de eletricidade por meio dos leilões de energia nova [recurso eletrônico] / Rafaella de Souza Henriques. - 2019.
1 recurso online (xviii, 142 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Rodney Rezende Saldanha.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 117-142.

Bibliografia: f. 111-116.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Geradores hidrelétricos - Teses. I. Saldanha, Rodney Rezende. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

"Desenvolvimento de Uma Ferramenta Baseada Em Sistema Multiagente Para Obtenção da Configuração do Parque Gerador de Eletricidade Por Meio dos Leilões de Energia Nova"

Rafaella de Souza Henriques

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 29 de agosto de 2019.

Por:

Prof. Dr. Rodney Rezende Saldanha
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Lucas de Souza Batista
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Frederico Gadelha Guimarães
DEE (UFMG)

Prof. Ph.D. Petr Iakovlevitch Ekel
PPGEE (UFMG)

Prof. Dr. Marcone Jamilson Freitas Souza
DECOMP (UFOP)

Prof. Dr. Rodrigo Cesar Pedrosa Silva
UFOP

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu marido, Lineker, companheiro fiel nesta árdua caminhada.

Ao Prof. Rodney pela orientação e compreensão nos momentos difíceis.

Aos Prof. Lucas Batista e Frederico Gadelha pelas valiosas contribuições em meu estudo.

Ao Baby, meu cachorro, por ter me acalmado nos momentos difíceis.

Aos meus amigos e colegas de trabalho pelo suporte.

Aos meus amigos e colegas de pós-graduação pelo apoio.

Resumo

O Setor Elétrico Brasileiro possui ferramentas para seu planejamento, como DECOMP e NEWAVE, porém, quanto à execução, ainda há carências a serem sanadas. O leilão, que é o mecanismo de expansão do parque gerador de eletricidade no Brasil, muitas vezes não reflete a real necessidade para o atendimento da demanda com o menor custo possível. Considerando os Leilões de Energia Nova, a antecedência insuficiente de sua realização destaca-se como deficiência, gerando atraso na entrada em operação das usinas geradoras. Ademais, a falta de ferramentas que possibilite analisar quais aspectos impactam na queda do preço pago pela energia nesses leilões também é uma lacuna. Visando auxiliar nessas questões, este estudo propõe uma ferramenta baseada em Sistema Multiagente (SMA) para a obtenção da composição dos Leilões de Energia Nova que assegure a configuração desejada do parque gerador de eletricidade, bem como para ajudar na definição dos aspectos que influenciam o preço pago pela energia nos Leilões de Energia Nova. Portanto, é apresentado um modelo com agentes que representam o Ministério de Minas e Energia (MME), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e os concorrentes dos Leilões de Energia Nova. Este modelo é composto por um subsistema de cooperação, que engloba um modelo Multiobjetivo Linear Inteiro Misto (MOLIM) para o planejamento dos leilões, e um subsistema de competição, que abrange a simulação dos leilões dos produtos de energia, considerando sua atual sistemática. Além do modelo baseado em SMA proposto, este estudo esforça-se em utilizar dados reais do Setor Elétrico Brasileiro como entradas, com o objetivo de fornecer uma ferramenta de apoio à decisão para planejamento e execução dos Leilões de Energia Nova.

Palavras-chave: Setor Elétrico Brasileiro; Leilão de Energia Nova; Sistema Multiagente.

Abstract

The Brazilian Electricity Sector has tools for its planning, such as DECOMP and NEWAVE, but in terms of execution, there are issues to be addressed. The auction which is the mechanism of expansion of the power generation park in Brazil, often do not reflect the real requirement to meet the demand with the lowest possible cost. Considering the New Energy Auctions, the insufficient advance of their realization is highlighted as deficiency, generating delays in the operation beginning of the generating plants. In addition, the lack of tools to analyze which aspects impact the fall in the price paid for energy in these auctions is also a shortcoming. In order to assist in these issues, this study proposes a tool based on Multiagent System (MAS) to obtain the composition of the New Energy Auctions which ensures the desired configuration of the power generating park, as well as to help in defining the aspects that influence the price paid for energy in the New Energy Auctions. Therefore, it is presented a model with agents who represent the Ministry of Mines and Energy (MME), the National Electric Energy Agency (NEEA), the Electric Energy Trading Chamber (EETC) and the competitors of the New Energy Auctions. This model is composed of a cooperation subsystem, which includes a Multiobjective Mixed Integer Linear (MMIL) model for auction planning, and a competition subsystem, which covers the simulation of the energy product auctions, considering their current systematic. Besides the proposed MAS based model, this study endeavors to use real data from the Brazilian Electricity Sector as input, with the aim of providing a decision support tool for planning and executing of the New Energy Auctions.

Keywords: Brazilian Electricity Sector; New Energy Auction; Multiagent System.

Sumário

Lista de Figuras xiii

Lista de Tabelas xvii

Lista de Abreviaturas e Siglas xviii

1 Introdução 1

1.1 Objetivo 3

1.1.1 Objetivo Geral 3

1.1.2 Objetivos Específicos 3

1.2 Justificativa, Relevância e Contribuições do Estudo 4

1.3 Revisão da Literatura 7

1.4 Organização do Trabalho 9

2 Referencial Teórico 10

2.1 Agentes do Setor Elétrico Brasileiro 10

2.2 Leilões de Energia 12

2.2.1 Sistemática dos Leilões de Energia Nova 17

2.3 Sistema Multiagente 22

2.3.1 Cooperação 25

2.3.2 Competição 28

2.3.3 Aprendizagem 32

2.4 Problemas de Otimização Multiobjetivo 33

2.4.1 Método da Soma Ponderada 35

2.4.2 Épsilon Restrito 36

3 Metodologia 38
3.1 Caracterização do Objeto de Estudo 39
3.2 Modelagem do Sistema 43
3.2.1 Agente 1 45
3.2.2 Agente 2 51
3.2.3 Agente de 3 a N 54
3.3 Verificação do Modelo 56
3.4 Obtenção e Tratamento de Dados 58
3.4.1 Tipos de Leilões 58
3.4.2 Configuração do Parque Gerador de Eletricidade 58
3.4.3 Tempo de Construção do Empreendimento 60
3.4.4 Risco de Construção do Empreendimento 61
3.4.5 Limites de Capacidade Instalada da Usina 62
3.4.6 Parâmetros do Leilão 62

4 Resultados 64
4.1 Subsistema de Cooperação 64
4.1.1 Verificação do Modelo MOLIM 64
4.1.2 Valores dos Parâmetros para o Estudo de Caso 66
4.1.3 Soluções do Modelo MOLIM 68
4.2 Subsistema de Competição 72
4.2.1 Verificação da Implementação do Leilão 72
4.2.2 Simulações 79
4.2.3 Análise das Simulações 96
4.2.4 Análise de Sensibilidade 103

5 Considerações Finais 108

Referências 111

Apêndice A – Entradas da Verificação 117
A.1 Entradas de Verificação para o Subsistema de Cooperação 118

A.2 Entradas de Verificação para o Subsistema de Competição 119

APÊNDICE B – RESULTADOS DO SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO . 120

B.1 Diversas Estratégias 121

B.2 Agentes Simétricos 122

B.3 Agentes Assimétricos 125

B.3.1 Estratégias Puras 125

B.3.2 Estratégias Puras *versus* Agentes Inteligentes 128

APÊNDICE C – TESTE ESTATÍSTICO 132

C.1 Entradas do Teste Kruskal Wallis 133

C.2 Saídas do Teste Kruskal Wallis 135

APÊNDICE D – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 137

D.1 Entradas da Análise de Sensibilidade 138

ANEXO A – LEILÕES 141

A.1 Resultado do 23º Leilão de Energia Nova 142

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Agentes do Setor Elétrico Brasileiro 12
FIGURA 2.2 – Sistemática dos Leilões de Energia Nova 19
FIGURA 2.3 – Uma taxonomia para coordenação em SMA 25

FIGURA 3.1 – Etapas do estudo 38
FIGURA 3.2 – Governaça nos leilões de energia 39
FIGURA 3.3 – Arquitetura do sistema proposto 44
FIGURA 3.4 – Estrutura do agente 1 46
FIGURA 3.5 – Valores de pesos utilizados na abordagem iterativa do MSP 50
FIGURA 3.6 – Estrutura do agente 2 51
FIGURA 3.7 – Estrutura do agente 3 a N 55

FIGURA 4.1 – Evolução do preço corrente para um vencedor 73
FIGURA 4.2 – Evolução do preço médio para um vencedor 73
FIGURA 4.3 – Evolução dos lances dos agentes 74
FIGURA 4.4 – Aprendizagem do agente 6 74
FIGURA 4.5 – Resultados do teste de verificação com quatro simulações para um vencedor 75
FIGURA 4.6 – Evolução do preço corrente para três vencedores 76
FIGURA 4.7 – Evolução do preço médio para três vencedores 77
FIGURA 4.8 – Evolução dos lances dos agentes 77
FIGURA 4.9 – Aprendizagem do agente 9 78
FIGURA 4.10 –Aprendizagem do agente 10 78

FIGURA 4.11 –Resultados do teste de verificação com quatro simulações para um vencedor 79

FIGURA 4.12 –Lances dos agentes para a estratégia 1 para o produto Hídrica-A . . 86

FIGURA 4.13 –Lances dos agentes para a estratégia 2 para o produto Eólica 87

FIGURA 4.14 –Lances dos agentes para a estratégia 3 para o produto Biomassa . . 88

FIGURA 4.15 –Lances dos agentes inteligentes para o produto Eólica 89

FIGURA 4.16 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes para o produto Hídrica-A 95

FIGURA 4.17 –Diagrama de caixa entalhado para o número de vitórias dos agentes considerando trinta testes de estratégias diversas para o produto Hídrica-A 98

FIGURA 4.18 –Diagrama de caixa entalhado para o número de vitórias dos agentes considerando trinta testes de estratégias diversas para o produto Eólica 99

FIGURA 4.19 –Diagrama de caixa entalhado para o número de vitórias dos agentes considerando trinta testes de estratégias diversas para o produto Biomassa 100

FIGURA B.1 –Resultados do teste com diversidade de estratégias para o produto Hídrica-A 121

FIGURA B.2 –Resultados do teste com diversidade de estratégias para o produto Eólica 121

FIGURA B.3 –Resultados do teste com diversidade de estratégias para o produto Biomassa 121

FIGURA B.4 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 1 para o produto Hídrica-A 122

FIGURA B.5 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 2 para o produto Hídrica-A 122

FIGURA B.6 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 3 para o produto Hídrica-A 122

FIGURA B.7 –Resultados do teste de agentes inteligentes para o produto Hídrica-A 122

FIGURA B.8 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 1 para o produto Eólica 123

FIGURA B.9 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 2 para o produto Eólica 123

FIGURA B.10 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 3 para o produto Eólica 123

FIGURA B.11 –Resultados do teste de agentes inteligentes para o produto Eólica . . 124

FIGURA B.12 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 1 para o produto Biomassa 124

FIGURA B.13 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 2 para o produto Biomassa 124

FIGURA B.14 –Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 3 para o produto Biomassa 125

FIGURA B.15 –Resultados do teste de agentes inteligentes para o produto Biomassa 125

FIGURA B.16 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 2 para o produto Hídrica-A 125

FIGURA B.17 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 3 para o produto Hídrica-A 126

FIGURA B.18 –Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* Estratégia 3 para o produto Hídrica-A 126

FIGURA B.19 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 2 para o produto Eólica 126

FIGURA B.20 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 3 para o produto Eólica 127

FIGURA B.21 –Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* Estratégia 3 para o produto Eólica 127

FIGURA B.22 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 2 para o produto Biomassa 127

FIGURA B.23 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 3 para o produto Biomassa 128

FIGURA B.24 –Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* Estratégia 3 para o produto Biomassa 128

FIGURA B.25 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes para o produto Hídrica-A 128

FIGURA B.26 –Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes para o produto Hídrica-A 129

FIGURA B.27 –Resultados do teste de Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes para o produto Hídrica-A 129

FIGURA B.28 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes para o produto Eólica 129

FIGURA B.29 –Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes para o produto Eólica 130

FIGURA B.30 –Resultados do teste de Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes para o produto Eólica 130

FIGURA B.31 –Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes para o produto Biomassa 130

FIGURA B.32 –Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes para o produto Biomassa 131

FIGURA B.33 –Resultados do teste de Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes para o produto Biomassa 131

FIGURA C.1 –Saídas do teste Kruskall Wallis com diversidade de estratégias para o produto Hídrica-A 135

FIGURA C.2 –Saídas do teste Kruskall Wallis com diversidade de estratégias para o produto Eólica 136

FIGURA C.3 –Saídas do teste Kruskall Wallis com diversidade de estratégias para o produto Biomassa 136

FIGURA A.1 –Resultado do 23º Leilão de Energia 142

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 – Leilões de Energia Nova já realizados pela CCEE 41
TABELA 3.2 – Leilões de Energia Nova já realizados pela CCEE 42
TABELA 3.3 – Matriz de recompensas para os agentes de 3 a N 56
TABELA 3.4 – Projeção de capacidade instalada em MWh definida pela EPE . . . 59
TABELA 3.5 – Tempo médio de construção das usinas 60
TABELA 3.6 – Atraso de entrega de empreendimentos de geração de energia no Brasil 61

TABELA 4.1 – Valores das funções objetivo para as quatro soluções encontradas . . 64
TABELA 4.2 – Valores da alocação dos componentes do parque gerador nos leilões (x_{ijk}) 65
TABELA 4.3 – Valores da quantidade de usinas (n_{ik}) 65
TABELA 4.4 – Capacidade média das usinas alocadas 65
TABELA 4.5 – As demandas de capacidade instalada em kW (D_{ik}) 66
TABELA 4.6 – Tempo de implementação dos produtos (V_i) 66
TABELA 4.7 – Valores de tempo disponibilizado pelo leilão tipo j (H_j) 67
TABELA 4.8 – Valores de tempo restante até o ano k (T_k) 67
TABELA 4.9 – Valores para o risco (R_{ij}) 67
TABELA 4.10 –Valores para limites mínimo (L_i^{min}) e máximo (L_i^{max}) de capacidade 68
TABELA 4.11 –Valores das funções objetivo para as três soluções mais bem classificadas 69
TABELA 4.12 –Solução não dominada 70
TABELA 4.13 –Solução dominada 1 70
TABELA 4.14 –quarta solução 71

TABELA 4.15 –Quarta solução - 3º lugar no AHP, 3º lugar no PROMETHEE II e 1º lugar no ELECTRE III 71

TABELA 4.16 –Valores dos parâmetros do subsistema de competição com um ganhador para produto Hídrica-A 80

TABELA 4.17 –Valores dos parâmetros do subsistema de competição com três ganhadores para produto Eólica 81

TABELA 4.18 –Valores dos parâmetros do subsistema de competição com três ganhadores para produto Biomassa 81

TABELA 4.19 –Resultados de vencedores do teste com diversidade de estratégias para o produto Hídrica-A com mil simulações 82

TABELA 4.20 –Resultados de vencedores do teste com diversidade de estratégias para o produto Eólica com mil simulações 83

TABELA 4.21 –Resultados de vencedores do teste com diversidade de estratégias para o produto Biomassa com mil simulações 83

TABELA 4.22 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias simétricas para o produto Hídrica-A com mil simulações 84

TABELA 4.23 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias simétricas para o produto Eólica com mil simulações 84

TABELA 4.24 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias simétricas para o produto Biomassa com mil simulações 85

TABELA 4.25 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras assimétricas para o produto Hídrica-A com mil simulações 90

TABELA 4.26 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras assimétricas para o produto Eólica com mil simulações 91

TABELA 4.27 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras assimétricas para o produto Biomassa com mil simulações 92

TABELA 4.28 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras e agentes inteligentes para o produto Hídrica-A com mil simulações 93

TABELA 4.29 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras e agentes inteligentes para o produto Eólica com mil simulações 94

TABELA 4.30 –Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras e agentes inteligentes para o produto Biomassa com mil simulações 95

TABELA 4.31 –Lucro por MWh dos vencedores para cada teste e produto 96

TABELA 4.32 –Resultados de valores-p para os testes *post-hoc* de comparação par a par de Conover e de Dunn do produto Hídrica-A 98

TABELA 4.33 –Resultados de valores-p para os testes *post-hoc* de comparação par a par de Conover e de Dunn para o produto Eólica 100

TABELA 4.34 –Resultados de valores-p para os testes de comparação par a par de Conover e de Dunn para o produto Biomassa 101

TABELA 4.35 –Resumo dos resultados obtidos para o produto Hídrica-A com um vencedor 102

TABELA 4.36 –Resumo dos resultados obtidos para o produto Eólica com três vencedores 102

TABELA 4.37 –Resumo dos resultados obtidos para o produto Biomassa com três vencedores 103

TABELA 4.38 –Resultados da análise de sensibilidade para o produto Hídrica-A . . 105

TABELA 4.39 –Resultados da análise de sensibilidade para o produto Eólica 106

TABELA 4.40 –Resultados da análise de sensibilidade para o produto Biomassa . . 107

TABELA 4.41 –Resultados para a análise de sensibilidade considerando a variação conjunta dos parâmetros 107

TABELA A.1 –Valores para a demanda de capacidade instalada D_{ik} 118

TABELA A.2 –Valores para limites mínimo (L_i^{min}) e máximo (L_i^{max}) de capacidade e tempo de implementação (V_i) 118

TABELA A.3 –Valores de tempo restante até o ano k (T_k) 118

TABELA A.4 –Valores de tempo disponibilizado pelo leilão tipo j (H_j) 118

TABELA A.5 –Valores para o risco (R_{ij}) 118

TABELA A.6 –Valores dos parâmetros da verificação do subsistema de competição com um ganhador 119

TABELA A.7 –Valores dos parâmetros da verificação do subsistema de competição com três ganhadores 119

TABELA C.1 –Dados de entrada do produto Hídrica-A para o teste Kruskall Wallis, Dunn e Canover 133

TABELA C.2 –Dados de entrada do produto Eólica para o teste Kruskall Wallis, Dunn e Canover 134

TABELA C.3 –Dados de entrada do produto Biomassa para o teste Kruskall Wallis, Dunn e Canover 135

TABELA D.1 –Valores de parãmetros da análise de sensibilidade para o produto Hídrica-A 138

TABELA D.2 –Valores de parãmetros da análise de sensibilidade para o produto Eólica 139

TABELA D.3 –Valores de parãmetros da análise de sensibilidade para o produto Biomassa 140

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEAR	Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
EIA	Estudos de Impacto Ambiental
ELECTRE	Elimination et Choix Traduisant la Realité
EOL	Centrais Geradoras Eólicas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCF	Função de Custo Futura
LEN	Leilão de Energia Nova
MME	Ministério de Minas e Energia
MOLIM	Multiobjetivo Linear Inteira Misto
MSP	Método da Soma Ponderada
MTDM	Métodos de Tomada de Decisão Multicritério
ONS	Operador Nacional do Sistema
OPL	Optimization Programming Language
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMA	Sistema Multiagente
UFV	Centrais Geradoras Solares Fotovoltaicas
UHE	Usinas Hidrelétricas
UTE	Usinas Termelétricas
UTN	Usinas Termonucleares

1 Introdução

No ano de 2018, o Brasil foi o oitavo produtor mundial de energia elétrica, com quase 596 TWh (ENERDATA, 2019). Segundo (ANEEL, 2019), em termos de empreendimentos em operação, as usinas hidrelétricas ainda constituem a principal fonte de energia elétrica no país, com 217 empreendimentos que representam 60,25% da potência instalada. As Usinas Termelétricas (UTE), por sua vez, perfazem 24,60% da potência instalada, distribuída entre 3017 empreendimentos. Além das hidrelétricas e termelétricas, também fazem parte da matriz elétrica as Centrais Geradoras Eólicas (EOL), com 9,09%, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), com 3,15% da potência instalada, as Centrais Geradoras Solares Fotovoltaicas (UFV) com 1,27%, as Usinas Termonucleares (UTN), representando 1,20%,e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), totalizando 0,43%.

O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) é formado por um órgão regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), um Operador Nacional do Sistema (ONS) e um conjunto de agentes institucionais, que possibilitam as transações de compra e venda de energia elétrica, bem como a realização de estudos desta área (MARTINS, 2008). O ONS dispõe de modelos computacionais que realizam a otimização da operação em médio e curto prazo, e que também atuam na programação diária, sendo eles o NEWAVE, o DECOMP e o DESSEM (SILVA, 2008).

No médio prazo, considerando um horizonte de até cinco anos, utiliza-se o modelo NEWAVE. Nele são considerados intervalos mensais, nos quais o objetivo é definir a proporção ótima de geração hidráulica, térmica e intercâmbio entre submercados, baseando-se em Programação Dinâmica Dual Estocástica, segundo o manual do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL, 2013b). Seu objetivo é calcular a política de operação considerando a estimativa dos valores da água armazenada nos reservatórios e a tendência hidrológica. Assim ele permite definir mensalmente metas de geração para cada usina pertencente ao sistema, visando atender à demanda e minimizar o valor esperado do custo de operação ao longo do horizonte de planejamento. Esse custo de operação, denominado de Função de Custo Futura (FCF), é composto pelo custo variável de combustível das usinas termelétricas e pelo custo associado a eventuais déficits no suprimento de energia, representado por uma função de penalização (ELETROBRAS, 2018).

No curto prazo, considerando um horizonte de tempo de até doze meses, utiliza-se o modelo DECOMP, o qual representa o primeiro mês com base semanal. Ele é um modelo linear de grande porte, multiperíodo e estocástico. O objetivo deste planejamento ótimo consiste na determinação do despacho de geração das usinas hidráulicas e térmicas, visando minimizar custo de operação ao longo do período de planejamento. Este custo é composto pelos gastos com combustível nas usinas térmicas somados às eventuais penalidades associadas ao não atendimento da carga (CEPEL, 2013a). Esse modelo utiliza a resposta da FCF do NEWAVE como um dado de entrada.

Já na programação diária, com horizonte de até duas semanas, utiliza-se o modelo DESSEM. Nele, o tempo é dividido em intervalos de meia hora, nos quais as vazões são consideradas determinísticas, a rede de transmissão é detalhada e são colocadas diversas restrições de operação (SILVA, 2008).

O marco regulatório introduzido pela Lei nº 10.848, de 2004, regimenta a expansão e a comercialização de energia elétrica para consumidores regulados por meio de um conjunto de leilões (MARTINS, 2008). O governo federal coordena a expansão do parque gerador utilizando estes leilões de energia e de transmissão, ao fechar contratos com empreendedores que realizam investimentos em novas instalações.

Por meio desse mecanismo, concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) garantem o atendimento à totalidade de seu mercado no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Quem realiza os leilões de energia elétrica é a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), por delegação da ANEEL. Segundo Hochstetler (2013) e IAB (2012), os leilões necessitam de alguns aperfeiçoamentos para alcançar a configuração desejada do parque gerador. Dentre os pontos discutidos pelos autores, ressaltam-se:

- A desconsideração da localização das usinas, o que implica em custos adicionais na ampliação da Rede Básica de Transmissão para escoar a energia entre subsistemas ou na geração de energia de usinas mais caras para contornar as restrições de transmissão. Além disso, tal fato tem ocasionado desequilíbrios estruturais de oferta e demanda em determinadas regiões;

- A falta de análise da complementaridade entre diferentes usinas geradoras de energia, o que pode acarretar na sub ou sobre contratação de um determinado tipo de usina;

- A valoração apenas da garantia física de energia agregada ao sistema. Visto que o sistema demanda uma potência instalada superior à energia média consumida para atender à modulação diária e sazonal da carga. Além disso, os leilões não consideram a flexibilidade operacional das usinas para atender a modulação da carga. Dessa forma, os leilões resultam numa expansão do parque gerador inadequada para o

pleno atendimento da mesma;

- A antecedência insuficiente, pois o atraso médio das usinas que não entraram em operação comercial na data prevista é superior a um ano. Outro fato relevante é que, na prática, o governo tem comprimido os prazos para a instalação das usinas com cronogramas muito inferiores aos previstos. Os leilões A-5, por exemplo, têm seus certames geralmente realizados nos últimos meses do ano, enquanto a data de início de suprimento geralmente é 1º de janeiro do ano A, resultando numa antecipação média de apenas 4,1 anos;

- Os preços máximos muito baixos, que criam desinteresse dos proponentes do leilão, ameaçando a concorrência ou mesmo inviabilizando sua realização. As autoridades devem levar em conta o risco e o custo de impor preços máximos muitos restritivos, já que a pressão concorrencial se mostra eficaz para disciplinar o preço.

Considerando toda a complexidade do Sistema Elétrico Brasileiro e as deficiências na gestão da expansão de geração de energia, ferramentas que auxiliem nesses pontos de melhoria dos leilões de energia são essenciais para a garantia da formação do parque gerador de eletricidade brasileiro desejado.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral desenvolver uma ferramenta baseada em Sistema Multiagente (SMA) que garanta o alcance da configuração desejada do parque gerador de eletricidade por meio dos Leilões de Energia Nova, considerando sua atual sistemática.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral deste estudo, considera-se:

- Alocar os componentes do parque gerador (quantidade de capacidade instalada, fonte de geração e data de início de operação) nos tipos de leilões, de forma a minimizar os riscos de atrasos e obedecer aspectos práticos como o tamanho das usinas e o tempo necessário para sua implementação;

- Simular os Leilões de Energia Nova para identificar os aspectos que influenciam no sucesso dos concorrentes e na redução do preço pago pela energia dos mesmos;

- Coletar dados reais do Setor Elétrico Brasileiro a fim de aproximar o estudo da realidade. Busca-se dados relativos aos Leilões de Energia Nova, a projeções de capacidade instalada e às usinas geradoras de energia elétrica no Brasil, assim como seus tempos de implementação, atrasos e capacidade instalada.

1.2 Justificativa, Relevância e Contribuições do Estudo

Segundo Walter (2006), o argumento mais forte para justificar a utilização de um Sistema Multiagente no mercado de energia elétrica é que este se configura em um sistema complexo composto de vários agentes econômicos interagindo e guiando suas ações para alcançarem um objetivo comum ou um interesse próprio. Assim, como o problema apresenta uma natureza distribuída, modelá-lo como um Sistema Multiagente se torna natural.

A aplicação da tecnologia de agentes é justificada quando o problema abordado possui as seguintes características (JENNINGS, 1996):

- Domínio envolve uma distribuição dos dados, das capacidades de resolução de problemas e de responsabilidades;
- Necessidade de manter a autonomia de subpartes, sem a perda da estrutura organizacional;
- Complexidade nas interações, incluindo negociação, compartilhamento de informação e coordenação;
- Impossibilidade de descrição da solução do problema *a priori*, devido à possibilidade de perturbações em tempo real no ambiente, *e.g.* falhas de equipamento, e processos de negócio de natureza dinâmica.

Para a alteração da configuração de um parque gerador de eletricidade por meio de implementação de novas usinas geradoras utilizando-se de Leilões de Energia Nova, é necessário a tomada de decisão em diversos níveis e organizações de forma autônoma. Neste contexto, é imprescindível a interação de diversos agentes do mercado de energia com autonomia de decisão e, algumas vezes, com objetivos conflitantes. Portanto, este é um ambiente com natureza distribuída onde não é possível delinear de antemão o resultado final de suas interações devido a sua complexidade e natureza dinâmica. Dessa forma, a utilização de uma abordagem de Sistema Multiagente se mostra oportuna.

Para exemplificar o contexto descrito no parágrafo anterior, pode-se evidenciar o processo decisório envolvido na adição de um novo componente do parque gerador de eletricidade no Brasil. O Ministério de Minas e Energia (MME) é responsável por decidir a política energética do país, apoiado de órgãos políticos e agentes institucionais. Dessa forma, o MME é responsável por definir como se dará a expansão do parque gerador de eletricidade, repassando suas diretrizes à ANEEL. De forma coerente com as decisões anteriores, a ANEEL estabelece o edital para a realização do(s) Leilão(ões) de Energia Nova que comercializará(ão) o(s) produto(s) de energia. A partir desse momento, a CCEE e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) elaboram as demais documentações desse(es) leilão(ões).

Aqueles que são detentores de empreendimentos e têm interesse de comercializar sua energia frente aos produtos estabelecidos em edital, caso forem homologados pela EPE se tornam participantes do Leilão de Energia Nova. A execução desse leilão é de responsabilidade da CCEE e deve ser realizada em um sistema eletrônico. Durante o leilão, esses participantes realizam seus lances de lotes de energia e/ou preço por meio desse sistema. Neste ponto, há objetivos conflitantes, pois os participantes desejam o maior valor pago pela energia que gerarão, e a CCEE deseja minimizar este preço. Ao final, todos devem chegar a uma solução para todo o sistema por meio de negociação. Portanto, a aplicação e modelagem deste contexto utilizando a tecnologia de agentes se mostra adequada e se justifica.

Segundo Juchem e Bastos (2001), os pesquisadores têm buscado métodos de resolução baseados em arquiteturas distribuídas para problemas com sistemas de grande complexidade e com a necessidade de tratamento de grandes massas de dados. Isso deve-se a diversas tentativas de aplicação de um modelo monolítico para a resolução de problemas em uma realidade distribuída, na qual os eventos ocorrem concorrentemente, resultando em um algoritmo não-computável devido ao tamanho e à complexidade do problema. Dessa maneira, como o problema em questão possui uma grande quantidade de interações de diferentes entes sem que haja a perda de autonomia de cada parte, em um ambiente dinâmico em que muitas vezes a informação é imperfeita e incompleta para os participantes, abordagens distribuídas se mostram mais adequadas.

O Setor Elétrico Brasileiro possui ferramentas potentes para seu planejamento, porém, quanto à execução, ainda há carências a serem sanadas, conforme já abordado (HOCHSTETLER, 2013; IAB, 2012). Os leilões, que são o mecanismo de expansão do parque gerador de eletricidade, muitas vezes não refletem a real necessidade para atendimento da demanda com o menor custo possível, fato relacionado com a falta de ferramentas oficiais para tal fim. Dessa forma, trabalhar com uma ferramenta apropriada nesse ponto pode representar grandes ganhos para o setor.

Uma boa gestão da geração da energia elétrica é ponto crucial na garantia e confi-

abilidade do atendimento da demanda brasileira. A energia elétrica é insumo essencial em indústrias, comércios e residências. Assim, sua falta e/ou seu alto custo representam perdas econômicas e sociais significativas, gerando insatisfação dos consumidores. Dessa forma, esse trabalho pode contribuir para alguns dos problemas dos leilões de energia listados por Hochstetler (2013) e IAB (2012), como:

- A antecedência insuficiente dos leilões: a ferramenta permitirá a alocação dos componentes do parque gerador de eletricidade no leilão adequado, respeitando seu prazo de construção e implementação para o começo de sua operação. Além disso, a ferramenta minimiza os riscos associados ao atraso na entrada em operação do empreendimento;

- Inadequação dos valores dos parâmetros do leilão, como os preços iniciais muito baixos: outro aspecto abordado neste estudo é a simulação dos Leilões de Energia Nova, considerando sua atual sistemática, que permite analisar quais aspectos interferem na queda de preço pago pela energia ao final do leilão, quando comparado ao preço inicial. Tal abordagem permite que os órgãos responsáveis possam definir parâmetros dos leilões de forma mais consistente, objetivando baixar os preços que os distribuidores pagam pela energia dos geradores e, consequentemente, aumentando as chances que essa redução seja repassada para os consumidores finais.

Consideradas as justificativas e a relevância deste estudo, é possível ver que a utilização da abordagem Multiagente pode permitir uma modelagem adequada das interações e negociações existentes na venda de energia nova para a formação do parque gerador elétrico. Esta abordagem permite a simulação do sistema considerando diferentes aspectos, sem uma determinação única do perfil de componentes, nem objetivos únicos para todo sistema, como é frequentemente realizado na programação matemática.

É importante ressaltar que a utilização da abordagem de tecnologia de agentes é um campo de pesquisa mais recente quando comparado às demais áreas da otimização, o que abre caminho para geração de conhecimento novo. Ainda, os estudos analisados sobre aplicação de Sistema Multiagente em leilões de energia não seguem a sistemática para Leilão de Energia Nova estabelecida pela CCEE, bem como não consideram alocar os empreendimentos e produtos de energia nos leilões de forma a minimizar o risco de atraso dos mesmos. Assim, as contribuições deste estudo consistem:

- Na utilização da abordagem de Sistema Multiagente em Leilões de Energia Nova para prover uma ferramenta de apoio à decisão, considerando todas as suas especificações, iniciando no planejamento e terminando com a comercialização dos produtos de energia;

- Na utilização de um estudo de caso com dados reais, retratando de forma mais fidedigna a prática;
- Na criação de um modelo matemático específico para o planejamento dos componentes do parque gerador de eletricidade nas diferentes modalidades de leilões;
- Na criação de uma ferramenta computacional que permite a simulação da comercialização dos produtos de energia.

1.3 Revisão da Literatura

Em Walter (2006) é proposta uma abordagem evolutiva para o projeto de estratégias de interação em Sistema Multiagente. Neste estudo, a aplicação desta nova abordagem foi realizada no mercado de energia elétrica, permitindo a simulação deste mercado por meio da evolução de estratégias de oferta em leilões de energia. O modelo baseado no uso de lógica *fuzzy* e algoritmos genéticos foi aplicado a um leilão de preço uniforme considerando modalidade de preço único e de múltiplos lances. Os resultados indicaram que não houve ganhos econômicos significativos com a aplicação do modelo do ponto de vista do agente gerador.

Já Pessanha (2007) utilizou-se de um modelo combinado de otimização e simulação. Nesse trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta para a definição dos montantes ótimos de energia a serem adquiridos por uma distribuidora em um leilão específico. O modelo possui como objetivo a minimização das perdas por sub ou sobre contratação de energia. Um outro estudo semelhante a este é o de Guarnier (2014), no qual é proposta uma ferramenta baseada em simulação para avaliar estratégias de participação de leilões de energia existente para geradores. O modelo proposto considera uma estrutura hierárquica dos critérios utilizados na determinação da aversão ao risco do agente de geração de energia.

No trabalho de Pinto *et al.* (2014) uma ferramenta inteligente é apresentada para suporte à tomada de decisão nos leilões de energia elétrica do ponto de vista de agentes geradores participantes. Utilizando-se de técnicas inteligentes baseada em *Particle Swarm Optimization* (*PSO*) ele resolve o problema de otimização formulado, de forma a maximizar os ganhos do agente, respeitando as restrições de mercado. A abordagem proposta realiza simultaneamente a maximização da receita esperada e a minimização do risco de contrato. O modelo em questão foi desenvolvido para o cenário brasileiro e foi aplicado a um estudo de caso tendo como agente gerador a Usina Hidrelétrica de Três Marias, localizada em Minas Gerais. Os resultados do estudo de caso indicaram que a inclusão do objetivo relacionado ao risco do contrato influencia fortemente na tomada de decisão dos agentes.

No trabalho de Lazo *et al.* (2012) é apresentada uma nova abordagem de um modelo inteligente de otimização sob incerteza para determinar a contratação de energia elétrica no curto prazo (referente aos leilões A-1 e de Ajuste) para distribuidoras de energia elétrica. A contratação ótima é calculada considerando vários cenários de consumo, obtidos a partir de uma simulação Monte Carlo, para um período de cinco anos de análise. As decisões de contratação do modelo são tomadas nos dois primeiros anos desse período. O modelo foi aplicado em um estudo de caso e os resultados foram comparados aos dados reais de um leilão ocorrido.

Em Santos (2012) foi proposta uma ferramenta para auxiliar os agentes geradores. Ela utiliza técnicas inteligentes de otimização para a formação de uma curva de oferta para os Leilões de Energia Existente. Nesta curva há o estabelecimento da relação entre a quantidade de energia ótima de acordo com os diferentes preços de oferta. O modelo em questão possui dois objetivos minimizar o risco relacionado a incerteza no montante de energia produzida e maximizar o retorno financeiro para o agente gerador.

Anatolitis e Welisch (2017) utilizaram um Sistema Multiagente para avaliação dos tipos de leilões de energia eólica na Alemanha. O estudo em questão considerou duas configurações de leilões: leilão uniforme e leilão discriminatório, e seguiu todas as diretrizes e estrutura de leilões de energia alemães. O ambiente do leilão foi simulado considerando um sistema de competição entre agentes com capacidade de aprendizado permitindo adequar os valores de lance em função da variação de preço de venda de energia ao longo do leilão. Os resultados indicaram que os leilões do tipo discriminatório alcançavam preços de venda de energia mais baixos do que os leilões de preço uniforme.

Em Jie *et al.* (2017) um Sistema Multiagente foi utilizado para avaliação de leilões de energia no contexto japonês. Neste estudo também foram avaliados leilões do tipo uniforme e discriminatório. O leilão simulado apresentava agentes com capacidade de aprendizado utilizando o método Q-learning que competiam entre si pelo direito de venda de energia. Assim como constatado no estudo anterior, o leilão tipo discriminatório resultou em preços de venda de energia menores do que o leilão de preço uniforme.

Já Welisch (2019) utilizou um Sistema Multiagente para apoio ao planejamento dos leilões de energia renovável na Dinamarca. O estudo era focado em sugerir o intervalo de tempo entre leilões e a quantidade de energia a ser comprada em cada leilão. O estudo considerou o modelo dinamarquês de leilão de energia renovável, o qual é baseado em um leilão do tipo discriminatório. O leilão simulado considerou agentes com capacidade de aprendizado que reagiam alterando seu preço de lance a partir da análise das variações do preço corrente do leilão. Os resultados indicaram que o uso de leilões menos frequentes e com maiores volumes de energia comprada por leilão estimula a competição e resulta em menores preços de energia.

Tendo em vista estes trabalhos, o presente estudo busca implementar a dinâmica da comercialização de energia por meio dos Leilões de Energia Nova utilizando a abordagem Multiagente. Este estudo vai além da modelagem do leilão em si, incluindo todo o processo decisório necessário ao alcance de determinada configuração do parque gerador de eletricidade por meio dos Leilões de Energia Nova. Por maio desta proposta, é possível que o governo tenha uma ferramenta mais adequada que auxilie no planejamento e execução dos leilões, portanto, instituições como o MME, ANEEL e CCEE poderiam se beneficiar de sua utilização. De qualquer maneira, também é possível que os proponentes dos leilões de energia a utilize para analisar suas estratégias, caso tenham interesse.

1.4 Organização do Trabalho

No capítulo 2 deste trabalho será realizada a Revisão da Literatura dos temas relevantes ao estudo. Serão abordados trabalhos sobre: o setor elétrico brasileiro, os leilões de energia, Sistema Multiagente, modelagem matemática e aplicações em leilões de energia. Já no capítulo 3, serão apresentados os aspectos metodológicos deste trabalho de forma detalhada. Nele encontram-se a caracterização do objeto de estudo, a modelagem do sistema, a verificação do modelo, a obtenção e tratamento de dados. Em seguida, tem-se o capítulo 4, o qual apresentará os resultados deste estudo. Nesta parte são apresentados os resultados do subsistema de cooperação e de competição, com a aplicação de testes estatísticos pertinentes e da análise de sensibilidade. Por fim, serão realizadas as considerações finais, retomando-se os principais pontos da pesquisa, suas conclusões e sugestões de estudos futuros.

2 Referencial Teórico

Neste capítulo serão apresentadas as principais fundamentações teóricas deste estudo. Assim, em um primeiro momento serão apresentados os agentes atuantes no setor elétrico brasileiro. Em seguida serão abordados os leilões de energia, seguidos do detalhamento da sistemática dos Leilões de Energia Nova. Na seção seguinte, os principais temas sobre a abordagem Multiagente serão apresentados. Por fim, tem-se uma seção dedicada à otimização multiobjetivo.

2.1 Agentes do Setor Elétrico Brasileiro

Diversas mudanças ocorreram no Setor Elétrico Brasileiro (SEB) a partir de 1996. Segundo Lima (2012), no antigo modelo havia empresas predominantemente estatais que eram responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. As atividades ligadas ao setor formavam um monopólio, já que todos os consumidores eram cativos e o mercado completamente regulado.

Com o novo modelo do SEB, as empresas de energia elétrica foram divididas em segmentos: geração, transmissão e distribuição, o que possibilitou mais competição na geração e comercialização com a implementação de leilões. Além disso, órgãos responsáveis pela comercialização, regulação e pesquisa de energia elétrica foram criados (LIMA, 2012). Com essas mudanças no SEB, também foi estabelecido o decreto nº 5.163/04 que instituiu duas esferas para as relações comerciais do atual modelo: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL). Segundo CCEE (2016b):

- Ambiente de Contratação Regulada (ACR): formalizada por meio de contratos celebrados entre os geradores e os distribuidores, que participam dos leilões de compra e venda de energia;
- Ambiente de Contratação Livre (ACL): os geradores, comercializadores, importadores e exportadores de energia e consumidores livres e especiais têm liberdade para negociar e estabelecer em contratos os volumes de compra e venda de energia e seus respectivos preços.

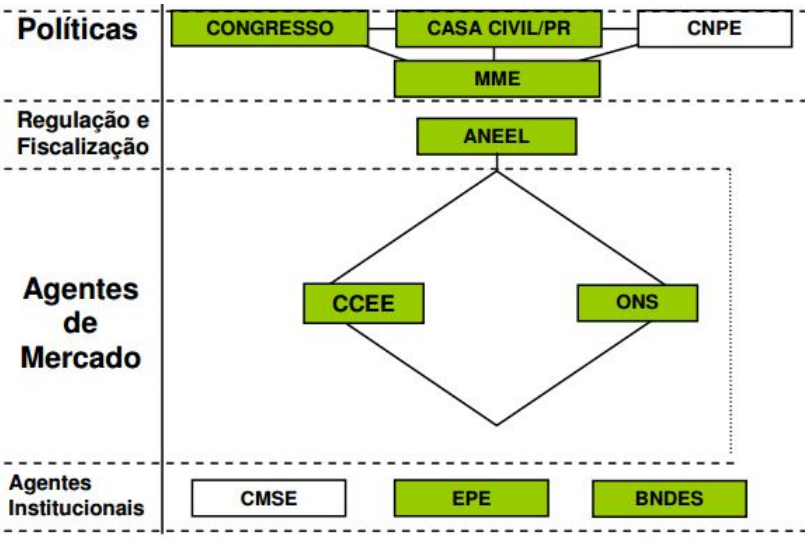
Segundo o MME (2016a), no Ambiente de Contratação Regulada os agentes vendedores (geradores, comercializadores e autoprodutores) e as distribuidoras estabelecem Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEAR) precedidos de licitação, ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos. De acordo com (LIMA, 2012), os agentes de geração, sejam concessionários de serviço público de geração, produtores independentes ou autoprodutores, bem como os comercializadores, podem vender energia elétrica nos dois ambientes, mantendo o caráter competitivo do segmento de geração. Todos os contratos firmados nos ambientes livre e regulado são registrados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Segundo Gastaldo (2009), Walter (2006) e COPEL (2015), o mercado de energia, ilustrado na Figura 2.1, é composto por:

- Ministério de Minas e Energia (MME): é o órgão do governo federal responsável pela condução das políticas energéticas do país. Suas principais obrigações incluem a formulação e implementação de políticas para o setor energético;
- Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE): tem como função acompanhar e avaliar permanentemente a continuidade e a segurança do suprimento eletro energético em todo o território nacional;
- Conselho Nacional de Política Energética (CNPE): é um órgão interministerial de assessoramento à presidência da República, tendo como principais atribuições formular políticas e diretrizes de energia e assegurar o suprimento de insumos energéticos nas áreas mais remotas ou de difícil acesso no país;
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE): é uma empresa vinculada ao MME, cuja finalidade é prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético;
- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE): tem a finalidade de viabilizar a comercialização de energia elétrica no SIN nos ambientes de contratação regulada e livre;
- Operador Nacional do Sistema (ONS): é um órgão colegiado responsável pela coordenação do setor elétrico;
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL): é um órgão governamental que regula o setor;
- Geradores: agentes produtores de energia elétrica;
- Distribuidores: agentes distribuidores de energia, compram energia dos geradores e distribuem aos consumidores;

- Transmissores: transmitem energia entre um agente gerador e um agente distribuidor recebendo tarifa de transmissão;
- Comercializadores: agentes negociadores de energia (*traders*) que compram e revendem energia;
- Consumidores livres: têm a liberdade de escolher de qual gerador ou comercializador comprar sua demanda independentemente do distribuidor concessionário de sua área geográfica;
- Consumidores cativos: devem obrigatoriamente comprar energia do distribuidor que serve sua área geográfica.

A Figura 2.1 ilustra as relações existentes destes agentes neste setor. Nela podemos visualizar que a partir de decisões políticas advindas do Congresso, Casa Civil, Presidência da República e do Conselho Nacional de Política Energética o Ministério de Minas e Energia toma suas decisões quanto a política energética do país e repassa à Agência Nacional de Energia Elétrica. Esta última tem o papel de regular s comercialização de energia e a operação do sistema elétrica, feitos pela CCEE e ONS respectivamente. Como agentes institucionais do setor temos a CMSE, EPE e BNDES.

FIGURA 2.1 – Agentes do Setor Elétrico Brasileiro



Fonte: (AVILÉS, 2009)

2.2 Leilões de Energia

Segundo o MME (2016a), os leilões são processos licitatórios realizados com o objetivo de contratar a energia elétrica necessária para assegurar o pleno atendimento da demanda

futura no Ambiente de Contratação Regulada. Os vencedores dos leilões celebrarão com os agentes de distribuição Contratos de Comercialização de Energia Elétrica em Ambiente Regulado, correspondendo às suas necessidades de compra para entrega no ano de início de suprimento da energia contratada no certame. De acordo com CCEE (2016d), os leilões podem ser classificados em:

- Leilão de Venda: realizado uma única vez em 2002 para vender os lotes de energia ofertados por empresas federais, estaduais e privadas por meio do sistema eletrônico do Banco do Brasil;
- Leilão de Fontes Alternativas: foi criado com o objetivo de aumentar a participação de fontes renováveis, *i.e.* eólica, biomassa e energia proveniente de PCH, na matriz energética brasileira;
- Leilão de Excedentes: foi realizado uma única vez em 2003 para venda dos excedentes de energia elétrica das concessionárias e autorizadas de geração decorrentes da liberação dos contratos iniciais. Também foram vendidos os montantes de energia de geração própria, estabelecidos nas Resoluções ANEEL nº 267, 450 e 451, todas de 1998;
- Leilão Estruturante: destina-se à compra de energia proveniente de projetos de geração indicados por resolução do CNPE e aprovados pelo presidente da República. Esses empreendimentos têm prioridade de licitação e implantação, por seu caráter estratégico e pelo interesse público;
- Leilão de Energia de Reserva: é realizado com o objetivo de elevar a segurança no fornecimento de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), assim usinas são contratadas para esta finalidade, tanto empreendimentos novos como existentes. Este suprimento de energia gerou o Encargo de Energia de Reserva para todos seus usuários, visando cobrir as despesas geradas;
- Leilão de Energia Existente: é realizado para contratar energia gerada por usinas já construídas e que estejam em operação, cujos investimentos já foram amortizados;
- Leilão de Compra: foram realizados nos anos 2003 e 2004 para que distribuidores e comercializadores comprassem energia dos geradores, produtores independentes e comercializadores/distribuidores que possuíam sobras contratuais;
- Leilão de Ajuste: visam adequar a contratação de energia pelas distribuidoras a curto prazo, de três meses a dois anos, compensando eventuais desvios por diferença entre as previsões e o comportamento de seu mercado;

- Leilão de Energia Nova: O Leilão de Energia Nova tem como finalidade atender ao aumento de carga das distribuidoras. Neste caso são vendidas e contratadas energia de usinas que ainda serão construídas. Segundo publicação de Brasil (2017), este leilão pode ser de quatro tipos: A-3, A-4, A-5 e A-6. A numeração do tipo de leilão indica em quantos anos após a realização do mesmo as usinas devem entrar em operação comercial. Por exemplo, a energia comercializada no ano A por um leilão A-3, deve entrar em operação comercial em até três anos.

Conforme estudo do Instituto Acende Brasil, (IAB, 2012), os Leilões de Ajuste e os Leilões de Energia Existente, como o A-1, visam a promover a recontratação de energia proveniente de empreendimentos em operação comercial para atendimento dos consumidores. Esta recontratação de energia é realizada anualmente para entrega de energia no ano seguinte mediante contratos de 3 a 15 anos de duração no caso dos leilões A-1. Já para os Leilões de Ajuste, esses contratos podem variar de 3 a 24 meses. Além disso, trata-se de um mecanismo de mitigação de risco para os distribuidores que possibilita o ajuste fino na contratação para pleno atendimento de sua carga. Já os Leilões A-0 são utilizados como uma medida emergencial adotada pelo governo para reduzir a exposição involuntária das distribuidoras decorrente da contratação insuficiente nos Leilões de Energia Existente nos últimos dois anos.

Os Leilões de Energia Nova visam proporcionar o tempo necessário para a instalação de novos empreendimentos de energia contratados no leilão. Até o ano de 2017 esses leilões só possuíam as modalidades A-3 e A-5. Após a publicação de Brasil (2016) e Brasil (2017), foram adicionadas duas novas modalidades: A-4 e A-6. Estes leilões são destinados à construção das novas usinas e à contratação de energia de novos empreendimentos para atendimento do crescimento da carga, alocando o risco de erros de projeções de crescimento da demanda por energia elétrica. Os prazos dos contratos de compra de energia e concessão da usina variam de 15 a 30 anos. Os preços definidos no leilão são corrigidos anualmente pela inflação e, no caso de termelétricas, também se considera uma correção para o custo de combustível baseado em índices de preços internacionais específicos.

Os Leilões de Energia Nova são instrumentos pelos quais o governo promove a expansão do parque gerador para atender ao crescimento da demanda referente ao mercado regulado. Os montantes a serem contratados nos Leilões de Energia Nova são definidos com base na projeção da demanda das distribuidoras nas suas respectivas áreas de concessão (IAB, 2012). Todo ano cada distribuidora submete ao MME a sua declaração de necessidade de contratação de energia, definindo os montantes a serem contratados por meio dos leilões. Com base nos valores agregados destas projeções, o governo define o montante a ser contratado nos Leilões de Energia Nova.

De 2005 a 2019 houve editais para a realização de vinte e nove Leilões de Energia

Nova, dos quais três foram cancelados (CCEE, 2019). De acordo com Brasil (2017) a cada ano devem ser realizados pelo menos um leilão A-3 ou A-4 e outro A-5 ou A-6. Porém, o que se observa na prática é que antes de 2017 só eram realizados leilões A-3 e A-5 e, após, só foram realizados os leilões do tipo A-4 e A-6. Tal fato sugere que o leilão A-3 foi substituído pelo A-4, já o A-5 pelo A-6. Isso poderia ser relacionado à mitigação do problema de atrasos na entrada em operação de usinas comercializadas neste leilão por tempo insuficiente a sua implementação.

Os Leilões de Energia Nova são leilões para a instalação de capacidade para a geração de energia elétrica. Para a realização deste leilão considera-se que:

- Os interessados devem ter o projeto cadastrado na EPE;
- A EPE avalia e habilita os projetos adequados;
- Os leilões são realizados virtualmente pela plataforma da CCEE, a qual realiza o papel de leiloeiro e os empreendedores de projetos habilitados são os concorrentes.

Os Leilões de Energia Nova consideram empreendimentos de diversas fontes. O objetivo desses é atender à demanda de energia ao menor custo. Geralmente, os editais estabelecem preços máximos diferenciados para empreendimentos de fontes distintas, chamados de preços iniciais. Os montates a serem contratados são repassados pelo MME no momento da ralização do leilão, porém não são divulgados. Nestes leilões são comercializados empreendimentos, produto quantidade e produto disponibilidade (IAB, 2012).

A habilitação de projetos deve seguir os critérios estabelecidos pelas portarias do MME de acordo com MME (2016b). Após a habilitação dos empreendimentos, os mesmos devem participar dos leilões. Nestes, a CCEE visa obter os menores preços pagos pela energia a ser instalada, de acordo com as definições estabelecidas pela documentação do leilão. Estas definições podem sofrer alterações de um leilão para o outro. Como referência neste trabalho serão utilizadas as documentações ANEEL (2016), CCEE (2016c) e CCEE (2016a). Portanto, as definições dessas documentações trazem como:

- Empreendimento hidrelétrico caso 1: nova UHE, com potência instalada superior a 50 MW, e suas respectivas instalações de transmissão de interesse restrito, que ofertará energia elétrica no produto quantidade;
- Empreendimento hidrelétrico caso 2: aproveitamento hidrelétrico que ofertará energia elétrica no produto quantidade, sendo o empreendimento uma nova PCH, nova Usina Hidrelétrica com potência igual ou inferior a 50 MW ou uma ampliação de UHE ou PCH existente;

- Empreendimento a biomassa: central de geração de energia elétrica a partir de biomassa, que ofertará energia elétrica no produto disponibilidade termoelétrica a biomassa e carvão;
- Empreendimento a gás natural: central de geração de energia elétrica a gás natural em ciclo combinado, que ofertará energia elétrica no produto disponibilidade termoelétrica a gás natural;
- Empreendimento a carvão: central de geração de energia elétrica a carvão, que ofertará energia elétrica no produto disponibilidade termoelétrica a biomassa e carvão;
- Empreendimento eólico: central de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica;
- Lote: unidade mínima da oferta de quantidade associada a um determinado empreendimento que pode ser submetida na forma de lance na etapa uniforme, equivalente a 0,1 MW médio neste leilão, conforme estabelecido no edital;
- Preço de referência: valor máximo, expresso em reais por megawatt-hora, de cada empreendimento hidrelétrico caso 1, empreendimento hidrelétrico caso 2, empreendimento com outorga sem contrato ou empreendimento com outorga com contrato a ser licitado no leilão, conforme definido no edital e no detalhamento da sistemática;
- Produto: energia elétrica negociada no leilão, que será objeto de CCEAR diferenciado por tipo de fonte energética nos termos do edital e das diretrizes do MME;
- Preço inicial: valor definido pelo MME, expresso em reais por Megawatt-hora (R$/MWh), para cada produto de energia;

No leilão A-5 de 2016 foram negociados quatro produtos com início de suprimento em 1º janeiro de 2021 nas seguintes modalidades de Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR)(CCEE, 2016a):

- Contratação de energia elétrica proveniente de fonte hidroelétrica, objeto de CCEAR por quantidade com período de suprimento de 1º de janeiro de 2021 a 31 de dezembro de 2050;
- Contratação de energia elétrica proveniente de fonte termoelétrica a biomassa e carvão, objeto de CCEAR por disponibilidade com período de suprimento de 1º de janeiro de 2021 a 31 de dezembro de 2045;
- Contratação de energia elétrica proveniente de fonte termoelétrica a gás natural, objeto de CCEAR por disponibilidade com período de suprimento de 1º de janeiro de 2021 a 31 de dezembro de 2040;

- Contratação de energia elétrica proveniente de fonte eólica, objeto de CCEAR por disponibilidade.

Para cada fonte houve condições específicas de contratação definidas na minuta do contrato.

2.2.1 Sistemática dos Leilões de Energia Nova

Os Leilões de Energia Nova são realizados via *internet* e são organizados pela CCEE. Esses leilões ocorrem em duas fases, sendo a primeira constituída por três etapas e a segunda por duas. Após publicação de Brasil (2016) e Brasil (2017) entrarem em vigor houve mudanças quanto a sistemática dos Leilões de Energia Nova. Assim sendo, este trabalho apresentará a nova sistemática de acordo com ANEEL (2018a), CCEE (2018b) e CCEE (2018a).

A primeira fase do leilão tem por objetivo a disputa de empresas pelo direito de construir e operar empreendimentos denominados caso 1, os quais abrangem hidrelétricas com potência instalada acima de 50 MW. Salienta-se que esses empreendimentos são licitados individualmente em ordem pré-definida e atendendo a demanda determinada pelo MME (ANEEL, 2018a).

A disputa pelos empreendimentos é feita a partir do preço de lance, o qual consiste no valor, expresso em reais por megawatt-hora, que o concorrente se predispõe a vender sua energia. A fase em questão envolve a realização de várias etapas classificatórias visando à redução do preço de venda em função do preço de lance dos concorrentes. De modo a permitir a definição dos lances das empresas proponentes, a EPE coordena a realização de estudos prévios e procedimentos iniciais de licenciamento ambiental, tais como: Estudos de Viabilidade Técnico-Econômica, Estudos de Impacto Ambiental (EIA), Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) e Licença Prévia Ambiental. Esses são disponibilizados aos interessados em participar do leilão (IAB, 2012).

Outro aspecto importante relativo a estes empreendimentos hidrelétricos é que eles recebem a outorga de concessão destinada à produção independente de energia, não restringindo ao concessionário a comercialização da energia apenas com o poder público. Todavia, normalmente nos editais de cada leilão a outorga está condicionada a efetivação de percentuais mínimos de venda da energia no leilão, que são estabelecidos em ANEEL (2018a).

A segunda fase, por sua vez, visa a definição dos empreendimentos que celebrarão contratos de comercialização de energia de longo prazo, conhecidos como produtos. Nesta fase, as empresas vencedoras dos empreendimentos da primeira fase, empreendimentos caso 1, e empreendimentos previamente habilitados e cadastrados pela EPE competem

entre si pelos contratos de comercialização de energia. Nesta etapa, a disputa é separada por produtos, sendo que cada concorrente deverá entrar na negociação de somente um produto (ANEEL, 2018a).

Deve ser ressaltado que a disputa pelos contratos de comercialização de energia entre os empreendimentos de geração divide-se em dois grupos: produtos da modalidade quantidade e produtos da modalidade disponibilidade. Ainda, para cada produto são definidos a fonte de produção da energia bem como o tempo de contrato (ANEEL, 2018a).

Os empreendimentos a serem comercializados na modalidade por quantidade apresentam contratos em que o gerador é responsável pelo fornecimento de certa quantidade de energia durante um período de tempo determinado por um preço pré-definido. De acordo com IAB (2012), nestes contratos o gerador de energia é que assume os riscos associados a desvios entre a quantidade de energia gerada, o valor acordado e as perdas decorrentes de alterações no custo variável da geração de energia da usina. No caso do fornecimento de energia em quantidade inferior ao valor acordado, deve ser realizada compensação por parte do gerador por meio da liquidação de diferenças no mercado de curto prazo da CCEE.

Já os empreendimentos comercializados na modalidade por disponibilidade possuem contratos em que o gerador deve garantir a disponibilidade de determinada capacidade de geração de energia. A remuneração neste tipo de contrato possui um valor fixo proporcional a capacidade disponibilizada e um valor variável relativo à quantidade de energia efetivamente gerada. A escolha dos empreendedores a serem acionados é feita pela ONS respeitando a ordem de mérito, que é definida pela ordem do menor custo operacional. Sendo assim, primeiramente são acionados os empreendimentos com menor custo variável. Já as usinas com custo variável superior serão utilizadas apenas para suprir a demanda restante (IAB, 2012).

Com relação à definição da quantidade de energia a ser contratada em cada uma das modalidades supracitadas, trata-se de uma definição que varia conforme o leilão. O MME e a ANEEL repassam as diretrizes de contratação à CCEE, contendo as quantidades de energia a serem contratadas em cada produto, conforme a demanda das distribuidoras e estudos disponibilizados pela ONS e EPE. Porém, segundo IAB (2012), a CCEE possui uma flexibilidade na quantidade de energia a ser contratada, com o objetivo de aumentar a concorrência de preços e minimizar o preço final pago pela energia. Outra informação relevante refere-se ao estabelecimento da garantia física, a qual é definida a partir dos dados do empreendedor submetidos no processo de habilitação. A garantia física é um parâmetro que servirá de lastro para a comercialização de energia no leilão.

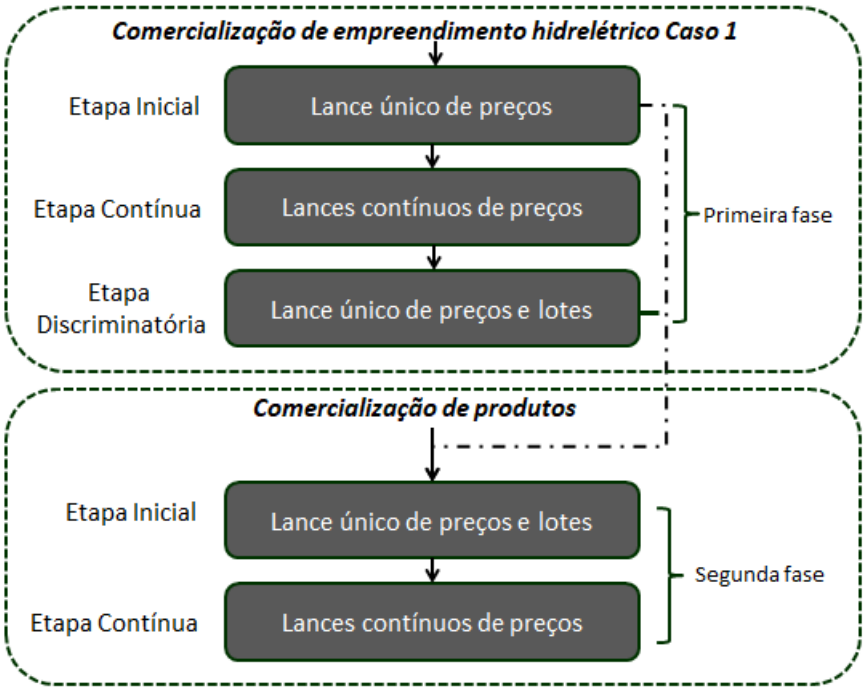
Com o objetivo de compreender melhor o funcionamento dos Leilões de Energia Nova, considere a Figura 2.2. Como já dito, no ano de 2017 a sistemática dos Leilões de Energia

Nova sofreu algumas mudanças. Portanto, este estudo utilizará de documentos do vigésimo oitavo Leilão de Energia Nova (CCEE, 2018a; CCEE, 2018b; ANEEL, 2018a), para explicar essa nova lógica.

A primeira fase consiste na disputa entre os empreendedores cadastrados para concorrer ao empreendimento caso 1. Os empreendimentos são licitados individualmente em um leilão que envolve três etapas. Somente os concorrentes de empreendimento caso 1 podem participar das duas fases do leilão. Para participar da comercialização exclusivamente dos produtos de energia, os concorrentes devem participar somente da segunda fase.

Na primeira fase, a primeira etapa é denominada etapa inicial e compreende a realização de um lance único por cada proponente, o qual deve ser menor ou igual ao preço de referência do empreendimento que consta no edital. Após o final do tempo de realização dos lances, o sistema identifica o menor lance. Caso a diferença entre o menor lance e os demais seja superior a cinco por cento, o empreendimento de menor lance é anunciado vencedor e a primeira fase é encerrada. Por outro lado, se existirem concorrentes cujas propostas forem inferiores a cento e cinto por cento do lance de menor preço, estes proponentes juntamente com o que ofertou o menor preço de lance se classificam para disputar a segunda etapa da primeira fase, a etapa contínua.

FIGURA 2.2 – Sistemática dos Leilões de Energia Nova



Fonte: (CCEE, 2018a)

Na etapa contínua, os empreendedores classificados podem inserir novos lances sequenciais de preço. O sistema informa continuamente aos concorrentes qual é o preço

corrente que aqui corresponde ao menor preço de lance inserido no sistema. O sistema disponibiliza um tempo de lance e os lances inseridos no sistema devem ser menores que o preço corrente menos um decremento mínimo. Esse decremento mínimo corresponde ao decremento porcentual multiplicado pelo preço corrente. O decremento porcentual é um parâmetro determinado pelo MME e colocado no sistema de realização do leilão, pouco antes da ocorrência do mesmo. A cada lance válido o sistema atualizará o preço corrente e reiniciará o tempo de lance. A concorrência continua até que o tempo de lance termine sem nenhuma realização de lance válido e, por consequência sem a atualização do preço corrente.

Com o fim da etapa contínua o concorrente com o menor lance obtém o direito de construir e operar o empreendimento disputado. Esse concorrente, juntamente com outros concorrentes que tenham vencido outros empreendimentos da caso 1, passarão à etapa discriminatória na qual farão um lance único de preço e oferta de lotes. O preço deve ser menor ou igual ao último preço corrente, já os lotes ofertados devem respeitar o limite mínimo de lotes estabelecido no edital. Serão declarados vencedores, aqueles que atenderem à quantidade de lotes demandada para a primeira fase de acordo com o menor preço de lance. Esses lotes serão comercializados na modalidade quantidade.

É importante ressaltar que o preço inicial para o produto quantidade na segunda fase consiste no menor valor entre o menor preço de lance da primeira fase e o preço deste produto, definido pelo edital. Também é muito importante mencionar que após as mudanças na sistemática do Leilão de Energia Nova com as publicações de Brasil (2016) e Brasil (2017) ainda não houve a comercialização de empreendimento caso 1. Conforme CCEE (2018a), se não houver empreendimento hidrelétrico caso 1, o leilão terá início já na segunda fase.

Os proponentes titulares de empreendimentos habilitados disputam os produtos definidos pelo edital na segunda fase. Esses produtos indicam a modalidade de produto, quantidade ou disponibilidade, e definem quais são os tipos de usinas que podem concorrer ao mesmo. Assim, em uma análise geral dos leilões já realizados, os produtos comercializados pela CCEE foram (CCEE, 2019):

- Quantidade: energia produzidas por hidrelétricas sendo CGH, PCH e UHE;
- Disponibilidade termoelétrica a biomassa: energia produzida por termoelétricas a biomassa ;
- Disponibilidade termoelétrica a carvão: energia produzida por termoelétricas a carvão;
- Disponibilidade termoelétrica a gás Natural: energia produzida por termoelétricas a gás natural;

- Disponibilidade eólica: energia produzida por usina eólica.
- Disponibilidade solar: energia produzida por usina solar fotovoltaica;

Não foram identificados nos históricos de Leilões de Energia Nova produtos destinados a usinas com fontes de energia a óleo e nuclear. Salienta-se que empreendimentos de produtos diferentes não competem entre si. A segunda fase é composta por duas etapas, denominadas etapa inicial e etapa contínua. A primeira consiste em um leilão de lance único, em que os concorrentes informam a quantidade de lotes de energia que desejam ofertar e o preço que desejam receber pelos mesmos, durante um intervalo de tempo. Esse preço deve ser menor que o preço corrente.

Em geral, os concorrentes devem ofertar a quantidade de lotes que desejam vender ao valor de seu lance de preço. Porém, em alguns editais de Leilões de Energia Nova houve a exigência de que o proponente escolha uma das duas opções abaixo referentes à quantidade de lotes ofertados:

- Ofertar a totalidade de lotes;
- Retirar todos os lotes do leilão.

Após o período de lances, os concorrentes são classificados de acordo com a ordem crescente de seu lance. Os primeiros concorrentes que ofertarem uma quantidade de lotes pelo menos igual à capacidade remanescente do SIN para escoamento de geração vão para a próxima etapa. A capacidade remanescente do SIN para escoamento de geração é um dado inserido pela EPE no sistema antes da ocorrência do leilão. Esta quantidade identifica a capacidade do sistema em distribuir a energia, evitando que quantidades excessivas de lotes de energia passem para a próxima fase do leilão. Em caso de empate na última colocação, considera-se a maior quantidade de lotes ofertados e a ordem cronológica do lance, respectivamente, como critérios de desempate.

Os concorrentes classificados na etapa inicial passam para a etapa contínua, que consiste em um leilão de preços decrescentes em que os concorrentes podem realizar lances em rodadas sucessivas determinando o preço que aceitam receber pelos lotes de energia ofertados na etapa anterior. Nesta etapa, o sistema determina um tempo de lance no qual os concorrentes podem fazer um lance de preço. O valor deste lance deve ser menor que o preço corrente menos o decremento ou menor que o último lance deste concorrente menos o decremento.

Após ter sido realizado um lance válido, os concorrentes são classificados quanto a ordem crescente de seu último valor de lance e o tempo de lance se reinicia. Os primeiros concorrentes que tiverem a quantidade de lotes pelo menos igual à quantidade demandada

do produto que está sendo comercializado terão seus lotes classificados como atendidos, para os demais concorrentes os lotes constarão como não atendidos. Cada concorrente consegue visualizar a classificação de seus lotes de energia bem como o preço corrente e o decremento mínimo. Esse procedimento continua até que o tempo destinado ao leilão se encerre ou até que um tempo de lance se finalize sem ter sido realizado nenhum lance válido.

Ao fim desta etapa são considerados vencedores aqueles concorrentes que até a última etapa tinham seus lotes classificados como atendidos. A quantidade demandada de cada produto é um valor decidido tendo como base a demanda declarada das distribuidoras ao MME. Além disso, a CCEE possui algum grau de liberdade para o cálculo deste valor (IAB, 2012). Caso a quantidade total de lotes atendidos seja superior à quantidade demandada do produto, o sistema dará início a etapa de ratificação do lance. Nela o concorrente que ocupar a última posição que tenha seus lotes atendidos deve adequar a quantidade de lotes ofertados. Este concorrente deve optar pelo maior valor entre a quantidade de lotes restantes que complete a quantidade demandada ou trinta por cento de sua energia habilitada (CCEE, 2018a).

Com relação à interação entre geradores e distribuidoras compradoras de energia, cada empreendedor vencedor do leilão estabelece um Contrato de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado com as compradoras conforme as suas respectivas demandas.

2.3 Sistema Multiagente

Sistemas Multiagentes (SMA) é um campo da Inteligência Artificial que visa estudar sistemas distribuídos. Sendo assim, define-se:

- Agentes inteligentes: entidade computacional situada em algum ambiente, capaz de agir de maneira autônoma e flexível para cumprir seus objetivos (WOOLDRIDGE *et al.*, 1995);
- SMA: é um sistema de computação distribuída composto de vários agentes inteligentes que interagem dentro de um ambiente. Tem como características a comunicação e interação entre agentes inteligentes (WEISS, 1999).

Congruente com a definição anterior de agentes, para desempenhar seu papel eles devem possuir (WOOLDRIDGE *et al.*, 1995):

- Autonomia: este aspecto exige que o agente execute a maior parte de suas ações sem interferência direta de outros agentes, computacionais ou não, de forma a ter controle total sobre suas ações e estado interno;

- Habilidade social: em função da arquitetura do sistema, um agente interage com outros agentes (humanos ou computacionais) para solucionar problemas e ou atingir objetivos próprios ou comuns. Sendo assim, os agentes devem ter a capacidade de comunicar seus interesses e respostas aos outros, além de possuir um mecanismo decisório interno que defina quando e quais interações são apropriadas;

- Capacidade de reação: em função da interação que tem com outros agentes e seu papel em todo o sistema, um agente deve ter a função de perceber e, quando necessário, reagir às alterações no ambiente em que estiver inserido;

- Capacidade pró-ativa: além de ter a capacidade de reagir frente uma alteração do ambiente em que está inserido, o agente também deve ter a capacidade de decidir quando realizar ações que o beneficiem ou beneficiem o sistema, sem necessariamente haver uma mudança do ambiente.

Na visão de Bond e Gasser (1988), um Sistema Multiagente pressupõe coordenação entre um conjunto existente de agentes autônomos e inteligentes. Dessa forma, necessita-se neste sistema de uma funcionalidade que permita que estes agentes possam coordenar seus conhecimentos, objetivos, habilidades e planos individuais de uma forma conjunta, para a execução de uma ação ou para a resolução de algum problema. Coordenação é o processo pelo qual um agente processa as informações sobre suas ações locais e as ações de outros agentes com o objetivo de garantir que a comunidade funcione de maneira coerente (O'HARE; JENNINGS, 1996).

A necessidade de coordenação entre múltiplos agentes surge do fato de que (O'HARE; JENNINGS, 1996):

- Existem dependências entre as ações dos diferentes agentes;

- Nenhum agente tem habilidades, recursos ou informações suficientes para resolver um problema completo de forma independente;

- Há critérios e restrições globais do sistema que devem ser respeitados para que se chegue à solução do problema;

- Deve ser garantida a harmonia das atividades de diferentes agentes quando estes as executam de forma conjunta, seja para atingir um mesmo objetivo ou objetivos concorrentes.

A coordenação é essencial para o bom funcionamento de um Sistema Multiagente, já que sem ela as ações dos agentes ocorrem de forma desorganizada e incoesa em relação ao sistema como um todo, atrasando ou impossibilitanto a resolução distribuída de problemas. Neste caso, como consequência, o sistema não está apto a fazer o que foi proposto,

resultando em resultados insatisfatórios. Assim, os objetivos do processo de coordenação visam garantir que (O'HARE; JENNINGS, 1996):

- Todos os componentes necessários ao sistema estejam inseridos nas capacidades funcionais de pelo menos um agente;
- Os agentes interajam de maneira a permitir que suas atividades sejam desenvolvidas e integradas em uma solução global;
- Os agentes atuem com propósitos, de forma consistente e coerente;
- Todos os objetivos individuais ou globais sejam atingíveis dentro das limitações computacionais impostas e dos recursos disponíveis.

Em O'Hare e Jennings (1996) são identificados três fatores básicos que devem estar presentes para uma coordenação com sucesso:

- A existência de uma estrutura que permita aos agentes interagirem de forma preditiva;
- A flexibilidade nas interações para que os agentes possam operar em ambientes dinâmicos e agir satisfatoriamente com uma visão parcial e imprecisa do sistema;
- Os agentes devem possuir conhecimento e capacidade de ação suficientes para explorar esta estrutura e flexibilidade descritas previamente.

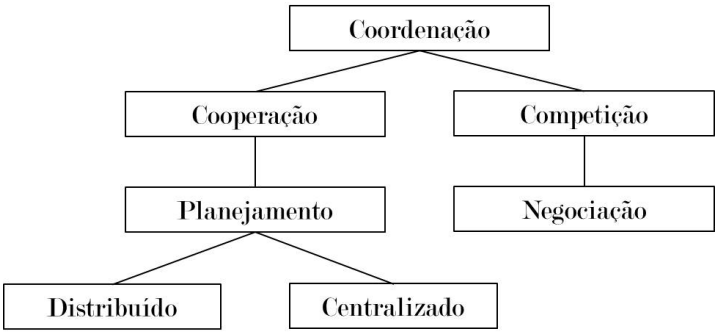
Em O'Hare e Jennings (1996) são utilizados três processos de coordenação fundamentais:

- O ajuste mútuo: é a forma mais simples de coordenação, na qual dois ou mais agentes compartilham recursos e informação para atingir algum objetivo comum;
- A supervisão direta: há o estabelecimento de uma relação hierárquica entre dois ou mais agentes, assim um mantém o controle sobre outro(s);
- A padronização: uma relação entre dois ou mais agentes é pré-definida, tendo uma resposta para cada ação de um agente. Desta forma, um agente mantém o controle sobre os outros estabelecendo procedimentos padronizados a serem seguidos por seus supervisionados em determinadas situações.

Os SMA são classificados quanto ao tipo de coordenação que possuem. Na Figura 2.3 de Weiss (1999) tem-se a taxonomia para a coordenação destes sistemas, que podem ser classificadas em:

- Cooperação: é a coordenação entre agentes não antagônicas com pelo menos um objetivo comum e que exige planejamento;
- Competição: é a coordenação entre agentes competitivos ou simplesmente auto-interessados que exige negociação.

FIGURA 2.3 – Uma taxonomia para coordenação em SMA



Fonte: (WEISS, 1999)

Em um SMA os agentes agem de acordo com suas próprias preferências. Essas preferências são formalmente capturadas por meio de funções utilidade, que atribuem um valor a uma entrada.

2.3.1 Cooperação

A maneira mais fácil de garantir um comportamento coerente dentro de um Sistema Multiagente é implantar um agente que tenha uma perspectiva mais ampla do sistema, atuando como um coordenador que possui informações sobre todo o ambiente. Assim, este seria responsável por criar planos e atribuir tarefas a todos os agentes. É importante dizer que nesta abordagem, uma falha do agente coordenador comprometeria o funcionamento de todo o sistema (O'HARE; JENNINGS, 1996). Além disso, os agentes constituintes do sistema devem ser cooperativos para atingir um objetivo global e comum.

Em Lux e Steiner (1995) é considerado que a cooperação acontece quando vários agentes planejam e executam suas ações de uma forma coordenada, sendo necessária quando:

- O agente não consegue encontrar um plano local que contemple o objetivo;
- O plano adequado ao objetivo envolve ações de outros agentes;
- O agente considera que um plano global pode ser melhor do que um plano local;

- Durante a fase de planejamento:
  - O agente encontra planos incompletos, que podem ser completados em cooperação com outros agentes;
  - O agente encontra eventos para os quais não é capaz de responder, mas que outros agentes são.

Os objetivos genéricos para a cooperação entre agentes são (O'HARE; JENNINGS, 1996):

- A diminuição do tempo de execução de uma tarefa através do paralelismo;
- O aumento do escopo de tarefas executáveis através do compartilhamento de recursos;
- A maior probabilidade de finalização de uma tarefa em função de seu compartilhamento, a ser realizada possivelmente através de distintos métodos de execução;
- A diminuição da interferência entre tarefas evitando interações prejudiciais.

2.3.1.1 Planejamento

Dentro do processo de cooperação há o planejamento. Ele tem como fim a determinação de um conjunto de atividades organizadas com um curso de ação definido, em que estas atividades são distribuídas entre agentes capacitados a executá-las. Este planejamento pode ocorrer de duas formas (WEISS, 1999):

- Centralizada: um único agente constrói o plano;
- Distribuída: o plano é construído por mais de um agente.

A primeira opção é mais adequada quando é possível ter um agente que possui informação sobre todo o sistema, já a segunda é utilizada no caso contrário, quando não há um único agente que possui uma visão global das atividades do grupo. O planejamento em Sistema Multiagente diz respeito a questões como os agentes podem (O'HARE; JENNINGS, 1996):

1. Formular um curso de ação levando em conta as ações a serem executadas paralelamente por outros agentes;
2. Descobrir o curso de ação de outros agentes;
3. Identificar de que forma um agente poderia comprometer-se com seus próprios modelos.

Segundo Bond e Gasser (1988), alinhar o comportamento de agentes em direção aos objetivos comuns, com a divisão explícita de tarefas, pode viabilizar a realização de grandes objetivos. Os autores afirmam que técnicas como planejamento centralizado para múltiplos agentes e planejamento distribuído são caminhos que auxiliam no alinhamento das atividades dos agentes, pois determina tarefas após analisar sobre as consequências destas em certas organizações.

Segundo Agre e Chapman (1990), a utilização de planos pode ser vista de duas maneiras:

- Plano como programa: O uso de plano é a execução de determinado procedimento, sendo que esta visão implica na execução de planos de forma independente do ambiente. Nesta visão, o plano pode ser decomposto em ações primitivas que podem ser simplesmente executadas através de um dispositivo. Nesta abordagem aparecem dificuldades como problemas intratáveis computacionalmente, inadequação dos procedimentos padrões previstos no programa quando há imprevisibilidade de ações dos outros agentes e detalhamento excessivo;

- Planos como comunicação: Nesta abordagem, o plano para o agente é seguir instruções em linguagem natural, desse modo um plano não determina diretamente suas ações. Aqui, um plano é um recurso que o agente utiliza para decidir o que fazer. A única situação completa conhecida é a situação inicial passada ao planejador. Durante a execução, as circunstâncias que aparecem podem somente determinar ramificações condicionais ou causar retorno do controle ao planejador se algo está errado.

No caso do planejamento distribuído, é necessário a determinação da definição de planos para cada agente. Um modelo de planejamento distribuído deve considerar a concorrência existente entre os agentes em um ambiente compartilhado. Além disso, ele deve levar em conta também as alterações ocorridas no ambiente entre o planejamento e a execução dos planos resultantes deste planejamento (SEGHROUCHNI, 1996).

Considerando este último aspecto, o sistema deve possuir mecanismos que avaliem os resultados obtidos, para que, caso necessário, os planos de um ou mais agentes sejam adaptados tendo em vista os melhores resultados. Tal aspecto será abordado em um tópico posterior sobre aprendizagem. Os ajustes nos planos de um agente podem ser requeridos por resultados de suas próprias ações, resultados de ações de outros agentes, mudanças no ambiente, mudanças de objetivos ou alterações na percepção do agente quanto ao contexto multiagente no qual está inserido (O'HARE; JENNINGS, 1996).

2.3.2 Competição

No caso em que os agentes do sistema são auto-interessados, não há um objetivo comum para eles. Sendo assim, esse se constitui em um Sistema Multiagente competitivo. Neste tipo de ambiente, os agentes devem negociar para atingir um acordo. Geralmente, a configuração de uma negociação deve conter os quatro diferentes componentes abaixo (WOOLDRIDGE, 2009):

- Um conjunto de negociação: que representa o espaço das possíveis propostas que os agentes podem fazer;
- Um protocolo: que define as propostas legais que os agentes podem fazer, como uma função do histórico prévio de negociação;
- Uma coleção de estratégias: que determina quais propostas os agentes farão;
- Uma regra de contrato: que determina quando um acordo foi atingido e o que este acordo representa.

Uma desvantagem advinda da distribuição do controle e dos dados é a dificuldade de se ter conhecimento sobre o estado global do sistema, já que cada indivíduo possui uma visão parcial e imprecisa nesta perspectiva.

2.3.2.1 Negociação

A negociação representa um papel fundamental em atividades dentro da sociedade, permitindo que pessoas resolvam conflitos em que possam interferir. O processo de negociação atua sobre a concordância em planos comuns de diferentes agentes, por meio de compartilhamento de estruturas de informações relevantes. Tal evento ocorre entre agentes com objetivos diferentes, que devem tomar uma decisão conjunta, porém, sem deixar de tentar alcançar seus objetivos individuais (O'HARE; JENNINGS, 1996).

Os principais elementos utilizados pelos agentes envolvidos no processo de negociação são (WEISS, 1999):

- A linguagem;
- O protocolo que define a maneira através da qual eles negociam;
- O processo de decisão que determina suas posições, concessões e critérios utilizados para acordos.

As abordagens de negociação utilizadas podem ser (WEISS, 1999):

- Centradas no ambiente: possui o foco de como as regras do ambiente podem ser desenvolvidas para que os agentes nele envolvidos, independente de suas origens, capacidades, ou intenções, interajam produtivamente e razoavelmente. Neste caso, o mecanismo de negociação resultante deve possuir as seguintes propriedades:
  - Eficiência: os agentes não devem desperdiçar recursos para chegar a um acordo;
  - Estabilidade: nenhum agente deve ter um incentivo para desviar das estratégias acordadas;
  - Simplicidade: deve impor baixas demandas computacionais dos agentes;
  - Distribuição: não deve requerer um tomador de decisões centralizado;
  - Simetria: não deve haver diferenciação no tratamento dos agentes por razões arbitrárias ou inapropriadas.
- Centradas no agente: assume que os agentes são economicamente racionais, o conjunto de agentes deve ser pequeno, eles necessitam ter uma linguagem e abstração dos problemas comuns, além disso devem alcançar uma solução comum. A partir destes pressupostos, foi desenvolvido um protocolo de negociação unificado, no qual os agentes criam um acordo, cuja utilidade para um agente é a quantidade que ele pagará subtraindo o custo do acordo (ROSENSCHEIN; ZLOTKIN, 1994). Agentes discutem um conjunto de negociações, que é o conjunto de todos os acordos que têm uma utilidade positiva para todos os agentes. Do processo de negociação, três situações podem surgir:
  - Conflito: o conjunto de negociações está vazio;
  - Compromisso: agentes preferem trabalhar de maneira isolada, mas se isto não for possível, chegarão a um acordo negociado;
  - Cooperativo: todos os acordos no conjunto de negociações são preferidos por todos os agentes prioritariamente à realização de seus objetivos de forma isolada.

Em geral, a negociação ocorre em uma série de rodadas, com cada agente fazendo uma proposta a cada rodada. As propostas que os agentes fazem são definidas por suas estratégias, as quais devem ser extraídas do conjunto de negociação e devem ser legais, como definido pelo protocolo. Se um acordo é atingido, conforme definido pela regra de contrato, a negociação termina com um acordo (WOOLDRIDGE, 2009). Um fator de grande complexidade na negociação é o número de agentes envolvidos neste processo. Algumas possibilidades descritas são:

- Negociação um para um: um agente negocia somente com outro agente. Um exemplo desta situação é quando os agentes envolvidos possuem preferências simétricas com

relação ao aspecto tratado. Neste caso, o que é preferido por um agente, não é preferido pelo outro;

- Negociação de vários para um: um único agente negocia com outros agentes. Um exemplo desta situação são os leilões, que serão explicados em uma seção posterior.

2.3.2.1.1 Protocolos

No caso em que os agentes têm objetivos conflitantes ou são simplesmente auto-interessados, o objetivo do protocolo é maximizar as utilidades dos agentes (WEISS, 1999). Um dos protocolos utilizados é o protocolo de concessão monotônica. Usando esta abordagem é garantido que a negociação terminará em um número finito de rodadas. As regras deste protocolo são (WOOLDRIDGE, 2009):

1. A negociação ocorre em uma série de rodadas;
2. Na primeira rodada, ambos os agentes propõem simultaneamente uma proposta de acordo para o conjunto de negociação;
3. Um acordo é atingido quando:

$$u_1(\delta_2) \geq u_1(\delta_1) \qquad ou \qquad u_2(\delta_1) \geq u_2(\delta_2) \tag{2.1}$$

   Em que u_1 e u_2 são as funções utilidade dos agentes 1 e 2, respectivamente. Já δ_1 e δ_2 são as propostas de acordo realizadas pelos agentes 1 e 2, respectivamente.

4. Se nenhum acordo é atingido, então a negociação vai para uma nova rodada de propostas de acordo simultâneas. Nesta próxima rodada, os agentes podem fazer uma proposta que é menos preferida pelo outro agente ou podem fazer uma concessão;
5. Caso nenhum dos agentes faça uma concessão, um acordo não será atingido em um número finito de rodadas, assim a negociação termina com um conflito.

2.3.2.2 Leilões

Segundo McAfee e McMillan (1987), um leilão é uma instituição de mercado com um conjunto de regras explícitas determinando uma alocação de recursos e preços com base em lances dos participantes no mercado. Uma maneira de modelar uma situação com negociação de vários agentes para um Sistema Multiagente é utilizar leilões. Nesta abordagem, um dos agentes é o leiloeiro e os outros são os participantes. O objetivo do leilão é vender um objeto para um dos participantes. O leiloeiro tem como objetivo

maximizar o preço deste objeto, enquanto os participantes desejam minimizar este preço (WOOLDRIDGE, 2009).

Vários tipos de leilão são encontrados na literatura e utilizados na prática. A caracterização de leilões pode ser feita (MASILI, 2004):

- A partir de sua natureza: oferta, demanda ou ambos;
- Pela forma como os lances são oferecidos: aberto ou fechado;
- Pela determinação do preço de fechamento: primeiro ou segundo preço.

A natureza de um leilão pode ser determinada através do papel exercido pelos grupos de participantes no leilão. Em um leilão de demanda, os m compradores fazem lances de demanda para comprar um bem que um leiloeiro pretende vender pelo maior preço. Vence o participante que fizer o maior lance de demanda. No leilão de oferta, os n vendedores ofertam um bem que o comprador pretende adquirir ao menor preço. O preço do produto leiloado é determinado pelos lances dos vendedores e vence aquele que fizer o menor lance de oferta. Este leilão também é denominado de leilão reverso ou de leilão *procurement*.

Já no leilão duplo, de demanda e oferta (*double auction*), os n vendedores fazem lances de oferta e os m compradores fazem lances de demanda simultaneamente. O preço de fechamento do leilão é estabelecido no intervalo entre os lances de oferta e demanda segundo as regras estabelecidas a priori para o leilão.

Outro aspecto importante em um leilão é a forma de oferta dos lances. Esses são realizados em um leilão aberto (*open-outcry*) ou fechado (*sealed bid*). No leilão aberto, o preço do bem leiloado é determinado através de um processo dinâmico de estabelecimento do lance vencedor. Os lances são informações públicas de conhecimento dos participantes no leilão. O processo pode ocorrer de forma ascendente, leilão inglês, ou descendente, leilão holandês. Já no leilão fechado os lances são apresentados simultaneamente ao leiloeiro em envelopes fechados, não sendo de conhecimento dos participantes seus valores. Vence o participante que fizer o melhor lance.

Na classificação de preço de fechamento é analisado o valor pelo qual o bem leiloado é negociado. Esse valor pode ser uniforme ou discriminatório. No primeiro, todos os agentes vencedores pagam o mesmo preço independentemente do valor de seus lances em caso de leilão de demanda, ou recebem em caso de leilão de oferta. Os leilões de preço uniforme podem ser de primeiro ou segundo preço. Em ambos os leilões, vence o participante que fizer o melhor lance, porém, no primeiro o preço de fechamento corresponde ao lance vencedor, já para o segundo o preço de fechamento corresponde ao melhor lance perdedor. No leilão com preço discriminatório, leilão Yankee ou *pay as bid*, cada agente comprador paga o valor de seu lance no caso de leilão de demanda, ou o vendedor recebe o valor de seu lance no caso de leilão de oferta.

Os leilões holandeses são exemplos de leilões descendentes abertos: o leiloeiro começa a oferecer o bem a algum valor artificialmente alto, acima do valor esperado por qualquer participante. Em seguida, o leiloeiro diminui continuamente o preço de oferta do bem, até que algum participante faça uma oferta para o bem que é igual ao preço corrente de oferta. O bem é então alocado para quem fez essa oferta. Não existe uma estratégia dominante para os leilões holandeses (WOOLDRIDGE, 2009).

2.3.3 Aprendizagem

Segundo Weiss (1999), aprendizagem e inteligência estão intimamente ligados, pois um sistema capaz de aprender deve ser considerado inteligente, bem como em um sistema inteligente é esperado que seus agentes aprendam. A aprendizagem proporciona melhorias no comportamento futuro baseado em experiências passadas.

O processo de aprendizagem de um agente engloba todas as atividades que são executadas com a intenção de atingir um objetivo específico de aprendizagem. É comum dividir a aprendizagem de Sistema Multiagente em duas principais categorias (WEISS, 1999):

- Aprendizagem centralizada (ou isolada);
- Aprendizagem descentralizada (ou interativa).

A aprendizagem é considerada centralizada se o processo de aprendizagem é totalmente executado por um único agente e não requer interação com nenhum outro. Já ela é dita descentralizada se vários agentes estão envolvidos no mesmo processo de aprendizagem. Nesta última abordagem, pode-se classificar a aprendizagem quanto ao seu grau de descentralização considerando (WEISS, 1999):

- Sua distribuição: na qual um agente realiza a aprendizagem de forma sequencial;
- Seu paralelismo: no qual as atividades de aprendizagem são distribuídas e paralelizadas pelos agentes do Sistema Multiagente.

Além disso, outra forma de classificação é sobre o retorno da aprendizagem que pode ser classificado em (WEISS, 1999):

- Aprendizagem supervisionada: o retorno especifica a atividade desejada do aprendiz e o objetivo da aprendizagem é atingir a ação desejada;
- Aprendizagem por reforço: o retorno especifica a utilidade da atividade atual do aprendiz e o objetivo é maximizar essa utilidade;

- Aprendizagem não supervisionada: não há um retorno explícito e o objetivo é encontrar atividades úteis e desejadas por meio da tentativa e erro.

Nos problemas de aprendizagem por reforço, os agentes reativos e adaptativos têm que escolher a próxima ação a partir de um conjunto de ações possíveis para maximizar um reforço escalar ou *feedback* recebido após cada ação, considerando o que eles sabem sobre o estado atual. Esta abordagem promove a adaptação do agente, e faz a atualização dos valores de parâmetros chave, com o objetivo de melhorar as decisões do agente.

Uma das técnicas de aprendizagem por reforço é o Q-learning. Por meio dele, os agentes aprendem agir de forma ótima em um meio definido por transições de estados em que um estado futuro depende somente de seu estado atual, também chamado de domínio Markoviano (WATKINS; DAYAN, 1992). Este agente aprende qual a melhor alternativa de ação estimando qual ação imediata lhe promoverá um melhor retorno a longo prazo (STAINES, 2018). Sendo assim, para aprender, este agente melhora sucessivamente suas estimativas dos pares de estado e ações. Estas atualizações são dadas por (STAINES, 2018):

$$Q\left(s_t, a_t\right) \leftarrow \left(1-\alpha\right) Q\left(s_t, a_t\right) + \alpha \left[r\left(s_t, a_t\right) + \gamma \max_a \left\{Q\left(s_{t+1}, a_{t+1}\right)\right\}\right] \tag{2.2}$$

Onde:

- $Q\left(s_t, a_t\right)$: é a estimativa da ação a_t no estado s_t em determinado tempo t;
- $r\left(s_t, a_t\right)$: é a recompensa recebida por realizar a ação a_t no estado s_t em determinado tempo t;
- α: é a taxa de aprendizado;
- γ: é o fator de desconto que pondera a importância dos ganhos futuros frente aos ganhos presentes;
- $\max_a \left\{Q\left(s_{t+1}, a_{t+1}\right)\right\}$: é o maior valor de Q das ações disponíveis para a próxima transição de estados.

Desta forma, a matriz Q pode ser considerada como o conhecimento acumulado do agente, que serve como guia para a tomada de decisão sobre qual ação escolher. Em geral, quando o agente ainda não teve a oportunidade de aprender, o algoritmo é iniciado escolhendo-se aleatoriamente uma ação possível, dado o estado inicial (STAINES, 2018).

2.4 Problemas de Otimização Multiobjetivo

Um problema de otimização consiste em encontrar valores ótimos de uma função objetivo, mas em muitas aplicações as condições ótimas de um sistema envolvem não apenas

um, mas múltiplos objetivos. Estes muitas vezes são conflitantes, assim, a melhora em um objetivo pode causar a piora em outros (VALENCIA *et al.*, 2019). Sendo assim, em um Problema de Otimização Multiobjetivo todos as funções objetivo são analisadas em conjunto de modo a se obter uma solução compromissada que respeite suas restrições. Um Problema de Otimização Multiobjetivo apresenta uma formulação geral descrita pelas Equações **??** e 2.4:

$$\min_{\mathbf{x}} F(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^m \tag{2.3}$$

Sujeito a:

$$\Phi = \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0, & i = 1, ..., I, \\ h_j(\mathbf{x}) = 0, & j = 1, ..., J, \\ \mathbf{x} \in X \end{cases} \tag{2.4}$$

em que X é o domínio das variáveis.

Todas as funções objetivo são minimizadas simultaneamente, mas algumas delas são conflitantes. Esse tipo de problema tem muitas soluções de modo que ao resolvê-lo obtém-se não apenas uma, mas um conjunto de soluções. No âmbito de um Problema de Otimização Multiobjetivo, para avaliar as soluções obtidas adota-se o conceito de dominância. Uma solução x_1 domina outra solução x_2 se ao menos em uma função objetivo da primeira é melhor do que a da segunda e os valores das demais funções objetivo de x_1 não são piores do que aqueles de x_2, o que atende à Equação 2.5.

$$f_k(\mathbf{x_1}) \leq f_k(\mathbf{x_2}) \wedge f_l(\mathbf{x_1}) \neq f_l(\mathbf{x_2}) \tag{2.5}$$

Considerando o conjunto de soluções, a solução x^* é considerada uma solução Pareto-ótima se a Equação 2.6 é satisfeita.

$$\neg\, \exists\, \mathbf{x} \neq \mathbf{x}^* \wedge x \in \Phi |\, f_k(\mathbf{x}) \leq f_k(\mathbf{x}^*) \wedge f_l(\mathbf{x}) \neq f_l(\mathbf{x}^*), \qquad f : X \subset \mathbb{R}^n \rightarrow Y \subset \mathbb{R}^m \tag{2.6}$$

Todas as soluções Pareto-ótimas, também denominadas de soluções não dominadas ou soluções eficientes, formam o conjunto global de soluções Pareto ótimas. Além disso, a imagem do conjunto de soluções Pareto ótimas forma no espaço de objetivos a fronteira Pareto.

Ressalta-se que a cardinalidade da fronteira Pareto pode ser muito elevada ou mesmo infinita. Sendo assim, para aplicações práticas, normalmente determina-se um conjunto

finito e representativo de soluções eficientes. Para se obter um ponto da fronteira Pareto, o Problema de Otimização Multiobjetivo pode ser resolvido utilizando técnicas que o transforma em um Problema de Otimização Mono-objetivo (EMMERICH; DEUTZ, 2018).

De fato, essa estratégia reduz a complexidade de resolução de um Problema de Otimização Multiobjetivo (AWAD; KHANNA, 2015), mas como as funções objetivo podem ter diferentes unidades ou ordens de magnitude, elas precisam ser normalizadas antes de transformadas em um Problema de Otimização Mono-objetivo. As equações 2.7 e 2.8 apresentam exemplos de procedimentos para a normalização das funções objetivo.

$$\widehat{f_k(\mathbf{x})} = \frac{f_k(\mathbf{x})}{f_k^{max}}, \qquad f_k^{max} > 0 \tag{2.7}$$

$$\widehat{f_k(\mathbf{x})} = \frac{f_k(\mathbf{x}) - f_k^{min}}{f_k^{max} - f_k^{min}}, \qquad f_k^{min} > 0, \qquad f_k^{max} > 0 \tag{2.8}$$

Em que:

- f_k^{max} é o máximo valor da função objetivo f_k;
- f_k^{min} é o mínimo valor da função objetivo f_k.

O procedimento para transformar um Problema de Otimização Multiobjetivo em um Problema de Otimização Mono-objetivo pode ser realizado por meio de diversas abordagens abordagens (RAO, 2009; TAKAHASHI, 2007). Neste estudo serão detalhados os métodos a serem utilizados: Método da Soma Ponderada (MSP) e Método Épsilon Restrito.

2.4.1 Método da Soma Ponderada

O MSP consiste em transformar o Problema de Otimização Multiobjetivo original em um Problema de Otimização Mono-objetivo utilizando a soma ponderada das funções objetivo. Para a formulação geral, o resultado do problema é apresentado nas equações 2.9 a 2.12.

$$\min_x \sum_{k=1}^{m} w_k f_k(\mathbf{x}) \tag{2.9}$$

Sujeito a:

$$\Phi = \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0, & i = 1, ..., I, \\ h_j(\mathbf{x}) = 0, & j = 1, ..., J, \\ \mathbf{x} \in X \end{cases} \tag{2.10}$$

em que X é o domínio das variáveis.

Com:

$$\sum_{k=1}^{m} w_k = 1, \qquad w_k \geqslant 0 \tag{2.11}$$

As principais vantagens desse método são sua simplicidade de uso e o fato de os parâmetros requeridos serem iguais ao numero de funções objetivo. Entretanto, a aplicabilidade do MSP é limitada a situações em que o Problema de Otimização Multiobjetivo original possui fronteira Pareto convexa, do contrário este método pode não ser capaz de gerar todas as soluções Pareto ótimas (RYU *et al.*, 2009). Além disso, em Pike-Burke () é destacado que as soluções do MSP são altamente dependentes dos vetores de pesos e que por meio deste método podem ser obtidas soluções eficientes fracas.

É importante ressaltar que se este método pode ser utilizado na obtenção de apenas uma determinada solução Pareto ótima, considerando-se que as preferências do tomador de decisão foram incorporadas nos pesos (w_k) adotados. Por outro lado, o MSP pode ser empregado de maneira iterativa de modo a se obter uma aproximação do conjunto Pareto ótimo. Essa abordagem requer a solução do problema de otimização inúmeras vezes, sendo que em cada uma utiliza-se um vetor de pesos (w_k) diferente (MARLER; ARORA, 2004). Normalmente este procedimento resulta em diferentes soluções Pareto ótimas.

2.4.2 Épsilon Restrito

O método Épsilon Restrito consiste em resolver o problema de otimização com relação a uma de suas funções objetivo, Equação 2.12., enquanto as demais são transformadas em restrições. Determina-se um valor épsilon (ϵ_k) para cada função objetivo a ser transformada em restrição, como apresentado na Equação 2.13. A determinação da faixa de valores de ϵ_k pode ser feita obtendo-se os melhores e piores valores de cada função objetivo resolvendo-se o problema como um Problema de Otimização Monobjetivo para cada uma de suas funções objetivo (TAKAHASHI, 2007).

Em seguida, resolve-se iterativamente os Problemas de Otimização Monobjetivo, para cada função objetivo mantida e variando-se os valores de épsilon de cada função objetivo transformada em restrição. Com esta abordagem é determinada a aproximação da fronteira Pareto considerando-se os valores de todas as funções objetivo originais obtidas por meio de cada uma das soluções ótimas encontradas dos Problemas de Otimização Monobjetivo. Este método apresenta como principal vantagem a possibilidade de se obter soluções Pareto ótimas inclusive para trechos não convexos de sua fronteira (TAKAHASHI,

2007).

$$\min_{x} f_l(\mathbf{x}) \tag{2.12}$$

Sujeito a:

$$\Phi = \begin{cases} g_i(\mathbf{x}) \leq 0, & i = 1, ..., I, \\ h_j(\mathbf{x}) = 0, & j = 1, ..., J, \\ f_k(\mathbf{x}) \leq \epsilon_k & k = 1, ..., m \quad (k \neq l) \\ & \mathbf{x} \in X \end{cases} \tag{2.13}$$

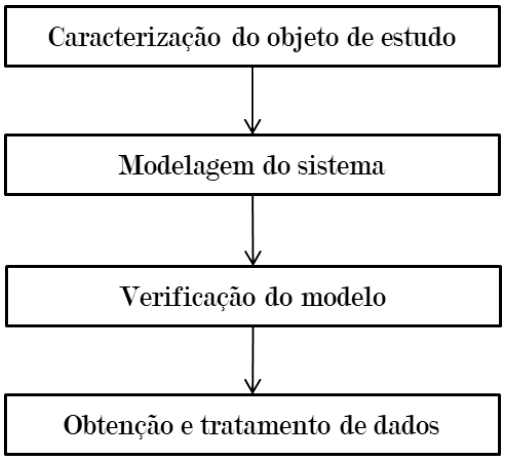
em que X é o domínio das variáveis.

3 Metodologia

Neste capítulo serão abordadas todas as etapas do estudo proposto, com o objetivo de evidenciar o processo metodológico utilizado. Conforme a Figura 3.1, o estudo se inicia pela caracterização do objeto de estudo, que engloba as características do setor energético brasileiro quanto à realização de Leilões de Energia Nova para a formação do parque gerador. Nesta etapa serão definidos os pontos relevantes que permitem delinear o problema abordado neste trabalho.

Como segunda etapa há a modelagem do sistema. Nela serão abordadas a arquitetura proposta do Sistema Multiagente, os subssitemas existentes, as características e os objetivos dos agentes, bem como o funcionamento de cada uma dessas partes do modelo. A próxima etapa se dedica à verificação que é basicamente a depuração do sistema, na qual garante-se que o modelo construído está funcionando corretamente (NIAZI *et al.*, 2017). Por fim, tem-se a etapa de obtenção e tratamento de dados, na qual serão evidenciados os dados necessários a realização do estudo de caso real, bem como seu processo de obtenção. Agora, segue-se o detalhamento das etapas previamente descritas.

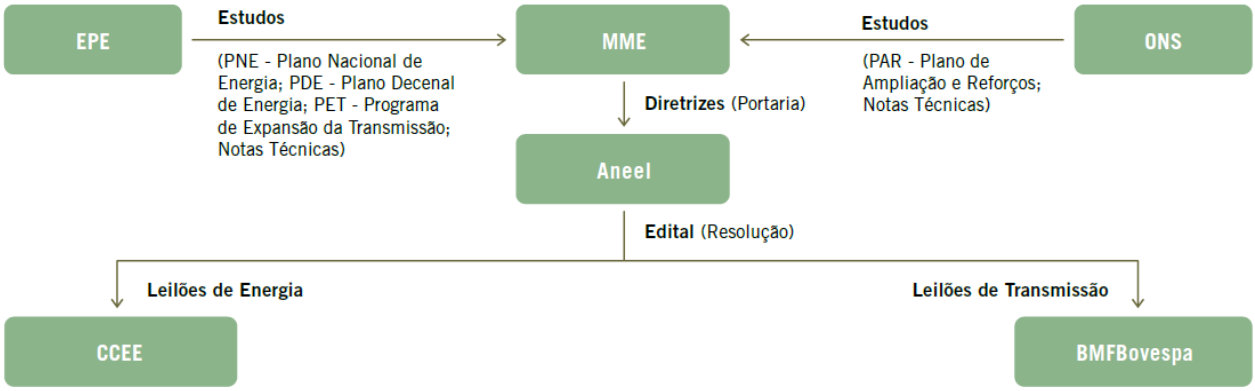
FIGURA 3.1 – Etapas do estudo



3.1 Caracterização do Objeto de Estudo

Este estudo tem como objetivo utilizar uma abordagem Multiagente para garantir a implantação do parque gerador elétrico desejado por meio de Leilões de Energia Nova. Sendo assim, o objeto de estudo em questão é o mercado de energia. Conforme a Figura 3.2, pode-se perceber que por meio das demandas de energia elétrica submetidas pelas distribuidoras e estudos provenientes da EPE e da ONS, o MME estabelece as diretrizes para cada Leilão de Energia Nova utilizando-se de portarias. A partir deste ponto, a ANEEL elabora o edital de cada leilão, no qual devem constar os produtos e preços iniciais dos mesmos, bem como informações sobre requisitos da ocorrência dos leilões. Assim, é delegada à CCEE a execução dos Leilões de Energia Nova.

FIGURA 3.2 – Governaça nos leilões de energia



Fonte: (IAB, 2012)

A definição da parcela do parque gerador a ser implantado pelos leilões realizados pela CCEE fica a cargo do MME. A ANEEL tem como papel a definição de especificidades do edital, já à CCEE compete as definições quanto à execução dos leilões. Para tal, a empresa disponibiliza em seu site o edital (ANEEL, 2018a), o Detalhamento da Sistemática (CCEE, 2018a) e o Manual da Sistemática (CCEE, 2018b). O primeiro refere-se a informações da data de ocorrência do leilão, dos preços iniciais, dos requisitos para a inscrição e habilitação do leilão e questões contratuais da venda de energia. O segundo documento possui todo o glossário e detalhamento da realização do leilão por parte da CCEE, já o último dedica-se a explicar o funcionamento do sistema eletrônico utilizado para a realização do leilão.

Como já dito, as publicações de Brasil (2016) e Brasil (2017) trouxeram mudanças na sistemática dos Leilões de Energia Nova. Desde então, ainda não houve a realização de leilões com empreendimentos caso 1. Sendo assim, a primeira fase da sistemática descrita em 2.2.1 ainda não foi utilizada. Além disso, a energia dos empreendimentos caso 1 pode ser comercializada como produto quantidade na segunda fase do leilão. Conforme CCEE (2018a), se não houver empreendimento hidrelétrico caso 1, o leilão terá início já

na segunda fase.

Como o objetivo deste estudo é criar uma ferramenta que auxilie o atingimento do parque gerador de eletricidade desejado por meio da alocação e comercialização de seus componentes nos Leilões de Energia Nova, temos que esses podem ser vistos como os produtos comercializados nestes leilões. Dessa forma, este trabalho considerou relevante a análise somente da sistemática do leilão na sua segunda fase, já que é nela que os produtos de energia são comercializados. A primeira fase, além de ainda não ter sido usada em sua nova sistemática, é dedicada somente aos empreendimentos caso 1, portanto, não apresenta grande contribuição para este estudo.

A sistemática dos Leilões de Energia Nova para os produtos de energia por disponibilidade e por quantidade, já abordada na Seção 2.2.1, consiste em:

1. Etapa inicial: esse é um leilão de preço fechado com um único lance de preço e lotes de energia. Nesta etapa, os concorrentes só tem como informações o tempo para o lance, o preço inicial pago pela energia e especificidades técnicas dos produtos definidos nas documentações do leilão, que foram previamente disponibilizadas na página eletrônica da CCEE. Vencem os participantes que derem os menores lances e que a soma de seus lotes ofertados não ultrapassem a capacidade remanescente do SIN. Em caso de empate serão considerados a maior quantidade de lotes ofertados e a ordem cronológica do lance como critérios de desempate.

2. Etapa contínua: esse é um leilão de preços decrescentes. Nele os concorrentes devem fazer seus lances de preços para os lotes ofertados na etapa anterior. Assim, dentro do tempo de lance determinado pelo leiloeiro, qualquer participante pode fazer um lance com valor menor que o preço corrente ou que o seu lance anterior. Assim que é feito um lance, o leiloeiro atualiza o preço corrente e a classificação dos concorrentes no leilão com relação ao preço crescente de lance. Nesta atualização é apontando se os lotes de energia de cada participante estão sendo atendidos ou não conforme sua posição na classificação e conforme a quantidade demandada de energia. Esta etapa termina quando o tempo de lance finalizar porque não houve lance ou até a duração do leilão.

Neste ponto fica evidente que o Leilão de Energia Nova para produtos de quantidade e disponibilidade é constituído de dois leilões. Na etapa inicial tem-se um leilão de oferta fechado de lance único. Já na etapa contínua tem-se um leilão de oferta fechado de preços decrescentes. Em todos os casos os vencedores são aqueles em que os lances são os menores valores de preço.

A determinação dos preços iniciais e a concorrência são fatores chave de sucesso para os leilões. Apesar de ser interessante para o governo comprar energia elétrica a preços

menores, caso sejam estabelecidos preços iniciais muito baixos, poucos concorrentes se interessarão em participar do leilão. Assim, haverá pouca concorrência ou até a inexistência de participantes para o leilão, provocando o cancelamento do mesmo.

Como já abordado na Seção 2.2, os Leilões de Energia Nova podem ser A-3, A-4, A-5 ou A-6. Conforme a Tabela 3.1, pode-se perceber que até o ano de 2016 foram publicados vinte e três editais de Leilão de Energia Nova, sendo que o 9º e o 14º leilões foram cancelados após publicação do edital. Já o 24º Leilão de Energia Nova, que ocorreria no ano de 2017, foi cancelado antes mesmo de serem feitas suas documentações, por isso o mesmo não possui data na Tabela 3.1. Em geral, foram realizados um leilão do tipo A-3 e outro do tipo A-5 por ano.

TABELA 3.1 – Leilões de Energia Nova já realizados pela CCEE

Leilão de Energia Nova	**Data de realização**	**Tipo**
1º	16/12/2005	A-5
2º	29/06/2006	A-3
3º	10/10/2006	A-5
4º	26/07/2007	A-3
5º	16/10/2007	A-5
6º	17/09/2008	A-3
7º	30/09/2008	A-5
8º	27/08/2009	A-3
9º*	21/12/2009	A-5
10º	30/07/2010	A-5
11º	17/12/2010	A-5
12º	17/08/2011	A-3
13º	20/12/2011	A-5
14º*	12/12/2012	A-3
15º	14/12/2012	A-5
16º	29/08/2013	A-5
17º	18/11/2013	A-3
18º	13/12/2013	A-5
19º	06/06/2014	A-3
20º	28/11/2014	A-5
21º	30/04/2015	A-5
22º	21/08/2016	A-3
23º	29/04/2016	A-5
24º*	-	A-3

Fonte: (CCEE, 2019)
* Leilões cancelados pela CCEE

A quantidade de projetos habilitados para concorrer ao leilão varia muito conforme o edital. Em 2016 um leilão A-5 contou com 802 projetos habilitados, já em 2015 esse mesmo tipo de leilão teve 50 projetos habilitados (CCEE, 2019). Esta variação pode ser atribuída ao preço inicial e determinações contratuais que mudam a cada edital.

Com a entrada em vigor de Brasil (2016) e Brasil (2017), os Leilões de Energia Nova ganharam duas novas modalidades: A-4 e A-6. Em Brasil (2017) é determinado que em cada ano deve ocorrer pelo menos um leilão A-3 ou A-4 e pelo menos outro leilão A-5 ou A-6. Apesar de haver a possibilidade de realização de qualquer um dos tipos de leilões previamente citados, o que se tem observado na prática é a ocorrência somente de leilões A-4 e A-6 após a entrada em vigor destas legislações, conforme apresentado na Tabela 3.2. Apesar de não haver informação formal dos órgãos competentes, pode-se entender que a troca de um leilão A-3 por um A-4 de um leilão A-5 por um A-6 permitiu maior tempo para implementação e entrada em operação das usinas vencedoras.

TABELA 3.2 – Leilões de Energia Nova já realizados pela CCEE

Leilão de Energia Nova	**Data de realização**	**Tipo**
25º	18/12/2017	A-4
26º	20/12/2017	A-6
27º	04/04/2018	A-4
28º	31/08/2018	A-6
29º	28/06/2019	A-4

Fonte: (CCEE, 2019)

Em CCEE (2019) estão disponíveis as planilhas de vencedores dos leilões, conforme pode ser visto no Anexo A. Nele é apresentado o resultado do vigésimo terceiro Leilão de Energia Nova, realizado em 29 de abril de 2016, para que os empreendimentos entrassem em operação em 1º de janeiro de 2021.

Após a caracterização do objeto de estudo e juntamente com as colocações feitas por Hochstetler (2013) e IAB (2012), é notória a necessidade de uma ferramenta para minimizar os riscos de atraso de entrada em operação das usinas produtoras de energia elétrica e para possibilitar a análise dos aspectos que influenciam na queda do preço pago pela energia. Então, a próxima seção apresentará a arquitetura proposta para a abordagem de Sistema Multiagente deste objeto de estudo.

3.2 Modelagem do Sistema

A partir do objeto de estudo apresentado na Seção 3.1, esta seção descreverá as premissas adotadas por este trabalho e a arquitetura proposta para a abordagem Multiagente. Para que a modelagem deste sistema fosse viável computacionalmente e representasse de forma aceitável o objeto de estudo, foram consideradas as premissas listadas abaixo e justificadas a seguir.

1. A configuração desejada do parque gerador de eletricidade é conhecida;
2. Para a realização de cada um dos tipos dos Leilões de Energia Nova há um risco associado à comercialização de energia de certo tipo de fonte;
3. Os leilões serão feitos para os produtos de quantidade e disponibilidade;
4. A CCEE tem diretrizes a respeito da quantidade de energia que deve comercializar em cada um de seus produtos, chamada de quantidade demandada;
5. Cada concorrente está interessado em somente um produto de disponibilidade ou quantidade, correspondente ao seu empreendimento;
6. Cada concorrente possui uma remuneração mínima aceitável que pode variar conforme o andamento do leilão;
7. Cada concorrente tem o direito de não realizar lances no leilão, quando o valor de seu lance for maior que o preço corrente menos o decremento.

A configuração do parque gerador de eletricidade é composta de várias parcelas denominadas componentes, as quais possuem as informações de quantidade de capacidade instalada, fonte e ano do início de operação. Na prática, o dimensionamento da energia a ser comercializada nos Leilões de Energia Nova tem sua origem nos pedidos de demanda realizados pelas distribuidoras ao MME, o qual processa essas informações e determina os produtos dos leilões. Então, para este estudo pressupõe-se que a energia a ser comercializada já tem definida sua quantidade, fonte e data de início de operação.

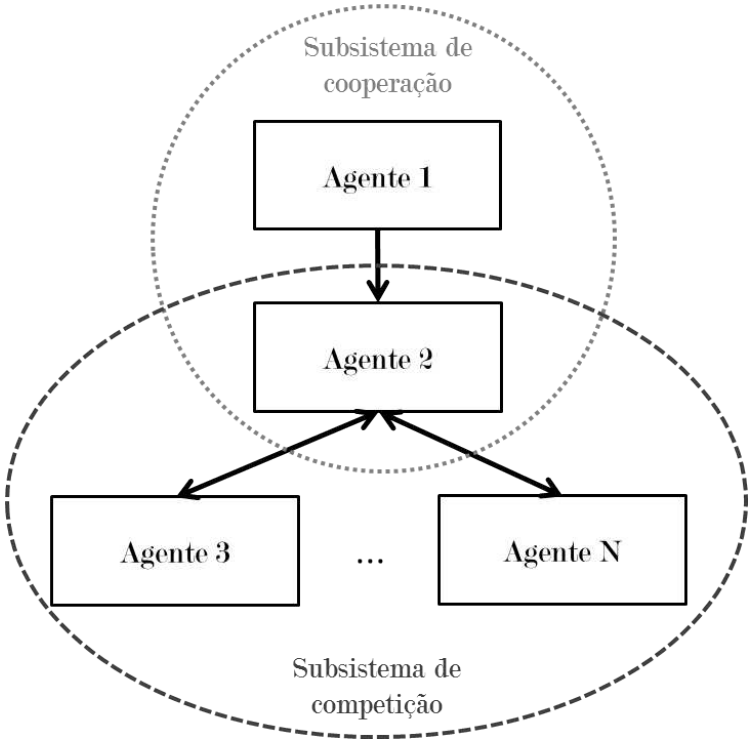
Já em relação ao risco, neste ponto a tentativa é de minimizar a probabilidade de atrasos nas entregas dos produtos, um problema comum como apontado por IAB (2012), Hochstetler (2013) e ANEEL (2018b). Nota-se que o tempo de construção e entrada em operação de uma usina de geração de energia tem relação direta com o tipo de fonte que utiliza e sua capacidade de geração. Portanto, esse risco seria um dos parâmetros balizadores para que possam ser tomadas decisões de alocações mais coerentes e com menor probabilidade de atrasos.

Apesar das diretrizes dos Leilões de Energia Nova serem estabelecidas pelo MME e o edital pela ANEEL, segundo IAB (2012), a CCEE pode diminuir a demanda de energia para forçar a redução do preço pago pela mesma. Ao se inscrever para participar do leilão, o concorrente está interessado em um dos produtos de disponibilidade ou quantidade. Esse fato é consequência da organização dos produtos, que já têm a fonte de energia determinados. Assim, conforme ANEEL (2016), é vetada a disputa de um produto de quantidade de energia hidrelétrica para o produto disponibilidade de termoelétrica a gás natural, por exemplo.

Para os concorrentes dos produtos de disponibilidade ou quantidade, pressupõe-se que os mesmos têm conhecimento de seus empreendimentos e que realizaram estudos econômicos que os possibilitam realizar estimativas do seu custo de energia e o lucro mínimo que desejam. Por fim, qualquer concorrente tem a opção de não realizar lance caso o preço corrente não seja vantajoso para seu negócio. Sendo assim, ele não venderá sua energia, podendo concorrer em um próximo leilão.

Dado as premissas deste estudo e suas justificativas, a modelagem do sistema foi baseada nas principais características do objeto de estudo e nos objetivos deste trabalho. Na Figura 3.3 é dada a arquitetura proposta, com a representação baseada na arquitetura *Artificial Economy Multi-agent System* (*AEMAS*), proposta em Wooldridge *et al.* (1995). Nela o sistema multiagente é composto por:

FIGURA 3.3 – Arquitetura do sistema proposto



- Agente 1: esse agente engloba funções principalmente do MME e da ANEEL. Ele

é responsável por definir a composição dos Leilões de Energia Nova, minimizando o risco de atraso na implementação do novo empreendimento, o número de usinas a serem implantadas e a antecipação desnecessária da comercialização de energia. Ele aloca os componentes do parque gerador (quantidade de potência instalada, fonte de geração e data de início de operação) nos tipos de leilões A-3, A-4, A-5 e A-6 como produtos de quantidade ou disponibilidade.

- Agente 2: esse agente assume as responsabilidades da CCEE. Ele pode ser definido como o leiloeiro. Sua função é coordenar o leilão, definir os vencedores e identificar quais aspectos influenciam no preço final pago pela energia.

- Agente 3 a N: esses agentes são os participantes dos Leilões de Energia Nova, que têm suas inscrições habilitadas. Cada um escolhe um produto para concorrer. Na sua estratégia, eles devem realizar seus lances de preço e/ou de lotes de energia. Podem optar pela estratégia: de valorar seu lance com base em seu custo e margem mínima de lucro, de valorar seu lance pelo preço corrente menos o decremento ou utilizar a média das duas estratégias anteriores. No caso do agente possuir a habilidade de aprender, ele deve escolher a melhor dessas três estratégias de acordo com seu aprendizado.

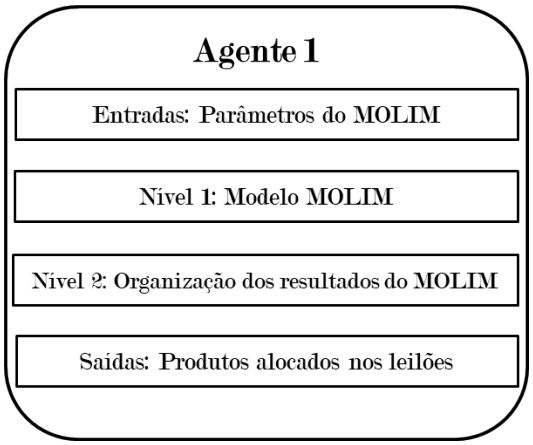
Os agentes 1 e 2 possuem uma relação de cooperação. O primeiro define os produtos dos leilões, já o segundo determina seus preços iniciais e realiza os leilões. Dessa maneira, o agente 2 deverá tomar decisões e realizar ações coerentes com o plano apresentado pelo agente 1, para que o objetivo global do Sistema Multiagente de atingir a configuração desejada do parque gerador de eletricidade seja alcançada. Dessa maneira, esses agentes formam o subsistema de cooperação, apresentado na Figura 3.3.

Já os agentes de 2 até N formam um subsistema de competição, também apresentado na Figura 3.3, no qual o agente 2 é o leiloeiro e os agentes de 3 a N são os participantes. Naturalmente, a relação de negociação desses agentes será modelada por leilões, seguindo as regras dos Leilões de Energia Nova. Nas próximas subseções, cada agente será detalhado, bem como seu funcionamento.

3.2.1 Agente 1

Para o agente 1, planejador dos leilões e representado na Figura 3.4, é necessária a alocação da composição do parque gerador de eletricidade desejado (quantidade de capacidade instalada, fonte de geração e data de início de operação) nos Leilões de Energia Nova, de modo a minimizar a probabilidade de insucesso, a quantidade de usinas e a antecipação desnecessária da comercialização de algum produto. A seguir, cada nível deste agente será detalhado, para melhor compreensão de seu funcionamento.

FIGURA 3.4 – Estrutura do agente 1



3.2.1.1 Entradas

Para a determinação da composição dos leilões, o agente 1 necessita de informações como a composição desejada do parque gerador de eletricidade ao longo do tempo, tempo e risco de implementação dos empreendimentos, capacidade mínima e máxima da usina de cada fonte. Como este trabalho esforça-se em realizar um estudo de caso, os dados serão baseados em fontes oficiais e sua obtenção será detalhada no item 3.4. De posse destes dados, os mesmos serão entradas do agente 1 e funcionarão como parâmetros para a modelagem do primeiro nível.

3.2.1.2 Nível 1

No nível 1 de decisão o agente deverá determinar os produtos a serem comercializados nos diversos leilões ao longo dos anos com base na configuração desejada do parque gerador de eletricidade. Ele realiza esta tarefa visando minimizar os riscos de atrasos dos empreendimentos, quantidade de empreendimentos de cada fonte e a antecipação desnecessária da comercialização dos produtos nos leilões.

Para este nível de planejamento do agente 1 optou-se por uma modelagem matemática utilizando um modelo Multiobjetivo Linear Inteira Misto (MOLIM). Dessa forma tem-se como conjuntos deste modelo:

- J: conjunto dos tipos de leilões, sendo $j \in J$;
- I: conjunto dos tipos de fonte de energia, sendo $i \in I$;
- K: conjunto dos anos de entrada em operação das usinas, sendo $k \in K$.

Como variáveis deste modelo tem-se:

- x_{ijk}: variável que indica a porcentagem de capacidade instalada da fonte i prevista para o ano k que será alocada em um leilão do tipo j;
- y_{ijk}: variável que toma o valor 1 se a capacidade instalada da fonte i prevista para o ano k será alocada em um leilão do tipo j, 0 senão;
- n_{ik}: variável que determina o número de usinas de energia elétrica da fonte i necessárias para atender a demanda do ano k.

Como parâmetros do modelo matemático tem-se:

- D_{ik}: demanda de capacidade instalada no ano k da fonte i (kW);
- V_i: tempo de implementação de uma usina de fonte i por unidade de potência (anos/kW);
- T_k: tempo restante até o ano k (anos);
- H_j: tempo máximo para a realização do empreendimento no leilão do tipo j (anos);
- R_{ij}: risco do empreendimento de fonte i não ocorrer no tempo limite previsto pelo leilão do tipo j (adimensional);
- L_i^{min}: capacidade instalada mínima de uma usina da fonte i (kW);
- L_i^{max}: capacidade instalada máxima de uma usina da fonte i (kW).

O MOLIM é composto também por três objetivos. O primeiro objetivo, Equação 3.1, é para aumentar as chances do cumprimento dos prazos de entrada em operação, minimizando o risco de atrasos. Já o segundo, Equação 3.2, surge da necessidade de limitar a quantidade de usinas implementadas, já que quanto maior a quantidade de usinas, maior a quantidade de vencedores de um leilão e, provavelmente, maior será o preço médio pago pela energia, já que os vencedores são ordenados conforme a ordem crescente de seus lances. Além disso, ao minimizar a quantidade de usinas de cada fonte retrata-se o pior caso para atrasos, pois usinas de maior potência demandam mais tempo de construção.

O terceiro objetivo, Equação 3.3, tenta evitar a antecipação desnecessária da comercialização de um produto, tendo em vista que um grande período de tempo auscultado entre a comercialização de um produto e o começo de sua remuneração pode diminuir a atratividade do negócio. Dessa forma, dado que há tempo hábil para a implementação

da usina, seu produto deve ser comercializado no momento mais próximo possível da sua entrada em operação.

$$\min_{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{n}} \sum_{ijk} R_{ij} y_{ijk} \tag{3.1}$$

$$\min_{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{n}} \sum_{ik} n_{ik} \tag{3.2}$$

$$\min_{\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{n}} \sum_{ijk} (T_k - H_j) y_{ijk} \tag{3.3}$$

Já as restrições do modelo são:

$$x_{ijk} V_i D_{ik} \leq T_k n_{ik} \quad \forall i, j, k \tag{3.4}$$

$$\sum_j x_{ijk} = 1 \quad \forall i, k, \quad D_{ik} > 0 \tag{3.5}$$

$$H_j y_{ijk} \leq T_k \quad \forall i, j, k \tag{3.6}$$

$$D_{ik} \geq L_i^{min} n_{ik} \quad \forall i, k \tag{3.7}$$

$$D_{ik} \leq L_i^{max} n_{ik} \quad \forall i, k \tag{3.8}$$

$$\sum_i x_{i1k} + \sum_i x_{i2k} \geq 1 \quad \forall k \tag{3.9}$$

$$\sum_i x_{i3k} + \sum_i x_{i4k} \geq 1 \quad \forall k \in \{3, 4\} \tag{3.10}$$

$$x_{ijk} \leq y_{ijk} \quad \forall i, j, k \tag{3.11}$$

$$x_{ijk} \leq n_{ik} \quad \forall i, j, k \tag{3.12}$$

$$x_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j, k \tag{3.13}$$

$$x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i, j, k \tag{3.14}$$

$$y_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k \tag{3.15}$$

$$n_{ik} \in \mathbb{N} \quad \forall i, k \tag{3.16}$$

A primeira família de restrições, Equação 3.4, refere-se a obediência do tempo médio de implantação e entrada de operação de uma usina, com relação ao tempo disponibilizado pelo tipo de leilão, considerando que pode haver n_i empreendimentos com a fonte i. Já o segundo conjunto de restrições, Equação 3.5, garante a alocação completa de determinado componente do parque gerador de eletricidade mesmo que separados em vários tipos de leilão.

As restrições representadas pela Equação 3.6 diz respeito à coerência de ocorrência dos diferentes tipos de leilões ao longo do tempo, *e.g.*, o leilão A-5 para uma usina que deve entrar em operação em 2025 deve ocorrer somente em 2020. As duas próximas famílias de restrições, Equações 3.7 e 3.8, garantem que cada usina responsável por um certo componente do parque gerador obedeça a um limite mínimo e máximo de capacidade instalada, respectivamente. As restrições 3.9 e 3.10 atendem a Brasil (2017), o qual determina que para cada ano, havendo demanda, devem ocorrer um leilão A-3 ou A-4, e um outro leilão A-5 ou A-6.

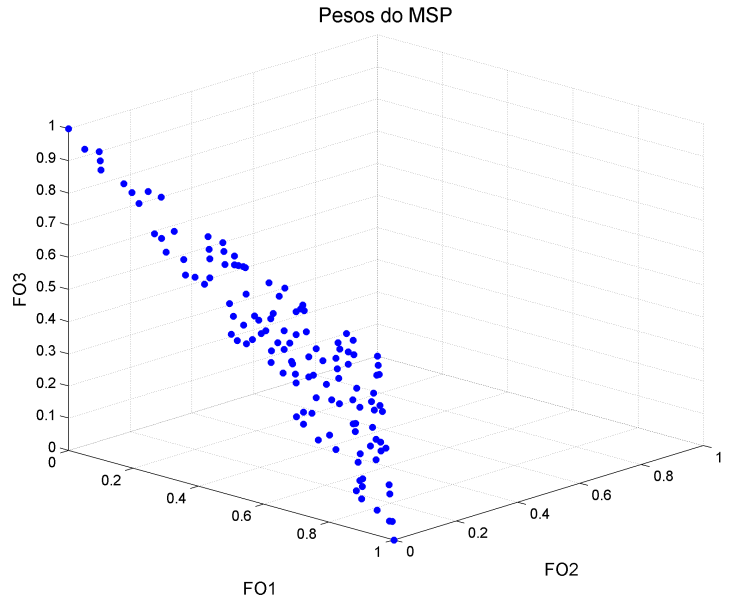
As restrições 3.11 e 3.12 definem a relação entre a variável contínua x_{ijk} com as variáveis y_{ijk} e n_{ik}, respectivamente. A primeira família dessas restrições define que mesmo alocando parcialmente um dos componentes em algum leilão, a variável binária y_{ijk} se torna igual a 1 para alocar o risco na função objetivo descrita pela Equação 3.1. A existência de x_{ijk} permite que um componente do parque gerador de eletricidade seja fracionado e comercializado em mais de um tipo de leilão. Já a segunda família de restrições, Equação 3.12, assegura que todo componente alocado terá pelo menos uma usina correspondente contabilizada. As restrições restantes definem o domínio das variáveis.

Para a resolução do MOLIM será aplicado iterativamente o Método da Soma Ponderada (MSP) com a normalização dos objetivos utilizando-se da Equação 2.8 para transformá-lo em mono-objetivo. Apesar de ser um método que não gera soluções de trechos não convexos da fronteira Pareto, ele foi escolhido tendo em vista que o mesmo mantém a linearidade do modelo MOLIM. A Figura 3.5 apresenta um gráfico utilizado para evidenciar que as combinações de pesos a serem utilizados estão distribuídas ao longo de todo o intervalo de valores permitidos.

Utilizou-se 135 vetores de pesos para obtenção da aproximação da fronteira Pareto, sendo que em todas elas a soma dos pesos é igual a 1. Ressalta-se que três combinações foram definidas de modo a representar casos extremos, *i.e.*, cada uma delas possui um

aspecto com peso unitário e peso nulo para os demais. Com o MSP é possível obter a aproximação da fronteira Pareto do MOLIM. Adicionalmente, será utilizado o método do Épsilon restrito, tendo em vista que este método obtém soluções em trechos não convexos de funções objetivo. Para a determinação da faixa de valores de ϵ_k, obteve-se os melhores e piores valores de cada função objetivo resolvendo-se o modelo MOLIM para cada uma de suas funções objetivo. Ambos os métodos de escalarização apresentados, MSP e Épsilon restrito, podem apresentar soluções eficientes fracas.

FIGURA 3.5 – Valores de pesos utilizados na abordagem iterativa do MSP



Esse modelo tem como resposta os produtos de disponibilidade e quantidade dos leilões A-3, A-4, A-5 e A-6 a serem comercializados nos próximos anos. A partir deste momento, o agente 1 passa para o próximo nível de decisão, no qual ele se interessa somente pelos leilões que devem ocorrer na data mais próxima.

3.2.1.3 Nível 2

Este nível do agente 1 tem como objetivo refinar as informações e complementá-las para que as diretrizes dos Leilões de Energia Nova sejam repassadas ao agente 2. Sendo assim, neste nível o agente tem como ação separar os dados de produtos do próximo leilão.

3.2.1.4 Saídas

Após a realização destas ações, as diretrizes dos leilões já estão determinadas. Portanto, agora o agente 1 repassará ao agente 2 a configuração do próximo leilão com a

definição de seus produtos. Neste momento as ações do agente 1 se encerram para que seja realizada a execução dos leilões.

3.2.2 Agente 2

Após a definição das diretrizes dos leilões pelo agente 1, o agente 2 estará apto à execução dos leilões. Nota-se que este agente, representado na Figura 3.6 tem como objetivo realizar os leilões de forma a identificar quais aspectos influenciam no preço final pago pela energia.

Além das ações já ditas anteriormente, ele será responsável por configurar os parâmetros do leilão, atualizar o preço corrente e determinar os vencedores de cada etapa. Como feito para o agente anterior, a seguir serão detalhados cada nível deste agente, para melhor compreensão de seu funcionamento.

FIGURA 3.6 – Estrutura do agente 2

3.2.2.1 Entradas

As entradas do agente 2 são as informações repassadas, *i.e.* saídas, do agente 1 e os dados de preço inicial dos produtos.

3.2.2.2 Nível 1

Para executar o leilão, primeiramente, o agente 2 deve configurar a execução do leilão. Esse agente deve determinar:

- O preço inicial de cada produto;
- O decremento mínimo de desconto dos lances;

- A capacidade remanescente do SIN;
- A quantidade de lotes demandada;
- A estratégia utilizada por cada agente de 3 a N.

O preço inicial dos produtos será baseado nas documentações existentes dos leilões. Entretanto, os valores de decremento mínimo, a capacidade remanescente do SIN e a quantidade de lotes demandada não são divulgadas. Na prática, estas três informações são colocadas no sistema por um representante do MME pouco antes da ocorrência do Leilão de Energia Nova. Tendo em vista essa limitação, neste estudo os valores desses parâmetros serão estimados baseando-se nas saídas do agente 1 e em uma calibração a partir de informações de um leilão real. Esses procedimentos serão detalhados posteriormente na seção 3.4.6.

3.2.2.3 Nível 2

Neste nível de decisão, o agente 2 será responsável pela realização e monitoramento do leilão. Dessa forma, ele será o responsável por atualizar o preço corrente, a classificação dos proponentes conforme a ordem crescente do preço de lance e determinar se os lotes de cada concorrente estão atendidos ou não, conforme sua classificação e a capacidade remanescente do SIN ou a quantidade de lotes demandada. Para a execução do leilão, é necessária a participação do agente 2 e dos concorrentes, agentes de 3 a N. Esses últimos serão detalhados no item 3.2.3. Então, o leilão consiste em:

1. Etapa inicial:
   (a) Agente 2 publica o preço inicial que se torna o primeiro preço corrente juntamente com o tempo de lance;
   (b) Agentes de 3 a N fazem seu lance único de preço pago pela energia e quantidade ofertada de lotes;
   (c) Após o término do tempo de lance, o agente 2 classifica os agentes de 3 a N conforme a ordem crescente do preço de lance;
   (d) Agente 2 determina como vencedores os primeiros colocados que tem a quantidade de lotes correspondente à capacidade remanescente do SIN. Em caso de empate, o agente 2 deve analisar a maior quantidade de lotes ofertada e a ordem cronológica do lance, respectivamente;
   (e) Agente 2 atualiza o preço corrente.
2. Etapa contínua:

(a) Agente 2 determina o tempo de lance;

(b) Um dos agentes de 3 a N realiza seu lance;

(c) A cada realização de lance, o agente 2 atualiza a classificação dos agentes de 3 a N conforme a ordem crescente de seu último lance aceito;

(d) Agente 2 determina quais dos agentes de 3 a N terão seus lotes atendidos de acordo com a sua classificação e a quantidade demandada de lotes;

(e) Agente 2 atualiza o preço corrente como sendo o valor do último lance do último agente de 3 a N que está com seus lotes no estado de atendido;

(f) Caso haja lance e ainda existir tempo restante para o leilão, o agente 2 volta ao passo (a), caso contrário o leilão é finalizado.

3.2.2.4 Nível 3

Ao finalizar um leilão, o agente 2 considerará como vencedores os agentes de 3 a N que estão com seus lotes ofertados no estado atendido. Sendo assim, o agente 2 identificará:

- Quais são os agentes vencedores do leilão;
- O preço médio a ser pago pela energia dos agentes vencedores;
- A queda percentual entre o preço inicial e o preço médio a ser pago pela energia;
- A queda percentual entre o preço inicial e o último preço corrente.

Para avaliar adequadamente os resultados do leilão, os Níveis 2 e 3 serão executados diversas vezes para uma mesma configuração de modo a se obter estatísticas dos dados mencionados anteriormente. Como o objetivo do subsistema de competição deste estudo é verificar quais são os aspectos que influenciam no preço final pago pela energia, deve-se retornar ao Nível 1 para simular uma nova configuração do leilão.

3.2.2.5 Saídas

Para cada configuração do Nível 1 deste agente, as saídas são as informações de:

- Frequência com que cada agente de 3 a N venceu os leilões;
- Média e desvio padrão amostral do preço médio a ser pago pela energia dos agentes vencedores;
- Média e desvio padrão amostral da queda percentual entre o preço inicial e o preço médio a ser pago pela energia;

- Média e desvio padrão amostral da queda percentual entre o preço inicial e o último preço corrente.

Esses resultados permitirão analisar como as diferentes configurações realizadas no Nível 1 influenciam na formação dos preços pagos pela energia.

3.2.3 Agente de 3 a N

Os agentes de 3 a N são os participantes do leilão. Eles têm como objetivo ter sua oferta selecionada a um preço que lhe proporcione lucro. Sendo assim, esses são agentes auto-interessados e:

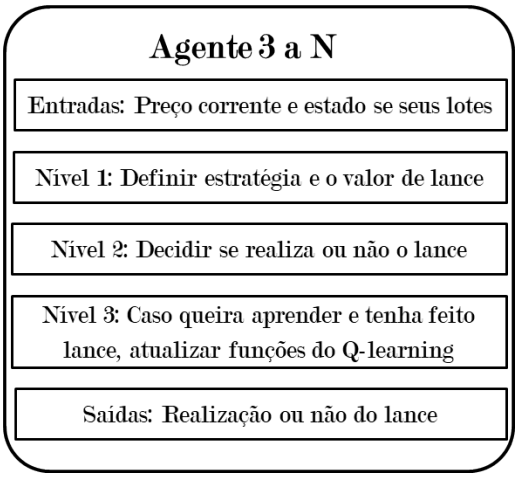
- Possuem um custo mínimo e uma margem de lucro, que decresce ao longo das rodadas dos leilões. Tal fato representa que com o passar do tempo, o concorrente está disposto a diminuir um pouco de seu lucro para aumentar suas chances de ser vencedor;
- Realizam lances de acordo com sua estratégia ou, se possui a capacidade de aprender, utiliza a melhor estratégia conforme seu aprendizado;
- Realizam lances se os mesmos forem menores que o preço corrente, tendo direito de não realizá-los caso contrário;
- Possuem como informação o preço corrente, decremento, o estado de seus lotes (atendido e não atendidos) e o tempo de lance;
- Na etapa inicial devem decidir por ofertar todos os seus lotes de energia ou nenhum lote.

Conforme IAB (2012), em alguns editais foi permitido aos concorrentes somente a oferta da totalidade de lotes de energia que possuíam ou nenhuma oferta. Apesar desta determinação não ter sido aplicada a todos os leilões, ela será utilizada neste estudo.

Nota-se que os agentes de 3 a N, com sua estrutura representada na Figura 3.7, não possuem todas as informações do sistema e devem reagir conforme as informações que recebem. Dessa forma, eles possuem informação incompleta e imperfeita durante a realização do leilão, pois não têm conhecimento sobre os demais concorrentes e nem conhecem todos os lances efetuados nem a quantidade de lotes de energia demandados. Então, durante o leilão, esses agentes devem se basear nas informações externas de preço corrente, decremento, tempo de lance e do estado de seus lotes.

Nos próximos itens serão descritos os níveis de planejamento de cada um desses agentes, para explicar de forma mais detalhada seu funcionamento.

FIGURA 3.7 – Estrutura do agente 3 a N



3.2.3.1 Entradas

Estes agentes têm como entradas o preço corrente, o decremento, o estado de seus lotes e o tempo de lance.

3.2.3.2 Nível 1

Neste nível o agente deve definir sua estratégia de lances. As estratégias possíveis são:

1. Estratégia 1: Valorar seu lance com base somente em seu custo e margem mínima de lucro, a qual decresce ao longo de seus lances;
2. Estratégia 2: Valorar seu lance pelo máximo valor aceitável do mesmo (preço corrente descontado o decremento);
3. Estratégia 3: Utilizar um valor intermediário entre as alternativas anteriores, utilizando-se da média desses valores.

Sendo assim, formalmente, considere como o conjunto das 3 possíveis estratégias, *i.e.* ações, do agente n, com n $\in \{3, 4, ..., N\}$:

$$A^n = \{a_1^n, a_2^n, a_3^n\} \tag{3.17}$$

Determinada a estratégia, os agentes de 3 a N devem calcular seu valor de lance.

3.2.3.3 Nível 2

Após determinado o lance, cada agente deve compará-lo com o preço corrente. O lance só será efetuado caso seja menor que o preço corrente.

3.2.3.4 Nível 3

Conforme já descrito na Seção 2.3.3, os agentes inteligentes devem ter a habilidade de aprender. Para os agentes com a habilidade de aprender, a aprendizagem será por reforço utilizando o método Q-learning. Para tal, considere o conjunto de ações que foi apresentado na Equação 3.17. Para o conjunto de estados possíveis de um agente n, com $n \in \{3, 4, ..., N\}$, considere os estados de seus lotes de energia: atendidos, s_2^n , e não atendidos, s_2^n. Dessa forma, para atualizar os valores de $Q(s_t, a_t)$ tem-se:

$$Q\left(s_t, a_t\right) \leftarrow \left(1-\alpha\right) Q\left(s_t, a_t\right) + \alpha \left[r\left(s_t, s_{t+1}\right) + \gamma \max_a \left\{Q\left(s_{t+1}, a_{t+1}\right)\right\}\right] \tag{3.18}$$

É importante mencionar que a recompensa r será estimada com base na transições de estado e não no par de estado e ação como tradicionalmente é visto. Sendo assim, a matriz de recompensas é dada por:

TABELA 3.3 – Matriz de recompensas para os agentes de 3 a N

s_t	s_{t+1}	
	Atendido	Não atendido
Atendido	10	-20
Não atendido	20	-10

3.2.3.5 Saídas

Após a formação do lance, cada um dos agentes de 3 a N decide se vai efetivá-lo caso ele seja menor que o preço corrente ou não no caso contrário. Para a etapa inicial, além do preço a receber pela energia, o agente também oferta seus lotes de energia.

3.3 Verificação do Modelo

Segundo Herd *et al.* (2013), verificação é tipicamente associada com a correção da implementação, enquanto validação é mais focada na representatividade do sistema. De acordo com o mesmo trabalho, o limite entre a verificação e a validação é frequentemente obscuro, de difícil separação, especialmente para modelos de simulação.

De acordo com Niazi *et al.* (2017), para validar um Sistema Multiagente normalmente são requeridos especialistas no assunto para analisar os dados de simulação. No mais, os fenômenos deste sistema podem ser bem complexos. Sendo assim, em um Sistema Multiagente pode ser muito difícil ter certeza se o comportamento observado é verdadeiramente representativo da atual sistema.

É importante mencionar que mesmo que os modelos não possam ser validados, eles podem ter mérito e uso como dispositivos de armazenagem, ou como um auxílio para mostrar ideias ou um auxílio de treinamento de um sistema gerencial automático. Tendo em vista esta ideia, neste estudo não será realizada a validação do sistema, dado a necessidade de especialistas. Portanto, serão feitas somente as verificações das implementações.

Quanto a verificação da modelagem proposta, neste estudo será utilizada a abordagem dinâmica, que implica na execução de código para testes. Aqui, os casos de teste foram construídos com dados sintéticos e houve a separação da implementação dos subsistemas de cooperação e competição. Tais decisões foram tomadas com o propósito de haver maior domínio da relação de entradas e saídas de cada parte da modelagem proposta.

Os subsistemas de cooperação e de competição previamente apresentados foram implementados no CPLEX e MATLAB, respectivamente. Para o primeiro foi utilizada a *Optimization Programming Language* (OPL) para implementar o modelo matemático descrito na Seção 3.2.1. Como esse é multiobjetivo, para que fosse viável sua execução no CPLEX, aplicou-se o Método da Soma Ponderada (MSP) para transformá-lo em mono-objetivo. Apesar de ser um método que não gera soluções de trechos não convexos da fronteira Pareto, ele foi escolhido tendo em vista que o mesmo mantém a linearidade do modelo MOLIM.

Os dados de entrada utilizados para o modelo estão descritos no Apêndice A.1. Eles foram construídos para que fosse verificado o respeito às restrições do problema, bem como a sensibilidade dos objetivos quando alterado o cenário. Os resultados obtidos nos testes executados serão apresentados no Capítulo 4. Pode-se concluir que os mesmos foram coerentes com as entradas e os resultados esperados, sendo assim o subsistema de cooperação é considerado verificado.

Já para a verificação do subsistema de competição, foi implementado em MATLAB a sistemática do Leilão de Energia Nova descrito no item 3.1 para um produto quantidade. Nesta implementação foram considerados 4 agentes, tendo em vista que há três estratégias puras e a habilidade de aprender por meio da abordagem Q-learning.

Embora este seja um cenário simplificado em termos de complexidade dos agentes, número de concorrentes e produtos comercializados no leilão, esta configuração permite a execução de todas as etapas dos Leilões de Energia Nova anteriormente descritos, bem como permite que mais de um agente seja considerado vencedor. Dessa forma, a implementação da sistemática foi completamente realizada de forma a manter o domínio das relações de entrada e saída do subsistema de competição.

Os dados de entrada utilizados para esta implementação estão descritos no Apêndice A.2. Eles foram baseados nos resultados dos leilões disponíveis em CCEE (2019) com o objetivo de também calibrar a implementação. Os testes foram executados de modo a

compreender todas as etapas do leilão, todas as estratégias e a aprendizagem dos concorrentes. Além disso, alterações específicas nos dados de entrada foram realizadas para verificar o comportamento dos agentes. Os resultados obtidos nos testes executados serão apresentados no Capítulo 4. Pode-se concluir que os mesmos foram coerentes com as entradas e os resultados esperados, sendo assim o subsistema de competição é considerado verificado.

3.4 Obtenção e Tratamento de Dados

Esta seção tem como objetivo elucidar sobre a coleta dos dados necessários para a determinação dos parâmetros de entrada do subsistema de cooperação e do subsistema de competição. Dessa forma, primeiramente serão explicitados as fontes e o tratamento dos dados evidenciados na seção 3.2.1. Após, serão explicitados aspectos relacionados aos agentes descritos nas seções 3.2.1 e 3.2.3.

3.4.1 Tipos de Leilões

Conforme Brasil (2017), os Leilões de Energia Nova permitidos são: A-3, A-4, A-5 e A-6. Na prática o que foi percebido com a entrada em vigor de Brasil (2017) e Brasil (2016) foi a substituição dos leilões A-3 e A-5 pelos leilões A-4 e A-6. Tal fato pode ser atribuído a um problema de antecedência insuficiente nos leilões antigos, já identificado em IAB (2012). De qualquer maneira, como é permitido em Brasil (2017) a realização dos 4 tipos de Leilões de Energia Nova, este estudo permanecerá com esta premissa. Dessa forma, temos que o conjunto J de leilões é composto pelos quatro tipos de leilões previamente citados e o parâmetro H_j é resultante do tempo entre a realização do leilão tipo j e a entrada em operação da usina.

3.4.2 Configuração do Parque Gerador de Eletricidade

A configuração desejada do parque gerador de eletricidade pode ser representada pela projeção de capacidade instalada definida em EPE (2018). Neste documento a EPE mostra a evolução desejada da potência das usinas geradoras de energia elétrica por fonte. Analisando a Tabela 3.4 fica evidente que a maioria da capacidade instalada no Brasil é de usinas que utilizam fontes renováveis. Diante do debate sobre sustentabilidade, tal fato coloca o país em uma posição de destaque, quando comparado a outros países como China e Estados Unidos, os quais tem sua matriz elétrica baseada em termoelétricas a carvão e gás, respectivamente. Devido a questões financeiras, na Tabela 3.4 é indicada a

substituição de termoelétricas a óleo por aquelas a gás natural, o que em termos ambientais não apresenta um grade avanço.

No processo de obtenção dos dados deste estudo, foi realizado um trabalho de análise de emissões de gases de efeito estufa, SO_2 e NO_x provenientes da produção de energia elétrica brasileira do ano de 2019 a 2027, considerando as informações de capacidade instalada disponibilizados em EPE (2018), fator de carga de eletricidade proveniente de MME (2018) e taxa de emissões dos poluentes de Turconi *et al.* (2013). Como conclusões, tem-se que a decisão de trocar termoelétricas a óleo por aquelas a gás natural representou uma redução de emissão de SO_2 por unidade de energia produzida, entretanto, proporcionou um aumento de gases de efeito estufa e NO_x por unidade de energia produzida. De qualquer maneira, o Brasil ainda ocupa uma posição de destaque em termos de emissões de poluentes frente ao cenário mundial, devido a grande participação de fonte renováveis na sua produção de energia elétrica.

TABELA 3.4 – Projeção de capacidade instalada em MWh definida pela EPE

Fonte	**Projeção de capacidade instalada (MW)**									
	2018	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**
Hídrica (UHE)	96.625,00	98.188,00	101.854,00	101.854,00	101.916,00	102.058,00	102.176,00	102.732,00	103.092,00	103.410,00
Hídrica (PCH e CGH)	6.245,00	6.360,00	6.553,00	6.715,00	6.751,00	7.168,00	7.518,00	7.968,00	8.418,00	8.868,00
Nuclear	1.990,00	1.990,00	1.990,00	1.990,00	1.990,00	1.990,00	1.990,00	1.990,00	3.395,00	3.395,00
Gás natural	12.538,00	12.939,00	14.454,00	15.759,00	15.759,00	17.898,00	21.352,00	21.870,00	21.870,00	23.021,00
Óleo	5.209,00	5.104,00	5.390,00	5.390,00	5.390,00	5.198,00	4.214,00	2.732,00	2.525,00	2.144,00
Carvão	3.075,00	3.420,00	3.420,00	3.420,00	3.420,00	3.420,00	3.420,00	3.420,00	3.420,00	3.420,00
Biomassa	13.598,00	13.581,00	13.595,00	13.724,00	13.806,00	14.463,00	14.993,00	15.523,00	16.053,00	16.583,00
Eólica	13.624,00	14.951,00	15.069,00	15.171,00	15.351,00	18.672,00	20.672,00	22.672,00	24.672,00	26.672,00
Solar	1.768,00	2.196,00	2.258,00	2.832,00	3.639,00	4.639,00	5.639,00	6.639,00	7.639,00	8.639,00
TOTAL	154.672,00	158.729,00	164.583,00	166.855,00	168.022,00	175.506,00	181.974,00	185.546,00	191.084,00	196.152,00

Fonte: (EPE, 2018)

Como a menor data de entrada em operação de um empreendimento comercializado agora (2019) seria 2022, para este estudo serão considerados os acréscimos de capacidade instalada a partir de 2022. Sendo assim, nosso horizonte de planejamento definido pelo conjunto K será do ano de 2022 ao ano de 2027, o que define o parâmetro T_k. Na primeira coluna da Tabela 3.4 já temos definidos os componentes do conjunto de fontes de geração de energia I.

Na Tabela 3.4 é apresentada a configuração desejada do parque gerador, porém, para o MOLIM proposto na seção 3.2.1 é necessário saber o acréscimo de capacidade instalada a ser comercializada. Portanto, para definir a demanda de capacidade instalada a ser comercializada nos leilões, D_{ik}, serão considerados os acréscimos de capacidade instalada ano a ano no horizonte de planejamento. Além disso, serão descontadas as capacidades instaladas já comercializadas do 26º ao 29º Leilão de Energia Nova, os quais negociaram produtos que entram em operação a partir de 2022. Com relação a fonte Nuclear, não haverá demanda, já que a capacidade existente é de 1990 MW e o aumento de capacidade

instalada no ano de 2026 ocorre em virtude da entrada em operação de Angra 3, com 1405 MW (ELETROBRAS, 2019a).

3.4.3 Tempo de Construção do Empreendimento

Para determinação deste dado foi adotada a premissa de que o tempo de construção de uma usina é proporcional a sua capacidade instalada. Dessa forma, para estabelecer uma relação entre o tempo necessário para construção de uma planta que atenderá um determinado produto, foram necessários dados de ANEEL (2019) e ANEEL (2018b).

Os dados contidos em ANEEL (2019) foram separados conforme as fontes definidas pelo conjunto I. Após, para cada tipo de usina correspondente a uma fonte foi realizada a média amostral da capacidade instalada. Para estes dados somente as usinas de fonte nuclear possuem um pequeno número de usinas em operação: Angra 1 e 2. Todos os outros tipos de usinas existem em grande número.

Em ANEEL (2018b) é disponibilizado o tempo médio de construção de usinas no país, conforme apresentado na Tabela 3.5. Como em ANEEL (2018b) não havia informações sobre construção das usinas termonulcleares, UTN, esse dado foi obtido a partir das datas de início de construção e início de operação de Angra 1 e Angra 2, disponibilizados em Eletrobras (2019b) e Eletrobras (2019c), respectivamente. Tal procedimento foi adotado tendo em vista que as usinas termonucleares possuem um tempo médio de construção bem maior do que o das demais termoelétricas. O valor de tempo médio de construção de UTE será utilizado para usinas que tem como fonte de energia a biomassa, o gás natural, o óleo e o carvão.

TABELA 3.5 – Tempo médio de construção das usinas

Tipo	**Tempo Médio (meses)**
UHE	45
PCH	29
EOL	18
UTE	24
UFV	12
UTN	193

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2018b)

De posse dos dados de capacidade instalada média e tempo médio de construção de cada tipo de usina, é possível calcular o parâmetro V_i, que corresponde ao tempo médio de implementação da usina de fonte i por unidade de potência instalada.

3.4.4 Risco de Construção do Empreendimento

O risco de construção do empreendimento tem por objetivo avaliar o impacto no sistema caso o prazo de entrega de um determinado empreendimento não seja atendido. No cálculo do risco foram considerados diferenças entre as fontes de energia bem como entre categorias do Leilão de Energia Nova. O risco foi calculado pela multiplicação da porcentagem de ocorrência de atraso pelo impacto do atraso gerado no tempo total de execução da obra.

A Equação 3.19 apresenta o cálculo do risco:

$$R_{ij} = \frac{N_i}{M_j} \cdot P_i \tag{3.19}$$

em que:

- R_{ij}: risco de atraso para a usina de fonte i caso ela seja comercializada no leilão do tipo j;
- N_i: atraso médio;
- P_i: probabilidade de atraso na entrega da obra em um período de meses maior ou igual ao valor de referência t, expresso em meses;
- M_j: prazo máximo previsto para conclusão da construção do empreendimento, sendo de 24, 36, 48 e 60 meses para os leilões do tipo A-3, A-4, A-5 e A-6, respectivamente.

Os valores de porcentagem de atraso e atrasos médios adotados neste estudo serão baseados na Tabela 3.6 obtida em TCU (2013) e Krenz e Hahn (2016), as quais apresentam as frequências de atrasos ocorridas em empreendimentos de geração no Brasil. Assumiu-se que empreendimentos com retardado na entrega igual ou superior a 3 meses estão em situação de atraso. Como pode ser visto, os dados obtidos estão agrupados em termoelétricas, portanto, esse dado será utilizado para as fontes de energia nuclear, biomassa, gás natural, óleo e carvão.

TABELA 3.6 – Atraso de entrega de empreendimentos de geração de energia no Brasil

Fonte	**Atraso médio (meses)**	**Porcentagem de usinas com atraso superior a 3 meses**
UHE	8	66%
PCH e CGH	4	50%
UTE	11	60%
EOL	10	66%
UFV	3	39%

Fontes: (TCU, 2013) e (KRENZ; HAHN, 2016)

3.4.5 Limites de Capacidade Instalada da Usina

Para determinar a capacidade instalada máxima e mínima das usinas de cada tipo de fonte de geração de energia foram utilizados os dados de ANEEL (2019). Como já abordado em 3.4.3, os dados contidos em ANEEL (2019) foram separados conforme as fontes definidas pelo conjunto I. Para cada tipo de usina foi identificada a capacidade mínima, L_i^{min}, e a capacidade máxima, L_i^{max} existente no sistema.

Neste ponto é necessário fazer uma ressalva quanto às usinas de fonte hídrica PCH e UHE. Por definição as usinas PCH possuem capacidade instalada entre 1MW e 30MW, já as UHE são aquelas com mais de 30MW. Analisando os dados de ANEEL (2019) foram encontradas usinas definidas como PCH com capacidades instaladas inferiores a 1MW bem como usinas definidas como UHE com capacidades instaladas inferiores a 30MW. Tendo em vista a grande chance de erro no banco de dados devido ao seu tamanho, este estudo priorizou adotar os valores instituídos pela definição para capacidade instalada mínima.

3.4.6 Parâmetros do Leilão

Para a realização da simulação do leilão é necessária a definição de alguns parâmetros. O primeiro deles é o preço inicial do produto de energia, o qual é encontrado nas documentações sobre os leilões disponibilizadas em CCEE (2019). Dessa forma, considerando aspectos como semelhança do produto e tipo de leilão foi selecionada a informação mais recente sobre preço inicial para ser utilizada nas simulações do leilão.

Os parâmetros de capacidade remanescente do SIN, quantidade de lotes demandados e decremento dos lances na prática são de responsabilidade do MME. Por questões de confidencialidade, os mesmos não são disponibilizados por serem aspectos estratégicos dos leilões. Então, para determinar:

- Capacidade remanescente do SIN: serão considerados que todos os agentes que concorrem ao leilão passarão da etapa inicial para a etapa contínua. Dessa forma esse valor será a quantidade suficiente para que tal fato ocorra;
- Quantidade de lotes demandados: será considerado que a quantidade de lotes de energia demandados do leilão será o valor suficiente para atender a demanda alocada pelo modelo MOLIM para um determinado produto. Como D_{ik} está descrito em kW e um lote corresponde a 0,1 MW-médio, essa conversão será feita utilizando o fator de carga da eletricidade do ano de 2017, calculado a partir da energia elétrica produzida e da capacidade instalada do mesmo ano, disponível em MME (2018).

Para a determinação de quantos lotes serão ofertados por cada agente, primeiramente,

será considerado que a quantidade de vencedores do leilão será igual à quantidade de usinas apontadas pelo MOLIM para atender a determinado produto do leilão. Assim, a quantidade de lotes demandados será dividida pela quantidade de usinas necessárias ao atendimento de cada produto. A partir daí esse valor será atribuído como sendo o valor de lotes de energia ofertados por todos os agentes concorrentes.

No processo de determinação de lances de cada agente no leilão, são necessários os valores de margem mínima de lucro, decréscimo da margem mínima de lucro e custo do seu negócio. O primeiro evidencia qual o mínimo de lucro que um agente deseja receber em relação ao seu custo. Já o segundo parâmetro representa a tendência dos concorrentes em ceder quanto a sua remuneração mínima, dispondo-se a diminuir sua margem de lucro a medida que ocorrem as rodadas do leilão, como forma de tentar aumentar as chances de terem seus lances aceitos ao longo da realização do leilão. Outro importante parâmetro é o decremento que estipula uma variação mínima que o lance oferecido por um concorrente deve ter do preço corrente.

Pela indisponibilidade de informações para a determinação destes últimos parâmetros, os mesmo serão definidos em uma etapa de calibração do subsistema de competição, que terá como referência a diferença percentual entre o preço inicial e o preço médio pago pela energia, os quais são disponibilizados nos resultados do leilão (CCEE, 2019), exemplificado no Anexo A. Dessa maneira, serão considerados os aspectos de semelhança do produto e tipo de leilão para selecionar a informação mais recente sobre a variação percentual do preço inicial e preço médio pago pelo produto de energia.

Após, o subsistema de competição terá os parâmetros de margem mínima de lucro, decréscimo da margem mínima de lucro, custo do seu negócio e decremento de forma a produzir na simulações uma variação percentual do preço inicial e preço médio pago pelo produto de energia próximo do real selecionado. Para essa calibração será considerada a maior diversidade possível de estratégias utilizadas pelos concorrentes e que os mesmos são iguais quanto a suas caraterísticas.

4 Resultados

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos pelo presente estudo. Sendo assim, eles estão organizados em subsistema de cooperação e subsistema de competição. No subsistema de cooperação serão abordados a verificação do modelo MOLIM, os valores de parâmetros obtidos e as suas soluções. Já para o subsistema de competição serão abordados a verificação da implementação da simulação do leilão, os experimentos para testar as diferentes estratégias, testes estatísticos pertinentes e seus efeitos na precificação final da energia com uma análise de sensibilidade.

4.1 Subsistema de Cooperação

4.1.1 Verificação do Modelo MOLIM

Como abordado na Seção 3.3, o modelo MOLIM apresentado na Seção 3.2.1 foi implementado na *Optimization Programming Language* (OPL) no software CPLEX. Para obter a aproximação da fronteira Pareto utilizou-se iterativamente MSP com 135 vetores de pesos. Esta parte do modelo baseado em Sistema Multiagente corresponde ao subsistema de cooperação formado pelo agente 1, o qual repassa informações ao agente 2.

No Apêndice A.1 são apresentados os dados de entrada elaborados para a verificação. Para tal, o modelo MOLIM apresentou quatro soluções das quais somente uma é não dominada, como pode ser visto na Tebela 4.4. Os valores de variáveis da solução não dominada são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3. Por estes valores, é possível observar que as Equações 3.1, 3.2 e 3.3 foram corretamente contabilizadas.

TABELA 4.1 – Valores das funções objetivo para as quatro soluções encontradas

Soluções	**F.O.1**	**F.O.2**	**F.O.3**
Primeira	5	10	2
Segunda	5	28	2
Terceira	9	10	8
Quarta	9	28	8

TABELA 4.2 – Valores da alocação dos componentes do parque gerador nos leilões (x_{ijk})

Fonte	**Ano 1**		**Ano 2**		**Ano 3**	
	Leilão 1	**Leilão 2**	**Leilão 1**	**Leilão 2**	**Leilão 1**	**Leilão 2**
Fonte 1	100%	-	-	100%	-	100%
Fonte 2	100%	-	-	100%	-	100%

TABELA 4.3 – Valores da quantidade de usinas (n_{ik})

Fonte	**Ano 1**		**Ano 2**		**Ano 3**	
	Leilão 1	**Leilão 2**	**Leilão 1**	**Leilão 2**	**Leilão 1**	**Leilão 2**
Fonte 1	3	-	-	2	-	1
Fonte 2	1	-	-	1	-	2

Ao verificar os valores de D_{ik}, V_i e T_k apresentados em A.1 juntamente com os valores das variáveis previamente apresentados temos que a família de restrições da Equação 3.4 foi respeitada. O conjunto de restrições mostrados pela Equação 3.5 foi respeitada, já que para cada fonte a cada ano os componentes foram totalmente alocados ($x_{ijk} = 1$). A família de restrições 3.5, pois os leilões utilizadas possuíam prazo para sua realização, tanto que no Ano 1 foi utilizado o Leilão 1, mesmo que este apresentasse maior risco.

Ao dividir o valor de D_{ik} por n_{ik}, quando estes não são nulos tem-se a capacidade instalada média das usinas alocadas. Essas capacidades médias são apresentadas em 4.4 e pode-se afirmar que as restrições 3.7 e 3.8 foram respeitadas já que esses valores se encontram dentro das faixas definidas por L_i^{min} e L_i^{max}. As restrições 3.9 e 3.10 foram obedecidas já que a cada ano há a ocorrência de pelo menos um dos tipos de leilão. O conjunto de restrições 3.11 fora obedecidos, pois os valores das variáveis x_{ijk} e y_{ijk} são iguais. As restrições 3.12 também foram respeitadas porque só há alocação de usinas (n_{ik}) quando há alocação dos componentes no leilão ($x_{ijk} > 0$)

TABELA 4.4 – Capacidade média das usinas alocadas

D_{ik}/n_{ik}	**Ano 1**	**Ano 2**	**Ano 3**
Fonte 1	10	7,5	5
Fonte 2	10	15	10

Conforme pode ser visto, a solução apresentada demonstra respeito a todas as restrições e possui os valores de função objetivo não dominadas. Portanto, a implementação do modelo MOLIM é considerada verificada.

4.1.2 Valores dos Parâmetros para o Estudo de Caso

Conforme abordado na Seção 3.4 foi realizada uma coleta de dados reais para a realização do estudo de caso. Na Tabela 4.5 estão os valores referentes a demanda de capacidade instalada D_{ik}. Nela, hídrica-A correspondente à produção de energia por meio de UHE e hídrica-B correspondente à produção de energia por meio de PCH e CGH. Por estes dados, percebe-se o esforço do governo em manter a maioria da geração de energia elétrica brasileira a partir de fontes renováveis. Tal fato pode ser exemplificado pelas demandas das fontes hídrica-A, hídrica-B, biomassa, eólica e solar.

TABELA 4.5 – As demandas de capacidade instalada em kW (D_{ik})

Fonte	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**
Hídrica-A	62.000,00	142.000,00	118.000,00	556.000,00	360.000,00	318.000,00
Hídrica-B	0,00	148.828,03	163.564,38	450.000,00	450.000,00	450.000,00
Nuclear	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gás Natural	0,00	0,00	526.722,61	518.000,00	0,00	1.151.000,00
Óleo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carvão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Biomassa	42.572,82	403.374,86	507.404,31	530.000,00	530.000,00	530.000,00
Eólica	95.186,34	1.525.692,86	933.226,97	2.000.000,00	2.000.000,00	2.000.000,00
Solar	0,00	0,00	347.192,00	1.000.000,00	1.000.000,00	1.000.000,00

Na Tabela 4.6 são apresentados os dados de tempo para implementação das usinas por unidade de capacidade instalada. Nota-se que fontes como hídrica-A e nuclear possuem um tempo de implementação menor devido à grande capacidade instalada de suas usinas. Já as usinas de fonte solar e hídrica-B apesentam um tempo maior de implementação por unidade de capacidade instalada, porém, em média, esses empreendimentos apresentam menor capacidade instalada o que resulta numa construção em um intervalo de tempo menor.

TABELA 4.6 – Tempo de implementação dos produtos (V_i)

Fonte	**Tempo médio por potência (anos/kW)**
Hídrica-A	$7,81.10^{-06}$
Hídrica-B	$1,97.10^{-04}$
Nuclear	$1,59.10^{-05}$
Termoelétrica*	$1,41.10^{-04}$
Eólica	$5,98.10^{-05}$
Solar	$1,21.10^{-03}$

*Como em ANEEL (2018b) o tempo médio de construção era agrupado em termoelétricas, utilizou-se o mesmo valor para as fontes Gás Natural, Óleo, Carvão e Biomassa

Conforme já dito na Seção 2.2, se um leilão A-3 é realizado no ano de 2019, a energia

comercializada deve entrar em operação no ano de 2022. Nesse caso, como os leilões são realizados durante o ano, na prática o prazo dado a esses empreendimentos é menor que os três anos descritos no nome do leilão. Sendo assim, devido a esse fato, para o parâmetro H_j foi descontado 6 meses do prazo de cada tipo de leilão conforme apresentado na Tabela 4.7. Seguindo a mesma ideia, para o tempo restante até o ano de entrada em operação, T_k, também foi descontado o mesmo período (Tabela 4.8).

TABELA 4.7 – Valores de tempo disponibilizado pelo leilão tipo j (H_j)

Tipo de leilão	**A-3**	**A-4**	**A-5**	**A-6**
H_j (anos)	2,5	3,5	4,5	5,5

TABELA 4.8 – Valores de tempo restante até o ano k (T_k)

Ano	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**	**2027**
T_k (anos)	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5

De acordo com os procedimentos adotados na Seção 3.4, foi calculado um risco para cada fonte e tipo de leilão. Nota-se na Tabela 4.9 que quanto maior o prazo permitido pelo tipo de leilão, menor o risco de atraso. Dessa forma, fica evidente que a troca prática de leilões A-3 por A-4 e A-5 por A-6 teve como norteador a diminuição da probabilidade de atrasos na entrada em operação dos empreendimentos.

TABELA 4.9 – Valores para o risco (R_{ij})

Fonte	**Tipo de leilão**			
	A-3	**A-4**	**A-5**	**A-6**
Hídrica-A	0,22	0,15	0,11	0,09
Hídrica-B	0,08	0,06	0,04	0,03
Termoelétricas*	0,28	0,18	0,14	0,11
Eólica	0,28	0,18	0,14	0,11
Solar	0,05	0,03	0,02	0,02

*Como em TCU (2013) os dados eram agrupados em termoelétricas, utilizou-se o mesmo valor para as fontes Gás Natural, Óleo, Carvão e Biomassa

Na Tabela 4.10 são apresentados os limites de capacidade instalada encontrados nas usinas já em operação. Juntamente com V_i, tais valores são cruciais para a determinação de quantas usinas são necessárias para o atendimento de determinado componente do parque gerador de eletricidade.

TABELA 4.10 – Valores para limites mínimo (L_i^{min}) e máximo (L_i^{max}) de capacidade

Fonte	L_i^{min} **(kW)**	L_i^{max} **(kW)**
Hídrica-A	30.000,00	11.233.100,00
Hídrica-B	1.000,00	3.0000,00
Nuclear	640.000,00	1.350.000,00
Gás Natural	2,40	1.058.300,00
Óleo	0,18	490000
Carvão	1.200,00	720.274,00
Biomassa	15,00	330.000,00
Eólica	0,16	105.000,00
Solar	0,26	33.000,00

Após a apresentação dos dados utilizados no estudo de caso, segue-se para as soluções apresentadas pelo modelo MOLIM.

4.1.3 Soluções do Modelo MOLIM

A resolução do modelo pelo MSP apresentou sete soluções distintas que tem suas funções objetivo como sendo a aproximação da fronteira Pareto. Após a avaliação dos valores das funções objetivo identificou-se que somente uma dessas soluções era não dominada. Suspeitando-se que poderiam haver questões ligadas a não convexidade da fronteira Pareto do modelo MOLIM ou a produção de soluções eficientes fracas em virtude dos vetores de pesos utilizados, foi empregado posteriormente o método do Épsilon restrito. Para este método foram obtidas um maior número de soluções viáveis, porém, somente uma solução não dominada, idêntica a obtida pelo MSP.

Como a maioria das variáveis do modelo MOLIM são inteiras, as soluções viáveis do problema são restringidas aos pontos que estão contidos no espaço viável definido pelas restrições. Adicionado a este fato, tem-se que o modelo MOLIM possui três objetivos que são compostos somente pelas variáveis inteiras. Então, o espaço de objetivos também se constitui por um conjunto de pontos e não por uma função contínua. Também vale a pena ressaltar que o tamanho conjunto de dados pode influenciar nas soluções obtidas do problema. Sendo assim, devida a essa junção de fatores é provável que para este caso o modelo MOLIM tenha apenas um indivíduo na sua fronteira Pareto para este caso.

Com o objetivo de oferecer ao tomador de decisão uma maior quantidade de alternativas, para este estudo foram detalhadas além da solução não dominada encontrada pelo MSP e pelo Épsilon restrito, duas soluções dominadas que possuíam valores de funções objetivo próximas aos da primeira solução. Dessa forma, é dada uma maior flexibilidade

à tomada de decisão, possibilitando maior configurações e também evidenciando as consequências de pequenas modificações no planejamento dos leilões. Essas três soluções são apresentadas na Tabela 4.11.

TABELA 4.11 – Valores das funções objetivo para as três soluções mais bem classificadas

Soluções	**F.O.1**	**F.O.2**	**F.O.3**
Não dominada	3,27	962	24
Dominada 1	3,52	962	24
Dominada 2	3,56	962	24

Nota-se que os valores obtidos para funções objetivos correspondentes à quantidade de usinas necessárias (F.O.2) e a folga de tempo entre o prazo do leilão e o tempo restante até a entrada em operação de determinado componente do parque gerador de eletricidade (F.O.3) possuem os mesmos valores. Portanto, as diferenças entre essas alternativas se encontram somente no risco proporcionado pela alocação dos componentes do parque gerador de eletricidade (F.O.1). As soluções apresentadas por cada uma dessas alternativas serão apresentadas a seguir.

Na Tabela 4.12 é possível ver a solução que teve suas funções objetivo não dominadas. Claramente nota-se que o modelo buscou alocar os componentes nos leilões A-4 e A-6 devido ao menor risco associado a eles. Somente nos anos que a alocação destes tipos de leilão não era possível devido às restrições temporais, que foi alocado um leilão A-3 (2022) e outro A-5 (2024). Para os anos de 2022 e 2023 não é possível a aplicação da família de restrições representados pela Equação 3.10 devido ao fato do tempo até esses anos (T_k) ser menor que o prazo estipulado pelo tipo de leilão (H_j). Portanto, nesses anos foram adotados somente um tipo de leilão, apesar da determinação de Brasil (2017).

Quanto à alocação dos componentes do parque gerador de eletricidade, apesar de o modelo permitir que a capacidade instalada a entrar em operação em um determinado ano pudesse ser alocada em mais de um tipo de leilão, já que $0 \leq x_{ijk} \leq 1$, o mesmo apresentou somente os valores extremos para essa variável. Tal fato pode ser explicado pela família de restrições representadas pela Equação 3.11, já que mesmo x_{ijk} podendo assumir valores intermediários, a variável binária y_{ijk} assumiria o valor unitário e adicionaria mais uma parcela de risco à função objetivo da Equação 3.1 elevando seu valor. Dessa forma, como essa função objetivo deve ser minimizada, o modelo MOLIM preferiu alocar por inteiro cada componente a um determinado tipo de leilão.

TABELA 4.12 – Solução não dominada

Entrada em operação	**2022**		**2023**		**2024**	
Leilões	**A-3**		**A-4**		**A-4**	**A-5**
Produtos (usinas)	Hídrica-A (1) Biomassa (3) Eólica (3)		Hídrica-A (1) Hídrica-B (9) Biomassa (17) Eólica (27)		Solar (94)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (8) Gás Natural (17) Biomassa(16) Eólica (13)
Entrada em operação	**2025**		**2026**		**2027**	
Leilões	**A-4**	**A-6**	**A-4**	**A-6**	**A-4**	**A-6**
Produtos (usinas)	Solar (220)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (17) Gás Natural (14) Biomassa(14) Eólica (22)	Solar (186)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (15) Biomassa(12) Eólica (20)	Solar (162)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (15) Gás Natural (22) Biomassa(10) Eólica (20)

Na Tabela 4.13 é apresentada a solução dominada 1. Essa solução também apresenta uma tendência em alocar os componentes do parque gerador nos leilão A-4 e A-6, alocando nos demais somente quando há restrições temporais. Para esta solução o risco é 7,65% maior, pois há algumas diferenças quanto a alocação dos componentes. Comparando à solução apresentada na Tabela 4.12 note que nos leilões com entrada em operação:

- Em 2024 os componentes hídrica-A(1) e solar(94) trocaram de leilões;
- Em 2025 os componentes hídrica-B(17) e solar(220) trocaram de leilões;
- Em 2026 os componentes biomassa(12) e solar(186) trocaram de leilões.

TABELA 4.13 – Solução dominada 1

Entrada em operação	**2022**		**2023**		**2024**	
Leilões	**A-3**		**A-4**		**A-4**	**A-5**
Produtos (usinas)	Hídrica-A (1) Biomassa (3) Eólica (3)		Hídrica-A (1) Hídrica-B (9) Biomassa (17) Eólica (27)		Hídrica-A (1)	Hídrica-B (8) Gás Natural (17) Biomassa (16) Eólica (13) Solar (94)
Entrada em operação	**2025**		**2026**		**2027**	
Leilões	**A-4**	**A-6**	**A-4**	**A-6**	**A-4**	**A-6**
Produtos (usinas)	Hídrica-B (17)	Hídrica-A (1) Gás Natural (14) Biomassa (14) Eólica (22) Solar (220)	Biomassa(12)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (15) Eólica (20) Solar (186)	Solar (162)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (15) Gás Natural (22) Biomassa(10) Eólica (20)

A Tabela 4.15 apresentada a solução dminada 2. Comparando-a à solução apresentada em 4.12, ela apresenta um risco 8,87% maior, devido às diferenças de alocações de componentes do parque gerador, como nos leilões com entrada em operação:

- Em 2024 os componentes hídrica-B(8) e solar(94) trocaram de leilões;
- Em 2025 os componentes biomassa(14) e solar(220) trocaram de leilões;
- Em 2027 os componentes biomassa(10) e solar(162) trocaram de leilões.

TABELA 4.14 – quarta solução

TABELA 4.15 – Quarta solução - 3º lugar no AHP, 3º lugar no PROMETHEE II e 1º lugar no ELECTRE III

Entrada em operação	**2022**		**2023**		**2024**	
Leilões	**A-3**		**A-4**		**A-4**	**A-5**
Produtos (usinas)	Hídrica-A (1) Biomassa (3) Eólica (3)		Hídrica-A (1) Hídrica-B (9) Biomassa (17) Eólica (27)		Hídrica-B (8)	Hídrica-A (1) Gás Natural (17) Biomassa (16) Eólica (13) Solar (94)
Entrada em operação	**2025**		**2026**		**2027**	
Leilões	**A-4**	**A-6**	**A-4**	**A-6**	**A-4**	**A-6**
Produtos (usinas)	Biomassa (14)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (17) Gás Natural (14) Eólica (22) Solar (220)	Solar (186)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (15) Biomassa (12) Eólica (20)	Biomassa(10)	Hídrica-A (1) Hídrica-B (15) Gás Natural (22) Eólica (20) Solar (162)

Com a alocação dos componentes do parque gerador de eletricidade nos leilões por parte do agente 1, agora o agente 2 tem como objetivo promover a comercialização dos mesmo após definir seu preço inicial. Sendo assim, os resultados agora passarão para o subsistema de competição, no qual serão simulados os leilões de comercialização dos produtos que correspondem aos componentes do parque gerador de eletricidade com entrada em operação no ano de 2022. Pelas soluções previamente detalhadas, é possível perceber que em todas elas a configuração para o primeiro ano é igual. Assim, estes produtos de energia serão denominados:

- Hídrica-A: produto de energia produzido por UHE que deve possuir um vencedor em seu leilão e quantidade de lotes demandados que correspondem à capacidade instalada de 62.000,00 kW que deve entrar em operação em 2022;
- Eólica: produto de energia produzido por EOL que deve possuir três vencedores em seu leilão e quantidade de lotes demandados que correspondem à capacidade instalada de 95.186,34 kW que deve entrar em operação em 2022;
- Biomassa: produto de energia produzido por UTE a biomassa que deve possuir três vencedores em seu leilão e quantidade de lotes demandados que correspondem à capacidade instalada de 42.572,82 kW que deve entrar em operação em 2022.

A correspondência entre a capacidade instalada demandada por cada componente do parque gerador de eletricidade e a quantidade demandada de lotes de energia para cada produto nos leilões será feita conforme procedimento descrito na Seção 3.4.6.

4.2 Subsistema de Competição

Nesta parte do modelo baseado em Sistema Multiagente proposto, será realizada a comercialização dos componentes do parque gerador de eletricidade hídrica-A(1), eólica(3) e biomassa(3), os quais foram definidos pelo agente 1 para o primeiro leilão A-3 com entrada em operação em 2022 e repassados ao agente 2. Note que para o componente hídrica-A o agente 1 estimou a necessidade de somente uma usina, já para os componentes eólica e biomassa foi calculada a necessidade de três usinas para cada um. Estas quantidades de usinas serão utilizadas para definir as quantidades de vencedores dos leilões para cada tipo de produto. Sendo assim, conforme definido na seção anterior, o leilão do produto de energia Hídrica-A terá um vencedor, o leilão do produto de energia Eólica terá três vencedores e o leilão do produto de energia Biomassa terá três vencedores também.

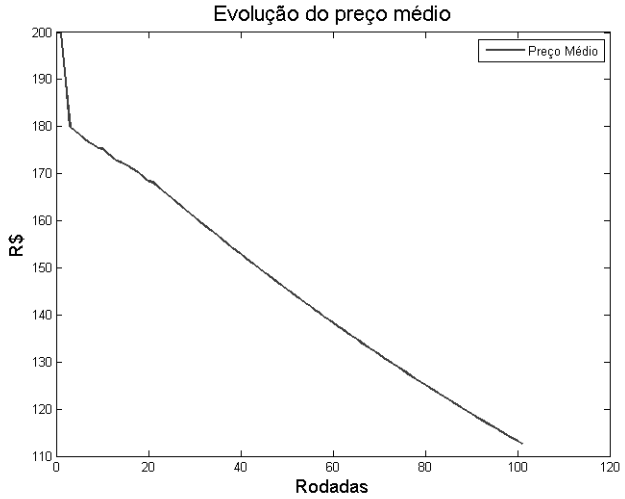
4.2.1 Verificação da Implementação do Leilão

Antes da realização das simulações do leilão, é necessária a verificação da implementação do mesmo. Sendo assim, alguns testes foram realizados com o objetivo de atestar o bom funcionamento da aplicação. Para a realização desses testes foram determinados valores de preço inicial, decremento, margem mínima de lucro, decréscimo da margem mínima, custo do concorrente, lotes ofertados, capacidade remanescente do SIN e quantidade de lotes demandados de forma arbitrária com dados sintéticos conforme exibidos no Apêndice A.2. Os valores de parâmetros para cada agente serão iguais, para que esses não influenciem em seu sucesso ou insucesso no leilão e, portanto, seja avaliado o impacto da estratégia no resultado final.

Primeiramente, será evidenciada a verificação para o leilão com até 100 lances aceitos na etapa contínua com apenas um vencedor. Para a simulação da comercialização do produto Hídrica-A, foi considerada a participação de quatro agentes, sendo que cada um dos três primeiros adota uma das estratégias puras e o último agente tem a habilidade de aprender segundo o método de aprendizagem por reforço Q-learning, conforme definido na Seção 3.2.3. Em uma simulação do leilão, o agente 4 foi o vencedor utilizando a estratégia 2. O último preço corrente e o preço final pago pela a energia foi de R$112,60. Aqui esses valores são iguais por haver somente um vencedor. Portanto, a queda percentual do preço corrente final e do preço médio pago pela energia foi de 43,70%. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a evolução do preço corrente e do preço médio a ser pago pela energia.

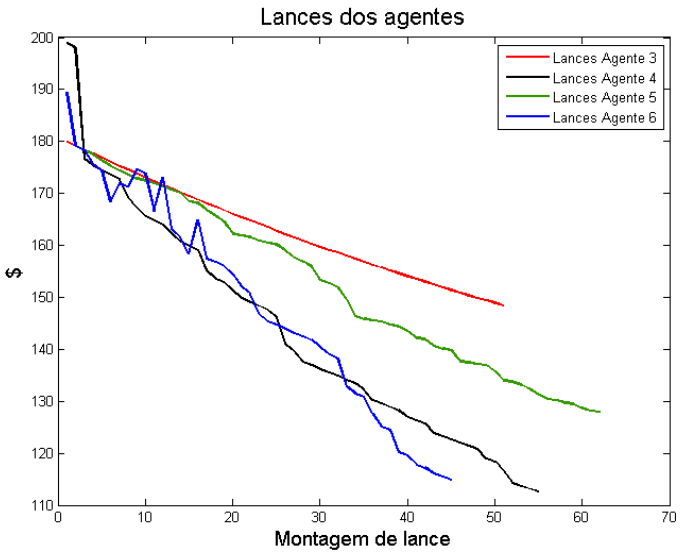
FIGURA 4.1 – Evolução do preço corrente para um vencedor

FIGURA 4.2 – Evolução do preço médio para um vencedor



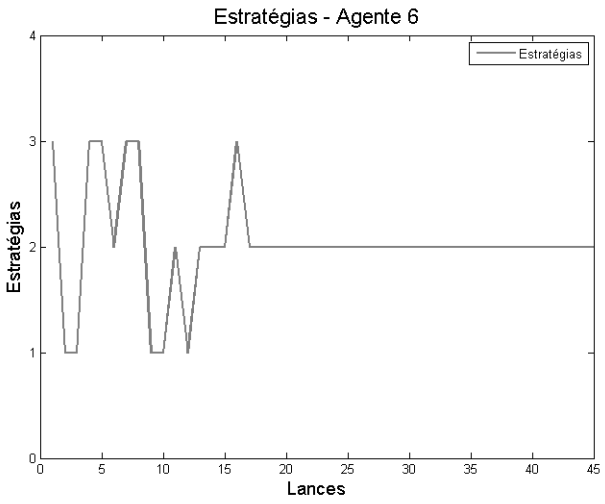
Na Figura 4.3 é possível ver a evolução dos valores de lances do leilão. É importante ressaltar que nesta simulação a etapa inicial caracteriza-se como a primeira rodada do leilão em que todos os agentes fazem lance e passam para a etapa seguinte. Após, na etapa contínua, uma rodada é marcada pelo lance de um agente. Portanto, para este gráfico, o eixo das abscissas apresenta a sequência de formação do valor lance de cada agente, sendo que não necessariamente esse lance foi aceito, já que era possível que o mesmo fosse maior que o preço corrente. Dessa maneira, o 40º lance ao agente 3 não é feito de forma paralela ao 40º lance do agente 6, por exemplo. Além disso, como é definido aleatoriamente qual o agente formará o lance em determinada rodada, eles não possuem exatamente a mesma quantidade de formação de lances. De qualquer maneira, os agentes têm probabilidades iguais de formar lance durante o andamento do leilão.

FIGURA 4.3 – Evolução dos lances dos agentes



Outro aspecto a ser considerado é a aprendizagem, habilidade do agente 6. Na Figura 4.4 é notório que após oscilar as estratégias inicialmente, esse agente adotou a estratégia 2, a mesma utilizada pelo agente 4, o vencedor deste leilão. Sendo assim, apesar de necessitar de um período de aprendizagem, o agente com a habilidade de aprender identifica a melhor estratégia a seguir.

FIGURA 4.4 – Aprendizagem do agente 6



Para testar a obtenção de dados de mais de uma simulação do leilão, foi realizado um teste com quatro simulações para identificar se os parâmetros de queda média do preço corrente, queda média do preço médio pago pela energia e contagem dos agentes vencedores estavam sendo obtidos de forma correta. A Figura 4.5 apresenta a tela com a matriz Resultados, na qual as colunas representam o agente vencedor, queda percentual entre o preço inicial e o último preço corrente, o preço pago pelo agente vencedor, o preço

pago pela energia e a queda percentual entre o preço inicial e o preço médio pago pela energia, respectivamente. Cada linha apresenta estas métricas para uma simulação.

Analisando a primeira coluna da matriz Resultados, nota-se que foi contabilizada corretamente a quantidade de vitórias de cada agente. Ao realizar a média da segunda e da quinta coluna, obtém-se a queda média do preço corrente e do preço final pago pela energia. Já a média da quarta coluna resulta no preço médio do primeiro lugar, o vencedor. Sendo assim, estas métricas estão corretamente calculadas.

FIGURA 4.5 – Resultados do teste de verificação com quatro simulações para um vencedor

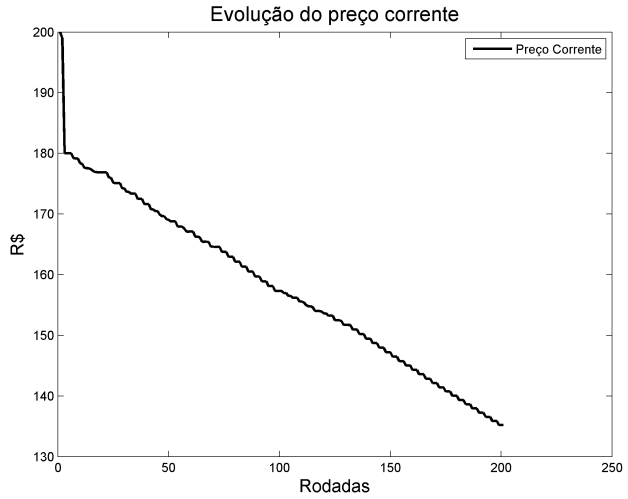
```
-----------------------------------------------------------------
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - 2019
RAFAELLA DE SOUZA HENRIQUES
Construção de uma ferramenta baseada em Sistema Multiagente para obtenção da
configuração do parque gerador de eletricidade por meio da composição dos Leilões de Energia Nova
-----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 44.53
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.31
Queda média do preço final pago pela energia: 44.53
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.31
Número de simulações: 4.00
Número de vitórias
           Primeiro lugar
Agente 3:       0.00
Agente 4:       3.00
Agente 5:       0.00
Agente 6:       1.00
Preço médio do primeiro lugar: 110.93
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.62

Resultado =

            6           0.44675       110.65           110.65      0.44675
            4           0.44561       110.88           110.88      0.44561
            4           0.44094       111.81           111.81      0.44094
            4             0.448        110.4            110.4        0.448
```

Agora, será evidenciada a verificação para o leilão com até 200 lances aceitos na etapa contínua com três vencedores, implementação utilizada para a simulação da comercialização dos produtos Eólica e Biomassa pelo leilão A-3 com entrada em operação em 2022. Como a quantidade de vencedores é maior, optou-se por realizar as simulações com oito agentes para que a probabilidade de ganhar o leilão seja menor do que a de perder. Na verdade, a implementação com quatro agentes foi testada para simular o leilão com três vencedores, porém, os resultados se mostraram inconclusivos devido a alta probabilidade de vencer que todos os agentes tinham independente da estratégia que utilizassem. Na verificação da implementação com oito agentes, cada par utiliza uma estratégia, seguindo a ordem das mesmas e os dois últimos são agentes inteligentes, conforme as especificações da Seção 3.2.3.

Em uma simulação do leilão, os vencedores foram os agentes 6, 9 e 5 nesta mesma ordem de classificação. O primeiro e o terceiro agentes utilizam a estratégia 2, já o outro é inteligente. O último preço corrente foi de R$ 135,19 e o preço final pago pela a energia foi de R$134,74. Aqui esses valores não são iguais por haver mais de um vencedor,

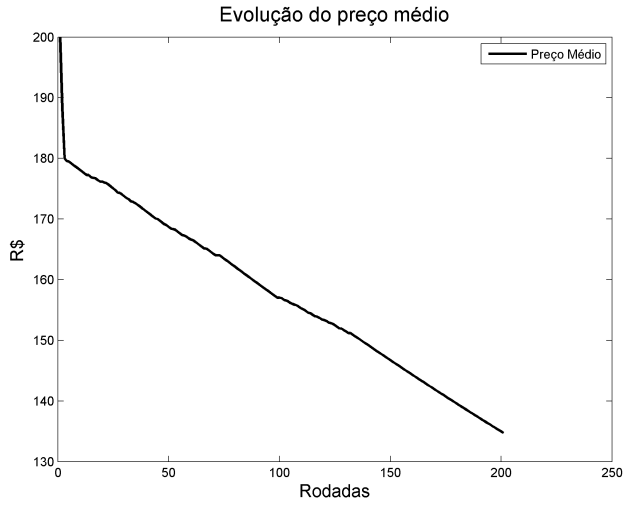
pois o preço corrente corresponde ao lance do último concorrente que tem seus lotes no estado atendido, já o preço médio pago pela energia é a média dos lances dos agentes que estão com seus lotes atendidos. A queda percentual do preço corrente final e do preço médio pago pela energia foi de 32,41% e 32,63%, respectivamente. As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam a evolução do preço corrente e do preço médio a ser pago pela energia.

FIGURA 4.6 – Evolução do preço corrente para três vencedores



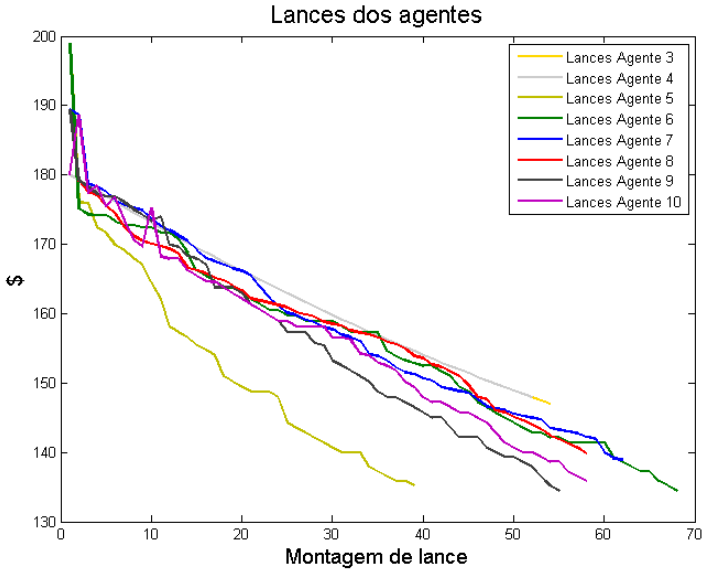
Note que na Figura 4.6 há rodadas em que o preço corrente não se altera. O mesmo é determinado pelo último lance aceito do último agente com os lotes de energia em estado atendido, considerando a ordenação crescente do último lance de cada agente e a quantidade demandada de lotes. Como nesta implementação há mais de um vencedor, é possível que em uma determinada rodada dois ou mais agentes, os quais possuem seus lotes atendidos, tenham o mesmo valor de último lance e que esse valor tenha sido aceito em rodadas anteriores quando o preço corrente era mais alto. Na rodada seguinte, se um outro agente ou um desses realizar um lance menor que o preço corrente, na nova classificação, o novo preço corrente continuará tendo o mesmo valor, já que o último agente com lotes atendidos ainda terá valor de último lance igual a esse valor ou as posições dos agentes com lotes atendidos se mantêm. Já na Figura 4.7 não há valores constantes, o que se vê são alterações muito pequenas nos valores médios pagos pela energia entre diferentes rodadas.

FIGURA 4.7 – Evolução do preço médio para três vencedores



Na Figura 4.8 é possível ver a evolução dos valores de lances do leilão. As premissas já descritas sobre as etapas do leilão e os lances dos agentes na verificação da implementação com um vencedor também valem aqui.

FIGURA 4.8 – Evolução dos lances dos agentes



Sobre a aprendizagem, habilidade dos agentes 9 e 10, é possível ver na Figura 4.10 que inicialmente há oscilações e, após há uma convergência quanto à estratégia a ser utilizada, conforme a verificação da implementação anterior.

FIGURA 4.9 – Aprendizagem do agente 9

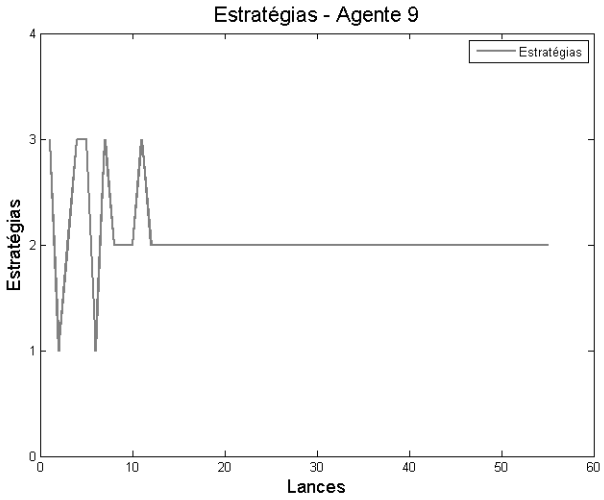
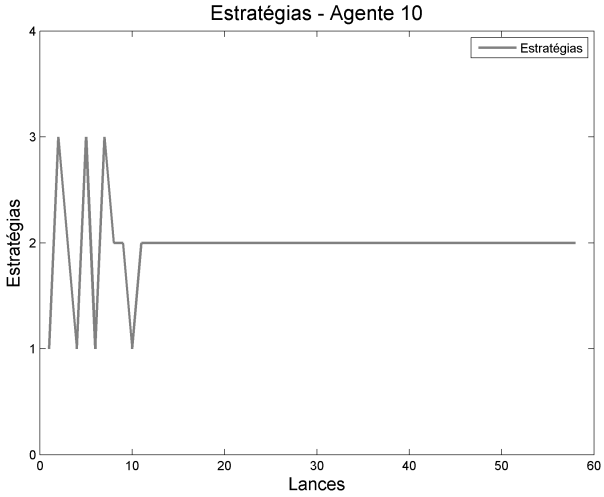


FIGURA 4.10 – Aprendizagem do agente 10



Aqui também foi realizado um teste com quatro simulações para identificar se os parâmetros de queda média do preço corrente, queda média do preço médio pago pela energia e contagem dos agentes vencedores estavam sendo obtidos de forma correta. A Figura 4.11 apresenta a tela com a matriz Resultados, na qual as colunas representam os agentes vencedores, o preço pago por cada agente vencedor, a queda percentual entre o preço inicial e o último preço corrente, o preço médio pago pela energia e a queda percentual entre o preço inicial e o preço médio pago pela energia, respectivamente. Cada linha apresenta estas métricas para uma simulação.

Analisando as três primeiras colunas da matriz Resultados, nota-se que foi contabilizada corretamente a quantidade de vitórias de cada agente. Ao realizar a média da quarta, quinta e sexta colunas, obtém-se o preço médio pago pela energia do primeiro, segundo e terceiros lugares, respectivamente. Ao realizar a média da sétima e da oitava coluna, são

obtidos os valores da queda média do preço corrente e do preço final pago pela energia. Dessa maneira, estas métricas estão corretamente calculadas.

FIGURA 4.11 – Resultados do teste de verificação com quatro simulações para um vencedor

```
-----------------------------------------------------------------
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - 2019
RAFAELLA DE SOUZA HENRIQUES
Construção de uma ferramenta baseada em Sistema Multiagente para obtenção da
configuração do parque gerador de eletricidade por meio da composição dos Leilões de Energia Nova
-----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 32.54
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.41
Queda média do preço final pago pela energia: 32.76
Devio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.41
Número de simulações: 4.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       0.00         0.00        0.00       0.00
Agente 4:       0.00         0.00        0.00       0.00
Agente 5:       4.00         0.00        0.00       4.00
Agente 6:       0.00         3.00        1.00       4.00
Agente 7:       0.00         0.00        0.00       0.00
Agente 8:       0.00         0.00        0.00       0.00
Agente 9:       0.00         0.00        3.00       3.00
Agente 10:      0.00         1.00        0.00       1.00
Preço médio do primeiro lugar: 134.26
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 2.81
Preco medio do segundo lugar: 134.26
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 2.81
Preco medio do segundo lugar: 134.93
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 2.83

Resultado =

           5          10           6      134.76      134.76      135.44     0.32279      134.99     0.32505
           5           6           9      130.32      130.32      130.98     0.34512      130.54     0.34731
           5           6           9      136.99      136.99      137.68      0.3116      137.22      0.3139
           5           6           9      134.95      134.95      135.62     0.32188      135.17     0.32414
```

4.2.2 Simulações

Nesta seção, serão apresentados os resultados para a calibração e testes da implementação dos leilões para os produtos de energia já mencionados. Primeiramente, para cada produto de energia foi feita uma etapa de calibração com o objetivo de determinar parâmetros, de acordo com o descrito na Seção 3.4.6. Em seguida, os resultados dos testes para os produtos de energia estão organizados em:

- Concorrentes com estratégias diversas: ambiente no qual todas as estratégias são utilizadas por um número igual de agentes, e há agentes inteligentes em quantidade igual também;
- Concorrentes simétricos: ambientes em que todos os agentes utilizam a mesma estratégia ou são todos inteligentes;
- Concorrentes assimétricos: ambientes em que metade dos agentes utiliza uma estratégia e a segunda metade utiliza outra estratégia. Aqui também é testado cada estratégia contra agentes inteligentes.

Os resultados foram organizados de forma a facilitar a análise e a compreensão dos mesmos. De qualquer maneira, as telas de todos os testes podem ser vistas no Apêndice B.

Uma das primeiras atividades do agente 2 é a determinação do preço inicial dos produtos de energia a serem comercializados nos leilões. Como descrito na Seção 3.4.6, para a determinação dos parâmetros do leilão do produto Hídrica-A foi considerado o produto de energia hídrica de UHE QTD-2017, que consta no 19º Leilão de Energia Nova do tipo A-3. Nele, o preço inicial deste produto foi de R$148,00 por MWh com preço médio pago pela energia de R$121,00 por MWh, resultando em uma queda percentual de 18,24%.

Para a calibração dos parâmetros, considerou-se a maior diversidade de estratégias para os agentes e os dados de preço inicial e queda percentual anteriormente citados. Sendo assim, os valores de parâmetros adotados para a simulação do produto Hídrica-A com um vencedor são apresentados na Tabela 4.16. Os dados dos testes deste produto consideraram até 100 lances aceitos na etapa contínua de cada simulação e a realização de 1000 simulações.

TABELA 4.16 – Valores dos parâmetros do subsistema de competição com um ganhador para produto Hídrica-A

Parâmetros	**Valor**
Preço inicial	R$ 148,00
Decremento	0,11%
Capacidade remanescente do SIN	1048 lotes
Quantidade de lotes demandados	262 lotes
Margem mínima de lucro do concorrente	47,00%
Decréscimo da margem mínima do concorrente	2,00%
Custo do concorrente	R$ 100,00
Lotes ofertados por cada concorrente	262 lotes

Analogamente ao produto anterior, foi realizado o procedimento de identificação de um produto de um leilão real semelhante ao produto de energia Eólica deste trabalho, com o objetivo de calibrar os parâmetros da implementação. Para a determinação dos parâmetros do leilão do produto Eólica foi considerado o produto de energia eólica DISE-2018 do 22º Leilão de Energia Nova do tipo A-3. Nele o preço inicial deste produto foi de R$184,00 por MWh com preço médio pago pela energia de R$181,14, implicando em uma queda percentual de 1,55%. Portanto, os valores de parâmetros adotados para a simulação do produto de energia Eólica com três vencedores são apresentados na Tabela 4.17. Os dados dos testes para este produto adotaram até 200 lances aceitos por simulação e a realização de 1000 simulações.

TABELA 4.17 – Valores dos parâmetros do subsistema de competição com três ganhadores para produto Eólica

Parâmetros	**Valor**
Preço inicial	R$ 184,00
Decremento	0,021%
Capacidade remanescente do SIN	1000 lotes
Quantidade de lotes demandados	375 lotes
Margem mínima de lucro do concorrente	83,50%
Decréscimo da margem mínima do concorrente	0,06%
Custo do concorrente	R$ 100,00
Lotes ofertados por cada concorrente	125 lotes

Já para o produto de energia Biomassa com entrada em operação em 2022, foi considerado o produto de energia térmica de usina de biomassa DIST-2018, também comercializado no 22º Leilão de Energia Nova do tipo A-3. Nele, o preço inicial deste produto foi de R$218,00 por MWh com preço médio pago pela energia de R$212,75 e, consequentemente, há uma queda percentual de 2,41%. Sendo assim, os valores de parâmetros adotados para a simulação do produto de energia Biomassa com três vencedores são apresentados na Tabela 4.18. Aqui, os testes também utilizaram de até 200 lances aceitos por simulação e a realização de 1000 simulações.

TABELA 4.18 – Valores dos parâmetros do subsistema de competição com três ganhadores para produto Biomassa

Parâmetros	**Valor**
Preço inicial	R$ 218,00
Decremento	0,0435%
Capacidade remanescente do SIN	496 lotes
Quantidade de lotes demandados	186 lotes
Margem mínima de lucro do concorrente	81,50%
Decréscimo da margem mínima do concorrente	0,10%
Custo do concorrente	R$ 120,00
Lotes ofertados por cada concorrente	62 lotes

4.2.2.1 Concorrentes com estratégias diversas

Para o produto Hídrica-A será realizado o teste considerando que:

- O agente 3 utiliza a estratégia 1;
- O agente 4 utiliza a estratégia 2;
- O agente 5 utiliza a estratégia 3;

- O agente 6 tem a habilidade de aprender por meio do Q-learning.

Para o produto Hídrica-A os resultados do teste são apresentados na Tabela 4.19. Neste resultado é possível perceber uma predominância do agente 4 que utiliza a estratégia 2. Tal fato ocorre em razão desta estratégia observar aspectos do ambiente para definição do lance. Como o agente 4 sempre forma o valor de seu lance tendo como parâmetro o preço corrente menos o decremento, sempre que decidir fazer o lance o mesmo será aceito. Já para a estratégia 1, o agente 3 observa somente aspectos internos, como margem mínima de lucro e custo, para a formação do valor de seu lance. O agente 5 possui a estratégia 3 que tenta combinar as duas estratégias anteriores por meio da média de seus valores.

Sobre o agente 6, com a habilidade de aprender, nota-se que o mesmo adota a estratégia 2 e tem uma taxa de sucesso bem próxima a do agente 4. Para esta configuração de teste, a queda entre o preço inicial do produto e o preço final pago pela energia do vencedor foi de 18,23%. Além disso, pelos valores de desvio-padrão das métricas, as mesmas não apresentam grandes oscilações durante as diferentes simulações.

TABELA 4.19 – Resultados de vencedores do teste com diversidade de estratégias para o produto Hídrica-A com mil simulações

Teste	**Vitórias**			
	Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**
Diversas estratégias	150	378	151	321

Já para os produtos Eólica e Biomassa serão realizados os testes considerando que:

- Os agentes 3 e 4 utilizam a estratégia 1;
- Os agentes 5 e 6 utilizam a estratégia 2;
- Os agentes 7 e 8 utilizam a estratégia 3;
- Os agentes 9 e 10 têm a habilidade de aprender por meio do Q-learning.

Para o produto Eólica os resultados do teste são apresentados na Tabela 4.20. Nestes resultados também é observado um bom desempenho dos Agentes 5 e 6, que utilizam a estratégia 2, seguidos dos Agentes 9 e 10, que são inteligentes. Sendo assim, novamente é possível perceber o impacto de utilizar informações do ambiente. Aqui a diferença entre o preço inicial do produto e o preço médio pago pela energia dos vencedores foi de 1,54%.

TABELA 4.20 – Resultados de vencedores do teste com diversidade de estratégias para o produto Eólica com mil simulações

Teste	Classificação	Vitórias							
		Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
Diversas estratégias	Primeiro lugar	133	130	128	120	114	110	130	135
	Segundo lugar	27	26	226	238	27	37	226	193
	Terceiro lugar	37	30	194	222	44	61	187	225
	Soma	197	186	548	580	185	208	543	553

Para o produto Biomassa os resultados do teste são apresentados na Tabela 4.21. Novamente é possível notar que os agentes que utilizam a estratégia 2 mostraram o melhor desempenho, seguidos pelos agentes que são inteligentes. Aqui a queda entre o preço inicial do produto e o preço médio pago pela energia dos vencedores foi de 2,41%.

TABELA 4.21 – Resultados de vencedores do teste com diversidade de estratégias para o produto Biomassa com mil simulações

Teste	Classificação	Vitórias							
		Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
Diversas estratégias	Primeiro lugar	64	56	215	181	45	46	203	190
	Segundo lugar	23	15	205	229	35	25	240	228
	Terceiro lugar	36	31	220	215	54	52	187	205
	Soma	123	102	640	625	134	123	630	623

Dessa forma, nota-se que observar as características do ambiente e formar um lance que certamente será aceito maximiza as chances de vencer o leilão. Porém, deve-se levar em conta que na prática essa atitude de um concorrente pode levá-lo a vender sua energia por um preço que não lhe confira uma margem de lucro aceitável ou mesmo prejuízo.

4.2.2.2 Concorrentes simétricos

Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes com todos os agentes possuindo a mesma estratégia ou a habilidade de aprender. Como todos os agentes terão as mesmas características, nota-se que a disputa será feita por agentes simétricos.

Na Tabela 4.22 é possível observar os resultados para o teste com agentes simétricos para o produto Hídrica-A. Nota-se que as vitórias estão distribuídas de forma bem próxima para todos agentes, já que todos utilizam a mesma estratégia. As diferenças podem ser atribuídas à ordem em que esses agentes dão seus lances, já que a mesma é determinada pela geração de um valor aleatório com probabilidades iguais para cada concorrente.

TABELA 4.22 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias simétricas para o produto Hídrica-A com mil simulações

Teste	**Vitórias**			
	Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**
Estratégia 1	268	240	245	247
Estratégia 2	251	227	255	267
Estratégia 3	251	253	247	249
Agentes inteligentes	220	262	262	256

Aqui, a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço final pago pela energia do vencedor foi de:

- Estratégia 1: 28,13% e 0,00%;
- Estratégia 2: 10,42% e 0,00%;
- Estratégia 3: 25,61% e 1,24%;
- Agentes inteligentes: 15,43% e 2,13%.

Na Tabela 4.23 são apresentados os resultados para o teste com agentes simétricos para o produto Eólica. Aqui também, a quantidade de vitórias de cada agente possui valores próximos, pois todos utilizam a mesma estratégia.

TABELA 4.23 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias simétricas para o produto Eólica com mil simulações

Teste	**Classificação**	**Vitórias**							
		Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
Estratégia 1	Primeiro lugar	143	104	130	125	120	111	135	132
	Segundo lugar	101	145	129	121	113	156	132	103
	Terceiro lugar	139	116	147	117	129	121	112	119
	Soma	383	365	406	363	362	388	379	354
Estratégia 2	Primeiro lugar	127	122	118	126	119	120	131	137
	Segundo lugar	115	123	136	111	144	111	119	141
	Terceiro lugar	125	121	117	144	149	118	116	110
	Soma	367	366	371	381	412	349	366	388
Estratégia 3	Primeiro lugar	118	128	114	131	116	138	137	118
	Segundo lugar	130	131	123	115	125	118	128	130
	Terceiro lugar	111	129	130	120	133	109	130	138
	Soma	359	388	367	366	374	365	395	386
Agentes inteligentes	Primeiro lugar	117	114	133	120	123	137	141	115
	Segundo lugar	125	116	110	114	138	136	140	121
	Terceiro lugar	127	119	131	132	133	114	127	117
	Soma	369	349	374	366	394	387	408	353

Para o produto Eólica a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço médio pago pela energia dos vencedores foi de:

- Estratégia 1: 2,04% e 0,00%;

- Estratégia 2: 1,40% e 0,00%;
- Estratégia 3: 1,59% e 0,10%;
- Agentes inteligentes: 1,56% e 0,17%.

Na Tabela 4.24 estão os resultados para o teste com agentes simétricos para o produto Biomassa. Da mesma forma que os produtos anteriores, obteve-se um número de vitórias bem semelhante para os agentes.

TABELA 4.24 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias simétricas para o produto Biomassa com mil simulações

Teste	**Classificação**	**Vitórias**							
		Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
Estratégia 1	Primeiro lugar	134	135	99	148	124	133	124	103
	Segundo lugar	125	128	124	122	127	113	123	138
	Terceiro lugar	140	117	126	131	117	118	120	131
	Soma	399	380	349	401	368	364	367	372
Estratégia 2	Primeiro lugar	119	122	138	119	119	112	128	143
	Segundo lugar	141	136	123	122	108	140	109	121
	Terceiro lugar	107	134	119	122	142	131	127	118
	Soma	367	392	380	363	369	383	364	382
Estratégia 3	Primeiro lugar	117	134	111	114	149	128	115	132
	Segundo lugar	128	118	145	122	128	108	134	117
	Terceiro lugar	119	129	123	135	114	120	120	140
	Soma	364	381	379	371	391	356	369	389
Agentes inteligentes	Primeiro lugar	120	124	121	134	118	128	125	130
	Segundo lugar	145	130	141	116	121	117	127	103
	Terceiro lugar	112	129	127	114	142	119	133	124
	Soma	377	383	389	364	381	364	385	357

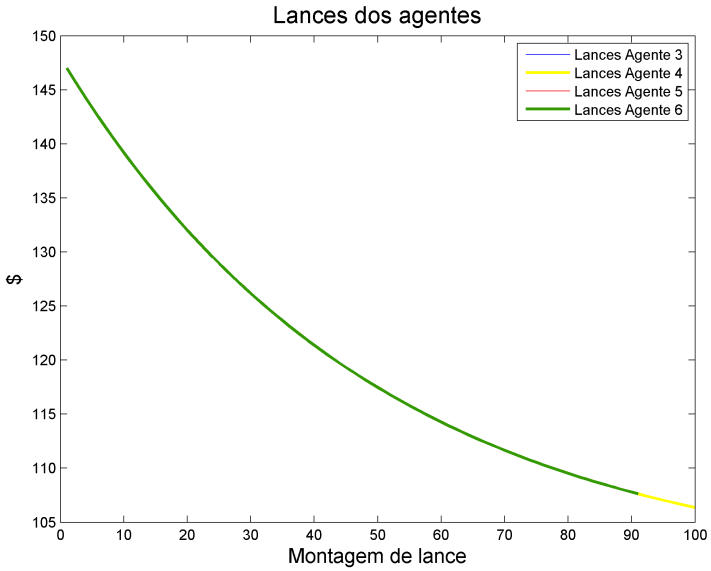
Para o produto Biomassa a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço médio pago pela energia dos vencedores foi de:

- Estratégia 1: 2,97% e 0,00%;
- Estratégia 2: 2,89% e 0,00%;
- Estratégia 3: 2,25% e 0,16%;
- Agentes inteligentes: 2,61% e 0,51%.

Como já dito, cada rodada do leilão é marcada pelo lance de um agente. Na implementação, todos os agentes têm a mesma probabilidade de ser o agente a formar o lance em um determinado momento. Dessa maneira, para o teste da estratégia 1, como o lance é formado pelas características de cada agente e a cada formação de lance o decréscimo de margem é igual para todos, tem-se que todos os agentes têm o mesmo perfil de lance, como pode ser visto na Figura 4.12. A diferença dos valores ocorre somente na quantidade

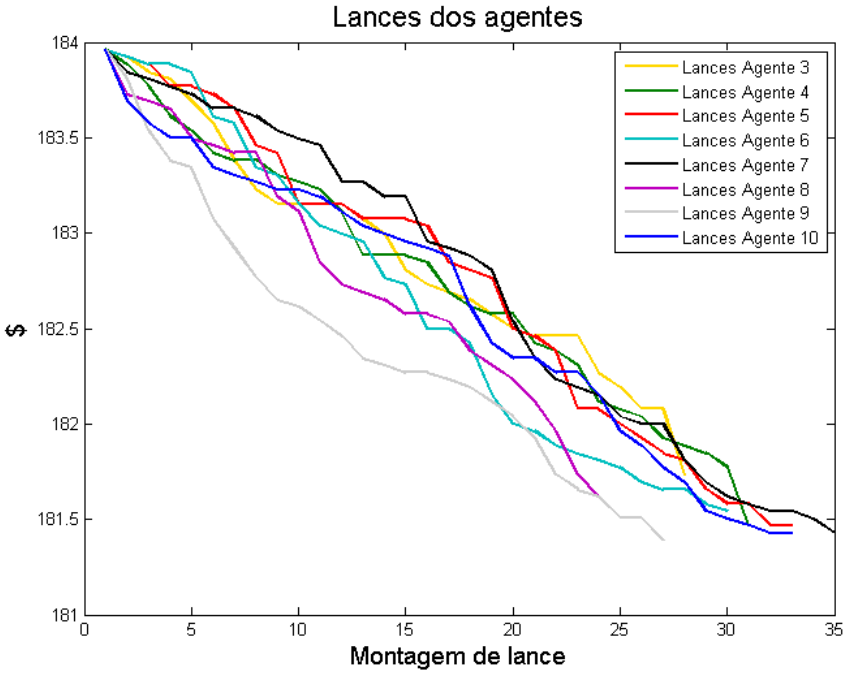
de vezes que um agente formou seu preço de lance, fato que determina o vencedor neste caso.

FIGURA 4.12 – Lances dos agentes para a estratégia 1 para o produto Hídrica-A



Para o teste com a estratégia 2 um fato semelhante ocorre. Como nessa estratégia o lance é formado pelo preço corrente menos o decremento, esse lance sempre será aceito. Dessa forma, independente da ordem de formação de lance, ganhará o agente que fizer o lance na última rodada, no caso do produto Hídrica-A ou os três últimos agentes que fizeram lances no caso dos produtos Eólica e Biomassa. Na Figura 4.13 está o perfil de formação de lances dos agentes, que como já dito, não ocorrem de forma paralela, mas sim sequencial e randomicamente determinada considerando as mesmas chances para todos os agentes.

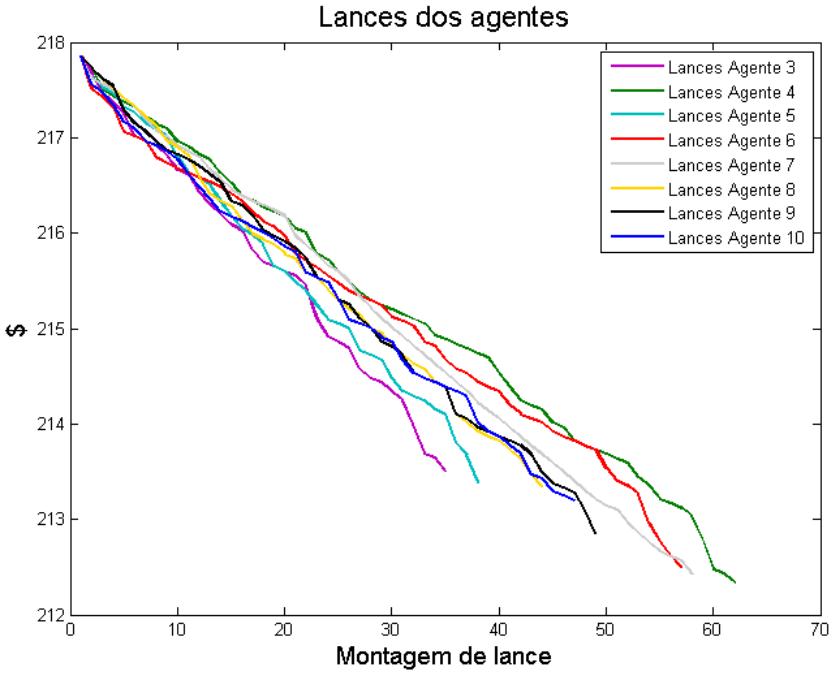
FIGURA 4.13 – Lances dos agentes para a estratégia 2 para o produto Eólica



Nestes dois casos, como cada leilão é fechado em 100 ou 200 lances aceitos na etapa contínua, o preço final pago pela energia do(s) vencedor(es) acaba sendo o mesmo, por depender somente da quantidade de rodadas. Dessa forma, nesses casos o desvio-padrão da queda entre o preço inicial e final pago pela energia é nulo.

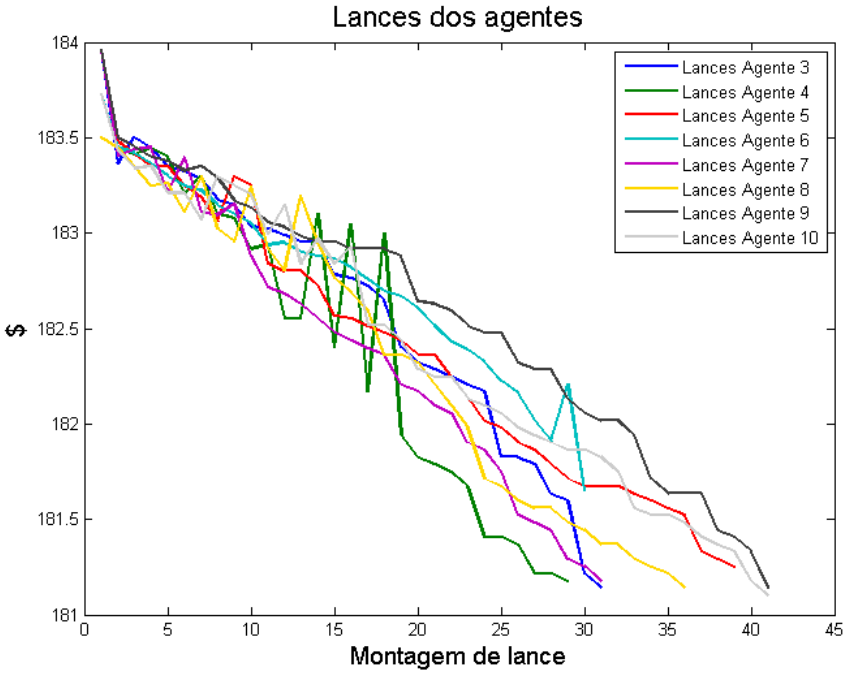
Já para o teste da estratégia 3, as diferenças no preço final pago pela energia podem ser atribuídas à sequência, à quantidade de lances aceitos de acada agente e à combinação entre as estratégias anteriores. Dessa forma, devido às diferentes possíveis combinações para este caso, os lances dos agentes apresentam pequenas diferenças. Aqui também nem sempre um lance formado será aceito, pois não há garantia que o mesmo será menor que o preço corrente. Na Figura 4.14 são apresentados os lances dos agentes que utilizam a estratégia 3 em uma determinada simulação do leilão.

FIGURA 4.14 – Lances dos agentes para a estratégia 3 para o produto Biomassa



Pode-se observar que o maior desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço final pago pela energia foi dos agentes inteligentes. Isso ocorreu porque o agente inteligente pode utilizar qualquer uma das três estratégias puras. Então, como nas rodadas iniciais a estratégia é escolhida aleatoriamente, já que o agente ainda não teve a oportunidade de aprender, a sequência em que cada agente as utiliza pode ser diferente. Na Figura 4.15 são apresentados os lances dos agentes inteligentes para uma simulação do produto Eólica.

FIGURA 4.15 – Lances dos agentes inteligentes para o produto Eólica



4.2.2.3 Concorrentes assimétricos

Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes com metade dos agentes possuindo uma estratégia ou a habilidade de aprender. Sendo assim, será possível fazer uma comparação par a par dos procedimentos de formação de lance. Como os agentes não usarão as mesmas alternativas para montar seus lances, nota-se que a disputa será feita por agentes assimétricos. Na primeira parte serão apresentados os resultados dos testes com comparação somente das estratégias puras para cada um dos produtos de energia. Após, serão evidenciados os resultados dos testes de cada estratégia pura com os agentes inteligentes.

Para o produto Hídrica-A, a configuração dos testes é dada por:

- Estratégia 1 *versus* estratégia 2: Os agentes 3 e 4 utilizam a estratégia 1 e os agentes 5 e 6 utilizam a estratégia 2;
- Estratégia 1 *versus* estratégia 3: Os agentes 3 e 4 utilizam a estratégia 1 e os agentes 5 e 6 utilizam a estratégia 3;
- Estratégia 2 *versus* estratégia 3: Os agentes 3 e 4 utilizam a estratégia 2 e os agentes 5 e 6 utilizam a estratégia 3.

Na Tabela 4.25 são apresentados os resultados para os testes com agentes assimétricos que utilizam estratégias puras considerando o produto Hídrica-A. É notório o desempenho

superior dos agentes que utilizam a estratégia 2, em contrapartida, os agentes que utilizam as estratégias 1 e 3 não apresentam grande numero de vitórias. Quando observado o teste Estratégia 1 *versus* estratégia 3, o número de vitórias de todos os agentes é bem próximo, não apontando nenhuma dominância entre essas estratégias.

TABELA 4.25 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras assimétricas para o produto Hídrica-A com mil simulações

Teste	**Vitórias**			
	Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**
Estratégia 1 *versus* estratégia 2	149	117	371	363
Estratégia 1 *versus* estratégia 3	233	267	248	252
Estratégia 2 *versus* estratégia 3	358	364	150	128

Para o produto Hídrica-A a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço final pago pela energia foi de:

- Estratégia 1 *versus* estratégia 2: 17,68% e 1,14%;
- Estratégia 1 *versus* estratégia 3: 26,53% e 1,00%;
- Estratégia 2 *versus* estratégia 3: 16,95% e 1,32%.

Para os produtos Eólica e Biomassa, a configuração dos testes é dada por:

- Estratégia 1 *versus* estratégia 2: Os agentes de 3 a 6 utilizam a estratégia 1 e os agentes 7 a 10 utilizam a estratégia 2;
- Estratégia 1 *versus* estratégia 3: Os agentes de 3 a 6 utilizam a estratégia 1 e os agentes 7 a 10 utilizam a estratégia 3;
- Estratégia 2 *versus* estratégia 3: Os agentes de 3 a 6 utilizam a estratégia 2 e os agentes 7 a 10 utilizam a estratégia 3.

Na Tabela 4.26 são apresentados os resultados para os testes com agentes assimétricos que utilizam estratégias puras considerando o produto Eólica. No teste Estratégia 1 *versus* estratégia 3 é interessante observar que quando analisadas as vitórias, os agentes que utilizam a estratégia 1 tendem a ficar em primeiro lugar, já os que utilizam a estratégia 3 obtiveram um maior número de vitórias nos segundos e terceiros lugares. Quanto aos demais testes, é possível observar que os agentes que utilizam a estratégia 2 possuem um maior número de vitórias e conseguiram a maioria dessas vitórias nas segundas e terceiras colocações.

TABELA 4.26 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras assimétricas para o produto Eólica com mil simulações

Teste	**Classificação**	**Vitórias**							
		Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
Estratégia 1	Primeiro lugar	89	97	117	119	132	159	156	131
versus	Segundo lugar	42	24	21	29	212	216	216	240
estratégia 2	Terceiro lugar	35	39	34	45	233	203	199	212
	Soma	166	160	172	193	577	578	571	583
Estratégia 1	Primeiro lugar	178	147	155	158	90	86	86	100
versus	Segundo lugar	107	109	113	102	139	127	139	164
estratégia 3	Terceiro lugar	89	91	104	100	157	162	156	141
	Soma	374	347	372	360	386	375	381	405
Estratégia 2	Primeiro lugar	145	144	159	142	111	99	95	105
versus	Segundo lugar	215	231	199	207	40	31	37	40
estratégia 3	Terceiro lugar	206	206	194	191	55	59	48	41
	Soma	566	581	552	540	206	189	180	186

Para o produto Eólica a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço médio pago pela energia dos vencedores foi de:

- Estratégia 1 *versus* estratégia 2: 1,58% e 0,13%;
- Estratégia 1 *versus* estratégia 3: 1,77% e 0,08%;
- Estratégia 2 *versus* estratégia 3: 1,44% e 0,08%.

Na Tabela 4.27 são apresentados os resultados para os testes com agentes assimétricos que utilizam estratégias puras considerando o produto Biomassa. Aqui, também é possível notar que no teste Estratégia 1 *versus* estratégia 3 os agentes que utilizam a estratégia 1 possuem mais primeiras colocações, já os agentes que utilizam a estratégia 3 tendem a ter mais terceiras colocações. Para o número de vitórias considerando o segundo lugar, os agentes que utilizam a estratégia 3 possuem um pequena vantagem. No teste Estratégia 1 *versus* estratégia 2 é observada uma maior quantidade de vitórias dos agentes que utilizam a estratégia 2, sendo que aqui também esses concorrentes obtiveram a maioria de suas vitórias nos segundos e terceiros lugares. Sobre o teste Estratégia 2 *versus* estratégia 3, os agentes que utilizam a primeira alternativa apresentaram uma maior quantidade de vitórias em todas as colocações.

TABELA 4.27 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras assimétricas para o produto Biomassa com mil simulações

Teste	**Classificação**	**Vitórias**							
		Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
Estratégia 1	Primeiro lugar	55	56	46	59	188	193	194	209
versus	Segundo lugar	18	15	17	31	231	236	231	221
estratégia 2	Terceiro lugar	31	32	30	25	224	216	227	215
	Soma	104	103	93	115	643	645	652	645
Estratégia 1	Primeiro lugar	168	146	165	146	89	103	94	89
versus	Segundo lugar	106	91	122	130	131	138	127	155
estratégia 3	Terceiro lugar	99	103	100	108	151	145	129	165
	Soma	373	340	387	384	371	386	350	409
Estratégia 2	Primeiro lugar	220	212	212	223	35	33	31	34
versus	Segundo lugar	245	245	210	210	27	23	22	18
estratégia 3	Terceiro lugar	179	211	225	221	33	50	38	43
	Soma	644	668	647	654	95	106	91	95

Para o produto Biomassa a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço médio pago pela energia dos vencedores foi de:

- Estratégia 1 *versus* estratégia 2: 2,44% e 0,45%;
- Estratégia 1 *versus* estratégia 3: 2,56% e 0,12%;
- Estratégia 2 *versus* estratégia 3: 2,34% e 0,30%.

Nos testes para agentes assimétricos com estratégias puras foi notório o melhor desempenho dos agentes que utilizavam a estratégia 2, seja para o produto Hídrica-A ou para os produtos Eólica e Biomassa. Para esses dois últimos, outro fato relevante foi a distribuição das vitórias dos agentes nas diferentes colocações dos vencedores. Além de possuir um melhor desempenho, em geral os agentes que utilizavam a estratégia 2 obtiveram a maioria de suas vitórias a partir das segundas e terceiras colocações. Já que a classificação dos agentes vencedores do leilão é determinada pelo valor crescente de seu último lance aceito e todos os agentes possuem o mesmo valor do parâmetro de custo de seu negócio, podemos afirmar que esses agentes possuem uma maior probabilidade de ter um lucro maior. Tal fato pode ser atribuído à lógica de formação de lance desta estratégia, o qual sempre será determinado pelo máximo valor possível de lance a ser aceito.

Sobre o teste Estratégia 1 *versus* estratégia 3, em termos gerais não houve um desempenho melhor de nenhum dos agentes. Entretanto, quando observado em quais colocações os agentes apresentaram a maioria de suas vitórias nos leilões com três vencedores, os agentes que utilizam a estratégia 3 também dominam as segundas e terceiras colocações, que, como já dito, proporcionam um preço pago pela energia mais alto que o primeiro lugar. Dessa forma, além das vitórias, outro aspecto que deve ser levado em consideração como fator de sucesso para os concorrentes do Leilão de Energia Nova é o preço pago pela sua energia, pois quanto maior esse valor, melhor para o agente.

Agora, serão apresentados os resultados dos testes de agentes que usam estratégias puras contra agentes inteligentes. Dessa forma, para o produto Hídrica-A, a configuração dos testes é dada por:

- Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes: Os agentes 3 e 4 utilizam a estratégia 1 e os agentes 5 e 6 são inteligentes;
- Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes: Os agentes 3 e 4 utilizam a estratégia 2 e os agentes 5 e 6 são inteligentes;
- Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes: Os agentes 3 e 4 utilizam a estratégia 3 e os agentes 5 e 6 são inteligentes.

Na Tabela 4.28 são apresentados os resultados para os testes com agentes assimétricos que utilizam estratégias puras contra agentes inteligentes considerando o produto Hídrica-A. Ela apresenta em destaque a maior quantidade de vitórias dos agentes inteligentes frente às estratégias 1 e 3. Porém, no teste Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes a quantidade de vitórias foi próxima para todos os agentes.

TABELA 4.28 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras e agentes inteligentes para o produto Hídrica-A com mil simulações

Teste	**Vitórias**			
	Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**
Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes	121	126	367	386
Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes	268	273	208	251
Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes	145	137	360	358

Para o produto Hídrica-A a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço final pago pela energia do vencedor foi de:

- Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes: 19,74% e 1,84%;
- Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes: 12,94% e 1,68%;
- Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes: 18,87% e 1,66%.

Para os produtos Eólica e Biomassa, a configuração dos testes é dada por:

- Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes: Os agentes de 3 a 6 utilizam a estratégia 1 e os agentes 7 a 10 são inteligentes;
- Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes: Os agentes de 3 a 6 utilizam a estratégia 2 e os agentes 7 a 10 são inteligentes;

- Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes: Os agentes de 3 a 6 utilizam a estratégia 3 e os agentes 7 a 10 são inteligentes.

Na Tabela 4.29 são apresentados os resultados para os testes com agentes assimétricos que utilizam estratégias puras contra agentes inteligentes considerando o produto Eólica. Paras os testes Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes e Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes é possível observar que os agentes com aprendizagem obtiveram a maioria de suas vitórias nos segundos e terceiros lugares. Já para o teste Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes o número de vitórias dos agentes e a distribuição das mesmas nas três colocações são equilibrados. Os agentes inteligentes obtiveram um bom desempenho em relação aos agentes que utilizavam as estratégias 1 e 3.

TABELA 4.29 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras e agentes inteligentes para o produto Eólica com mil simulações

Teste	**Classificação**	**Vitórias**							
		Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
Estratégia 1	Primeiro lugar	129	147	122	126	121	121	106	128
versus	Segundo lugar	23	31	30	39	227	225	203	222
agentes inteligentes	Terceiro lugar	39	26	40	33	232	211	227	192
	Soma	191	204	192	198	580	557	536	542
Estratégia 2	Primeiro lugar	137	133	130	129	111	130	120	110
versus	Segundo lugar	119	114	138	128	130	124	121	126
agentes inteligentes	Terceiro lugar	115	115	132	125	131	130	120	132
	Soma	371	362	400	382	372	384	361	368
Estratégia 3	Primeiro lugar	120	122	111	114	123	147	131	132
versus	Segundo lugar	47	40	36	46	229	185	204	213
agentes inteligentes	Terceiro lugar	37	51	53	49	202	194	228	186
	Soma	204	213	200	209	554	526	563	531

Para o produto Eólica a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço médio pago pela energia dos vencedores foi de:

- Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes: 1,64% e 0,09%;
- Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes: 1,57% e 0,06%;
- Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes: 1,51% e 0,07%.

Na Tabela 4.30 são apresentados os resultados para os testes com agentes assimétricos que utilizam estratégias puras contra agentes inteligentes considerando o produto Biomassa. Aqui nota-se que os agentes inteligentes apresentaram um número de vitórias superior aos agentes que utilizavam a estratégia 1 ou 3. Considerando o teste Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes, é possível observar que os agentes inteligentes têm a maioria de suas vitórias nas segundas e terceiras posições. Nos demais testes, esta divisão é equilibrada.

TABELA 4.30 – Resultados de vencedores dos testes com estratégias puras e agentes inteligentes para o produto Biomassa com mil simulações

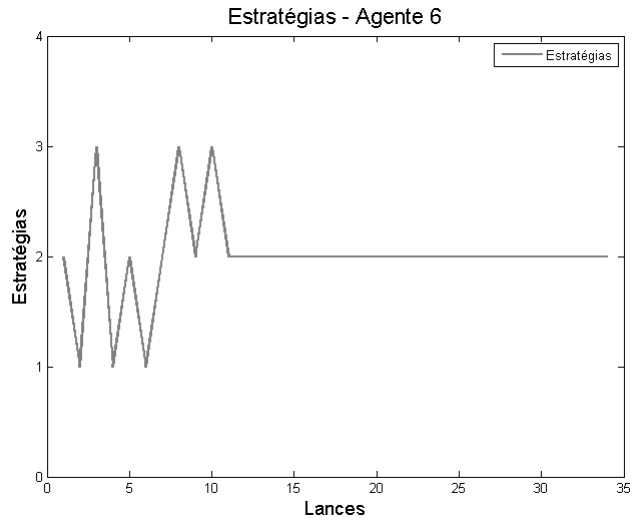
Teste	**Classificação**	**Vitórias**							
		Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
Estratégia 1	Primeiro lugar	65	73	60	60	189	182	200	171
versus	Segundo lugar	28	28	30	25	211	211	225	242
agentes inteligentes	Terceiro lugar	35	30	20	28	211	212	239	225
	Soma	128	131	110	113	611	605	664	638
Estratégia 2	Primeiro lugar	132	129	133	130	127	124	122	103
versus	Segundo lugar	127	132	130	112	130	114	122	133
agentes inteligentes	Terceiro lugar	146	108	143	122	118	127	113	123
	Soma	405	369	406	364	375	365	357	359
Estratégia 3	Primeiro lugar	52	49	50	50	200	193	196	210
versus	Segundo lugar	33	27	25	39	210	218	220	228
agentes inteligentes	Terceiro lugar	55	35	55	56	202	201	216	180
	Soma	140	111	130	145	612	612	632	618

Para o produto Biomassa a média e desvio-padrão da queda entre o preço inicial do produto e o preço médio pago pela energia dos vencedores foi de:

- Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes: 2,48% e 0,26%;
- Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes: 2,83% e 0,10%;
- Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes: 2,35% e 0,19%.

Conforme já identificado em testes anteriores, a estratégia 2 apresenta uma superioridade em seu desempenho. Bem próxima dela, os agentes inteligentes também apresentam um significativo número de vitórias. Como pode ser visto na Figura 4.16, em determinada simulação do teste Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes, o agente 6 adotou a estratégia 2 após um momento de aprendizagem. Tal fato garantiu sua taxa de sucesso em obter as vitórias.

FIGURA 4.16 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes para o produto Hídrica-A



Outro aspecto relevante de se observar é que para os leilões com três vencedores, em geral, os agentes inteligentes obtiveram a maioria de suas vitórias nas segundas e terceiras colocações. Tal fato confere a esses agentes uma remuneração mais alta pela sua energia. Como já dito, além da quantidade de vitórias, outro ponto relevante para o sucesso do agente é obter um maior lucro para seu negócio. Isso só não ocorreu nos testes Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes, os quais apresentaram um grande equilíbrio entre os diferentes agentes em termos de número de vitórias e distribuição da quantidade de vitórias nas diferentes colocações.

Nos testes Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes para os diferentes produtos de energia é possível observar que a quantidade de vitórias para os agentes é bem próxima, com uma leve vantagem dos agentes que utilizam a estratégia 2. Tal fato pode ser explicado pelo tempo de aprendizagem necessário aos agentes inteligentes até que identifiquem a estratégia mais vantajosa, o que pode diminuir a quantidade de lances formados pela estratégia 2 no caso de agentes inteligentes. Aqui os agentes inteligentes tenderam a escolher também a estratégia 2 após aprenderem que ela era a melhor alternativa.

A Tabela 4.31 apresenta os lucros dos agentes vencedores por MWh nos testes realizados. Como pode ser observado, apesar dos agentes que utilizam a estratégia 2 só utilizarem informação do ambiente, eles possuem os maiores lucros para os produtos Hídrica-A e Eólica. Como já mencionado, como os agentes possuem o mesmo custo, aqueles que venceram nas terceiras colocações dos produtos Eólica e Biomassa possuíram maior lucro. Nestes testes todos agentes obtiveram lucros, mesmo que pequenos.

TABELA 4.31 – Lucro por MWh dos vencedores para cada teste e produto

Elementos	**Hídrica-A**	**Eólica**				**Biomassa**			
		Primeiro lugar	**Segundo lugar**	**Terceiro lugar**	**Média**	**Primeiro lugar**	**Segundo lugar**	**Terceiro lugar**	**Média**
Diversas estratégias	21,02	81,12	81,18	81,19	81,16	92,70	92,74	92,78	92,74
Estratégia 1	6,36	80,04	80,27	80,41	80,24	91,14	91,57	91,85	91,52
Estratégia 2	32,58	81,39	81,43	81,43	81,42	91,64	91,74	91,74	91,71
Estratégia 3	10,10	80,99	81,09	81,16	81,08	92,92	93,11	93,24	93,09
Agentes inteligentes	25,16	81,12	81,14	81,15	81,14	92,27	92,30	92,33	92,30
Estratégia 1 *versus* Estratégia 2	21,83	81,06	81,11	81,13	81,10	92,63	92,68	92,72	92,68
Estratégia 1 *versus* Estratégia 3	8,73	80,59	80,76	80,86	80,74	92,13	92,47	92,66	92,42
Estratégia 2 *versus* Estratégia 3	22,91	81,32	81,35	81,36	81,34	92,87	92,90	92,94	92,90
Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes	18,78	80,93	81,00	81,02	80,98	92,54	92,61	92,65	92,60
Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes	28,84	81,09	81,11	81,12	81,11	91,79	91,82	91,85	91,82
Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes	20,08	81,19	81,23	81,25	81,22	92,82	92,87	92,91	92,87

4.2.3 Análise das Simulações

Para analisar se há diferenças relevantes entre o número de vitórias dos diferentes agentes, este estudo utilizará o teste estatístico Kruskal Wallis. Este teste foi escolhido já que não se pode afirmar que a variável aleatória que representa a quantidade de vitórias de

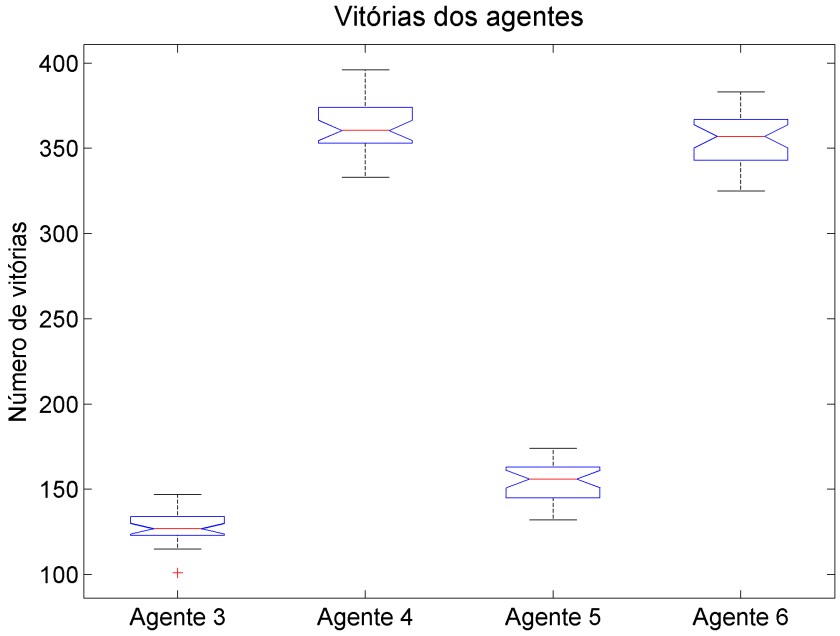
cada agente durante as simulações dos leilões segue uma distribuição Normal. Portanto, foi escolhido um teste estatístico não paramétrico que possa comparar várias amostras. Sendo assim, as hipóteses são definidas como:

- H_0: não há diferenças significativas entre o desempenho dos agentes em termos de números de vitórias;
- H_1: há diferenças significativas entre o desempenho dos agentes em termos de números de vitórias.

Objetivando coletar dados que formam as amostras a serem testadas, as simulações dos leilões para os produtos Hídrica-A, Eólica e Biomassa com estratégias diversas foram executadas trinta vezes cada. Dessa maneira, uma amostra de dados para este teste estatístico é o conjunto de vitórias de determinado agente, que contém trinta elementos. Como na implementação do produto Hídrica-A há a participação de quatro agentes, portanto, os dados de entrada do teste de Kruskal Wallis são formados de quatro amostras com trinta elementos cada. Já para os produtos Eólica e Biomassa os dados de entrada são formados por oito amostras com trinta elementos cada uma. Esses dados pode ser vistos no Apêndice C.1.

Os testes estatísticos de Kruskal Wallis foram realizados em MATLAB por meio de função específica para tal. Primeiramente, o teste para o produto Hidrica-A com quatro agentes em conjunto foi realizado, a tela de saída do *software* pode ser vista no Apêndice C.2. Neste, o valor-p foi de $2,83.10^{-21}$. Sendo assim, como esse valor está bem abaixo dos valores de referência, pode-se concluir que a H_0 será rejeitada, apontando que há diferenças significativas entre pelo menos uma das amostras. Na Figura 4.17 podemos ver o diagrama de caixa entalhado, no qual o entalhe dos blocos que representam número de vitórias dos agentes 3 e 5 não se sobrepõem a nenhum outro. Porém, quando analisado os entalhes dos blocos que representam as vitórias dos agentes 4 e 6, há algum intervalo de sobreposição.

FIGURA 4.17 – Diagrama de caixa entalhado para o número de vitórias dos agentes considerando trinta testes de estratégias diversas para o produto Hídrica-A



Pelo teste de Kruskal Wallis pode-se somente rejeitar a H_0, portanto, por ele sabe-se somente que há uma ou mais amostras que possuem diferenças estatisticamente significantes. Para realizar a comparação par a par, esses dados foram levados a testes *post-hoc* realizados por meio de uma aplicação em R disponibilizada em Vasavada (2016). Na Tabela 4.32 são apresentados os resultados do valor-p para os testes de Dunn e Conover. Por esses valores percebemos que a H_0 só não pode ser rejeitada na comparação dos agentes 4 e 6, pois todos os demais valores-p são menores que os valores de referência. Dessa forma, temos que estatisticamente o número de vitórias desses agentes destoam dos demais, o que corrobora com o desempenho superior detectado nos testes da seção anterior.

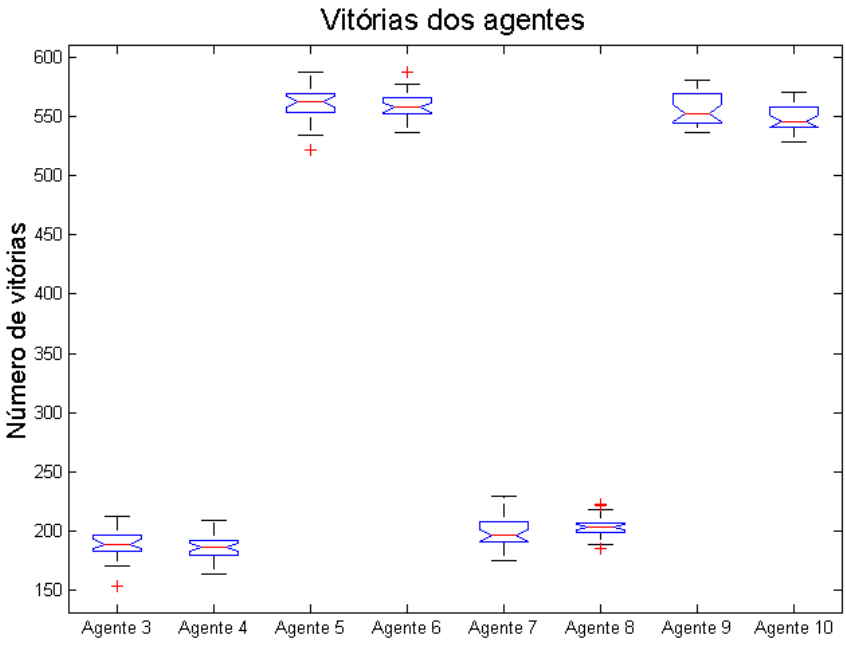
TABELA 4.32 – Resultados de valores-p para os testes *post-hoc* de comparação par a par de Conover e de Dunn do produto Hídrica-A

Testes	**Valor-p**	
	Conover	**Dunn**
Agente 3 e agente 4	$2,09.10^{-39}$	$9,86.10^{-17}$
Agente 3 e agente 5	$6,98.10^{-11}$	$3,09.10^{-3}$
Agente 3 e agente 6	$1,36.10^{-36}$	$1,16.10^{-14}$
Agente 4 e agente 5	$1,64.10^{-24}$	$7,48.10^{-8}$
Agente 4 e agente 6	$1,18.10^{-1}$	$5,11.10^{-1}$
Agente 5 e agente 6	$5,71.10^{-21}$	$2,00.10^{-6}$

Analogamente ao produto Hídrica-A, os testes para os produtos Eólica e Biomassa fo-

ram realizados considerando os oito agentes em conjunto. As saídas desses testes também podem ser vistas no Apêndice C.2. Para o produto Eólica o valor-p foi de $1,09.10^{-37}$, o que rejeita H_0. A Figura 4.18 apresenta o diagrama de caixa entalhado para os dados de entrada do produto Eólica. Nele é possível perceber que os agentes 5, 6, 9 e 10 possuem trechos do entalhe sobrepostos.

FIGURA 4.18 – Diagrama de caixa entalhado para o número de vitórias dos agentes considerando trinta testes de estratégias diversas para o produto Eólica



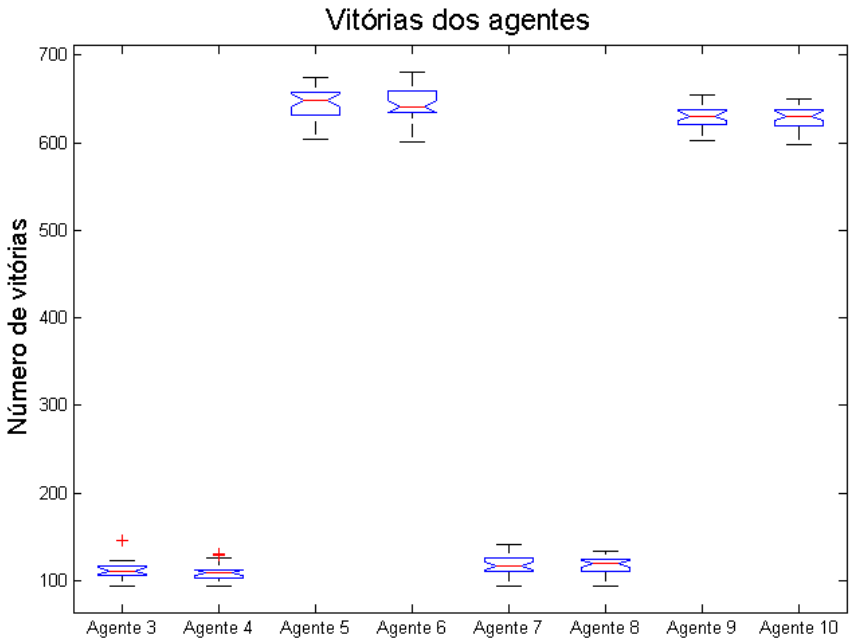
Aqui também utilizou-se dos testes textitpost-hoc de Dunn e Conover. Na Tabela 4.33 é possível perceber que para a comparação entre os agentes 5, 6, 9 e 10 há maiores valores do parâmetro valor-p, o que faz com que não se rejeite H_0 nestes casos.

TABELA 4.33 – Resultados de valores-p para os testes *post-hoc* de comparação par a par de Conover e de Dunn para o produto Eólica

Testes	Valor-P		Testes	Valor-P	
	Conover	Dunn		Conover	Dunn
Agente 3 e agente 4	$2,78.10^{-01}$	$6,51.10^{-01}$	Agente 5 e agente 7	$1,45.10^{-34}$	$6,19.10^{-11}$
Agente 3 e agente 5	$1,63.10^{-43}$	$8,73.10^{-15}$	Agente 5 e agente 8	$4,85.10^{-29}$	$6,76.10^{-09}$
Agente 3 e agente 6	$1,30.10^{-41}$	$6,38.10^{-14}$	Agente 5 e agente 9	$2,78.10^{-01}$	$6,51.10^{-01}$
Agente 3 e agente 7	$7,17.10^{-03}$	$2,57.10^{-01}$	Agente 5 e agente 10	$7,02.10^{-04}$	$1,50.10^{-01}$
Agente 3 e agente 8	$1,55.10^{-05}$	$6,09.10^{-02}$	Agente 6 e agente 7	$1,33.10^{-32}$	$3,55.10^{-10}$
Agente 3 e agente 9	$6,00.10^{-40}$	$3,42.10^{-13}$	Agente 6 e agente 8	$4,34.10^{-27}$	$3,26.10^{-08}$
Agente 3 e agente 10	$3,20.10^{-32}$	$4,70.10^{-10}$	Agente 6 e agente 9	$5,98.10^{-01}$	$8,10.10^{-01}$
Agente 4 e agente 5	$1,11.10^{-46}$	$4,24.10^{-16}$	Agente 6 e agente 10	$5,08.10^{-03}$	$2,43.10^{-01}$
Agente 4 e agente 6	$5,28.10^{-45}$	$2,24.10^{-15}$	Agente 7 e agente 8	$1,01.10^{-01}$	$5,03.10^{-01}$
Agente 4 e agente 7	$1,54.10^{-04}$	$1,05.10^{-01}$	Agente 7 e agente 9	$6,08.10^{-31}$	$1,38.10^{-09}$
Agente 4 e agente 8	$6,93.10^{-08}$	$1,59.10^{-02}$	Agente 7 e agente 10	$2,77.10^{-23}$	$5,94.10^{-07}$
Agente 4 e agente 9	$1,63.10^{-43}$	$8,73.10^{-15}$	Agente 8 e agente 9	$2,08.10^{-25}$	$1,20.10^{-07}$
Agente 4 e agente 10	$6,82.10^{-36}$	$1,88.10^{-11}$	Agente 8 e agente 10	$5,66.10^{-18}$	$2,66.10^{-05}$
Agente 5 e agente 6	$5,65.10^{-01}$	$8,10.10^{-01}$	Agente 9 e agente 10	$2,12.10^{-02}$	$3,34.10^{-01}$

Na Figura 4.19 é apresentado o o diagrama de caixa entalhado para os dados de entrada do produto Biomassa. Nele pode-se perceber que agentes que possuem a mesma estratégia têm trechos de sobreposição em seus entalhes. Para o teste Kruskal Wallis com todos os oito agentes o valor-p obtido foi de $1,16.10^{-37}$, fazendo com que se rejeite a H_0.

FIGURA 4.19 – Diagrama de caixa entalhado para o número de vitórias dos agentes considerando trinta testes de estratégias diversas para o produto Biomassa



Na Tabela 4.34 são apresentados os testes *post-hoc* de Dunn e Conover para os dados do produto Biomassa. Nele é possível perceber que para a comparação de agentes que utilizam a mesma estratégia o valor-p é maior, assim, para os dados desses agentes não se rejeita H_0.

TABELA 4.34 – Resultados de valores-p para os testes de comparação par a par de Conover e de Dunn para o produto Biomassa

Testes	**Valor-P**		**Testes**	**Valor-P**	
	Conover	**Dunn**		**Conover**	**Dunn**
Agente 3 e agente 4	$7,22.10^{-01}$	$8,90.10^{-01}$	Agente 5 e agente 7	$1,06.10^{-37}$	$3,59.10^{-12}$
Agente 3 e agente 5	$1,60.10^{-45}$	$9,20.10^{-16}$	Agente 5 e agente 8	$3,95.10^{-37}$	$5,73.10^{-12}$
Agente 3 e agente 6	$2,28.10^{-44}$	$3,06.10^{-15}$	Agente 5 e agente 9	$3,17.10^{-05}$	$6,99.10^{-02}$
Agente 3 e agente 7	$1,80.10^{-02}$	$3,09.10^{-01}$	Agente 5 e agente 10	$5,60.10^{-06}$	$4,87.10^{-02}$
Agente 3 e agente 8	$1,09.10^{-02}$	$2,78.10^{-01}$	Agente 6 e agente 7	$1,51.10^{-36}$	$9,33.10^{-12}$
Agente 3 e agente 9	$9,63.10^{-32}$	$6,49.10^{-10}$	Agente 6 e agente 8	$5,87.10^{-36}$	$1,54.10^{-11}$
Agente 3 e agente 10	$2,21.10^{-30}$	$2,04.10^{-09}$	Agente 6 e agente 9	$1,47.10^{-04}$	$9,97.10^{-02}$
Agente 4 e agente 5	$1,53.10^{-46}$	$4,60.10^{-16}$	Agente 6 e agente 10	$2,92.10^{-05}$	$6,99.10^{-02}$
Agente 4 e agente 6	$1,43.10^{-45}$	$9,20.10^{-16}$	Agente 7 e agente 8	$8,45.10^{-01}$	$9,29.10^{-01}$
Agente 4 e agente 7	$5,22.10^{-03}$	$2,36.10^{-01}$	Agente 7 e agente 9	$7,47.10^{-24}$	$4,09.10^{-07}$
Agente 4 e agente 8	$2,95.10^{-03}$	$2,10.10^{-01}$	Agente 7 e agente 10	$1,43.10^{-22}$	$9,86.10^{-07}$
Agente 4 e agente 9	$3,53.10^{-33}$	$1,99.10^{-10}$	Agente 8 e agente 9	$2,91.10^{-23}$	$6,12.10^{-07}$
Agente 4 e agente 10	$8,01.10^{-32}$	$6,40.10^{-10}$	Agente 8 e agente 10	$5,56.10^{-22}$	$1,47.10^{-06}$
Agente 5 e agente 6	$7,22.10^{-01}$	$8,90.10^{-01}$	Agente 9 e agente 10	$7,22.10^{-01}$	$8,90.10^{-01}$

Em termos práticos, os resultados dos testes estatísticos foram muito coerentes com o observado durante as simulações. Tendo em vista que os agentes inteligentes geralmente adotavam a estratégia 2 após um período de aprendizagem, temos então que quando comparávamos o número de vitórias dos agentes 4 e 6, no caso do produto Hídrica-A e dos agentes 5, 6, 9 e 10 no caso dos demais produtos, na verdade estávamos comparando o uso da mesma estratégia, a 2. Então, é esperado que não se encontre diferenças significativas de resultados obtidos por meio da mesma lógica em um mesmo ambiente.

Para realizar uma análise dos resultados apresentados na Seção 4.2.2 com relação à queda do preço final pago pela energia em relação ao seu preço inicial, serão evidenciadas essas métricas organizadas por produto. A Tabela 4.35 apresenta o resumo dos resultados para o produto Hídrica-A. Nela é possível observar que os testes que apresentaram maior queda percentual do preço médio pago pela energia em relação ao preço inicial foram aqueles que tinham a participação de agentes que seguiam a estratégia 1 e/ou 3. Em geral, os agentes que utilizaram dessas estratégias apresentaram um desempenho ruim.

TABELA 4.35 – Resumo dos resultados obtidos para o produto Hídrica-A com um vencedor

Teste	**Queda percentual do preço pago pela energia**	
	Média	**Desvio-padrão**
Diversas estratégias	18,23	1,40
Estratégia 1	28,13	0,00
Estratégia 2	10,42	0,00
Estratégia 3	25,61	1,24
Agentes inteligentes	15,43	2,13
Estratégia 1 *versus* estratégia 2	17,68	1,14
Estratégia 1 *versus* estratégia 3	26,53	1,00
Estratégia 2 *versus* estratégia 3	16,95	1,32
Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes	19,74	1,84
Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes	12,94	1,68
Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes	18,87	1,66

Na Tabela 4.36 é apresentado o resumo dos resultados para as simulações do produto Eólica. Nesta tabela também é evidenciado que os testes que apresentaram maior queda percentual do preço médio pago pela energia em relação ao preço inicial foram aqueles que tinham a participação de agentes que seguiam a estratégia 1 e/ou 3. Já as estratégias que apresentaram maior desempenho, como a estratégia 2, resultaram em valores menores de queda.

TABELA 4.36 – Resumo dos resultados obtidos para o produto Eólica com três vencedores

Teste	**Queda percentual do preço pago pela energia**	
	Média	**Desvio-padrão**
Diversas estratégias	1,54	0,08
Estratégia 1	2,04	0,00
Estratégia 2	1,40	0,00
Estratégia 3	1,59	0,10
Agentes inteligentes	1,55	0,17
Estratégia 1 *versus* estratégia 2	1,58	0,13
Estratégia 1 *versus* estratégia 3	1,77	0,08
Estratégia 2 *versus* estratégia 3	1,44	0,08
Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes	1,64	0,09
Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes	1,57	0,06
Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes	1,51	0,07

Na Tabela 4.37 é apresentado o resumo dos resultados para as simulações do produto Biomassa. Aqui é evidenciado que os testes que apresentaram maior queda percentual do preço médio pago pela energia em relação ao preço inicial foram aqueles que tinham a participação de agentes que seguiam a estratégia 1, 2 ou eram inteligentes.

TABELA 4.37 – Resumo dos resultados obtidos para o produto Biomassa com três vencedores

Teste	**Queda percentual do preço pago pela energia**	
	Média	**Desvio-padrão**
Diversas estratégias	2,41	0,25
Estratégia 1	2,97	0,00
Estratégia 2	2,89	0,00
Estratégia 3	2,25	0,16
Agentes inteligentes	2,61	0,51
Estratégia 1 *versus* estratégia 2	2,44	0,35
Estratégia 1 *versus* estratégia 3	2,56	0,12
Estratégia 2 *versus* estratégia 3	2,34	0,30
Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes	2,48	0,26
Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes	2,83	0,10
Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes	2,35	0,19

Tendo em vista que os valores dos parâmetros utilizados nas simulações dos leilões interferem diretamente nos valores de queda, faz-se necessário mais testes. Para estender a análise sobre os aspectos que afetam a queda percentual do preço pago pela energia, na próxima seção será apresentada uma análise de sensibilidade das implementações.

4.2.4 Análise de Sensibilidade

Com o objetivo de obter mais conclusões sobre os efeitos dos valores de parâmetros sobre os resultados das simulações, nesta seção será apresentada uma análise de sensibilidade. Na Seção 4.2.2 foram apresentados oito parâmetros necessários ao subsistema de competição. Os parâmetros de capacidade remanescente do SIN, quantidade de lotes demandados e lotes ofertados por cada concorrente foram determinados conforme informações do subsistema de cooperação por terem influência direta na determinação da quantidade de vencedores em cada leilão. Já os demais parâmetros tiveram seus valores obtidos por meio de um processo de calibração.

Com o objetivo de verificar a influência dos valores desses últimos, foi proposta uma variação de 20% e 50% para mais e para menos dos valores apresentados nas Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18 para os produtos Hídrica-A, Eólica e Biomassa, respectivamente. Dessa maneira, cada um dos cinco parâmetros possuía quatro valores possíveis para sua variação e para as simulações será utilizada a implementação com estratégias diversas, apresentada na Seção 4.2.2.1. A fim de investigar a influência de variação de valor de cada parâmetro e a influência da variação conjunta de todos eles, foram propostos vinte e quatro testes, sendo os vinte primeiros com a variação de cada parâmetro por vez com cada um dos quatro valores possíveis e os quatro últimos com a variação conjunta dos valores dos

parâmetros de +20%, -20%, +50% e -50%. No Apêndice D é possível ver os valores dos parâmetros para cada teste.

Antes de apresentar os resultados da análise de sensibilidade para cada produto, é importante mencionar que combinações de valores dos parâmetros margem mínima de lucro do concorrente e custo do concorrente podem fazer com que os lances formados por agentes que utilizam as estratégias 1 e 3 sejam maiores que o preço corrente, o qual tem seu primeiro valor igual ao do parâmetro preço inicial. Dessa forma, nestes casos, haveria uma maior rejeição de lances desses agentes, o que representaria uma queda de concorrência no leilão. Além disso, como há variação de parâmetros que influenciam diretamente no valor final pago pela energia e obrigatoriamente deve haver vencedor(es) no leilão, para esses testes serão analisados o valor da queda percentual do preço pago pela energia.

Na Tabela 4.38 são apresentados os resultados para a análise de sensibilidade do produto Hídrica-A. Em geral, os agentes que utilizam a estratégia 2 ou são inteligentes apresentaram um maior número de vitórias aqui também. Pelos resultados pode-se observar que valores de preço inicial mais altos fazem com que mais agentes tenham seus lances aceitos, o que incentiva a concorrência fazendo com que a queda percentual do preço pago pela energia seja maior (vide resultados dos testes 1 e 11). O mesmo ocorre quando se tem o custo do concorrente mais baixo (vide resultados dos testes 10 e 20). Já valores baixos de preço inicial fazem com que os agentes que utilizam a estratégia 1 e 3 tenham poucos lances aceitos, diminuindo a concorrência e, consequentemente, reduzindo o valor de queda percentual do preço pago pela energia (vide resultados dos testes 6 e 16). O mesmo ocorre quado os valores de custo do concorrente é alto (vide resultados dos testes 5 e 15).

TABELA 4.38 – Resultados da análise de sensibilidade para o produto Hídrica-A

Teste	Vitórias				Queda percentual do preço pago pela energia	
	Agente 3	Agente 4	Agente 5	Agente 6	Média	Desvio-padrão
Padrão	150	378	151	321	18,23	1,40
1	143	375	152	330	31,83	1,13
2	93	381	141	385	18,64	1,32
3	143	373	145	339	16,49	1,52
4	143	323	181	353	20,25	1,49
5	7	502	12	479	10,43	0,09
6	0	494	0	506	10,42	0,01
7	156	331	158	355	17,89	1,49
8	101	413	125	361	21,35	1,08
9	126	363	137	374	15,95	1,19
10	125	345	179	351	34,55	1,10
11	119	402	138	341	45,47	0,98
12	70	415	89	426	19,54	1,17
13	135	348	176	341	14,39	1,64
14	131	354	167	348	22,73	1,55
15	0	498	0	502	10,42	0,00
16	0	483	0	517	10,42	0,00
17	173	331	169	327	17,56	1,51
18	26	458	51	465	26,56	0,58
19	55	423	83	439	12,42	0,72
20	108	357	169	366	59,06	0,67
21	142	385	127	346	19,02	1,55
22	125	389	152	334	19,16	1,00
23	116	375	135	374	20,81	1,73
24	98	408	126	368	22,17	0,45

Para as implementações com três vencedores, as combinações de valores de custo do concorrente e margem mínima de lucro do concorrente também podem inviabilizar o aceite de lances de alguns agentes. Porém, como há três vencedores neste leilão, após várias rodadas e com o decrescimento da margem mínima de lucro do agente, os valores destes lances podem diminuir e em poucas simulações os agentes que utilizam as estratégias 1 e 3 conseguem ser vencedores. Tal fato faz com que os valores do preço pago pela energia tenham grande dispersão em alguns testes dos produtos Eólica e Biomassa (vide resultados dos testes 3, 5, 6, 13, 15, 16, 21 e 23 de ambos os produtos).

Os resultados da análise de sensibilidade para o produto Eólica são apresentados na Tabela 4.39. Nele é possível perceber que o preço inicial mais alto (vide resultados dos testes 1 e 11) e o custo do concorrente mais baixo (vide resultados dos testes 10 e 20) aumentam a queda percentual do preço pago pela energia, analogamente ao produto Hídrica-A. Além disso, nota-se também, que tal fenômeno pode ser visto quando usa-se uma menor margem de lucro do concorrente (vide resultado do teste 18). No entanto, quando se tem um decremento menor (vide resultados dos testes 7 e 17) ou decréscimo da

margem mínima do concorrente menor (vide resultados dos testes 9 e 19), há uma menor queda percentual do preço pago pela energia.

TABELA 4.39 – Resultados da análise de sensibilidade para o produto Eólica

Teste	Vitórias								Queda percentual do preço pago pela energia	
	Agente 3	Agente 4	Agente 5	Agente 6	Agente 7	Agente 8	Agente 9	Agente 10	Média	Desvio-padrão
Padrão	197	186	548	580	185	208	543	553	1,54	0,08
1	172	197	547	574	209	201	538	562	17,95	0,08
2	128	126	621	611	141	128	600	645	1,65	0,15
3	12	8	947	947	15	14	534	523	0,21	0,36
4	261	242	508	511	249	252	505	472	1,67	0,08
5	14	12	945	946	10	7	540	526	0,21	0,35
6	13	13	933	953	16	8	537	527	0,23	0,38
7	258	232	503	456	259	282	520	490	1,42	0,07
8	155	151	614	559	157	161	601	602	10,42	0,09
9	121	108	641	642	123	145	609	611	1,4	0,13
10	175	202	555	560	193	207	559	549	21,23	0,06
11	193	186	569	565	187	191	562	547	34,36	0,06
12	35	30	747	711	55	50	683	689	1,82	0,35
13	15	16	942	942	14	9	540	522	0,23	0,38
14	292	313	462	451	293	305	451	433	1,89	0,09
15	16	13	942	928	16	13	571	501	0,23	0,38
16	6	14	932	946	11	23	546	522	0,22	0,36
17	405	377	366	366	359	392	359	376	1,26	0,06
18	19	21	743	740	34	48	699	696	23,74	0,19
19	1	1	804	783	4	2	717	688	1,12	0,36
20	184	213	558	545	209	188	563	540	50,77	0,05
21	8	20	947	930	6	3	575	511	0,28	0,47
22	128	138	612	628	158	154	606	576	10,2	0,09
23	10	6	954	939	8	12	527	544	0,33	0,55
24	25	22	728	759	40	34	698	694	23,36	0,09

Para o produto Biomassa, os resultados da análise de sensibilidade são apresentados na Tabela 4.40. De maneira geral, aqui também faz-se a mesma análise do produto Eólica. Ademais, é importante mencionar que quando se tem uma combinação de margem mínima de lucro e custo do concorrente que proporcione lances menores, e também há um valor de decremento menor, as vitórias se distribuem de forma mais uniforme entre os diferentes agentes. Tal fato é consequência da proximidade dos valores de lances dos diferentes agentes ao longo das rodadas do leilão. Isso pode ser observado no teste 17 tanto do produto Eólica quanto do produto Biomassa.

TABELA 4.40 – Resultados da análise de sensibilidade para o produto Biomassa

Teste	Vitórias								Queda percentual do preço pago pela energia	
	Agente 3	Agente 4	Agente 5	Agente 6	Agente 7	Agente 8	Agente 9	Agente 10	Média	Desvio-padrão
Padrão	123	102	640	625	134	123	630	623	2,41	0,25
1	102	108	631	650	113	132	630	634	18,65	0,22
2	30	24	715	740	38	50	693	710	2,58	0,65
3	9	15	928	930	11	13	539	555	25,51	42,31
4	178	156	567	593	177	191	568	570	2,64	0,20
5	13	8	916	921	18	14	590	520	23,65	41,30
6	16	10	920	935	17	12	542	548	25,79	42,27
7	182	174	559	585	211	180	557	552	2,18	0,15
8	42	42	703	736	63	61	685	668	11,04	0,40
9	27	23	746	751	38	29	688	698	2,17	0,54
10	111	124	635	628	130	110	640	622	21,91	0,19
11	106	109	636	664	123	121	612	629	34,92	0,17
12	3	0	790	800	2	4	705	696	2,85	1,06
13	6	8	938	925	13	9	567	534	26,95	43,11
14	238	249	534	508	262	225	513	471	2,96	0,16
15	18	12	909	929	14	14	572	532	27,84	43,53
16	7	6	926	930	10	11	569	541	25,04	41,23
17	329	342	416	452	342	314	405	400	1,81	0,10
18	1	0	783	789	6	2	721	698	23,89	0,59
19	0	0	818	845	0	0	691	646	1,53	0,87
20	105	110	656	634	124	125	622	624	51,19	0,14
21	10	17	929	925	13	11	520	575	25,48	42,44
22	45	49	722	723	57	60	685	659	10,65	0,33
23	13	8	929	925	19	10	571	525	26,38	42,95
24	1	0	776	773	2	4	730	714	23,23	0,28

Para analisar melhor os efeitos conjuntos das variações desses cinco parâmetros, foi realizado um teste que permite a variação uniforme de cada um deles com valores 50% menores e maiores que os apresentados nas Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18 para os leilões dos produtos Hídrica-A, Eólica e Biomassa, respectivamente. Na Tabela 4.41 são apresentados os resultados para estes testes. Por eles é possível perceber que os agentes que utilizam a estratégia 2 possuem um maior número de vitórias, seguidos dos agentes inteligentes. Já os valores de queda percentual do preço pago pela energia possuem grande dispersão devido a grade variação de parâmetros, tendo uma média bem maior que os valores apresentados para os testes com diversidade de estratégias apresentados em 4.2.2.

TABELA 4.41 – Resultados para a análise de sensibilidade considerando a variação conjunta dos parâmetros

Testes	Vitórias								Queda percentual do preço pago pela energia	
	Agente 3	Agente 4	Agente 5	Agente 6	Agente 7	Agente 8	Agente 9	Agente 10	Média	Desvio-padrão
Hídrica-A	75	423	92	410	-	-	-	-	25,89	18,01
Eólica	89	97	776	749	83	95	560	551	14,12	18,19
Biomassa	68	75	777	790	52	62	565	611	27,41	31,40

5 Considerações Finais

Neste estudo buscou-se criar uma ferramenta baseada em Sistema Multiagente para auxiliar no planejamento e execução dos Leilões de Energia Nova. Primeiramente, destaca-se a utilização de dados reais na tentativa de aproximar o estudo da realidade. Para tal, foram utilizados dados de diversas fontes, como órgãos oficiais do Setor Elétrico Brasileiro. Como só houve fonte de dados secundários, esses dados foram tratados de modo a tomarem a forma dos parâmetros do modelo MOLIM, peça chave do subsistema de cooperação.

É importante mencionar que os documentos e informações disponibilizados pela EPE, ANEEL e MME foram de grande valia no processo de obtenção de dados. Entretanto, é necessário reconhecer que o fato de os dados serem secundários, ou seja, originalmente não foram obtidos para este estudo especificamente, requerendo uma série de procedimentos para que eles fossem tratados e assumissem a forma desejável para os parâmetros do modelo. No caso de interesses dos órgãos oficiais do Setor Elétrico Brasileiro, é possível a utilização de seus dados nas ferramentas criadas neste estudo. Neste contexto toda a implementação proposta se aproximaria mais ainda da realidade.

Vale a pena ressaltar que o modelo MOLIM apresenta a maioria de variáveis inteiras. Portanto, as soluções viáveis deste problema são somente os pontos que estão contidos no espaço viável definido pelas restrições. Juntamente com o fato das três funções objetivos deste modelo serem compostas somente pelas variáveis inteiras do problema, a fronteira Pareto pode ter cardinalidade limitada. Para verificar se havia questões ligadas a não convexidade da fronteira Pareto, o método Épsilon restrito foi posteriormente empregado para a solução do problema, porém, este obteve a mesma solução não dominada do MSP. Ressalta-se que caso seja utilizado um conjunto de dados mais extenso para alimentar o modelo MOLIM, é possível que se obtenha mais soluções não dominadas.

Por meio dos resultados do subsistema de cooperação foi possível concluir que a decisão de adicionar os leilões A-4 e A-6 pode representar diminuições significativas no risco de atraso da entrada em operação dos empreendimentos responsáveis pelos produtos de energia vendidos nos Leilões de Energia Nova. Tal fato pode ser apoiado pelas soluções do modelo MOLIM em alocar os leilões A-3 ou A-5 somente quando há restrições temporais de realização dos demais tipos de leilão. Sendo assim, o modelo também apontou a

substituição feita na prática desde 2017: o leilão A-3 pelo A-4 e o leilão A-5 pelo A-6.

Com relação ao subsistema de competição, os testes apontam que estratégias que incorporam elementos do meio, como a estratégia 2 e o aprendizado pelo método Q-learning levam a um maior sucesso do concorrente. Por outro lado, em alguns testes, essas mesmas alternativas provocaram uma menor queda percentual no preço pago pela energia. Sendo assim, a formação de coalizão dos concorrentes ou a divulgação de mais informações durante a ocorrência de um leilão podem impactar em seus resultados. Para a primeira situação é necessário cuidado, visto que os concorrentes do Leilão de Energia Nova são auto-interessados e buscam a maior remuneração para sua energia.

Outro fato interessante observado é que nos leilões com três vencedores, além do número de vitórias também deve ser levado em consideração as posições em que os agentes as obtiveram. Dado que os agentes são classificados quanto à ordem crescente de seus lances, agentes que são vencedores na terceira posição tem uma probabilidade maior de ter maior remuneração pela sua energia, seguido pelo segundo lugar. O agente que é classificado em primeiro lugar vence o leilão, porém, recebe a menor remuneração pela sua venda. Dessa forma, também deve-se destacar o desempenho da estratégia 2 nesse sentido, já que frequentemente agentes que as utilizavam, apresentavam grade parte de suas vitórias nos terceiros e segundos lugares.

Apesar de terem sido utilizados agentes com parâmetros idênticos de margem mínima de lucro, decréscimo da margem mínima, custo e lotes ofertados, é possível diferenciá-los na implementação proposta. Tal abordagem foi parcialmente realizada na análise de sensibilidade, destacando-se os resultados obtidos na Tabela 4.41. Nas simulações convencionais não se optou por essa alternativa, tendo em vista que essas variações tornariam mais difíceis as análises do desempenho das estratégias e dos aspectos que influenciam na redução do preço pago pela energia.

Para avaliar estatisticamente o desempenho das diferentes estratégias e da aprendizagem dos agentes em termos da quantidade de vitórias, foi utilizado o teste não paramétrico Kruskal Wallis. Após, para a comparação par a par, foram utilizados os métodos de Dunn e Conover. Destes testes pode-se concluir que os agentes que utilizavam a estratégia 2 apresentaram um desempenho destacado dos demais. Estes testes também apontaram que não há diferença significativa entre os agentes que utilizavam a estratégia 2 ou eram inteligentes, já que os últimos, após um período de aprendizagem, também adotavam essa estratégia.

Para verificar os aspectos que influenciam na queda entre o preço inicial de um produto e o preço pago pela energia ao final do leilão, foi realizada uma análise de sensibilidade. Para os maiores valores dessa métrica destacam-se a influência do preço inicial mais alto, o custo do concorrente mais baixo e margem menor de lucro do concorrente. O que observou-

se foi que esses valores são responsáveis por promover maior concorrência durante o leilão, fazendo com que lances de mais agentes fossem aceitos. Por outro lado, valores opostos a esse promovem uma menor queda no preço pago pela energia. Valores menores dos parâmetros decremento e decréscimo da margem mínima do concorrente também resultam em pequenas quedas de preço.

De forma geral, a abordagem Multiagente se mostrou satisfatória para o estudo proposto. Como já dito, o problema de obtenção do parque gerador de eletricidade desejado por meio de Leilões de Energia Nova se caracteriza por ter uma grande quantidade de interações, decisões, interesses conflitantes e entes auto-interessados. Ademais, os concorrentes do leilão possuem informação incompleta e imperfeita durante o mesmo, pois eles não possuem conhecimento sobre os demais concorrentes e nem conhecem todos os lances efetuados nem a quantidade de lotes de energia demandados. Sobre as informações externas, durante um leilão um concorrente sabe somente o preço corrente, decremento, tempo de lance e o estado de seus lotes. Tendo em vista todo esse contexto, o problema estudado caracteriza-se por exigir autonomia das partes, ter grande dinâmica e, consequentemente, uma razoável complexidade. Dessa forma, a abordagem utilizada se mostrou adequada.

Como já dito, há carências quanto ao planejamento e execução dos Leilões de Energia Nova. Com o estudo proposto, é oferecida uma ferramenta adequada que auxilia no planejamento e execução dos leilões, portanto, instituições como o MME, ANEEL e CCEE poderiam se beneficiar de sua utilização, bem como os distribuidores e consumidores finais de energia elétrica. De qualquer maneira, também é possível que os concorrentes dos leilões de energia a utilize para analisar suas estratégias, caso tenham interesse.

Como estudos futuros, sugere-se a implementação da sistemática antiga dos Leilões de Energia Nova para verificar se as mudanças feitas trouxeram benefícios e para quem são esses benefícios. Na sistemática antiga os produtos de energia eram comercializados em um leilão com duas etapas, sendo a primeira denominada etapa uniforme, que se caracteriza como um leilão de lances sequenciais de quantidades de lotes de energia que os concorrentes aceitam vender ao preço corrente. Essa etapa se encerra quando a quantidade total de lotes ofertados dos concorrentes se iguala à oferta de referência, a qual corresponde à quantidade demandada de lotes de energia. Em seguida, esse leilão passa à etapa discriminatória, na qual os concorrentes fazem um lote único de preço para seus lotes remanescentes de energia. Serão comprados os lotes que tiverem menor preço de lance e que preencherem a necessidade de lotes estipulada pela CCEE. Sendo assim, vale a pena ser investigado o impacto das mudanças na sistemática dos Leilões de Energia Nova.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Edital do 23º Leilão de Energia Nova - 01/2016**. 2016. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/>. Acesso em: 21 jun. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Edital do 28º Leilão de Energia Nova - 03/2018**. jul. 2018. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/leiloes>. Acesso em: 12 jul. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório de acompanhamento da implantação de empreendimentos de geração**. 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/publicacoes>. Acesso em: 5 set. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de geração do Brasil**. 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 01 ago. 2019.

AGRE, P. E.; CHAPMAN, D. What are plans for? **Robotics and autonomous systems**, Elsevier, v. 6, n. 1, p. 17–34, 1990.

ANATOLITIS, V.; WELISCH, M. Putting renewable energy auctions into action–an agent-based model of onshore wind power auctions in germany. **Energy Policy**, Elsevier, v. 110, p. 394–402, 2017.

AVILÉS, I. P. L. **Avaliação de Smelter de Alumínio Auto-Suficiente em Geração de Energia Elétrica pela Metodologia de Opções Reais**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Administação de Empresas - PUC-Rio, 2009.

AWAD, M.; KHANNA, R. **Efficient learning machines: theories, concepts, and applications for engineers and system designers**. Nova Iorque: Apress, 2015.

BOND, A. H.; GASSER, L. **Readings in distributed artificial intelligence**. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1988.

BRASIL. Lei nº 13.360, de 17 de novembro de 2016. Brasília, DF, 2016.

BRASIL. Decreto nº 9.143, de 22 de agosto de 2017. Brasília, DF, 2017.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Detalhamento da Sistemática para o 23º Leilão de compra de de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração (A-5 em 2016)**. 2016. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/>. Acesso em: 21 jun. 2017.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Entenda o mercado e a CCEE**. 2016. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal>. Acesso em: 20 mai. 2017.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do Sistema do 23º Leilão de Energia Nova (A-5 de 2016)**. 2016. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/>. Acesso em: 21 jun. 2017.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tipos de Leilão**. 2016. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal>. Acesso em: 05 abr. 2017.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Detalhamento da Sistemática para o 28º Leilão de compra de de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração (A-6 em 2018)**. jul. 2018. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/>. Acesso em: 12 jul. 2019.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual do Sistema do 28º Leilão de Energia Nova (A-6 de 2018)**. jul. 2018. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/leiloes>. Acesso em: 12 jul. 2019.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **O que fazemos - Leilões**. jul. 2019. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/leiloes>. Acesso em: 12 jul. 2019.

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Modelo DECOMP**: Determinação da coordenação da operação a curto prazo - Manual do usuário. Rio de Janeiro, 2013. 143 p.

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Projeto NEWAVE**: Modelo estratégico de geração hidrotérmica a subsistemas equivalentes - manual do usuário. Rio de Janeiro, 2013. 177 p.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **As Instituições do Setor Elétrico Brasileiro**. jun. 2015. Disponível em: <http://www.copel.com/>.

ELETROBRAS CEPEL. **NEWAVE - Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo**. 2018. Disponível em: <http://www.cepel.br/pt_br/produtos/newave-modelo-de-planejamento-da-operacao-de-sistemas-hidrotermicos-interligados-de-longo-e-medio-prazo.htm>. Acesso em: 06 ago. 2019.

ELETROBRAS ELETRONUCLEAR. **Angra 3**. 2019. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Angra-3.aspx>. Acesso em: 10 fev. 2019.

ELETROBRAS ELETRONUCLEAR. **Informações de Angra 1**. 2019. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Informacoes-de-Angra-1-.aspx>. Acesso em: 10 fev. 2019.

ELETROBRAS ELETRONUCLEAR. **Informações de Angra 2**. 2019. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Paginas/Informacoes-de-Angra-2-.aspx>. Acesso em: 10 fev. 2019.

EMMERICH, M. T.; DEUTZ, A. H. A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. **Natural computing**, Springer, v. 17, n. 3, p. 585–609, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia-2027**. 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2027>. Acesso em: 4 jan. 2019.

ENERDATA. **Global Energy Statistical Yearbook 2018**. 2019. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics-.html>. Acesso em: 10 jun. 2019.

GASTALDO, M. M. **Capítulo III: Os agentes do mercado de energia elétrica**. 38. ed. São Paulo, 2009. 26–29 p. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br-/wp-content/uploads/2010/04/ed38_direito_em_energia_eletrica.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2019.

GUARNIER, E. **Simulador de estratégias de participação em leilões de energia existente para geradores**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade de São Paulo, 2014.

HERD, B.; MILES, S.; MCBURNEY, P.; LUCK, M. Verification and validation of agent-based simulations using approximate model checking. In: SPRINGER. **International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation**. [S.l.], 2013. p. 53–70.

HOCHSTETLER, R. L. Aprimoramentos nos leilões de energia para fomentar a configuração ótima do parque gerador. In: **Anais do XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Brasília: SNPTEE, 2013. p. 1–9.

INSTITUTO ACENDE BRASIL. Leilões no setor elétrico brasileiro: Análises e recomendações. **White Papers**, v. 7, 2012.

JENNINGS, N. R. Using intelligent agents to manage business processes. In: IET. **IEE Colloquium on Intelligent Agents and Their Applications (Digest No: 1996/101)**. Londres, 1996. p. 5–1.

JIE, B.; TSUJI, T.; UCHIDA, K. An analysis of market mechanism and bidding strategy for power balancing market mixed by conventional and renewable energy. In: IEEE. **2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)**. Dresden, 2017. p. 1–6.

JUCHEM, M.; BASTOS, R. M. Engenharia de sistemas multiagentes: uma investigação sobre o estado da arte. **Relatório Técnico, Faculdade de Ciências Exatas da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS)**, 2001.

KRENZ, P.; HAHN, P. O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica - edição 2016. 2016. Disponível em: <https://institutoideal.org/o-mercado-brasileiro-de-geracao-distribuida-fotovoltaica-edicao-2016/>. Acesso em: 10 mai. 2019.

LAZO, J. G. L.; LIMA, D. A.; FIGUEIREDO, K. Análise de um modelo inteligente de contrataçao de energia elétrica no curto prazo para distribuidoras. **Revista Controle & Automaçao**, v. 23, n. 6, p. 711–725, 2012.

LIMA, F. da R. **Decisão de Sazonalização para Otimizar Carteira de Contratos com Hidrelétricas e Eólicas no Brasil**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Administação de Empresas - PUC-Rio, 2012.

LUX, A.; STEINER, D. Understanding cooperation: An agent's perspective. In: **ICMAS**. São Francisco: [s.n.], 1995. p. 261–268.

MARLER, R. T.; ARORA, J. S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. **Structural and multidisciplinary optimization**, Springer, v. 26, n. 6, p. 369–395, 2004.

MARTINS, D. M. R. **Setor Elétrico Brasileiro: Análise do Investimento de Capital em Usinas Termelétricas**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Economia - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

MASILI, G. S. **Metodologia e software para simulaçao de leiloes de energia elétrica do mercado brasileiro**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduaçao em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, 2004.

MCAFEE, R. P.; MCMILLAN, J. Auctions and bidding. **Journal of economic literature**, JSTOR, v. 25, n. 2, p. 699–738, 1987.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Leilões de Energia**. 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/leiloes_de_energia/menu/inicio.html>. Acesso em: 10 abr. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Portaria n. 102 de 22 de março de 2016**. mar. 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents>. Acesso em: 10 abr. 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira 2018 - Ano base 2017**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/Imprensa-e-Midias/Documents-/Resenha%20Energ%C3%A9tica%202018%20-MME.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2019.

NIAZI, M. A.; HUSSAIN, A.; KOLBERG, M. Verification & validation of agent based simulations using the VOMAS (virtual overlay multi-agent system) approach. **CoRR**, abs/1708.02361, 2017. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1708.02361>.

O'HARE, G. M.; JENNINGS, N. **Foundations of distributed artificial intelligence**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1996.

PESSANHA, A. J. **Estratégia de contratação de energia elétrica em leilões regulados: Aplicação de um modelo de Simulação e Otimização**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal Fluminense, 2007.

PIKE-BURKE, C. **Multi-Objective Optimization**. Disponível em: <https://www.lancaster.ac.uk/pg/pikeburc/report1.pdf>.

PINTO, M. S.; MARTINS, C. R.; CERQUEIRA, S. N.; TROVÃO, S. A.; SAAVEDRA, O. R. Tomada de decisões em leilões de energia elétrica de longo prazo. **Ingeniare. Revista chilena de ingeniería**, SciELO Chile, v. 22, n. 4, p. 539–546, 2014.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

ROSENSCHEIN, J. S.; ZLOTKIN, G. Designing conventions for automated negotiation. **AI magazine**, v. 15, n. 3, p. 29, 1994.

RYU, J.-h.; KIM, S.; WAN, H. Pareto front approximation with adaptive weighted sum method in multiobjective simulation optimization. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. **Winter Simulation Conference**. Austin, 2009. p. 623–633.

SANTOS, S. A. T. **Ferramenta de Auxílio na Formação de Estratégias de Oferta em Leilões de Longo Prazo de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade - Universidade Federal do Maranhão, 2012.

SEGHROUCHNI, A. E. F. Rational agent cooperation through concurrent plan coordination. **The proceedings of DAIMAS**, São Petersburgo, v. 96, 1996.

SILVA, T. C. T. da. **Cenários futuros de oferta e demanda de energia elétrica**: Simulações do possível racionamento até 2011. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PUC-Rio, 2008.

STAINES, T. **Q-Bay: Explaining Q-Learning with Simulated Auctions**. 2018. Disponível em: <https://towardsdatascience.com/q-bay-explaining-q-learning-with-simulated-auctions-f85bac990c60>. Acesso em: 6 jul. 2019.

TAKAHASHI, R. Otimização escalar e vetorial, volume 3: Otimização vetorial. **Notas de aula. Departamento de Matemática. Universidade Federal de Minas Gerais**, p. 262–301, 2007.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO. **Relatório de Auditoria**. 2013. Disponível em: <www.tcu.gov.br/Consultas/Juris/Docs/judoc/Acord/.../AC_2316_34_14_P.doc>. Acesso em: 12 jul. 2017.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. Life cycle assessment (lca) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 28, p. 555–565, 2013.

VALENCIA, G.; BENAVIDES, A.; CÁRDENAS, Y. Economic and environmental multiobjective optimization of a wind–solar–fuel cell hybrid energy system in the colombian caribbean region. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 11, p. 2119, 2019.

VASAVADA, N. **Kruskal-Wallis rank sum (omnibus) test calculatorns**. 2016. Disponível em: <https://astatsa.com/KruskalWallisTest>. Acesso em: 28 jul. 2019.

WALTER, I. A. **Sistemas multiagentes em mercados de energia elétrica**. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas, 2006.

WATKINS, C. J.; DAYAN, P. Q-learning. **Machine learning**, Springer, v. 8, n. 3-4, p. 279–292, 1992.

WEISS, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. [S.l.]: MIT press, 1999.

WELISCH, M. Multi-unit renewables auctions for small markets-designing the danish multi-technology auction scheme. **Renewable energy**, Elsevier, v. 131, p. 372–380, 2019.

WOOLDRIDGE, M. **An introduction to multiagent systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R. *et al.* Intelligent agents: Theory and practice. **Knowledge engineering review**, Cambridge Univ Press, v. 10, n. 2, p. 115–152, 1995.

Apêndice A - Entradas da Verificação

A.1 Entradas de Verificação para o Subsistema de Cooperação

TABELA A.1 – Valores para a demanda de capacidade instalada D_{ik}

Fonte	**Ano 1**	**Ano 2**	**Ano 3**
Fonte 1	30	15	5
Fonte 2	10	15	30

TABELA A.2 – Valores para limites mínimo (L_i^{min}) e máximo (L_i^{max}) de capacidade e tempo de implementação (V_i)

Fonte	L_i^{min}	L_i^{max}	V_i
Fonte 1	5	10	0.1
Fonte 2	10	15	0.1

TABELA A.3 – Valores de tempo restante até o ano k (T_k)

	Ano 1	**Ano 2**	**Ano 3**
T_k	3	4	5

TABELA A.4 – Valores de tempo disponibilizado pelo leilão tipo j (H_j)

	Leilão 1	**Leilão 2**
H_j	3	4

TABELA A.5 – Valores para o risco (R_{ij})

Fonte	**Leilão 1**	**Leilão 2**
Fonte 1	1	0.75
Fonte 2	1	0.75

A.2 Entradas de Verificação para o Subsistema de Competição

TABELA A.6 – Valores dos parâmetros da verificação do subsistema de competição com um ganhador

Parâmetros	**Valor**
Preço inicial	R$ 200,00
Decremento	0,50%
Capacidade remanescente do SIN	1200 lotes
Quantidade de lotes demandados	300 lotes
Margem mínima de lucro do concorrente	80,00%
Decréscimo da margem mínima do concorrente	1,00%
Custo do concorrente	R$ 100,00
Lotes ofertados por cada concorrente	300 lotes

TABELA A.7 – Valores dos parâmetros da verificação do subsistema de competição com três ganhadores

Parâmetros	**Valor**
Preço inicial	R$ 200,00
Decremento	0,50%
Capacidade remanescente do SIN	1200 lotes
Quantidade de lotes demandados	300 lotes
Margem mínima de lucro do concorrente	80,00%
Decréscimo da margem mínima do concorrente	1,00%
Custo do concorrente	R$ 100,00
Lotes ofertados por cada concorrente	900 lotes

Apêndice B - Resultados do Subsistema de Competição

B.1 Diversas Estratégias

FIGURA B.1 – Resultados do teste com diversidade de estratégias para o produto Hídrica-A

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 18.23
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.40
Queda média do preço final pago pela energia: 18.23
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.40
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar
Agente 3:       150.00
Agente 4:       378.00
Agente 5:       151.00
Agente 6:       321.00
Preço médio do primeiro lugar: 121.02
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 2.07
```

FIGURA B.2 – Resultados do teste com diversidade de estratégias para o produto Eólica

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.53
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.08
Queda média do preço final pago pela energia: 1.54
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.08
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       133.00         27.00        37.00       197.00
Agente 4:       130.00         26.00        30.00       186.00
Agente 5:       128.00         226.00        194.00       548.00
Agente 6:       120.00         238.00        222.00       580.00
Agente 7:       114.00         27.00        44.00       185.00
Agente 8:       110.00         37.00        61.00       208.00
Agente 9:       130.00         226.00        187.00       543.00
Agente 10:      135.00         193.00        225.00       553.00
Preço médio do primeiro lugar: 181.12
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.18
Preco medio do segundo lugar: 181.18
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.15
Preco medio do segundo lugar: 181.19
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.15
```

FIGURA B.3 – Resultados do teste com diversidade de estratégias para o produto Biomassa

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.39
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.25
Queda média do preço final pago pela energia: 2.41
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.25
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       64.00         23.00        36.00       123.00
Agente 4:       56.00         15.00        31.00       102.00
Agente 5:       215.00         205.00        220.00       640.00
Agente 6:       181.00         229.00        215.00       625.00
Agente 7:       45.00         35.00        54.00       134.00
Agente 8:       46.00         25.00        52.00       123.00
Agente 9:       203.00         240.00        187.00       630.00
Agente 10:      190.00         228.00        205.00       623.00
Preço médio do primeiro lugar: 212.70
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.55
Preco medio do segundo lugar: 212.74
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.54
Preco medio do segundo lugar: 212.78
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.55
```

B.2 Agentes Simétricos

FIGURA B.4 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 1 para o produto Hídrica-A

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 28.13
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.00
Queda média do preço final pago pela energia: 28.13
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.00
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar
Agente 3:       268.00
Agente 4:       240.00
Agente 5:       245.00
Agente 6:       247.00
Preço médio do primeiro lugar: 106.36
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.00
```

FIGURA B.5 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 2 para o produto Hídrica-A

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 10.42
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.00
Queda média do preço final pago pela energia: 10.42
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.00
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar
Agente 3:       251.00
Agente 4:       227.00
Agente 5:       255.00
Agente 6:       267.00
Preço médio do primeiro lugar: 132.58
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.00
```

FIGURA B.6 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 3 para o produto Hídrica-A

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 25.61
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.24
Queda média do preço final pago pela energia: 25.61
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.24
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar
Agente 3:       251.00
Agente 4:       253.00
Agente 5:       247.00
Agente 6:       249.00
Preço médio do primeiro lugar: 110.10
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 1.83
```

FIGURA B.7 – Resultados do teste de agentes inteligentes para o produto Hídrica-A

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 15.43
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 2.13
Queda média do preço final pago pela energia: 15.43
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 2.13
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar
Agente 3:       247.00
Agente 4:       243.00
Agente 5:       244.00
Agente 6:       266.00
Preço médio do primeiro lugar: 125.16
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 3.16
```

FIGURA B.8 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 1 para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.95
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.05
Queda média do preço final pago pela energia: 2.04
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.00
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       143.00         101.00        139.00       383.00
Agente 4:       104.00         145.00        116.00       365.00
Agente 5:       130.00         129.00        147.00       406.00
Agente 6:       125.00         121.00        117.00       363.00
Agente 7:       120.00         113.00        129.00       362.00
Agente 8:       111.00         156.00        121.00       388.00
Agente 9:       135.00         132.00        112.00       379.00
Agente 10:      132.00         103.00        119.00       354.00
Preço médio do primeiro lugar: 180.04
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.13
Preco medio do segundo lugar: 180.27
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.08
Preco medio do segundo lugar: 180.41
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.10
```

FIGURA B.9 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 2 para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.40
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.00
Queda média do preço final pago pela energia: 1.40
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.00
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       127.00         115.00        125.00       367.00
Agente 4:       122.00         123.00        121.00       366.00
Agente 5:       118.00         136.00        117.00       371.00
Agente 6:       126.00         111.00        144.00       381.00
Agente 7:       119.00         144.00        149.00       412.00
Agente 8:       120.00         111.00        118.00       349.00
Agente 9:       131.00         119.00        116.00       366.00
Agente 10:      137.00         141.00        110.00       388.00
Preço médio do primeiro lugar: 181.39
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.00
Preco medio do segundo lugar: 181.43
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.00
Preco medio do segundo lugar: 181.43
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.00
```

FIGURA B.10 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 3 para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.54
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.10
Queda média do preço final pago pela energia: 1.59
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.10
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       118.00         130.00        111.00       359.00
Agente 4:       128.00         131.00        129.00       388.00
Agente 5:       114.00         123.00        130.00       367.00
Agente 6:       131.00         115.00        120.00       366.00
Agente 7:       116.00         125.00        133.00       374.00
Agente 8:       138.00         118.00        109.00       365.00
Agente 9:       137.00         128.00        130.00       395.00
Agente 10:      118.00         130.00        138.00       386.00
Preço médio do primeiro lugar: 180.99
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.19
Preco medio do segundo lugar: 181.09
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.18
Preco medio do segundo lugar: 181.16
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.18
```

FIGURA B.11 – Resultados do teste de agentes inteligentes para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.55
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.17
Queda média do preço final pago pela energia: 1.56
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.17
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       117.00         125.00        127.00       369.00
Agente 4:       114.00         116.00        119.00       349.00
Agente 5:       133.00         110.00        131.00       374.00
Agente 6:       120.00         114.00        132.00       366.00
Agente 7:       123.00         138.00        133.00       394.00
Agente 8:       137.00         136.00        114.00       387.00
Agente 9:       141.00         140.00        127.00       408.00
Agente 10:      115.00         121.00        117.00       353.00
Preço médio do primeiro lugar: 181.12
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.31
Preco medio do segundo lugar: 181.14
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.31
Preco medio do segundo lugar: 181.15
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.31
```

FIGURA B.12 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 1 para o produto Biomassa

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.82
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.09
Queda média do preço final pago pela energia: 2.97
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.00
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       134.00         125.00        140.00       399.00
Agente 4:       135.00         128.00        117.00       380.00
Agente 5:       99.00          124.00        126.00       349.00
Agente 6:       148.00         122.00        131.00       401.00
Agente 7:       124.00         127.00        117.00       368.00
Agente 8:       133.00         113.00        118.00       364.00
Agente 9:       124.00         123.00        120.00       367.00
Agente 10:      103.00         138.00        131.00       372.00
Preço médio do primeiro lugar: 211.14
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.25
Preco medio do segundo lugar: 211.57
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.16
Preco medio do segundo lugar: 211.85
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.20
```

FIGURA B.13 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 2 para o produto Biomassa

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.87
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.00
Queda média do preço final pago pela energia: 2.89
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.00
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       119.00         141.00        107.00       367.00
Agente 4:       122.00         136.00        134.00       392.00
Agente 5:       138.00         123.00        119.00       380.00
Agente 6:       119.00         122.00        122.00       363.00
Agente 7:       119.00         108.00        142.00       369.00
Agente 8:       112.00         140.00        131.00       383.00
Agente 9:       128.00         109.00        127.00       364.00
Agente 10:      143.00         121.00        118.00       382.00
Preço médio do primeiro lugar: 211.64
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.00
Preco medio do segundo lugar: 211.74
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.00
Preco medio do segundo lugar: 211.74
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.00
```

FIGURA B.14 – Resultados do teste de agentes simétricos com Estratégia 3 para o produto Biomassa

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.18
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.16
Queda média do preço final pago pela energia: 2.25
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.16
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       117.00         128.00        119.00       364.00
Agente 4:       134.00         118.00        129.00       381.00
Agente 5:       111.00         145.00        123.00       379.00
Agente 6:       114.00         122.00        135.00       371.00
Agente 7:       149.00         128.00        114.00       391.00
Agente 8:       128.00         108.00        120.00       356.00
Agente 9:       115.00         134.00        120.00       369.00
Agente 10:      132.00         117.00        140.00       389.00
Preço médio do primeiro lugar: 212.92
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.36
Preco medio do segundo lugar: 213.11
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.35
Preco medio do segundo lugar: 213.24
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.34
```

FIGURA B.15 – Resultados do teste de agentes inteligentes para o produto Biomassa

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.60
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.51
Queda média do preço final pago pela energia: 2.61
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.51
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       120.00         145.00        112.00       377.00
Agente 4:       124.00         130.00        129.00       383.00
Agente 5:       121.00         141.00        127.00       389.00
Agente 6:       134.00         116.00        114.00       364.00
Agente 7:       118.00         121.00        142.00       381.00
Agente 8:       128.00         117.00        119.00       364.00
Agente 9:       125.00         127.00        133.00       385.00
Agente 10:      130.00         103.00        124.00       357.00
Preço médio do primeiro lugar: 212.27
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 1.11
Preco medio do segundo lugar: 212.30
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 1.11
Preco medio do segundo lugar: 212.33
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 1.12
```

B.3 Agentes Assimétricos

B.3.1 Estratégias Puras

FIGURA B.16 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 2 para o produto Hídrica-A

```
----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 17.68
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.14
Queda média do preço final pago pela energia: 17.68
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.14
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar
Agente 3:       149.00
Agente 4:       117.00
Agente 5:       371.00
Agente 6:       363.00
Preço médio do primeiro lugar: 121.83
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 1.69
```

FIGURA B.17 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 3 para o produto Hídrica-A

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 26.53
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.00
Queda média do preço final pago pela energia: 26.53
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.00
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
           Primeiro lugar
Agente 3:       233.00
Agente 4:       267.00
Agente 5:       248.00
Agente 6:       252.00
Preço médio do primeiro lugar: 108.73
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 1.47
```

FIGURA B.18 – Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* Estratégia 3 para o produto Hídrica-A

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 16.95
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.32
Queda média do preço final pago pela energia: 16.95
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.32
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
           Primeiro lugar
Agente 3:       311.00
Agente 4:       325.00
Agente 5:       179.00
Agente 6:       185.00
Preço médio do primeiro lugar: 122.91
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 1.96
```

FIGURA B.19 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 2 para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.56
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.13
Queda média do preço final pago pela energia: 1.58
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.13
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       89.00         42.00        35.00       166.00
Agente 4:       97.00         24.00        39.00       160.00
Agente 5:       117.00         21.00        34.00       172.00
Agente 6:       119.00         29.00        45.00       193.00
Agente 7:       132.00         212.00        233.00       577.00
Agente 8:       159.00         216.00        203.00       578.00
Agente 9:       156.00         216.00        199.00       571.00
Agente 10:      131.00         240.00        212.00       583.00
Preço médio do primeiro lugar: 181.06
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.26
Preco medio do segundo lugar: 181.11
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.24
Preco medio do segundo lugar: 181.13
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.24
```

FIGURA B.20 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 3 para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.71
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.08
Queda média do preço final pago pela energia: 1.77
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.08
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       178.00         107.00        89.00       374.00
Agente 4:       147.00         109.00        91.00       347.00
Agente 5:       155.00         113.00        104.00       372.00
Agente 6:       158.00         102.00        100.00       360.00
Agente 7:       90.00         139.00        157.00       386.00
Agente 8:       86.00         127.00        162.00       375.00
Agente 9:       86.00         139.00        156.00       381.00
Agente 10:      100.00         164.00        141.00       405.00
Preço médio do primeiro lugar: 180.59
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.19
Preco medio do segundo lugar: 180.76
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.15
Preco medio do segundo lugar: 180.86
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.15
```

FIGURA B.21 – Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* Estratégia 3 para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.43
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.08
Queda média do preço final pago pela energia: 1.44
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.08
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       145.00         215.00        206.00       566.00
Agente 4:       144.00         231.00        206.00       581.00
Agente 5:       159.00         199.00        194.00       552.00
Agente 6:       142.00         207.00        191.00       540.00
Agente 7:       111.00         40.00        55.00       206.00
Agente 8:       99.00         31.00        59.00       189.00
Agente 9:       95.00         37.00        48.00       180.00
Agente 10:      105.00         40.00        41.00       186.00
Preço médio do primeiro lugar: 181.32
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.15
Preco medio do segundo lugar: 181.35
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.14
Preco medio do segundo lugar: 181.36
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.14
```

FIGURA B.22 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 2 para o produto Biomassa

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.42
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.35
Queda média do preço final pago pela energia: 2.44
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.35
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       55.00         18.00        31.00       104.00
Agente 4:       56.00         15.00        32.00       103.00
Agente 5:       46.00         17.00        30.00       93.00
Agente 6:       59.00         31.00        25.00       115.00
Agente 7:       188.00         231.00        224.00       643.00
Agente 8:       193.00         236.00        216.00       645.00
Agente 9:       194.00         231.00        227.00       652.00
Agente 10:      209.00         221.00        215.00       645.00
Preço médio do primeiro lugar: 212.63
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.77
Preco medio do segundo lugar: 212.68
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.76
Preco medio do segundo lugar: 212.72
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.77
```

FIGURA B.23 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* Estratégia 3 para o produto Biomassa

```
-----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.45
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.13
Queda média do preço final pago pela energia: 2.56
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.12
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       168.00         106.00        99.00       373.00
Agente 4:       146.00          91.00       103.00       340.00
Agente 5:       165.00         122.00       100.00       387.00
Agente 6:       146.00         130.00       108.00       384.00
Agente 7:       89.00          131.00       151.00       371.00
Agente 8:       103.00         138.00       145.00       386.00
Agente 9:       94.00          127.00       129.00       350.00
Agente 10:      89.00          155.00       165.00       409.00
Preço médio do primeiro lugar: 212.13
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.37
Preco medio do segundo lugar: 212.47
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.29
Preco medio do segundo lugar: 212.66
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.28
```

FIGURA B.24 – Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* Estratégia 3 para o produto Biomassa

```
-----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.32
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.30
Queda média do preço final pago pela energia: 2.34
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.30
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       220.00         245.00        179.00       644.00
Agente 4:       212.00         245.00        211.00       668.00
Agente 5:       212.00         210.00        225.00       647.00
Agente 6:       223.00         210.00        221.00       654.00
Agente 7:       35.00          27.00         33.00        95.00
Agente 8:       33.00          23.00         50.00        106.00
Agente 9:       31.00          22.00         38.00        91.00
Agente 10:      34.00          18.00         43.00        95.00
Preço médio do primeiro lugar: 212.87
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.66
Preco medio do segundo lugar: 212.90
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.65
Preco medio do segundo lugar: 212.94
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.66
```

B.3.2 Estratégias Puras *versus* Agentes Inteligentes

FIGURA B.25 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes para o produto Hídrica-A

```
-----------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 19.74
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.84
Queda média do preço final pago pela energia: 19.74
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.84
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
           Primeiro lugar
Agente 3:       121.00
Agente 4:       126.00
Agente 5:       367.00
Agente 6:       386.00
Preço médio do primeiro lugar: 118.78
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 2.72
```

FIGURA B.26 – Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes para o produto Hídrica-A

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 12.94
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.68
Queda média do preço final pago pela energia: 12.94
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.68
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
           Primeiro lugar
Agente 3:       268.00
Agente 4:       273.00
Agente 5:       208.00
Agente 6:       251.00
Preço médio do primeiro lugar: 128.84
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 2.48
```

FIGURA B.27 – Resultados do teste de Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes para o produto Hídrica-A

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
RESULTADOS
Queda média do preço corrente: 18.87
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 1.66
Queda média do preço final pago pela energia: 18.87
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 1.66
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
           Primeiro lugar
Agente 3:       145.00
Agente 4:       137.00
Agente 5:       360.00
Agente 6:       358.00
Preço médio do primeiro lugar: 120.08
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 2.46
```

FIGURA B.28 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.62
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.08
Queda média do preço final pago pela energia: 1.64
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.09
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       129.00         23.00        39.00       191.00
Agente 4:       147.00         31.00        26.00       204.00
Agente 5:       122.00         30.00        40.00       192.00
Agente 6:       126.00         39.00        33.00       198.00
Agente 7:       121.00         227.00        232.00       580.00
Agente 8:       121.00         225.00        211.00       557.00
Agente 9:       106.00         203.00        227.00       536.00
Agente 10:      128.00         222.00        192.00       542.00
Preço médio do primeiro lugar: 180.93
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.19
Preco medio do segundo lugar: 181.00
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.15
Preco medio do segundo lugar: 181.02
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.15
```

FIGURA B.29 – Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.57
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.06
Queda média do preço final pago pela energia: 1.57
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.06
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       137.00         119.00        115.00       371.00
Agente 4:       133.00         114.00        115.00       362.00
Agente 5:       130.00         138.00        132.00       400.00
Agente 6:       129.00         128.00        125.00       382.00
Agente 7:       111.00         130.00        131.00       372.00
Agente 8:       130.00         124.00        130.00       384.00
Agente 9:       120.00         121.00        120.00       361.00
Agente 10:      110.00         126.00        132.00       368.00
Preço médio do primeiro lugar: 181.09
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.11
Preco medio do segundo lugar: 181.11
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.11
Preco medio do segundo lugar: 181.12
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.11
```

FIGURA B.30 – Resultados do teste de Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes para o produto Eólica

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 1.49
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.07
Queda média do preço final pago pela energia: 1.51
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.07
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       120.00         47.00         37.00       204.00
Agente 4:       122.00         40.00         51.00       213.00
Agente 5:       111.00         36.00         53.00       200.00
Agente 6:       114.00         46.00         49.00       209.00
Agente 7:       123.00         229.00         202.00       554.00
Agente 8:       147.00         185.00         194.00       526.00
Agente 9:       131.00         204.00         228.00       563.00
Agente 10:      132.00         213.00         186.00       531.00
Preço médio do primeiro lugar: 181.19
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.15
Preco medio do segundo lugar: 181.23
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.13
Preco medio do segundo lugar: 181.25
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.13
```

FIGURA B.31 – Resultados do teste de Estratégia 1 *versus* agentes inteligentes para o produto Biomassa

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.45
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.26
Queda média do preço final pago pela energia: 2.48
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.26
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       65.00         28.00         35.00       128.00
Agente 4:       73.00         28.00         30.00       131.00
Agente 5:       60.00         30.00         20.00       110.00
Agente 6:       60.00         25.00         28.00       113.00
Agente 7:       189.00         211.00         211.00       611.00
Agente 8:       182.00         211.00         212.00       605.00
Agente 9:       200.00         225.00         239.00       664.00
Agente 10:      171.00         242.00         225.00       638.00
Preço médio do primeiro lugar: 212.54
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.57
Preco medio do segundo lugar: 212.61
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.55
Preco medio do segundo lugar: 212.65
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.56
```

FIGURA B.32 – Resultados do teste de Estratégia 2 *versus* agentes inteligentes para o produto Biomassa

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.82
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.10
Queda média do preço final pago pela energia: 2.83
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.10
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       132.00         127.00        146.00       405.00
Agente 4:       129.00         132.00        108.00       369.00
Agente 5:       133.00         130.00        143.00       406.00
Agente 6:       130.00         112.00        122.00       364.00
Agente 7:       127.00         130.00        118.00       375.00
Agente 8:       124.00         114.00        127.00       365.00
Agente 9:       122.00         122.00        113.00       357.00
Agente 10:      103.00         133.00        123.00       359.00
Preço médio do primeiro lugar: 211.79
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.23
Preco medio do segundo lugar: 211.82
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.23
Preco medio do segundo lugar: 211.85
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.23
```

FIGURA B.33 – Resultados do teste de Estratégia 3 *versus* agentes inteligentes para o produto Biomassa

```
---------------------------------------------------------------------
SUBSISTEMA DE COMPETIÇÃO
Queda média do preço corrente: 2.34
Desvio-padrão da queda média do preço corrente: 0.19
Queda média do preço final pago pela energia: 2.35
Desvio-padrão da queda média do preço final pago pela energia: 0.19
Número de simulações: 1000.00
Número de vitórias
          Primeiro lugar Segundo Lugar  Terceiro Lugar     SOMA
Agente 3:       52.00          33.00         55.00       140.00
Agente 4:       49.00          27.00         35.00       111.00
Agente 5:       50.00          25.00         55.00       130.00
Agente 6:       50.00          39.00         56.00       145.00
Agente 7:       200.00          210.00         202.00       612.00
Agente 8:       193.00          218.00         201.00       612.00
Agente 9:       196.00          220.00         216.00       632.00
Agente 10:      210.00          228.00         180.00       618.00
Preço médio do primeiro lugar: 212.82
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.41
Preco medio do segundo lugar: 212.87
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.41
Preco medio do segundo lugar: 212.91
Desvio-padrão do preço médio do primeiro lugar: 0.41
```

Apêndice C - Teste Estatístico

C.1 Entradas do Teste Kruskal Wallis

TABELA C.1 – Dados de entrada do produto Hídrica-A para o teste Kruskall Wallis, Dunn e Canover

Elementos	**Vitórias**			
	Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**
1	142	335	149	374
2	135	382	133	350
3	126	333	174	367
4	143	359	163	335
5	127	359	132	382
6	115	368	134	383
7	131	341	161	367
8	144	356	157	343
9	124	353	153	370
10	101	381	135	383
11	122	386	157	335
12	125	362	155	358
13	122	347	155	376
14	143	365	156	336
15	123	374	139	364
16	133	355	165	347
17	128	344	167	361
18	115	359	163	363
19	125	355	166	354
20	135	371	143	351
21	134	375	154	337
22	127	373	164	336
23	131	363	145	361
24	127	380	168	325
25	147	341	156	356
26	134	350	164	352
27	129	355	151	365
28	121	362	159	358
29	126	375	156	343
30	121	396	144	339

TABELA C.2 – Dados de entrada do produto Eólica para o teste Kruskall Wallis, Dunn e Canover

Elementos	**Vitórias**							
	Agente 3	**Agente 4**	**Agente 5**	**Agente 6**	**Agente 7**	**Agente 8**	**Agente 9**	**Agente 10**
1	182	187	550	560	180	217	572	552
2	189	191	566	562	195	202	553	542
3	189	180	562	570	189	221	543	546
4	187	188	558	551	210	199	574	533
5	189	184	569	563	175	223	540	557
6	183	186	571	552	205	196	545	562
7	203	182	539	541	200	218	576	541
8	196	200	561	553	180	185	577	548
9	185	186	557	541	196	203	572	560
10	204	191	555	566	196	199	556	533
11	195	178	555	566	194	205	564	543
12	184	183	557	567	191	206	569	543
13	204	166	563	567	214	204	553	529
14	195	174	563	558	207	199	558	546
15	153	175	569	588	195	215	542	563
16	193	180	540	552	226	190	553	566
17	196	201	563	558	182	205	537	558
18	194	194	583	554	187	203	548	537
19	170	186	554	537	229	210	543	571
20	186	189	536	561	212	197	573	546
21	191	190	575	556	208	199	541	540
22	200	196	534	552	204	199	545	570
23	177	209	569	545	192	207	555	546
24	183	185	588	543	210	204	550	537
25	205	192	565	561	194	200	542	541
26	172	163	577	560	214	210	559	545
27	207	199	522	578	195	192	552	555
28	175	190	565	556	205	188	569	552
29	212	196	546	548	181	204	581	532
30	181	176	567	573	197	193	552	561

TABELA C.3 – Dados de entrada do produto Biomassa para o teste Kruskall Wallis, Dunn e Canover

Elementos	Vitórias							
	Agente 3	Agente 4	Agente 5	Agente 6	Agente 7	Agente 8	Agente 9	Agente 10
1	118	108	668	641	105	124	608	628
2	113	123	629	664	114	109	634	614
3	117	104	643	664	106	118	608	640
4	110	109	604	649	122	117	654	635
5	121	93	654	641	110	126	648	607
6	107	110	618	641	131	125	638	630
7	105	109	624	659	116	121	632	634
8	112	102	659	634	125	112	619	637
9	122	128	624	631	121	123	648	603
10	114	104	648	648	121	124	621	620
11	109	107	654	601	130	133	638	628
12	110	104	617	645	121	128	640	635
13	102	105	653	647	109	119	632	633
14	101	96	644	681	97	99	642	640
15	115	111	624	634	129	119	631	637
16	116	111	672	635	115	103	617	631
17	105	129	674	631	100	119	628	614
18	106	124	663	636	123	94	621	633
19	120	112	656	657	110	107	623	615
20	114	119	659	630	111	125	605	637
21	146	96	646	662	105	97	621	627
22	117	126	670	638	117	112	610	610
23	101	102	646	626	141	125	640	619
24	105	101	644	639	133	120	621	637
25	112	111	657	648	126	110	639	597
26	93	95	653	633	118	121	637	650
27	101	130	649	673	93	114	620	620
28	118	97	656	667	113	108	602	639
29	102	111	646	626	125	122	637	631
30	105	110	632	661	114	124	630	624

C.2 Saídas do Teste Kruskal Wallis

FIGURA C.1 – Saídas do teste Kruskall Wallis com diversidade de estratégias para o produto Hídrica-A

Kruskal-Wallis ANOVA Table

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	119511.2	3	39837.1	98.79	2.82887e-21
Error	24448.8	116	210.8		
Total	143960	119			

FIGURA C.2 – Saídas do teste Kruskall Wallis com diversidade de estratégias para o produto Eólica

Kruskal-Wallis ANOVA Table

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	918700.2	7	131242.9	190.65	1.09403e-37
Error	232996.3	232	1004.3		
Total	1151696.5	239			

FIGURA C.3 – Saídas do teste Kruskall Wallis com diversidade de estratégias para o produto Biomassa

Kruskal-Wallis ANOVA Table

Source	SS	df	MS	Chi-sq	Prob>Chi-sq
Columns	918161.8	7	131166	190.53	1.15736e-37
Error	233557.8	232	1006.7		
Total	1151719.5	239			

Apêndice D - Análise de Sensibilidade

D.1 Entradas da Análise de Sensibilidade

TABELA D.1 – Valores de parãmetros da análise de sensibilidade para o produto Hídrica-A

Teste	**Parâmetros**				
	Preço inicial	**Decremento**	**Margem mínima de lucro do concorrente**	**Decréscimo da margem mínima do concorrente**	**Custo do concorrente**
Padrão	R$ 148,00	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
1	R$ 177,60	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
2	R$ 148,00	0,132%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
3	R$ 148,00	0,110%	56,40%	2,00%	R$ 100,00
4	R$ 148,00	0,110%	47,00%	2,40%	R$ 100,00
5	R$ 148,00	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 120,00
6	R$ 118,40	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
7	R$ 148,00	0,088%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
8	R$ 148,00	0,110%	37,60%	2,00%	R$ 100,00
9	R$ 148,00	0,110%	47,00%	1,60%	R$ 100,00
10	R$ 148,00	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 80,00
11	R$ 222,00	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
12	R$ 148,00	0,165%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
13	R$ 148,00	0,110%	70,50%	2,00%	R$ 100,00
14	R$ 148,00	0,110%	47,00%	3,00%	R$ 100,00
15	R$ 148,00	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 150,00
16	R$ 74,00	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
17	R$ 148,00	0,055%	47,00%	2,00%	R$ 100,00
18	R$ 148,00	0,110%	23,50%	2,00%	R$ 100,00
19	R$ 148,00	0,110%	47,00%	1,00%	R$ 100,00
20	R$ 148,00	0,110%	47,00%	2,00%	R$ 50,00
21	R$ 177,60	0,132%	56,40%	2,40%	R$ 120,00
22	R$ 118,40	0,088%	37,60%	1,60%	R$ 80,00
23	R$ 222,00	0,165%	70,50%	3,00%	R$ 150,00
24	R$ 74,00	0,055%	23,50%	1,00%	R$ 50,00

TABELA D.2 – Valores de parãmetros da análise de sensibilidade para o produto Eólica

Teste	**Parâmetros**				
	Preço inicial	**Decremento**	**Margem mínima de lucro do concorrente**	**Decréscimo da margem mínima do concorrente**	**Custo do concorrente**
Padrão	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
1	R$ 220,80	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
2	R$ 184,00	0,0252%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
3	R$ 184,00	0,0210%	100,20%	0,060%	R$ 100,00
4	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,072%	R$ 100,00
5	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 120,00
6	R$ 147,20	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
7	R$ 184,00	0,0168%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
8	R$ 184,00	0,0210%	66,80%	0,060%	R$ 100,00
9	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,048%	R$ 100,00
10	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 80,00
11	R$ 276,00	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
12	R$ 184,00	0,0315%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
13	R$ 184,00	0,0210%	125,25%	0,060%	R$ 100,00
14	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,090%	R$ 100,00
15	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 150,00
16	R$ 92,00	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
17	R$ 184,00	0,0105%	83,50%	0,060%	R$ 100,00
18	R$ 184,00	0,0210%	41,75%	0,060%	R$ 100,00
19	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,030%	R$ 100,00
20	R$ 184,00	0,0210%	83,50%	0,060%	R$ 50,00
21	R$ 220,80	0,0252%	100,20%	0,072%	R$ 120,00
22	R$ 147,20	0,0168%	66,80%	0,048%	R$ 80,00
23	R$ 276,00	0,0315%	125,25%	0,090%	R$ 150,00
24	R$ 92,00	0,0105%	41,75%	0,030%	R$ 50,00

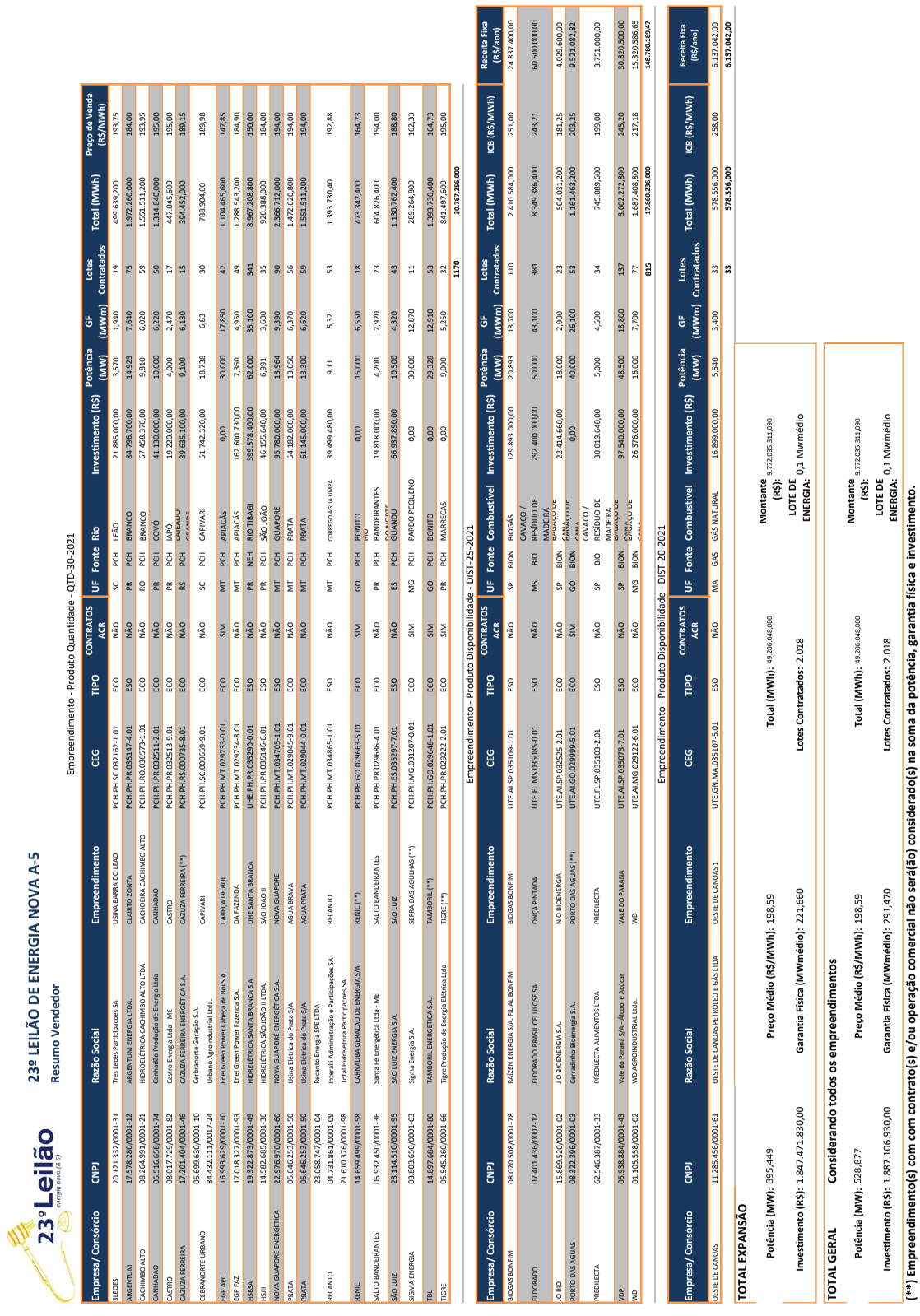
TABELA D.3 – Valores de parãmetros da análise de sensibilidade para o produto Biomassa

Teste	**Parâmetros**				
	Preço inicial	**Decremento**	**Margem mínima de lucro do concorrente**	**Decréscimo da margem mínima do concorrente**	**Custo do concorrente**
Padrão	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
1	R$ 261,60	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
2	R$ 218,00	0,05220%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
3	R$ 218,00	0,04350%	97,80%	0,10%	R$ 120,00
4	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,12%	R$ 120,00
5	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 144,00
6	R$ 174,40	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
7	R$ 218,00	0,03480%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
8	R$ 218,00	0,04350%	65,20%	0,10%	R$ 120,00
9	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,08%	R$ 120,00
10	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 96,00
11	R$ 327,00	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
12	R$ 218,00	0,06525%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
13	R$ 218,00	0,04350%	122,25%	0,10%	R$ 120,00
14	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,15%	R$ 120,00
15	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 180,00
16	R$ 109,00	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
17	R$ 218,00	0,02175%	81,50%	0,10%	R$ 120,00
18	R$ 218,00	0,04350%	40,75%	0,10%	R$ 120,00
19	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,05%	R$ 120,00
20	R$ 218,00	0,04350%	81,50%	0,10%	R$ 60,00
21	R$ 261,60	0,05220%	97,80%	0,12%	R$ 144,00
22	R$ 174,40	0,03480%	65,20%	0,08%	R$ 96,00
23	R$ 327,00	0,06525%	122,25%	0,15%	R$ 180,00
24	R$ 109,00	0,02175%	40,75%	0,05%	R$ 60,00

Anexo A - Leilões

A.1 Resultado do 23º Leilão de Energia Nova

FIGURA A.1 – Resultado do 23º Leilão de Energia



23º Leilão — energia nova (A-5)

23º LEILÃO DE ENERGIA NOVA A-5

Resumo Vendedor

Empreendimento - Produto Quantidade - QTD-30-2021

Empresa/ Consórcio	CNPJ	Razão Social	Empreendimento	CEG	TIPO	CONTRATOS ACR	UF	Fonte	Rio	Investimento (R$)	Potência (MW)	GF (MWm)	Lotes Contratados	Total (MWh)	Preço de Venda (R$/MWh)
3LEOES	20.121.332/0001-31	Tres Leoes Participacoes SA	USINA BARRA DO LEAO	PCH.PH.SC.032162-1.01	ECO	NÃO	SC	PCH	LEÃO	21.885.000,00	3,570	1,940	19	499.639,200	193,75
ARGENTUM	17.578.280/0001-12	ARGENTUM ENERGIA LTDA.	CLARITO ZONTA	PCH.PH.PR.035147-4.01	ESO	NÃO	PR	PCH	BRANCO	84.796.700,00	14,923	7,640	75	1.972.260,000	184,00
CACHIMBO ALTO	08.264.991/0001-21	HIDROELÉTRICA CACHIMBO ALTO LTDA	CACHOEIRA CACHIMBO ALTO	PCH.PH.RO.0305713-1.01	ECO	NÃO	RO	PCH	BRANCO	67.458.370,00	9,810	6,020	59	1.551.511,200	193,95
CANHADAO	05.516.658/0001-74	Canhadão Produção de Energia Ltda	CANHADAO	PCH.PH.PR.032511-2.01	ECO	NÃO	PR	PCH	COVÓ	41.130.000,00	10,000	6,220	50	1.314.840,000	195,00
CASTRO	08.017.729/0001-82	Castro Energia Ltda - ME	CASTRO	PCH.PH.PR.032513-9.01	ECO	NÃO	PR	PCH	IAPÓ	19.220.000,00	4,000	2,470	17	447.045,600	195,00
CAZUZA FERREIRA	17.201.404/0001-46	CAZUZA FERREIRA ENERGÉTICA S.A.	CAZUZA FERREIRA (**)	PCH.PH.MS.000735-8.01	ECO	NÃO	RS	PCH	CAIBAÚ CERANIC	39.635.100,00	9,100	6,130	15	394.452,000	189,15
CEBRANORTE URBANO	05.699.630/0001-10	Cerbranorte Geração S.A.	CAPIVARI	PCH.PH.SC.000659-9.01	ECO	NÃO	SC	PCH	CAPIVARI	51.742.320,00	18,738	6,83	30	788.904,00	189,98
	84.432.111/0017-24	Urbano Agroindustrial Ltda.													
EGP APC	16.993.629/0001-10	Enel Green Power Cabeça de Boi S.A.	CABEÇA DE BOI	PCH.PH.MT.029733-0.01	ECO	SIM	MT	PCH	APIACÁS	0,00	30,000	17,850	42	1.104.465,600	147,85
EGP FAZ	17.018.327/0001-93	Enel Green Power Fazenda S.A.	DA FAZENDA	PCH.PH.MT.029734-8.01	ECO	NÃO	MT	PCH	APIACÁS	162.600.730,00	7,360	4,950	49	1.288.543,200	184,90
HSBSA	19.322.873/0001-49	HIDROELÉTRICA SANTA BRANCA S.A.	UHE SANTA BRANCA	UHE.PH.PR.035390-9.01	ESO	NÃO	PR	NEH	RIO TIBAGI	399.578.400,00	62,000	35,100	341	8.967.208,800	150,00
HSBII	14.582.685/0001-36	HIDROELÉTRICA SÃO JOÃO II LTDA.	SAO JOAO II	PCH.PH.PR.035146-6.01	ESO	NÃO	PR	PCH	SÃO JOÃO	46.155.640,00	6,991	3,600	35	920.388,000	184,00
NOVA GUAPORE ENERGETICA	22.976.970/0001-60	NOVA GUAPORE ENERGÉTICA S.A.	NOVA GUAPORE	PCH.PH.MT.034705-1.01	ESO	NÃO	MT	PCH	GUAPORÉ	95.780.000,00	13,964	9,390	90	2.366.712,000	194,00
PRATA	05.646.253/0001-50	Usina Elétrica do Prata S/A	AGUA BRAVA	PCH.PH.MT.029045-9.01	ECO	NÃO	MT	PCH	PRATA	54.182.000,00	13,050	6,370	56	1.472.620,800	194,00
PRATA	05.646.253/0001-50	Usina Elétrica do Prata S/A	AGUA PRATA	PCH.PH.MT.029044-0.01	ECO	NÃO	MT	PCH	PRATA	61.145.000,00	13,300	6,620	59	1.551.511,200	194,00
	23.058.747/0001-04	Recanto Energia SPE LTDA													
RECANTO	04.731.861/0001-09	Interalli Administração e Participações SA	RECANTO	PCH.PH.MT.034865-1.01	ESO	NÃO	MT	PCH	CORREGO AGUA LIMPA	39.499.480,00	9,11	5,32	53	1.393.730,40	192,88
	21.610.376/0001-98	Total Hidroelétrica Participacoes SA													
RENIC	14.659.499/0001-58	CARNAUBA GERAÇÃO DE ENERGIA S/A	RENIC (**)	PCH.PH.GO.029663-5.01	ECO	SIM	GO	PCH	BONITO	0,00	16,000	6,550	18	473.342,400	164,73
SALTO BANDEIRANTES	05.932.450/0001-36	Santa Fé Energética Ltda - ME	SALTO BANDEIRANTES	PCH.PH.PR.029686-4.01	ECO	NÃO	PR	PCH	BANDEIRANTES	19.818.000,00	4,200	2,920	23	604.826,400	194,00
SÃO LUIZ	23.114.510/0001-95	SÃO LUIZ ENERGIA S.A.	SÃO LUIZ	PCH.PH.ES.0352297-7.01	ESO	NÃO	ES	PCH	GUANDU	66.937.890,00	10,500	4,320	43	1.130.762,400	188,80
SIGMA ENERGIA	03.803.650/0001-63	Sigma Energia S.A.	SERRA DAS AGULHAS (**)	PCH.PH.MG.031207-0.01	ECO	SIM	MG	PCH	PARDO PEQUENO	0,00	30,000	12,870	11	289.264,800	162,33
TBL	14.897.684/0001-80	TAMBORIL ENERGETICA S.A.	TAMBORIL (**)	PCH.PH.GO.029648-1.01	ECO	SIM	GO	PCH	BONITO	0,00	29,328	12,910	53	1.393.730,400	164,73
TIGRE	05.545.260/0001-66	Tigre Produção de Energia Elétrica Ltda	TIGRE (**)	PCH.PH.PR.029222-2.01	ECO	SIM	PR	PCH	MARRECAS	0,00	9,000	5,250	32	841.497,600	195,00
													1170	**30.767.256,000**	

Empreendimento - Produto Disponibilidade - DIST-25-2021

Empresa/ Consórcio	CNPJ	Razão Social	Empreendimento	CEG	TIPO	CONTRATOS ACR	UF	Fonte	Combustível	Investimento (R$)	Potência (MW)	GF (MWm)	Lotes Contratados	Total (MWh)	ICB (R$/MWh)	Receita Fixa (R$/ano)
BIOGAS BONFIM	08.070.508/0001-78	RAÍZEN ENERGIA S/A. FILIAL BONFIM	BIOGÁS BONFIM	UTE.AI.SP.035109-1.01	ESO	NÃO	SP	BION	BIOGÁS	129.893.000,00	20,893	13,700	110	2.410.584,000	251,00	24.837.400,00
ELDORADO	07.401.436/0002-12	ELDORADO BRASIL CELULOSE SA	ONÇA PINTADA	UTE.FL.MS.035085-0.01	ESO	NÃO	MS	BIO	CAVACO / RESÍDUO DE MADEIRA	292.400.000,00	50,000	43,100	381	8.349.386,400	243,21	60.500.000,00
JO BIO	15.869.520/0001-02	J O BIOENERGIA S.A.	N O BIOENERGIA	UTE.AI.SP.032525-2.01	ECO	NÃO	SP	BION	BAGAÇO DE CANA	22.414.660,00	18,000	2,900	23	504.031,200	181,25	4.029.600,00
PORTO DAS AGUAS	08.322.396/0001-03	Cerradinho Bioenergia S.A.	PORTO DAS AGUAS (**)	UTE.AI.GO.029999-5.01	ECO	SIM	GO	BION	BAGAÇO DE CANA	0,00	40,000	26,100	53	1.161.463,200	203,25	9.521.082,82
PREDILECTA	62.546.387/0001-33	PREDILECTA ALIMENTOS LTDA	PREDILECTA	UTE.FL.SP.035103-2.01	ESO	NÃO	SP	BIO	CAVACO / RESIDUO DE MADEIRA	30.019.640,00	5,000	4,500	34	745.089,600	199,00	3.751.000,00
VDP	05.938.884/0001-43	Vale do Paraná S/A - Alcool e Açúcar	VALE DO PARANA	UTE.AI.SP.035073-7.01	ESO	NÃO	SP	BION	BAGAÇO DE CANA	97.540.000,00	48,500	18,800	137	3.002.272,800	245,20	30.820.500,00
WD	01.105.558/0001-02	WD AGROINDUSTRIAL Ltda.	WD	UTE.AI.MG.029122-6.01	ECO	NÃO	MG	BION	BAGAÇO DE CANA	26.376.000,00	16,000	7,700	77	1.687.408,800	217,18	15.320.586,65
													815	**17.860.236,000**		**148.780.169,47**

Empreendimento - Produto Disponibilidade - DIST-20-2021

Empresa/ Consórcio	CNPJ	Razão Social	Empreendimento	CEG	TIPO	CONTRATOS ACR	UF	Fonte	Combustível	Investimento (R$)	Potência (MW)	GF (MWm)	Lotes Contratados	Total (MWh)	ICB (R$/MWh)	Receita Fixa (R$/ano)
OESTE DE CANOAS	11.285.456/0001-61	OESTE DE CANOAS PETRÓLEO E GÁS LTDA	OESTE DE CANOAS I	UTE.GN.MA.035107-5.01	ESO	NÃO	MA	GAS	GÁS NATURAL	16.899.000,00	5,540	3,400	33	578.556,000	258,00	6.137.042,00
													33	**578.556,000**		**6.137.042,00**

TOTAL EXPANSÃO

Potência (MW): 395,449 — Preço Médio (R$/MWh): 198,59 — Total (MWh): 49.206.048,000 — Montante (R$): 9.772.035.311,090

Investimento (R$): 1.847.471.830,00 — Garantia Física (MWmédio): 221,660 — Lotes Contratados: 2.018 — LOTE DE ENERGIA: 0,1 Mwmédio

TOTAL GERAL **Considerando todos os empreendimentos**

Potência (MW): 528,877 — Preço Médio (R$/MWh): 198,59 — Total (MWh): 49.206.048,000 — Montante (R$): 9.772.035.311,090

Investimento (R$): 1.887.106.930,00 — Garantia Física (MWmédio): 291,470 — Lotes Contratados: 2.018 — LOTE DE ENERGIA: 0,1 Mwmédio

(**) Empreendimento(s) com com contrato(s) e/ou operação comercial não será(ão) considerado(s) na soma da potência, garantia física e investimento.

Fonte: (CCEE, 2019)