

MURILO KENICHI FUJII

**SIMULAÇÃO COM APRENDIZADO COMPUTACIONAL EM LEILÕES DE
ENERGIA NO BRASIL**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Diploma de
Engenheiro de Produção

São Paulo

2017

MURILO KENICHI FUJII

**SIMULAÇÃO COM APRENDIZADO COMPUTACIONAL EM LEILÕES DE
ENERGIA NO BRASIL**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Diploma de
Engenheiro de Produção

Orientadora: Prof^a. Dra. Celma de Oliveira
Ribeiro

São Paulo
2017

Ficha Catalográfica

Fujii, Murilo Kenichi

SIMULAÇÃO COM APRENDIZADO COMPUTACIONAL EM LEILÕES DE ENERGIA NO BRASIL / M. K. Fujii -- São Paulo, 2017.

104 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Aprendizagem Computacional 2.Aprendizagem por Reforço 3.Q Learning 4.Leilões de Energia no Brasil 5.Simulação de Lances Finais em Leilão de Energia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

A todos aqueles que estiveram e estão próximos de mim e que, cada um à sua maneira, proporcionaram-me a certeza de que não estou sozinho nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof.^a Dra. Celma de Oliveira Ribeiro por seus ensinamentos, paciência e confiança ao longo do desenvolvimento deste trabalho que foram fundamentais para a conclusão.

Ao Marcos Roberto Machado pela parceria e amizade também essenciais para o entendimento de questões relacionadas à modelagem do algoritmo utilizado neste trabalho.

À minha namorada que não deixou de me incentivar e apoiar nos momentos mais difíceis não só ao longo do desenvolvimento deste trabalho, mas também ao longo da minha graduação.

À minha família e meus amigos pela paciência e compreensão em todas as ausências que se fizeram necessárias.

“Não é o conhecimento, mas o ato de aprender;
não a posse, mas o ato de chegar lá que concede a
maior satisfação.”

(Carl Friedrich Gauss)

RESUMO

O que se propõe fazer neste trabalho é prover os rudimentos para simulação de lances finais em leilões de energia no mercado brasileiro por meio de conceitos de Aprendizagem por Reforço Computacional, dentre esses o *Q-Learning* mais especificamente. Para tanto, buscou-se caracterizar os leilões que ocorrem no setor elétrico brasileiro, abordando o setor eólico mais especificamente devido à quantidade e facilidade de obtenção de dados. A programação dos algoritmos para simulação de lances foi feita em *MatLab* e posterior análise de resultados através do software *Minitab*, através dos quais podemos concluir que o simulador atende o propósito de fornecer uma base rudimentar para iniciar estudos mais aprofundados e simulações mais sofisticadas no que diz respeito à aplicação de algoritmos com aprendizagem por reforço na determinação de lances de segunda fase em leilões de energia no Brasil.

Palavras-Chave: Aprendizagem Computacional, Aprendizagem por Reforço Computacional, Q-Learning, Inteligência Artificial, Leilões de Energia Eólica, Simulação de Lances Finais em Leilão de Energia.

ABSTRACT

What it is proposed to do in this work is to provide the rudiments for simulation of final bids in energy auctions in the Brazilian market through concepts of Computational Reinforcement Learning, among which Q-Learning more specifically. In order to do so, we sought to characterize the auctions that occur in the Brazilian electric sector, addressing the wind sector more specifically due to the quantity and ease of obtaining data. The programming of the algorithms for bid simulation was performed in *MatLab* and later analysis of results through Minitab software, through which we can conclude that the simulator serves the purpose of providing a rudimentary basis to initiate further studies and more sophisticated simulations regarding the application of reinforcement learning algorithms in determination of second phase bids in energy auctions in Brazil.

Keywords: Computational Learning, Reinforcement Learning, Q-Learning, Artificial Intelligence, Wind Energy Auctions, Simulation of Final Bidding on Energy Auctions.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Matriz Energética por Fonte de Energia	35
Figura 2 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	36
Figura 3 - Distribuição Geográfica dos Empreendimentos de Geração Hidráulica no Brasil ...	37
Figura 4 - Atlas do Potencial Eólico Nacional (trimestral)	39
Figura 5 - Evolução da Energia Eólica no Brasil (MW)).....	41
Figura 6 - Interação entre Agente e Ambiente	43
Figura 7 - Interação entre Ambientes e Agentes com Aprendizagem.....	47
Figura 8 - Torre de Hanói	49
Figura 9 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade de Distribuição Normal	57
Figura 10 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 1, 4 e 7.....	65
Figura 11 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 2, 5 e 8.....	65
Figura 12 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 3, 6 e 7.....	66
Figura 13 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 10, 13 e 16.....	66
Figura 14 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 11, 14 e 17.....	67
Figura 15 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 12, 15 e 18.....	67
Figura 16 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 19, 22 e 25.....	68
Figura 17 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 20, 23 e 26.....	68
Figura 18 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 21, 24 e 27.....	69
Figura 19 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 1, 10 e 19	70
Figura 20 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 2, 11 e 20	70
Figura 21 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 3, 12 e 21	71
Figura 22 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 4, 13 e 22	71
Figura 23 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 5, 14 e 23	72
Figura 24 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 6, 15 e 24	72
Figura 25 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 7, 16 e 25	73
Figura 26 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 8, 17 e 26	73
Figura 27 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 9, 18 e 27	74
Figura 28 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 1, 2 e 3	75
Figura 29 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 4, 5 e 6	75
Figura 30 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 7, 8 e 9	76
Figura 31 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 10, 11 e 12	76
Figura 32 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 13, 14 e 15	77
Figura 33 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 16, 17 e 18	77
Figura 34 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 19, 20 e 21	78
Figura 35 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 22, 23 e 24	78
Figura 36 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 25, 26 e 27	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de Ganhos para Exemplificar Estratégia Dominante.....	29
Tabela 2 - Matriz de Ganhos para Exemplificar Equilíbrio de Nash	29
Tabela 3 - Comparação entre Ambientes Livre e Regulado.....	34
Tabela 4 - Empreendimentos de Geração em Operação no Brasil	36
Tabela 5 - Leilões Realizados pela ANEEL com Energia Eólica	40
Tabela 6 - Levantamento do Histórico de Trabalhos com ABM no Setor Elétrico Mundial...	44
Tabela 7 - Critérios para o Sucesso de um Projeto de Simulação	53
Tabela 8 - Modelo da Matriz de Recompensas	56
Tabela 9 - Quantidade de Anormalidades por Série de Simulações Geradas	64
Tabela 10 - Teste de Igualdade de Média.....	80
Tabela 11 - Teste de Média	80
Tabela 12 - Teste de Normalidade de Jarque-Bera.....	81

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. Motivação	21
1.2. Gemse	22
1.3. Objetivo	22
1.4. Estrutura do Trabalho	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1. Leilões.....	24
Teoria Dos Leilões	24
Alguns Conceitos da Teoria dos Jogos	26
Classificações de Jogos	27
Soluções de um Jogo	28
Aplicações No Setor Elétrico	30
Setor Elétrico Brasileiro E Leilões De Energia No Brasil	31
Fontes de Geração de Eletricidade no Brasil	34
2.2. Simulação Baseada em Agentes	41
Agent-Based Modeling And Simulation	42
Agentes.....	43
Uso de SBA no setor elétrico	44
Aprendizagem Computacional	46
Aprendizagem por Reforço	48
<i>Q-Learning</i>	50
3. METODOLOGIA	52
3.1. Sobre o Ambiente de Simulação.....	53
3.2. Sobre os <i>Inputs</i> do Simulador	54
3.3. Sobre a Arquitetura do Simulador	55

Cálculo da Matriz Q.....	55
Matriz de Recompensas.....	55
Funções Recompensa.....	56
Matriz de Valores da Função Q.....	58
Outputs:.....	59
Método 1: Média.....	59
Método 2: Lance Aleatório	59
Método 3: Lance com Aprendizado I	60
3.4. SOBRE O QUE FOI SIMULADO	61
Fase I: Estudo dos parâmetros envolvidos e funções de recompensa	61
Fase II: Consistência dos lances gerados.....	63
4. RESULTADOS E ANÁLISES.....	64
4.1. Resultados Fase I.....	64
4.2. Resultados Fase II	79
Teste de Igualdade de Média.....	79
Teste de Média	80
Teste de Normalidade.....	81
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
ANEXO – Entradas para Simulação e Resultados.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande potencial energético no que tange à geração de energia por fontes renováveis de energia, que são fontes em que sua utilização e uso podem-se manter ao longo do tempo sem possibilidade de esgotamento dessa fonte, *e.g.* energia solar e eólica. Graças a esse potencial, fazem-se constantes as intervenções regulatórias do governo de maneira a contemplar inovações tecnológicas mais recentes, bem como mudanças do próprio mercado.

Conforme informações da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), as empresas responsáveis pela produção e transmissão de energia, espalhadas pelas cinco regiões do país (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e Norte), compõem um sistema no qual ocorrem as negociações de compra e venda de energia do país.

Tais negociações se estabelecem em dois tipos de ambiente, os quais possuem particularidades distintas. Um destes ambientes é o chamado Ambiente de Contratação Regulada (ACR), no qual as relações de compra e venda de energia se dão através de leilões de compra e venda de energia. É nesse contexto que se desenvolve este trabalho.

1.1.Motivação

Entender a dinâmica de formação de preços em mercados do setor elétrico tem demonstrado ser uma preocupação de âmbito mundial, uma vez que cada mercado possui uma abordagem distinta para a negociação de preços, variando desde leilões realizados pelos governos a negociações de contratos em mercados derivativos. Cada vez mais o tema vem sendo tratado em estudos ao redor do mundo utilizando técnicas computacionais para tentar prever o comportamento dos elementos envolvidos.

As abordagens mais recentes que têm sido realizadas para o estudo da dinâmica de preços de leilões de energia elétrica têm considerado modelos encontrados na literatura de trabalhos de Inteligência Artificial, como algoritmos genéticos, redes neurais e aprendizagem por reforço. Isso se deve, basicamente, à simplificação que tais modelos permitem dar aos problemas que têm sido propostos a resolver, uma vez que mercados de energia elétrica apresentam um alto grau de complexidade para modelagem computacional tradicional em razão dos diversos fatores que influenciam esses mercados: fontes de energia, capacidade de geração, efeitos de

sazonalidade, características geográficas, o próprio mercado etc. (GUERCI e SAPIO, 2012; PALOMINO, 2009).

Esse é um dos assuntos de interesse do GEMSE (Grupo de Estudos em Modelagem do Setor Elétrico), liderado pela Prof.^a Dra. Celma de Oliveira Ribeiro e pelo Prof. Dr. Erik Eduardo Rego, ambos professores do Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ao qual este trabalho pretende ser útil.

1.2.Gemse

O Grupo de Estudos em Modelagem do Setor Elétrico (GEMSE) tem como foco a análise da dinâmica de evolução dos lances de venda de energia elétrica em leilões de comercialização, cuja importância se dá pela necessidade de aperfeiçoamento da estrutura dos leilões de contratação de energia elétrica no Brasil no que se refere a encorajar a competição, evitar o conluio e proporcionar modicidade tarifária e segurança energética por parte do governo brasileiro; bem como maximizar a receita por parte de quem vende energia.

1.3.Objetivo

O que se propõe fazer neste trabalho é elaborar um simulador baseado nos conceitos de Aprendizagem por Reforço Computacional que têm sido utilizados em estudos recentes sobre mercados de energia elétrica ao redor do mundo. Este simulador deve simular lances finais para geradores participantes de um leilão de energia elétrica no mercado brasileiro.

A elaboração deste simulador servirá como uma base rudimentar para posteriores análises da dinâmica de preços de leilões de energia no Brasil e consequentes sofisticções do modelo para estudos de estratégia nesses leilões.

1.4.Estrutura do Trabalho

Este trabalho está subdividido em quatro tópicos principais: Fundamentação Teórica, Metodologia, Análise da Simulação e Considerações Finais.

O capítulo 2 contém uma revisão da literatura relacionada à abordagem do objetivo supracitado, que inclui Teoria de Leilões, Setor Elétrico Brasileiro, Leilões de Energia Elétrica no Brasil, Simulação Baseada em Agentes, com destaque para Aprendizagem Computacional, Aprendizagem por Reforço e o algoritmo que se quer implementar neste trabalho: *Q-Learning*.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para cumprir os objetivos deste trabalho e gerar lances finais através de simulações baseadas no algoritmo de aprendizagem por reforço *Q-Learning*, que serão apresentados e analisados no capítulo 4 deste texto.

O capítulo 5 contém a conclusão referente aos resultados obtidos, o aprendizado adquirido ao longo do desenvolvimento deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros visando o progresso da implementação de algoritmos de aprendizagem por reforço.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo visa apresentar os conceitos relevantes para entendimento e desenvolvimento deste trabalho.

2.1.Leilões

Geralmente, a imagem que nos vem ao pensamento quando se fala em leilão é a cena de várias pessoas competindo para obter uma obra de arte valiosa, oferecendo, para isso, altas quantias de dinheiro; enquanto outra pessoa, chamada leiloeiro, busca o maior valor que as pessoas competidoras podem oferecer, declarando vencedor o competidor detentor de tal oferta. Este é um exemplo de leilão, o qual WOLFSTETTER (1999) define como um mecanismo de transações regido por um conjunto de regras que especificam como um vencedor é determinado e quanto este deve pagar.

Podemos citar o uso de leilões por parte tanto de empresas privadas – e.g. leilões de bens e serviços, leilões do direito de transmissão de eventos esportivos, leilões para comercialização de energia elétrica – quanto pelo governo de vários países – e.g. leilão do direito de perfurar áreas para obtenção de petróleo, leilões de faixas do espectro de ondas de rádio, leilões para privatização de usinas elétricas – em suas negociações devido, segundo WOLFSTETTER (1999), a 3 razões principais: velocidade de venda, revelar informações sobre *valuations* de compradores, prevenir acordos desonestos entre compradores e vendedores.

A seguir, procurar-se-á definir os principais conceitos sobre os tipos de leilão e situar o leitor em relação ao atual setor elétrico brasileiro, bem como a importância e as aplicações dos leilões neste cenário.

Teoria Dos Leilões

De maneira sucinta, podemos entender o leilão como um mecanismo de compra e venda de bens e/ou serviços no qual candidatos a compra fazem lances de preços na intenção de adquirir o que está sendo leilado, competindo entre si, sendo que o processo de

intermediação é executado por um terceiro participante denominado leiloeiro, que tem por função coordenar o leilão recebendo as ofertas e os lances.

De acordo com KLEMPERER (1999), são 4 os tipos amplamente usados e estudados: o leilão de lance ascendente (ou leilão inglês), o leilão de lance descendente (ou leilão holandês), o leilão de primeiro preço e o leilão de segundo preço (ou leilão de Vickrey, em homenagem ao professor da *Columbia University*, William Vickrey).

No leilão ascendente, os participantes progressivamente oferecem lances declarados abertamente sempre mais altos que o lance imediatamente anterior através de um incremento mínimo de valor até que reste apenas um participante, dito vencedor; conforme os lances sobem, os participantes que não cobrem o valor desistem do leilão. No leilão descendente, ocorre exatamente o contrário do leilão ascendente: o valor começa muito alto e então vai diminuindo continuamente, vencendo o leilão o primeiro participante que aceitar o lance corrente. Em ambos os tipos de leilão, os lances são anunciados abertamente: todos os participantes conhecem os valores dos lances que são anunciados.

No leilão de primeiro preço, cada participante submete seu lance ao leiloeiro de maneira não aberta: apenas o leiloeiro conhece os lances dos participantes, além do próprio participante, vencendo o leilão o participante que deu o maior lance, pagando por este. O leilão de segundo preço é feito de maneira análoga ao leilão de primeiro preço, vencendo o leilão o participante que deu o maior lance. Contudo, este paga pelo segundo maior lance dado.

Varian (2000, apud REGO, 2012) diferencia ainda mais os leilões, classificando-os ainda quanto à natureza do leilão (ação tomada pelos participantes do leilão), quanto à forma (características de realização dos lances) e quanto ao preço de fechamento (regras que definem o valor de negociação do bem leilado, que não é necessariamente o valor do lance vencedor).

Quanto à natureza, o leilão pode ser classificado em leilão de oferta, de demanda ou duplo. No leilão de oferta, o comprador pretende adquirir um bem pelo menor preço possível abaixo do maior lance de oferta válido para participação do leilão por parte dos vendedores, sendo que este é definido pelo comprador; vencendo o participante que fizer o menor lance de oferta. No leilão de demanda, analogamente à ideia do leilão de oferta, os compradores fazem lances acima do menor lance de demanda válido (definido pelo vendedor do bem), vencendo aquele que fizer o maior lance. No leilão duplo, há lances tanto de oferta (por parte de

vendedores), quanto de demanda (por parte de compradores). O preço de fechamento do leilão é estabelecido conforme regras pré-definidas do leilão e pode haver ou não a presença de agentes intermediários (leiloeiros).

Quanto à forma, o leilão pode ser classificado em leilão aberto ou fechado. No leilão aberto, os lances são divulgados abertamente a todos os participantes, podendo, ainda, ser subclassificado em ascendente (leilão de demanda em tempo real no qual os lances são necessariamente superiores a seus lances antecessores) ou descendente (no qual os lances são necessariamente inferiores a seus lances antecessores). No leilão fechado, os lances não são divulgados até o encerramento do leilão: apenas o leiloeiro conhece os lances de todos os participantes.

Quanto ao preço de fechamento, o leilão pode ser classificado em leilão uniforme ou leilão discriminatório. No leilão uniforme, todos os participantes vencedores do leilão pagam o mesmo preço independentemente do valor de seus lances, sendo a mais utilizada para comercialização de energia elétrica. Há, ainda, a seguinte diferenciação: primeiro-preço, o preço do bem leilado é o valor do lance vencedor, e segundo-preço, o preço do bem leilado é o valor do melhor lance perdedor (que é o segundo melhor lance do leilão). No leilão discriminatório, cada participante vencedor paga pelo bem leilado o valor de seu próprio lance.

Dadas as características de um leilão, nota-se que os participantes possuem objetivos conflitantes: vencedores querem maximizar o valor de venda e os compradores desejam minimizar o valor da compra. Além disso, não podemos esquecer a competição existente entre compradores (no caso de um leilão de demanda, por exemplo) e entre vendedores (no caso de um leilão de oferta, por exemplo). Assim, é interessante introduzirmos alguns conceitos relacionados a Teoria dos Jogos.

Alguns Conceitos da Teoria dos Jogos

HILLIER e LIEBERMAN (2013) definem Teoria dos Jogos como um ramo da matemática dedicado ao estudo de situações competitivas cujos resultados finais dependem essencialmente da combinação das estratégias selecionadas pelos participantes, colocando ênfase nos processos de tomada de decisão desses; estuda a escolha de decisões ótimas sob condições conflitantes. Para cada agente (participante) há um conjunto de estratégias

possíveis sendo que a seleção ocorre conforme interesses ou preferências (perfil) de cada agente para uma dada situação. Dessa forma, pode-se definir uma função que atribui um valor a cada perfil de jogo e que representa o ganho do jogador caso selecione uma dada estratégia.

Um jogo é constituído por um conjunto finito de jogadores $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ em que cada jogador $g_i \in G$ possui um conjunto $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ik}\}$ de k opções, ditas estratégias puras do jogador g_i . A reunião de estratégias forma um perfil de estratégia s . A reunião de todos os perfis de estratégia forma o conjunto $S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$, dito espaço de estratégia pura do jogo. Temos, ainda, que para cada jogador $g_i \in G$ existe uma função que associa o ganho $u_i(s)$ do jogador g_i para o perfil de estratégia $s \in S$, dita função utilidade, que é uma função definida por $u_i: S \rightarrow R$, em que R é o conjunto dos números reais. (BORTOLOSSI et al., 2004)

Classificações de Jogos

Os jogos podem ser classificados:

- Quanto à natureza da interação dos jogadores: dito cooperativo quando os jogadores podem tomar decisões conjugadas, ou seja, conjuntamente; e não cooperativo quando não houver possibilidade de acordos, ou seja, os jogadores atuam isoladamente.
- De acordo com sua natureza de formulação e tipo de aplicação: dito simultâneo ou estático quando o jogo ocorre em uma única etapa e o jogador decide sem o conhecimento da decisão dos outros jogadores; e sequencial ou dinâmica quando o jogo ocorre em etapas sucessivas e a tomada de decisão tem implicações em etapas subsequentes.
- Com relação às informações disponíveis aos jogadores: dito de informação completa quando os jogadores tem ciência de todas as informações pertinentes à tomada de decisão (regras do jogo, quem participa, possíveis ações, possíveis resultados, preferência dos jogadores em função dos resultados); e de informação incompleta quando faltar alguma das informações para qualquer um dos jogadores.

Com base no conjunto de classificações definidas, REGO (2013) enquadra o modelo brasileiro de leilões de comercialização de energia elétrica como:

- uniforme de primeiro preço;
- fechado;
- de duas etapas sendo que a primeira possui dinâmica de lances descendentes e a segunda, de lances simultâneos em que o objetivo do leiloeiro é o de minimização do valor de aquisição da energia elétrica;
- jogadores não cooperativos;
- de informação incompleta.

Soluções de um Jogo

BORTOLOSSI et al (2004) definem “solução de um jogo” como uma prescrição ou previsão sobre o resultado do jogo, sendo que há duas abordagens principais: Dominância e Equilíbrio de Nash.

Dominância

Dominância é um processo no qual se eliminam estratégias que são estritamente dominadas até que se encontre a estratégia ótima. HILLIER e LIEBERMAN (2013) explicam que uma estratégia é dominada por outra se esta sempre for pelo menos tão boa quanto a primeira independentemente do que faz o oponente. A rigor, podemos dizer que uma estratégia é estritamente dominada quando todos os ganhos da função de utilidade aplicada a um perfil de estratégia forem maiores do que os ganhos da função de utilidade aplicada a outro perfil de estratégia. Considerando a matriz de ganhos a seguir, podemos dizer que:

- Em relação ao jogador 1, a estratégia 3 é dominada pela estratégia 1, pois a estratégia 1 possui ganhos maiores: $1 > -1, 2 > 1, 4 > 0$
- Em relação ao jogador 2 não há estratégia dominada;

Tabela 1 - Matriz de Ganhos para Exemplificar Estratégia Dominante

		Jogador 2		
Jogador 1	Estratégia	1	2	3
	1	1	2	4
	2	1	0	5
	3	-1	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Equilíbrio de Nash

Segundo BORTOLOSSI et al (2004), o Equilíbrio de Nash é definido por um ponto onde cada jogador não tem incentivo para mudar sua estratégia se os demais jogadores não o fizerem. Em outras palavras, podemos entender que cada pessoa faz a escolha ótima dada a escolha do outro de modo que, quando a escolha de uma pessoa for revelada, nenhuma delas queira mudar seu comportamento – REGO (2012).

Exemplo: Considere o jogo determinado pela matriz de ganhos abaixo:

Tabela 2 - Matriz de Ganhos para Exemplificar Equilíbrio de Nash

		Jogador 2			
Jogador 1	Estratégia	1	2	3	4
	1	(-5,2)	(2,6)	(1,4)	(0,4)
	2	(0,0)	(3,2)	(2,1)	(1,1)
	3	(7,0)	(2,2)	(1,1)	(5,1)
	4	(9,5)	(1,3)	(0,2)	(4,8)

Fonte: Elaborado pelo Autor

O único equilíbrio de Nash existente é o perfil de estratégia (s_{12}, s_{22}):

- Para estratégia 1 do jogador 2, o jogador 1 escolhe estratégia 4;
- Para estratégia 2 do jogador 2, o jogador 1 escolhe estratégia 2;
- Para estratégia 3 do jogador 2, o jogador 1 escolhe estratégia 2;
- Para estratégia 4 do jogador 2, o jogador 1 escolhe estratégia 3;

- Para estratégia 1 do jogador 1, o jogador 2 escolhe estratégia 2;
- Para estratégia 2 do jogador 1, o jogador 2 escolhe estratégia 2;
- Para estratégia 3 do jogador 1, o jogador 2 escolhe estratégia 2;
- Para estratégia 4 do jogador 1, o jogador 2 escolhe estratégia 4;

Portanto, o ótimo para ambos os jogadores é a estratégia 2 do jogador 1 e a estratégia 2 do jogador 2.

Aplicações No Setor Elétrico

Segundo PALOMINO (2009), podemos dizer que a partir da década de 1990 os setores elétricos de todo o mundo começaram a sofrer processos de reestruturação com o intuito de implementar uma estrutura de mercado que tornasse possível o ramo da comercialização de energia elétrica através de diretrizes que permitissem o surgimento de uma indústria de energia elétrica que gerasse competição de mercado e consequente separação das atividades de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Sabe-se, também, que o objetivo principal foi incentivar tal competição de maneira a diminuir o preço da energia elétrica decorrente do livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição por todos os agentes envolvidos nesse mercado. Foi neste contexto que foram sendo introduzidos os leilões.

Os leilões têm sido amplamente aplicados no cenário mundial do setor elétrico sendo que, de modo geral, após algum tipo de reestruturação e liberação do mercado de energia elétrica de cada país. A seguir, estão listados alguns exemplos de leilões que ocorrem no setor elétrico mundial. (MASILI, 2004)

Nos EUA, podemos citar os leilões de energia realizados pela *PJM Interconnection*, que opera nos mercados de energia elétrica do dia seguinte (*day-ahead*) que servem para assegurar que os detentores de direitos de transmissão recebam algum tipo de compensação por despesas de congestionamento das linhas de transmissão. Estes leilões são caracterizados como leilão duplo fechado de preço de fechamento uniforme e participantes não identificados.

Na Alemanha, existem os leilões realizados pelo mercado de energia elétrica desta, o *European Energy Exchange (EEX)*. O EEX realiza leilões do tipo fechado para contratos horários e de blocos e leilões do tipo aberto para negociação de contratos para cargas de base e pico.

Na Espanha, a *Compañía Operadora del Mercado Español de Electricidad S. A.*, responsável pela gestão econômica e pelo desenvolvimento do mercado de produção de energia elétrica, realiza leilões duplos fechados de primeiro-preço com preço de fechamento uniforme para cada hora do dia.

Na Argentina, a energia pode ser negociada a partir de três preços: contratual (negociação envolvendo as partes interessadas), sazonal (determinado através de preço de combustíveis, demanda prevista, capacidade de reservatórios e disponibilidade de oferta pela *Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S. A.*), e spot (determinado através de leilão de oferta fechado com preço de fechamento uniforme).

Setor Elétrico Brasileiro E Leilões De Energia No Brasil

PALOMINO (2009) divide o histórico do setor elétrico brasileiro em quatro etapas. Na primeira, que durou até a década de 1930, não havia intervenção do Estado no setor elétrico, sendo que as necessidades do mercado eram supridas por agentes privados. Isto fez com que o suprimento resultante do processo fosse escasso e não-uniforme ao longo do território nacional, o que gerou uma participação mais intensificada por parte do Estado, cujo interesse foi o de possibilitar haver uma infraestrutura propícia para o desenvolvimento nacional, marcando a segunda etapa que durou de 1930 a 1965. A terceira etapa, que viu seu fim em 1995, é caracterizada pela forte estrutura estatal presente no setor elétrico brasileiro.

A quarta etapa (atual) teve seu marco com a promulgação de duas leis de 1995 que permitiram a criação do atual modelo do setor de energia no Brasil: a Lei nº 8.987 de 13 de fevereiro de 1995, que dispõe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos previsto no art. 175 da Constituição Federal e dá outras providências; e a Lei nº 9.074 de 7 de julho de 1995, a qual estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. (Conforme consta no portal da Subchefia para Assuntos Jurídicos da Casa Civil). Essas leis permitiram: 1) a abertura do setor elétrico a empresas para autorização ou concessão de geração de energia elétrica com vistas ao comércio, sujeito às regras de comercialização, sendo possível a venda a consumidores específicos; 2) estabelecimento do livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição por parte dos fornecedores e consumidores livres (consumidor com carga igual ou superior a 3.000 kW, atendido em tensão maior ou igual a 69 kV que pode escolher o seu

fornecedor de energia elétrica), mediante o ressarcimento dos custos de transporte de energia envolvidos.

O modelo atual conta ainda com a *Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)* – órgão responsável pela regulação, fiscalização da produção, da transmissão, da distribuição e da comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal – com o *Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE)* – ambiente no qual ocorre a comercialização de energia elétrica – com o *Operador Nacional do Sistema (ONS)* – órgão responsável pela gestão técnica do sistema – e com o *Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)* – órgão de assessoramento do Presidente da República para formulação de políticas e diretrizes de energia – formando, assim, a organização institucional do setor elétrico brasileiro capaz de sustentar um modelo que acompanha as tendências de reestruturação que se via no mundo.

Finalmente, a promulgação da Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004, que dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, estabeleceu a estrutura de regras de comercialização de energia elétrica determinando dois ambientes de contratação: o *Ambiente de Contratação Livre (ACL)* e o *Ambiente de Contratação Regulado (ACR)*.

Ambiente de Contratação Regulado (ACR) é o segmento no qual se realizam a compra e venda de energia elétrica pelas distribuidoras e geradoras por intermédio de leilões promovidos pelo governo, por meio de contratos de longo prazo, uma vez que a legislação não permite que as distribuidoras atuem também como geradoras de energia. Esses leilões possuem sistemática reversa, iniciando com um preço-teto estabelecido pela ANEEL e reduzindo até a demanda superar a oferta, respeitando um preço mínimo de referência calculado pela EPE (PALOMINO, 2009; ANEEL).

Conforme REGO (2012), a partir de 1998, o setor elétrico do Brasil passou a fazer uso de leilões para a licitação de empreendimentos, autorizações de sistemas de transmissão e, desde 2004, na comercialização de energia elétrica. Com esse modelo atual do setor elétrico, foram criadas novas instituições e alteradas as funções de outras já existentes, a fim de zelar pelo equilíbrio operacional do mercado e regulamentar a comercialização de energia, de acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Ainda conforme a CCEE, com relação às fontes utilizadas para a geração de energia, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) mostra que a energia hidrelétrica está no topo da

matriz energética brasileira, fato que pode ser explicado pela abundância de grandes cursos d'água espalhados por quase todo o território nacional. No entanto, políticas públicas implementadas nos últimos anos têm feito aumentar a participação de outras fontes nessa matriz, tais como o gás natural, o petróleo e o carvão.

Os leilões de energia elétrica são realizados pela CCEE, por delegação da ANEEL, e utilizam o critério de menor tarifa, visando a redução do custo de aquisição da energia elétrica a ser repassada aos consumidores cativos e, ao mesmo tempo, assegurando o pleno atendimento da demanda futura no ACR e mantendo a observância da modicidade tarifária e das condições limites de repasse do custo de aquisição da energia aos consumidores finais (cativos), entre outros aspectos. Consumidores cativos são aqueles aos quais só é permitido comprar energia da rede a qual estejam conectados.

O leilão ocorre em duas fases. A primeira é restrita aos empreendimentos hidrelétricos, e se subdivide em duas etapas. Na primeira etapa, os empreendimentos fazem seus lances com base no “preço lance”. Se o menor lance for menor que 5% em relação aos outros, esta fase é concluída. Caso contrário, os empreendimentos com lances maiores em até 5% do lance mínimo continuam disputando. Na segunda etapa, os lances são feitos em rodadas uniforme por lotes de energia ligados a um preço definido pelo sistema. Ao se encontrar o ponto de equilíbrio entre a oferta e a demanda, inicia-se a rodada discriminatória, em que apenas um lance de preço é associado àquela quantidade de lotes classificada. A segunda fase também é formada por duas etapas, a hidro e a termo, em que há rodadas uniformes para negociar quantidades de lotes, e rodadas discriminatórias de lances únicos de preço para cada etapa (PALOMINO, 2009).

Cada distribuidora é responsável por estimar sua demanda a fim de atender seus consumidores cativos, que são aqueles que estão vinculados à concessionária responsável devido à localidade e que não tem opção de escolher seu próprio fornecedor. Consumidores que podem escolher seus fornecedores contratam via ACL (PALOMINO, 2009).

Ambiente de Contratação Livre (ACL), ou Mercado Livre, é aquele no qual as operações de compra e venda de energia elétrica são movidas por contratos bilaterais, que estabelecem volumes, preços e prazos, livremente negociados entre geradores, comercializadores, importadores e exportadores de energia e consumidores livres convencionais. O contrato deve, obrigatoriamente, ser registrado pelo agente vendedor e validado pelo agente comprador na CCEE, instituição responsável por realizar as operações de contabilização e liquidação

financeira das diferenças entre os montantes contratados e os montantes efetivamente consumidos (PALOMINO, 2009; ANEEL, CCEE). A tabela a seguir mostra, resumidamente, um comparativo entre os dois ambientes tratados.

Tabela 3 - Comparação entre Ambientes Livre e Regulado

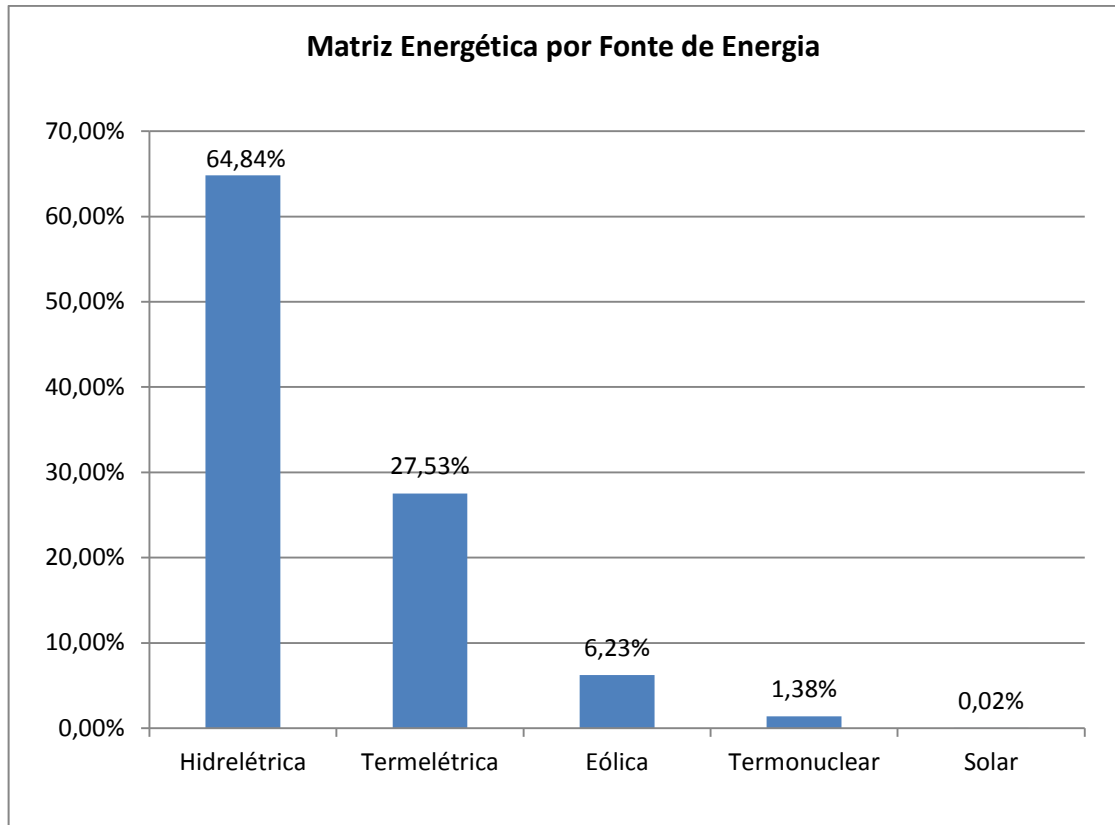
	Ambiente Livre	Ambiente Regulado
Participantes	Geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais	Geradoras, distribuidoras e comercializadoras. As comercializadoras podem negociar energia somente nos leilões de energia existente – (Ajuste e A-1)
Contratação	Livre negociação entre os compradores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

Fonte: Elaborado pelo Autor

Fontes de Geração de Eletricidade no Brasil

Segundo a ANEEL, o Brasil possui 4.524 empreendimentos em operação provendo um total de 144.005.730 kW de potência instalada (máxima potência elétrica ativa possível de ser obtida), distribuída em 5 fontes principais de geração de energia: fonte hídrica, fonte térmica (queima de combustíveis fósseis e biomassa), fonte eólica, fonte nuclear (urânio) e fonte solar (fotovoltaico). A distribuição dessa capacidade por fonte de geração é mostrada no gráfico a seguir.

Figura 1- Matriz Energética por Fonte de Energia



Fonte: Elaborado pelo Autor

As fontes geradoras de energia são as responsáveis pela produção de energia elétrica e sua injeção nos sistemas de transporte (transmissão e distribuição) para chegar aos consumidores. No Brasil, esse segmento é bastante fragmentado, contando com 4048 empreendimentos geradores atualmente, segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015). Desse total, a maioria, 2291, são termelétricas, embora essas usinas sejam responsáveis por apenas 28,2% da potência instalada (kW) no país. O tipo de empreendimento de maior capacidade instalada são as usinas hidrelétricas, responsáveis por mais de 60,0% do total, apesar de haver apenas 201 usinas desse tipo. A tabela a seguir apresenta, mais detalhadamente, os diferentes tipos de empreendimentos de geração em operação no Brasil, suas quantidades e potência instalada (ABRADEE; ANEEL).

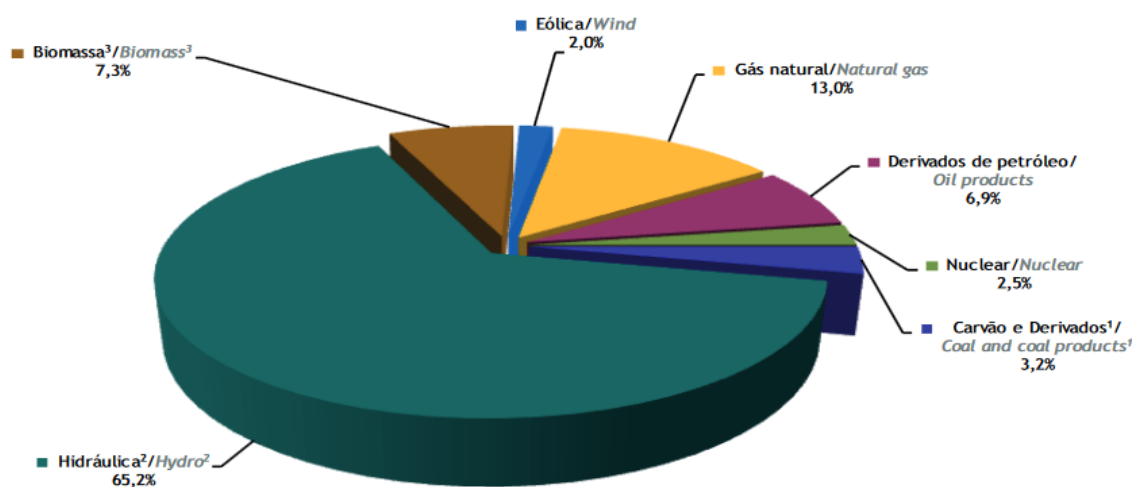
Tabela 4 - Empreendimentos de Geração em Operação no Brasil

Tipo	Quantidade	% do total	Potência instalada (kW)	% do total
Usina Hidrelétrica de Energia – UHE	201	5,0	84.703.838	62,3
Pequena Central Hidrelétrica – PCH	476	11,8	4.783.058	3,5
Central Geradora Hidrelétrica – CGH	496	12,3	326.213	0,2
Usina Termelétrica de Energia – UTE	2291	56,6	38.372.240	28,2
Usina Termonuclear – UTN	2	0,0	1.990.000	1,5
Central Geradora Eolielétrica – EOL	265	6,5	5.832.549	4,3
Central Geradora Solar Fotovoltaica – UFV	317	7,8	15.179	0,0
Total	4048	100	136.023.077	100

Fonte: Banco de Informações de Geração, 2015

No Brasil, a matriz elétrica é predominantemente de origem renovável, representando 74,6% da oferta interna, valor resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, essencialmente de origem renovável. O gráfico da figura a seguir apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2014 (EPE, 2015).

Figura 2 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: Balanço Energético Nacional - EPE, 2015

Levando em consideração a fonte de geração de energia elétrica, a principal é a hidráulica, embora tenha apresentado uma redução de 4,5% em comparação com o ano de 2013, ainda responde por 65,2% da oferta interna e contribuiu com 44,3% na expansão da capacidade instalada em 2014. Nesse segmento, incluem-se as usinas hidrelétricas de energia, as pequenas centrais hidrelétricas e as centrais geradoras hidrelétricas. A figura a seguir apresenta a distribuição geográfica dessas usinas no Brasil (EPE, 2015).

Figura 3 - Distribuição Geográfica dos Empreendimentos de Geração Hidráulica no Brasil

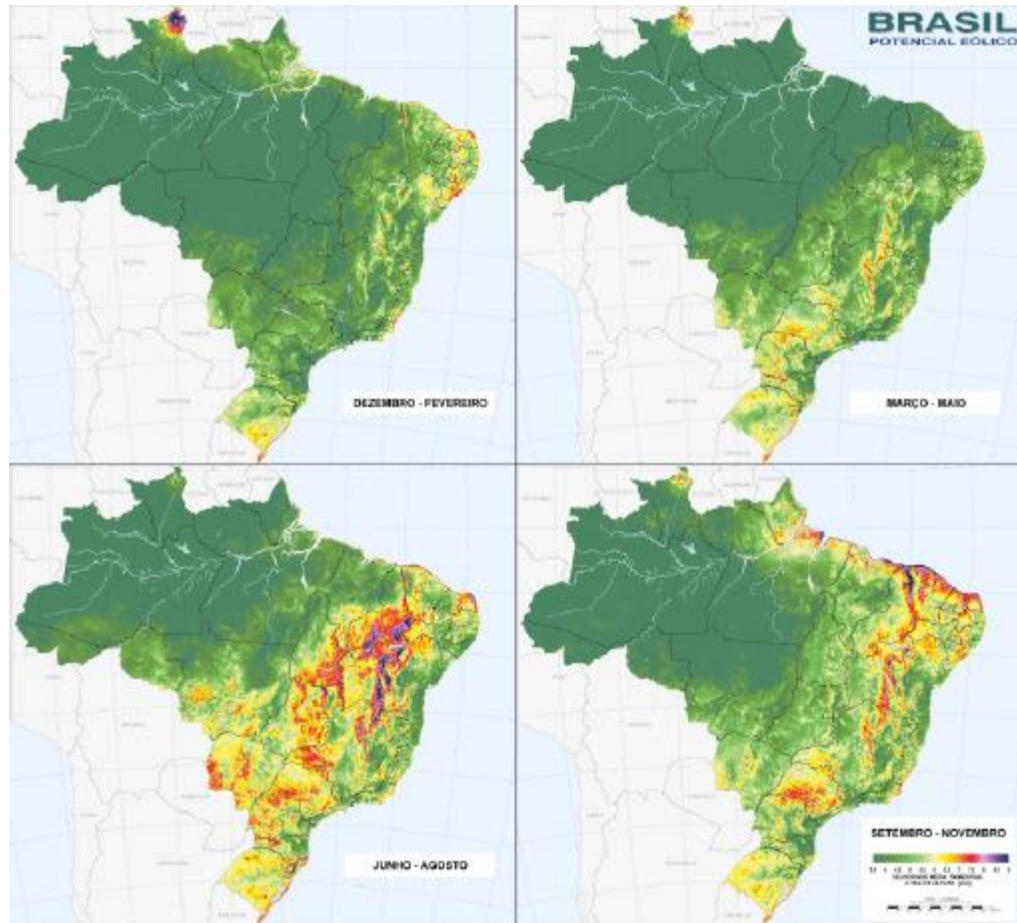


Fonte: Sistema de Georreferências do Setor Elétrico, 2016

Em relação ao modo de funcionamento de cada usina, a usina hidrelétrica baseia-se na conversão da energia cinética em energia mecânica, promovida por um potencial hidráulico que faz girar as turbinas acopladas a geradores, que convertem a energia mecânica em energia elétrica. A energia eólica funciona da mesma maneira, porém é utilizada a energia cinética dos ventos para fazer girar as turbinas. A usina termelétrica tem seu processo baseado na conversão de energia térmica em energia mecânica, proveniente da queima de um combustível, cujo vapor move as turbinas, também acopladas a geradores que convertem a energia mecânica em elétrica. A usina nuclear parte do mesmo princípio que a termelétrica, porém a fonte de energia nuclear são as reações nucleares de materiais radioativos, que produzem calor utilizado para gerar vapor que move as turbinas (PALOMINO, 2009).

Outra importante fonte geradora de energia é a eólica. A definição de energia eólica, segundo a ANEEL (2005), é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento), que é convertida em eletricidade por meio de turbinas eólicas (aerogeradores), consolidando uma fonte de energia limpa, sustentável e disponível, além de requerer menos terreno para sua implantação. Um ponto importante a ser levado em consideração é a disponibilidade de recursos. Grubb e Meyer (1993, apud ANEEL, 2005) expõem que a densidade da energia eólica deve ser maior ou igual a 500 W/m^2 a uma altura de 50 m, ou seja, que a velocidade mínima do vento seja de 7 a 8 m/s, para que seja considerada tecnicamente aproveitável. Um ‘Atlas Eólico’ do Brasil (Figura 1) elaborado em 2001 pela CEPEL (EPE, 2009a), para uma altitude de 50 m, mostra que, com exceção da região amazônica, o potencial dos ventos se distribui por todo o território nacional, sendo mais favorável na região Nordeste do país e expressando-se mais intensamente entre junho a dezembro, coincidindo com os meses de menor pluviosidade. Apesar das aparentes vantagens, esse tipo de energia demorou a se popularizar, sendo o custo dos equipamentos um dos principais entraves. Esse cenário vem mudando com os recentes desenvolvimentos tecnológicos, reduzindo significativamente os custos nas últimas duas décadas e possibilitando avanços como a instalação de aerogeradores a cerca de 100 m de altura acima do solo, que, em geral apresentam relação custo-benefício mais favorável, contribuindo para que esse tipo de fonte se estabeleça no setor energético.

Figura 4 - Atlas do Potencial Eólico Nacional (trimestral)



Fonte: EPE

No Brasil, a energia eólica teve início em 1992, com a instalação da primeira turbina eólica no arquipélago de Fernando de Noronha (Pernambuco), sendo esse aerogerador o primeiro a entrar em operação comercial na América do Sul. Apesar disso, os anos seguintes não trouxeram muitos avanços para essa fonte alternativa de energia elétrica, mesmo com a criação do Programa Emergencial de Energia Eólica – PROEÓLICA, criado após a crise energética de 2001. Em 2002, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, em substituição ao Programa anterior, com o objetivo de aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica, como as pequenas centrais hidrelétricas, as usinas eólicas e os empreendimentos termelétricos a biomassa, privilegiando empreendedores que não tenham vínculos societários com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição. O PROINFA também abriu caminho para a fixação de indústrias de componentes e turbinas eólicas (ABEEÓLICA, 2013; ANEEL, 2016b).

Assim, a energia eólica começou a integrar os leilões de energia, tendo sua primeira participação no Segundo Leilão de Energia de Reserva (LER), caracterizada pela contratação de um volume de energia além do que seria necessário para atender à demanda do mercado total do país, que ocorreu em 2009, em um leilão de comercialização de energia exclusivo para a fonte eólica, resultando na contratação de 1.805,7 MW, provenientes de 71 empreendimentos, a um preço médio de venda de R\$ 148,39/MWh (ABEEÓLICA, 2013; EPE, 2009b). Depois disso, essa fonte de energia voltou a participar de outros leilões, como mostrado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 5 - Leilões Realizados pela ANEEL com Energia Eólica

Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	3/2009	5/2010	2/2011	6/2012	5/2013	3/2014	2/2015
Leilões		7/2010	3/2011		9/2013	6/2014	4/2015
			7/2011		10/2013	8/2014	9/2015

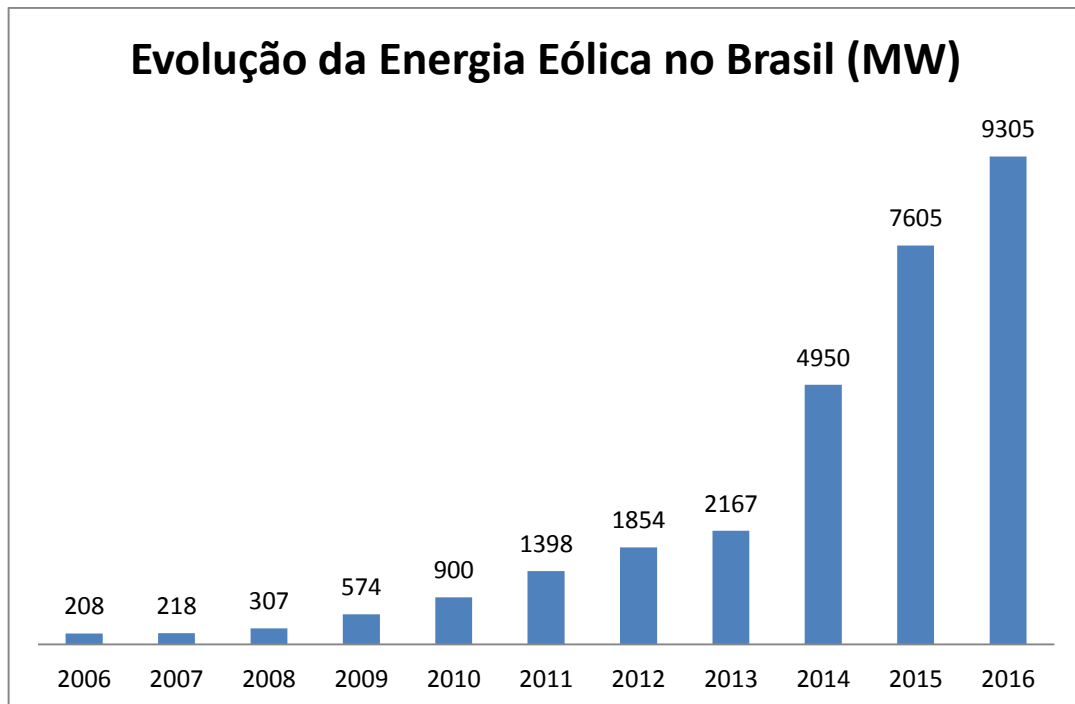
Fonte: ANEEL, elaborado pelo autor

Esses leilões foram tanto de Energia de Reserva (LER), como de Fontes Alternativas (LFA) e de Energia Nova (LEN), este último podendo ser de duas categorias: o A -5, para usinas que entram em operação comercial em até cinco anos, e o A -3, em até três anos (CCEE).

A utilização do mecanismo de leilão para a contratação de energia eólica visa estabelecer um valor adequado ao equilíbrio do preço com a percepção de risco de retorno do investimento, considerando a produção média ao longo dos anos e estabelecendo-se um preço teto coerente com a política de modicidade tarifária. De acordo com a Lei nº 10.848/2004, a contratação de energia pode ser feita por quantidade ou por disponibilidade, em que, no primeiro modo, o vendedor do contrato assume os riscos e os custos variáveis de produção, enquanto que no segundo modo, o comprador do contrato os assume (EPE, 2009a).

Além do PROINFA e dos leilões, a energia proveniente da fonte eólica também é comercializada, em uma escala menor, no Mercado Livre, onde as condições contratuais são livremente negociadas entre as contrapartes (ABEEÓLICA, 2013). A Figura 2 apresenta um gráfico da evolução da energia eólica no Brasil, em que é possível notar um crescimento exponencial desse tipo de energia.

Figura 5 - Evolução da Energia Eólica no Brasil (MW))



Fonte: ANEEL 2016, elaborado pelo autor

Ainda, segundo a ANEEL (2016a), o Brasil continua entre os países com maior percentual de energia eólica em sua matriz energética, e previsão de crescimento de mais de 7500 MW até 2018. Além disso, apresentou crescimento maior que os 8 anos anteriores, tornando-se o décimo maior país do mundo em geração de energia eólica e o quarto maior em expansão dessa fonte. Em relação à participação interna na matriz energética brasileira, a energia eólica passou a ocupar o terceiro lugar.

2.2.Simulação Baseada em Agentes

Imagine que precisemos decidir se é vantajoso para nós participarmos de uma espécie de jogo de lançamento de dados para o qual existem certas regras em que ganhamos ou perdemos uma quantia de dinheiro dependendo de algum tipo de combinação dos resultados dos dados lançados. O que podemos pensar para tomar essa decisão é registrar possíveis combinações dos resultados dos dados e verificar o quanto ganhamos ou perdemos e só então olhar o quadro geral para tomar a decisão: participar ou não participar. Isso é uma forma de simular.

Conforme SANTORO (2010), podemos definir simulação como uma forma de imitar comportamentos de determinados elementos de maneira a obter informações sobre certos aspectos da realidade e entender o relacionamento entre tais elementos para, desse modo, tentar prever situações ou comportamentos a fim de obter decisões ótimas.

Outra definição relevante para este estudo é a de Pegden (1991, apud FREITAS FILHO, 2001), que diz que a simulação consiste em projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo a fim de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação. Neste momento, faz-se necessária a definição dos conceitos de sistema, que para WINSTON (2003) é o conjunto de entidades que agem e interagem com um determinado propósito, e modelo, que para PIDD (1996), é uma representação de parte da realidade percebida pela pessoa que deseja usar tal representação para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade.

Agent-Based Modeling And Simulation

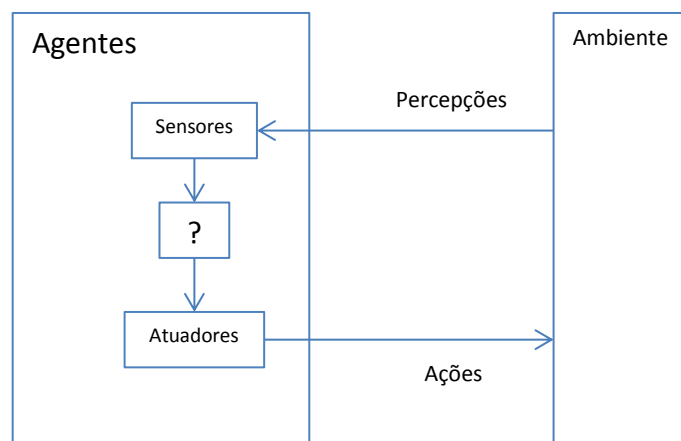
A ideia central da Simulação Baseada em Agentes (SBA), de acordo com SAMUELSON (2005) é “expandir a simulação tradicional para incluir entidades cujo comportamento pode mudar ao longo do tempo, dependendo das circunstâncias com que se deparam”. Segundo ele, o campo de aplicação da SBA tem crescido enormemente nos últimos 10 anos e atingindo diversas áreas tais como análise de inteligência, desempenho organizacional, política social e questões militares.

Para SAMUELSON e MACAL (2006), a SBA permite o estudo de fenômenos muito complexos através da modelagem de sistemas de agentes autônomos que são relativamente simples interagindo entre si. As aplicações citadas pelos autores para exemplificar tais fenômenos incluem comportamentos em mercado de ações, *supply chains*, previsão de propagação de epidemias e até o comportamento de células bacterianas: a modelagem tradicional para tais ambientes se mostra complexa demais quando abordada utilizando técnicas estatístico-matemáticas convencionais, como, por exemplo, uso de equações diferenciais.

Agentes

RUSSEL e NORVIG (2013) definem agente como “tudo o que pode ser considerado capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e que pode agir sobre esse ambiente por intermédio de atuadores”. A percepção mencionada pelos autores diz respeito às entradas perceptivas do agente em um dado instante, formando um histórico de dados referentes a alguma característica do ambiente. Um agente racional é um agente que seleciona uma ação que se espera maximizar uma medida de desempenho, com base em uma sequência de percepções e qualquer conhecimento interno do agente. A ação executada pelo agente em resposta a qualquer sequência de percepções é dita função de agente e é avaliada por uma medida de desempenho, sendo que um agente sempre age para maximizar o valor esperado dessa medida.

Figura 6 - Interação entre Agente e Ambiente



Fonte: RUSSEL e NORVIG (2013), elaborado pelo Autor

Existem quatro classificações para os tipos de agentes:

- Agentes reativos simples: respondem diretamente a percepções do ambiente
- Agentes reativos baseados em modelos: controlam o estado atual do ambiente usando um modelo interno pré-definido. Em seguida, escolhe uma ação da mesma maneira que o agente reativo simples.
- Agentes baseados em objetivos: controlam o estado atual do ambiente bem como um conjunto de objetivos que está tentando atingir e escolhe uma ação que levará à realização daqueles objetivos.

- Agentes baseados em utilidade: utilizam um modelo do ambiente juntamente com uma função de utilidade, responsável por medir as preferências do agente conforme estados do ambiente. Em seguida, escolhe a ação que leva à melhor utilidade esperada que é calculada pela média de todos os estados resultantes possíveis, ponderados pela probabilidade do resultado.
- Agentes com aprendizagem: o aprendizado pode ser resumido como um processo de modificação de cada componente do agente, a fim de levar os componentes a um acordo mais íntimo com as informações de realimentação disponíveis, melhorando o desempenho global do agente.

Conforme MACAL e NORTH (2005), são características dos agentes:

- 1) ter seu comportamento governado por um conjunto de características e regras que influenciam sua capacidade de tomada de decisão. Essas mesmas regras podem ser modificadas por regras adicionais;
- 2) possuem capacidade de interagir com outros agentes através de um modelo pré-definido produzindo respostas ao ambiente;
- 3) possuem habilidade para aprender e se adaptar ao longo do tempo com base em suas percepções (memória)

Uso de SBA no setor elétrico

PALOMINO (2009) apresenta um levantamento do histórico de aplicações de SBA em mercados de energia elétrica em todo o mundo, através do qual podemos destacar o seguinte desenvolvimento de tipos de algoritmos para simulação:

Tabela 6 - Levantamento do Histórico de Trabalhos com ABM no Setor Elétrico Mundial

1992	<ul style="list-style-type: none"> • Verkama et al. publicaram um estudo sobre interações entre agentes; • Talukdar e Ramesh sugeriram uma plataforma de administração do sistema de geração de eletricidade em situações de rápida mudança do mercado de energia elétrica.
1994	<ul style="list-style-type: none"> • Verkama et al. empregaram o uso de modelagem baseada em agentes para representar o comportamento humano visando gerar resultados que mostrassem a evolução das propriedades desses agentes baseada nas

	experiências que fossem sendo acumuladas;
1995	<ul style="list-style-type: none"> • Hämäläinen e Parantainen publicaram uma nova metodologia para análise de mercados de energia elétrica que utiliza agentes para modelagem da demanda;
1997	<ul style="list-style-type: none"> • Hämäläinen et al. aplicaram a metodologia desenvolvida por eles em 1995 para ambos os lados do mercado: oferta e demanda; • Curzon Price desenvolveram um modelo de simplificação do mercado de eletricidade britânico que é representado por um leilão de preço uniforme;
1998	<ul style="list-style-type: none"> • Krishna e Ramesh desenvolveram modelo baseado em agentes racionais para ajudar os geradores a negociar com parceiros potenciais; • Bunn e Day propuseram um modelo de simulação baseado em agentes com aprendizado computacional para analisar o comportamento dos geradores no curto e longo prazos; • Richter e Sheblé usaram um algoritmo genético para a evolução de estratégias de oferta de preço em um mercado de eletricidade no qual geradores e distribuidores compram e vendem energia elétrica via leilões duplos;
1999	<ul style="list-style-type: none"> • Richter et al. aprofundaram o estudo para incluir estratégias de oferta de preço em leilões duplos de energia elétrica de maneira competitiva;
2000	<ul style="list-style-type: none"> • Lane et al. incorporam aos estudos já desenvolvidos uma modelagem que utiliza agentes em um mercado de eletricidade que aprendem por intermédio de um algoritmo genético em um leilão duplo discriminatório; • Nicolaisen et al. fizeram uso de algoritmo genético baseado em agentes em um modelo de leilão duplo de preços discriminatórios no qual todos os negociadores ofertam antes do fechamento do mercado para estudar o poder de mercado em um mercado de energia elétrica; • Bower e Bunn desenvolveram uma simulação para o mercado inglês visando testar o impacto de arranjos alternativos nos preços de mercado

	e leilões de preços discriminatórios e uniformes;
	<ul style="list-style-type: none"> Nicolaisen, Petrov e Tesfatsion alteraram seu modelo já desenvolvido de maneira a incorporar uma forma de aprendizado através de algoritmo de aprendizagem por reforço¹;
2001	<ul style="list-style-type: none"> Bunn e Oliveira descreveram um modelo com simulação com aprendizado através de algoritmo genético considerando restrições dinâmicas diárias do sistema e diferentes custos marginais para cada tecnologia de geração;
2003	<ul style="list-style-type: none"> Bunn e Oliveira usaram uma simulação baseada em agentes com aprendizagem por reforço para analisar a possibilidade de abuso de poder de mercado em um mercado de eletricidade competitivo.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Como se pode observar, há um aumento gradual do uso de algoritmos de aprendizagem por reforço, o qual será descrito a seguir.

Aprendizagem Computacional

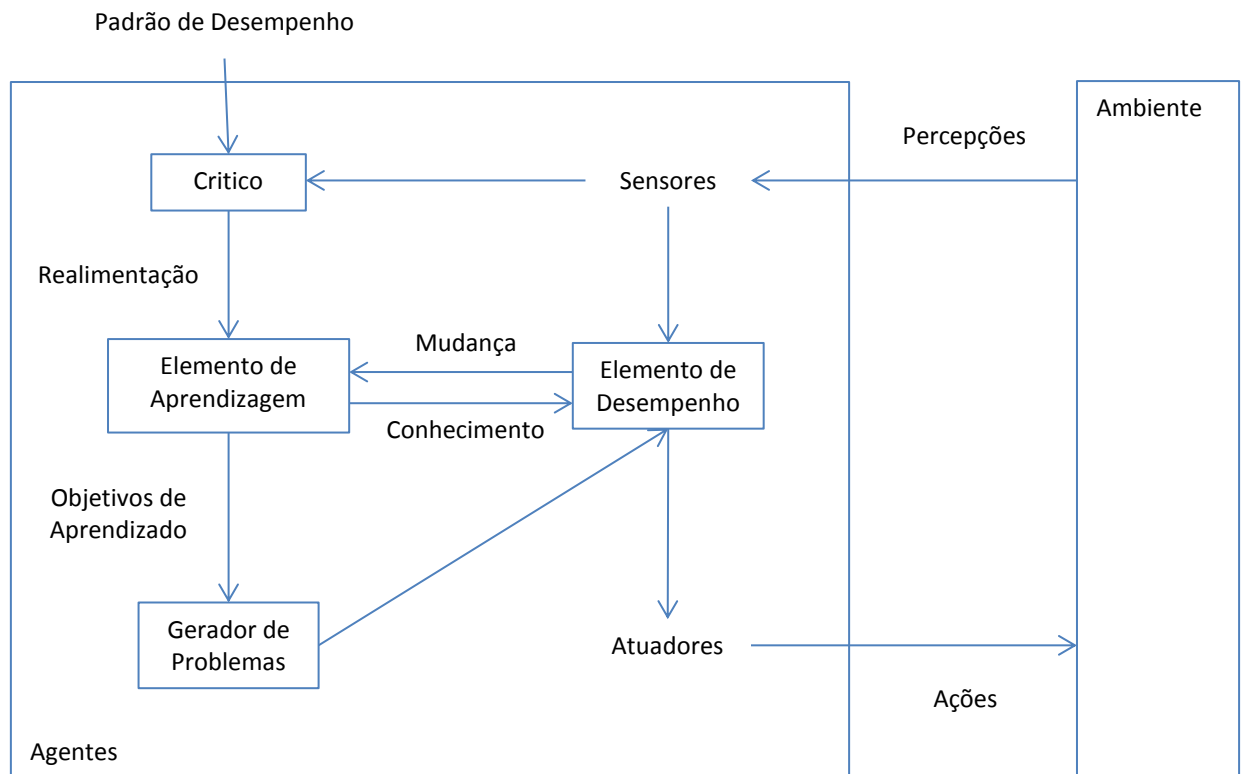
De maneira geral, podemos dizer que estamos aprendendo alguma coisa quando melhoramos nosso desempenho quando realizamos uma determinada tarefa. Podemos pensar da mesma maneira quando falamos de agentes com aprendizagem computacional. RUSSEL e NORVIG (2013) destacam três razões principais para modelarmos agentes com aprendizagem:

- 1) não podemos prever todas as situações possíveis em que um agente pode se encontrar;
- 2) não podemos antecipar todas as mudanças ao longo do tempo;
- 3) podemos não saber como programar uma solução para um determinado problema.

RUSSEL e NORVIG (2013) destacam quatro componentes conceituais para um agente com aprendizagem:

¹ Algoritmo de Aprendizagem por Reforço: será descrito mais adiante.

Figura 7 - Interação entre Ambientes e Agentes com Aprendizagem



Fonte: RUSSEL e NORVIG (2013), elaborado pelo Autor

- Elemento de aprendizado: responsável pela execução de aperfeiçoamentos utilizando realimentação do “crítico” sobre como o agente está funcionando e determina de que maneira o elemento de desempenho deve ser modificado para operar melhor.
- Elementos de desempenho: responsável pela seleção de ações externas, recebe percepções e decide sobre ações
- Crítico: informa ao “elemento de aprendizado” como o agente está se comportando em relação a um padrão fixo de desempenho.
- Gerador de problemas: visa sugerir ações exploratórias que levarão o agente a novas experiências informativas.

Na busca por uma definição para aprendizagem computacional, podemos intuir o que CAMPOS JUNIOR e CAMARINHA definem para aprendizagem computacional: um conjunto de métodos que detectam padrões automaticamente em conjuntos de dados para depois usá-los de maneira a prever dados futuros.

Contudo, RICH (1988) faz duas afirmações sobre a aprendizagem:

- 1) A aquisição de conhecimentos novos é um componente do aprendizado; se qualquer programa que execute uma aquisição de dados representar um programa de aprendizado, então haverá pouco que não seja trivial a ser dito sobre esses programas como um grupo;
- 2) A solução de problemas – exigida para integrar o sistema de novos conhecimentos e dedução de novas informações – em situações que os fatos necessários para a resolução forem insuficientes é outro componente do aprendizado. Tal característica também é encontrada em outros programas que realizam tarefas não consideradas como de aprendizado.

O que sugere que não conseguimos definir com precisão o que é a aprendizagem computacional, apesar de a analogia entre aprendizado humano e aprendizado computacional e o que o método se propõe a fazer formarem uma boa base para o entendimento da questão.

Sobre os tipos de aprendizagem computacional, Russel e Norvig definem:

- 1) aprendizagem supervisionada: cujo objetivo é o de encontrar um mapeamento $f: E \rightarrow S$ em que se associa cada entrada em E (conjunto de dados) à respectiva saída em S (valores associados aos dados), ou seja, o agente observa alguns exemplos de pares de entrada e saída e aprende uma função que faz o mapeamento da entrada para a saída. Por exemplo, um motorista (agente) que perceba a aproximação brusca de um objeto a sua frente (entrada) precisa parar o veículo (saída);
- 2) aprendizagem não supervisionada: o agente aprende padrões na entrada e apenas isso, desconhecendo um conjunto de saídas. Por exemplo, um cozinheiro (agente) que precise desenvolver o conceito de gosto bom ou gosto ruim (saídas) através da observação da reação de quem come os pratos que ele serve (entradas), sem que tenham sido rotulados os conceitos de gosto bom ou gosto ruim;
- 3) aprendizagem por reforço: o agente aprende através de recompensas ou punições (reforço). Por exemplo, a gorjeta (reforço) que um garçom (agente) recebe após finalizar o atendimento a uma mesa indicaria o quão bom foi seu atendimento;

Aprendizagem por Reforço

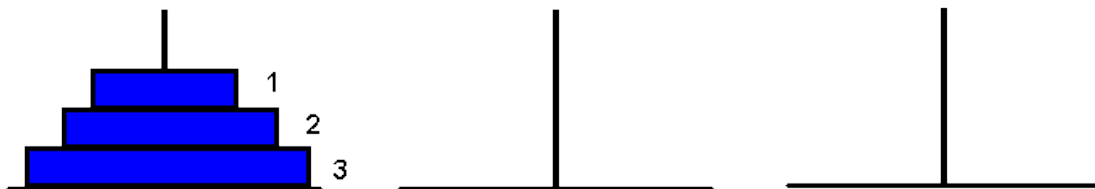
Em linhas gerais, a Aprendizagem por Reforço consiste em usar recompensas observadas para aprender uma política ótima para o ambiente. A política ótima é um conjunto de pares

ordenados estado-ação em que o estado é um conjunto de dados que descreve o ambiente e a ação é comportamento do agente em resposta àquele estado.

Segundo RUSSEL e NORVIG (2013), a Aprendizagem por Reforço é o único caminho possível para treinar um programa com desempenho de alto nível a fim de se conseguir fazer uma simulação para certos tipos complexos de problema, pois a ideia central é programar o agente de tal maneira que ele próprio aprenda a se comportar com sucesso em um dado ambiente. Para exemplificar, podemos citar a dificuldade que seria encontrada para programar um agente que pilote um helicóptero por um meio que não utilize a aprendizagem por reforço; enquanto que, dadas as recompensas negativas por colisão, queda etc., um agente poderia aprender sozinho.

Para entender o funcionamento do modelo de Aprendizagem por Reforço, podemos imaginar uma modelagem via Aprendizagem por Reforço para resolver o quebra-cabeça “Torre de Hanói”, que consiste em uma base contendo três pinos, em um dos quais são dispostos alguns discos uns sobre os outros, em ordem crescente de diâmetro, de cima para baixo, conforme ilustra a figura a seguir.

Figura 8 - Torre de Hanói



Fonte: Google

O problema a ser resolvido é passar todos os discos do primeiro pino para o terceiro de modo que só podemos mover um disco de cada vez e um disco de maior diâmetro nunca pode ficar sobre um disco de menor diâmetro.

Cada uma das possibilidades de posicionamento (independentemente de contemplar as restrições do problema ou não) é um estado e_i do sistema. E a cada um desses estados, atribui-se uma recompensa $R(e_i)$ de acordo com a proximidade do estado atual com o estado-objetivo do sistema, aqui sim visando contemplar as restrições do problema. Por exemplo, para o estado representado na figura, ao qual atribuiremos a notação $e_1 = \{(1,2,3), (), ()\}$, podemos dizer que $R(e_1) = 0$; para um estado $e_2 = \{(3,2,1), (), ()\}$, podemos atribuir

$R(e_2) = -10$, pois o disco 3 estaria sobre os discos 2 e 1; e para um estado $e_3 = \{(), (), (1,2,3)\}$, podemos atribuir $R(e_3) = 100$, pois representa o estado-objetivo.

O conjunto de ações a serem tomadas pode ser governado por um conjunto de políticas de maneira que, para um dado estado e_i do sistema, pode ser tomada a ação $a(e_i) \in \{\pi_1(e_i), \pi_2(e_i), \dots, \pi_j(e_i)\}$. Assim, sendo o estado atual igual a $e_1 = \{(1,2,3), (), ()\}$, poderia se escolher uma ação com base na política $\pi_1(e_1)$ que dita mudar do estado e_1 para o estado $e_4 = \{(2,3), (), (1)\}$; ou escolher uma ação de acordo com a política $\pi_2(e_1)$, que dita mudar do estado e_1 para o estado $e_5 = \{(2,3), (1), ()\}$.

O parâmetro com que o agente pode contar para saber qual o melhor conjunto de políticas é chamado de Função Utilidade, que pode ser modelado com base em todo o conjunto de políticas ou com base em cada estado do sistema. Independentemente do meio, a Aprendizagem por Reforço visa definir a política ótima através dessa Função de Utilidade.

Q-Learning

O *Q-Learning* é um algoritmo de Aprendizagem por Reforço que busca a política ótima através da seguinte Função Utilidade:

$$Q(s, a) = R(s) + \gamma \sum_{s'} P(s'|s, a) \cdot \max_{a'} Q(s', a')$$

Na qual,

s : estado

a : ação

s' : estado sucessor de s

$R(s)$: recompensa atribuída ao estado s

γ : fator de desconto que varia de 0 a 1: quanto mais próximo de 0, o agente tende a considerar apenas as recompensas imediatas; e quanto mais próximo de 1, o agente tende a considerar recompensas futuras com maior peso.

$P(s'|s, a)$: probabilidade de se chegar a s' a partir do estado s depois de realizar a ação a .

Essa Função Q é calculada para cada par estado-ação do sistema e é igual à recompensa esperada de um estado somada a um valor atribuído à utilidade esperada de seus estados sucessores.

É importante observar que a função Q se baseia na capacidade de escolher entre recompensas imediatas e recompensas futuras para se buscar a política ótima. Uma vez calculada, obtém-se um conjunto de ações ótimas a serem tomadas em cada possível estado do sistema.

3. METODOLOGIA

Retomando a ideia central do trabalho, que tem como objetivo desenvolver um simulador que gere lances ótimos para geradores de energia elétrica por fonte eólica na segunda etapa do leilão de energia em ambiente regulado (ACR), descreveremos a seguir todas as condições de contorno consideradas, bem como a arquitetura desenvolvida para a elaboração do simulador.

Segundo HILLIER e LIEBERMAN (2013), para preparar a simulação de um sistema, é preciso formular um modelo de simulação detalhado para descrever a operação de um sistema de tal forma que se tenha claros:

- 1) a definição do estado do sistema (informações referentes ao que está ocorrendo no sistema em um dado momento);
- 2) identificar os possíveis estados do sistema que podem ocorrer;
- 3) identificar os possíveis eventos que mudariam o estado do sistema (acontecimentos aleatórios ou programados que provocam mudanças de estado do sistema);
- 4) uma provisão para um relógio simulado que registrará a passagem do tempo (tempo de execução da simulação);
- 5) um método para gerar eventos aleatoriamente;
- 6) uma fórmula para identificar as transições de estado que são geradas pelos diversos tipos de eventos.

Law e McComas (1992, apud SOUZA, 2009) definem oito elementos que determinam o sucesso de um projeto de simulação, que são subdivididos nas classes: técnica, gerencial e precisão dos dados. A saber:

Tabela 7 - Critérios para o Sucesso de um Projeto de Simulação

Técnica	1) conhecer a metodologia de simulação, modelos estocásticos e teoria das probabilidades e estatística;
	2) modelar a aleatoriedade do sistema de maneira razoável;
	3) escolher o software de simulação adequado e utilizá-lo corretamente;
	4) usar procedimentos estatísticos apropriados para interpretar os dados de entrada e saída da simulação;
Gerencial	5) formular corretamente o problema;
	6) empregar técnicas de gerenciamento de projetos;
Precisão dos Dados	7) obter boa informação sobre os procedimentos de operacionalização do sistema e lógica de controle;
	8) estabelecer a validade e credibilidade do modelo.

Fonte: elaborado pelo Autor

3.1.Sobre o Ambiente de Simulação

Como já descrito anteriormente, os leilões de energia elétrica são realizados pela CCEE, por delegação da ANEEL, e utilizam o critério de menor tarifa, visando a redução do custo de aquisição da energia elétrica a ser repassada aos consumidores cativos e, ao mesmo tempo, assegurando o pleno atendimento da demanda futura no ACR e mantendo a observância da modicidade tarifária e das condições limites de repasse do custo de aquisição da energia aos consumidores finais (cativos), entre outros aspectos. Consumidores cativos são aqueles aos quais só é permitido comprar energia da rede a qual estejam conectados.

O leilão ocorre em duas fases. A primeira é restrita aos empreendimentos hidrelétricos, e se subdivide em duas etapas. Na primeira etapa, os empreendimentos fazem seus lances com base no “preço lance”. Se o menor lance for menor que 5% em relação aos outros, esta fase é concluída. Caso contrário, os empreendimentos com lances maiores em até 5% do lance mínimo continuam disputando. Na segunda etapa, os lances são feitos em rodadas uniformes por lotes de energia ligados a um preço definido pelo sistema. Ao se encontrar o ponto de equilíbrio entre a oferta e a demanda, inicia-se a rodada discriminatória, em que apenas um lance de preço é associado àquela quantidade de lotes classificada. A segunda fase também é

formada por duas etapas, a hidro e a termo, em que há rodadas uniformes para negociar quantidades de lotes, e rodadas discriminatórias de lances únicos de preço para cada etapa.

Mais tecnicamente, podemos descrever a segunda fase do leilão, que é o momento para o qual se quer gerar resultados através do simulador, da seguinte maneira: cada gerador ativo dá seu lance e então o leiloeiro escolhe os geradores que deram os menores lances de tal forma que a demanda continue sendo atendida. Em outras palavras, obtém-se os lances dos k geradores ativos L_k na segunda fase, formando o conjunto $L = \{L_1, \dots, L_k\}$ e inicia-se um processo iterativo:

- Armazenam-se os elementos do conjunto L e também as ofertas dos respectivos geradores ativos na segunda fase
- Procura-se pelo maior lance de um gerador ativo $L_{Max} = \max_i L_i$ e exclui-se L_{Max} .
- Calcula-se a oferta total disponível na iteração i através da soma das ofertas dos k geradores ativos naquela iteração: $O_i = \sum_{j=1}^k O_j$.

O processo se encerra caso $O_i < \bar{D}$, sendo \bar{D} , a demanda que se quer atender, e determinam-se os geradores vencedores do leilão, que são os que permanecem ativos após a última exclusão de L_{Max} .

Neste trabalho, foram realizadas simulações de lances L_k dos participantes ativos na segunda fase do leilão, com base em dados do setor eólico.

3.2. Sobre os *Inputs* do Simulador

O conjunto de dados de entrada para alimentar o simulador deve conter um histórico de lances dos últimos leilões que participou para cada um dos geradores, bem como os preços de corte para a segunda fase de cada leilão. Esses dados visam fomentar a matriz de recompensas necessária para executar o algoritmo que calcula a matriz Q de valores da Função Q do algoritmo *Q-Learning*.

Além disso, fazem-se necessários:

- o número de iterações máximo $n_{iteracoes}$ que se deseja rodar o algoritmo para o cálculo da matriz Q ;

- o valor de γ , que representa o quanto se considera a respeito dos valores de recompensa imediatos ou futuros;
- o valor do preço de corte para a início da segunda fase P_{ref} para o conjunto de lances que se quer simular;
- os preços mínimos p_i de cada gerador i para que estes permaneçam participando do leilão durante suas etapas.

3.3.Sobre a Arquitetura do Simulador

A plataforma utilizada para a programação do simulador é a do software *Matlab*, que utiliza uma linguagem processual desenhada para matemática numérica, especialmente quando envolve matrizes e vetores computacionais. (Zimmerman et al, 1998 apud MASILI, 2004)

Cálculo da Matriz Q

O bloco “Q-Learning” é responsável por definir a melhor ação \bar{a} que se pode tomar a partir de um estado de referência e_0 . Para isso, constrói-se a matriz de recompensas e a matriz Q para cada gerador ativo na segunda fase em cada iteração do leilão com base nas séries históricas de preços de cada gerador e em P_{Ref} , que será o estado-objetivo. A ideia geral é definir o estado e_0 como sendo o preço mínimo p_i do gerador i e chegar o mais próximo possível do preço de corte para a segunda fase do leilão P_{Ref} considerando as séries históricas. Observe que os dados de entrada desse bloco são p_i , P_{Ref} e as séries de preços.

Matriz de Recompensas

Sejam $S_i = \{s_1^i, s_2^i, \dots, s_n^i\}$ a série histórica de n lances finais do gerador i referentes aos n leilões ocorridos, $\bar{S}_i = \{\bar{s}_1^i, \bar{s}_2^i, \dots, \bar{s}_n^i\}$ a série histórica de n últimos preços de primeira fase dos n leilões ocorridos. A partir desses conjuntos, formam-se os conjuntos de estados e ações $E = S_i \cup \bar{S}_i$ e $A = S_i \cup \bar{S}_i$, necessários para definir a função de recompensas $R_i: E \rightarrow A$ que formará a matriz $m \times m$ de recompensas do gerador i . Observe que $m \leq 2n$ e que $E = A$.

Supondo que tanto em S_i quanto em \bar{S}_i não haja valores repetidos, a matriz de recompensas terá $m = 2n$ e será:

Tabela 8 - Modelo da Matriz de Recompensas

estado\ação	$s_1^i = a_1$	$s_2^i = a_2$	...	$s_n^i = a_n$	$\bar{s}_1^i = a_{n+1}$	$\bar{s}_2^i = a_{n+2}$	...	$\bar{s}_n^i = a_{2n}$
$s_1^i = e_1$	$r_i(e_1, a_1)$	$r_i(e_1, a_2)$	...	...	...	...	...	$r_i(e_1, a_{2n})$
$s_2^i = e_2$	$r_i(e_2, a_1)$	$r_i(e_2, a_2)$	...	...	...	...	...	$r_i(e_2, a_{2n})$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\vdots
$s_n^i = e_n$	\vdots	\vdots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\vdots
$\bar{s}_1^i = e_{n+1}$	\vdots	\vdots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\vdots
$\bar{s}_2^i = e_{n+2}$	\vdots	\vdots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\vdots
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\ddots	\vdots
$\bar{s}_n^i = e_{2n}$	$r_i(e_{2n}, a_1)$	$r_i(e_{2n}, a_2)$	...	...	...	...	...	$r_i(e_{2n}, a_{2n})$

Fonte: elaborado pelo Autor

Funções Recompensa

Para critério de comparação e análise dentre as possibilidades de aprendizado, buscou-se calcular valores de recompensa através das seguintes funções:

Função #1

Busca-se atribuir um valor alto ao par ordenado (e_j, a_k) se $e_j > a_k$ (diminuição do valor do lance) e e_j estiver próximo de a_k (maximização do lucro do gerador):

$$r_i(e_j, a_k) = \begin{cases} \frac{a_k}{e_j} & \text{se } e_j > a_k \\ 0 & \text{se } e_j = a_k \\ -\frac{a_k}{e_j} & \text{se } e_j < a_k \end{cases}$$

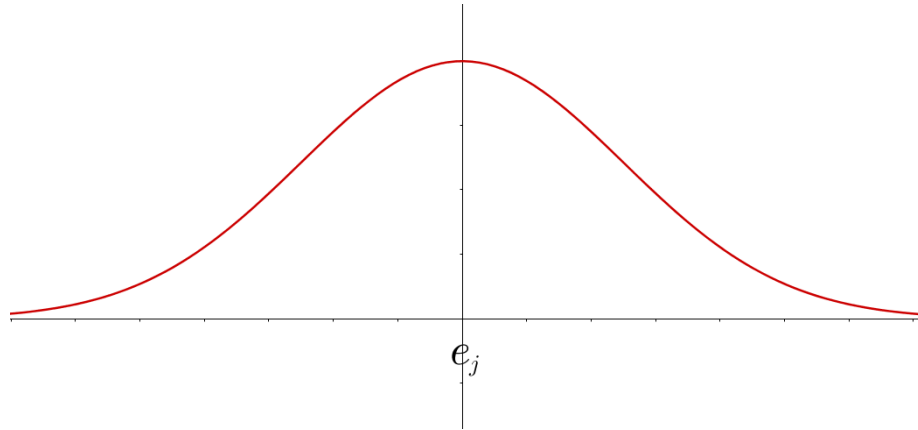
Função #2

Busca-se atribuir valores de recompensa segundo uma função densidade de probabilidade tal qual a de uma Distribuição Normal:

$$r_i(e_j, a_k) = f(a_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{a_k - e_j}{\sigma} \right)^2 \right] ; \sigma = 5$$

Através desta função, busca-se tornar como premissa do modelo a atribuição de altas recompensas a lances que estejam próximos do estado e_j , tornando-o um valor central:

Figura 9 - Gráfico da Função Densidade de Probabilidade de Distribuição Normal



Fonte: elaborado pelo Autor

Função #3

Esta função de recompensa é a função #2 melhorada, ou seja, é uma função que atribui valores de recompensa conforme uma função de densidade de probabilidade tal qual a de uma Distribuição Normal com a diferença de que, ao invés de se atribuir e_j como o valor central, atribui-se ao valor central o lance vencedor \bar{L}_n referente ao preço de corte P_{Ref} dado no leilão n conforme histórico do gerador, caso esta informação exista no histórico. Caso não exista, procede-se como na função #2.

$$r_i(e_j, a_k) = \begin{cases} f(a_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{a_k - \bar{L}_n}{\sigma} \right)^2 \right], & \text{se } e_j = P_{Ref} \\ f(a_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{a_k - e_j}{\sigma} \right)^2 \right], & \text{se } e_j \neq P_{Ref} \end{cases} ; \sigma = 5$$

Caso o histórico de lances do gerador apresente x combinações possíveis entre P_{Ref} e \bar{L}_n , faz-se uma média aritmética conforme a seguir:

$$r_i(e_j, a_k) = \frac{1}{x} \cdot \sum_{m=1}^x \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{a_k - \bar{L}_{n,m}}{\sigma} \right)^2 \right] \right)$$

O que se pretende com esta função, é melhorar a estimativa de para qual intervalo de lances deve-se atribuir um maior valor de recompensa.

Matriz de Valores da Função Q

O processo iterativo para o cálculo da matriz Q_i referente ao gerador i está descrito a seguir, considerando o mesmo conjunto de estados $E = \{e_1^i, e_2^i, \dots, e_j^i\}$ e ações $A = \{a_1^i, a_2^i, \dots, a_j^i\}$ utilizados para compor a matriz de recompensas. Sejam $\bar{e} = P_{Ref}$ o estado-objetivo e n o número de iterações como sendo o critério de parada. Enquanto o critério de parada não for satisfeito repete-se o roteiro:

- Passo 1:* Seleção aleatória de estado inicial $e_k \in E$.
- Passo 2:* Seleção aleatória de ação $a_k \in A$.
- Passo 3:* Atualização do elemento $q_i(e_k, a_k)$ da matriz Q_i por meio da expressão $\boxed{q_i(e_k, a_k) = r_i(e_k, a_k) + \gamma \cdot \max_x q_i(a_k, x)}$ em que $x \in A$.
- Passo 4:* Define-se $e_{k+1} = a_k$.
- Verificação 1:* $e_{k+1} = \bar{e}$? Se sim, fazer verificação 2; se não, seguir para passo 2.
- Verificação 2:* Critério de parada foi satisfeito? Se sim, a matriz está calculada; se não, seguir para passo 1.

Outputs:

O simulador deve apresentar lances finais para cada um dos geradores em simulação, que se diferenciam apenas pelo modo de cálculo do lance final. O que se busca explorar com isso é a existência de variabilidade no preço médio final do leilão, bem como analisar de que maneira a escolha do lance final de um gerador influencia a sequência de leilões simulados. A seguir, descreveremos as formas de cálculo para gerar os lances finais em cada um dos tipos de resposta.

Método 1: Média

Utilizou-se média aritmética para determinação do lance final L_i^1 do gerador i :

$$L_i^1 = \frac{p_i + P_{ref}}{2}$$

Em que:

p_i é o preço mínimo do gerador i para que este permaneça participando das duas fases do leilão;

P_{ref} é o preço de corte para início da segunda fase do leilão.

Método 2: Lance Aleatório

Gera-se o seguinte conjunto de possibilidades para o lance final L_i^2 do gerador i , a partir do qual um dos valores será definido aleatoriamente e atribuído ao lance final:

$$\{p_i, p_i + x, p_i + 2x, \dots, p_i + 10x\}$$

Em que:

p_i é o preço mínimo do gerador i para que este permaneça participando das duas fases do leilão;

$x = \frac{P_{ref} - p_i}{10}$ é o incremento considerado para discretizar o intervalo $[p_i, P_{ref}]$;

P_{ref} é o preço de corte para início da segunda fase do leilão.

Método 3: Lance com Aprendizado I

Atribui-se ao lance final L_i^3 do gerador i a ação a que maximiza o valor $q_i = \max_a Q(P_{ref}, a)$:

$$\left| \begin{array}{l} L_i^3 = a \\ q_i = \max_a Q_i(P_{ref}, a) \end{array} \right.$$

Em que:

P_{ref} é o preço de corte para início da segunda fase do leilão;

$Q_i(x, y)$ é o valor da matriz Q do gerador i para o estado x e ação y determinada a partir da função de recompensa #1.

Método 4: Lance com Aprendizado II

Atribui-se ao lance final L_i^3 do gerador i a ação a que maximiza o valor $q_i = \max_a Q(P_{ref}, a)$:

$$\left| \begin{array}{l} L_i^3 = a \\ q_i = \max_a Q_i(P_{ref}, a) \end{array} \right.$$

Em que:

P_{ref} é o preço de corte para início da segunda fase do leilão;

$Q_i(x, y)$ é o valor da matriz Q do gerador i para o estado x e ação y determinada a partir da função de recompensa #2.

Método 5: Lance com Aprendizado III

Atribui-se ao lance final L_i^3 do gerador i a ação a que maximiza o valor $q_i = \max_a Q(P_{ref}, a)$:

$$\begin{cases} L_i^3 = a \\ q_i = \max_a Q_i(P_{ref}, a) \end{cases}$$

Em que:

P_{ref} é o preço de corte para início da segunda fase do leilão;

$Q_i(x, y)$ é o valor da matriz Q do gerador i para o estado x e ação y determinada a partir da função de recompensa #3.

3.4.SOBRE O QUE FOI SIMULADO

As simulações deste trabalho podem ser subdivididas em duas fases. Para testar e validar o modelo desenvolvido neste trabalho foi preciso gerar as séries históricas de cada gerador – necessárias para o cálculo dos valores da função de recompensa.

Foi gerada uma série histórica de lances finais com 300 valores, representando 300 leilões ocorridos, através de uma distribuição normal na qual:

- a média da distribuição é a média de preços de venda (lances finais dos geradores vencedores) do primeiro leilão de energia por fonte hidráulica: 114,43 reais/MWh;
- o desvio padrão da distribuição é o desvio padrão dos mesmos preços de venda: 7,48 reais/MWh.

Essas séries históricas foram utilizadas no cálculo de valores de recompensa que compõem a matriz R, necessários para determinar os valores da matriz Q.

Fase I: Estudo dos parâmetros envolvidos e funções de recompensa

Neste conjunto de simulações pretende-se analisar a influência dos valores de γ e $n_{iteracoes}$ na elaboração da matriz Q, bem como a influência da função de recompensa na geração de lances finais. Dessa forma, foram simulados um total de 5400 lances de segunda-fase de leilões considerando todas as possíveis combinações entre $\gamma = 0.3$, $\gamma = 0.5$ e $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 100$, $n_{iteracoes} = 500$ e $n_{iteracoes} = 1000$ para cada, ou seja:

- 1) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 2) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 3) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 1000$;
- 4) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 5) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 6) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 1000$;
- 7) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 8) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 9) 200 simulações através do método 3 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 1000$;
- 10) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 11) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 12) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 1000$;
- 13) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 14) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 15) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 1000$;
- 16) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 17) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 18) 200 simulações através do método 4 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 1000$;
- 19) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 20) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 21) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.3$ e $n_{iteracoes} = 1000$;
- 22) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 23) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 24) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.5$ e $n_{iteracoes} = 1000$;
- 25) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 100$;
- 26) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 500$;
- 27) 200 simulações através do método 5 com base nos valores $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 1000$;

Além disso, o preço de corte e o lance mínimo para cada simulação de lance final foram gerados aleatoriamente, considerando um intervalo entre 95 e 180, com a restrição de que o preço de corte estivesse acima do lance mínimo a que o gerador estaria disposto a ofertar.

Fase II: Consistência dos lances gerados

Neste conjunto de simulações foram simulados 10000 lances de segunda-fase de leilões, considerando $\gamma = 0.8$ e $n_{iteracoes} = 1000$. O preço de corte foi fixado em 180 e o lance mínimo foi gerado aleatoriamente, considerando um intervalo entre 95 e 180. O intuito desse conjunto de simulações é verificar se os lances finais gerados pelo método 3 são superiores aos lances finais gerados pelos métodos 1 e 2.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir, apresentamos os resultados das simulações descritas na seção 3.4 deste texto.

4.1. Resultados Fase I

As séries de simulações geradas conforme descritas na seção 3.4 apresentaram valores abaixo do Lance Mínimo do gerador. A quantidade de valores abaixo do Lance Mínimo está descrita conforme tabela abaixo, indicada por “anormalidades”.

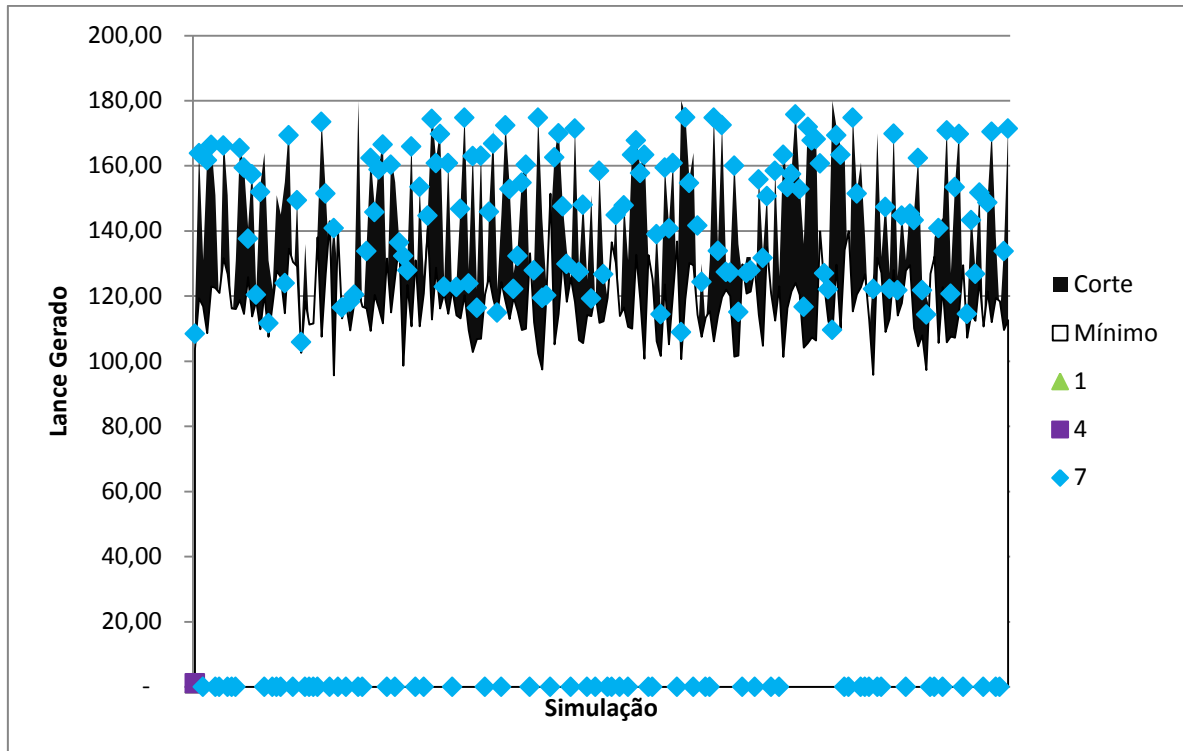
Tabela 9 - Quantidade de Anormalidades por Série de Simulações Geradas

	$\gamma = 0.3$		$\gamma = 0.5$		$\gamma = 0.8$	
	Série	Anormalidades	Série	Anormalidades	Série	Anormalidades
Método 3	1	37	10	42	19	43
	2	35	11	35	20	35
	3	35	12	35	21	35
Método 4	4	37	13	34	22	39
	5	35	14	35	23	34
	6	35	15	35	24	35
Método 5	7	61	16	65	25	64
	8	62	17	61	26	61
	9	61	18	61	27	61

Fonte: elaborado pelo Autor

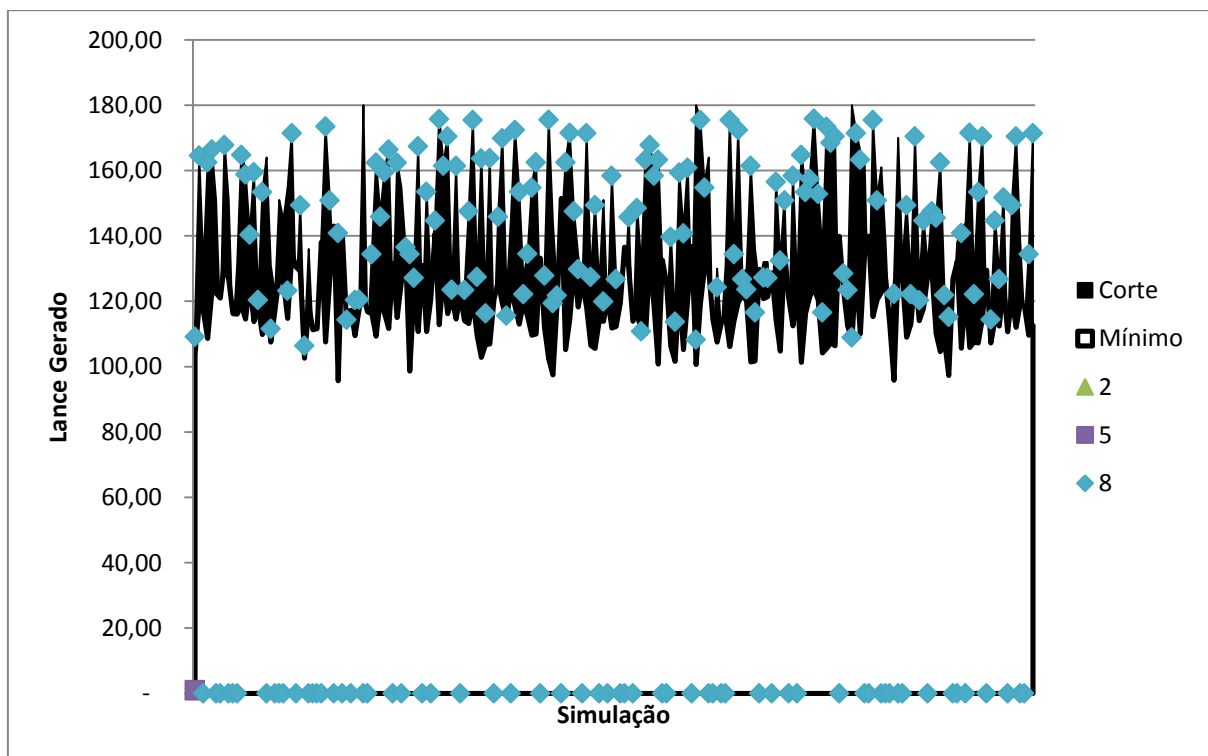
A seguir, fazemos a comparação entre os resultados obtidos através das simulações das séries de Métodos diferentes, mas mesmos valores de γ e $n_{iteracoes}$.

Figura 10 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 1, 4 e 7



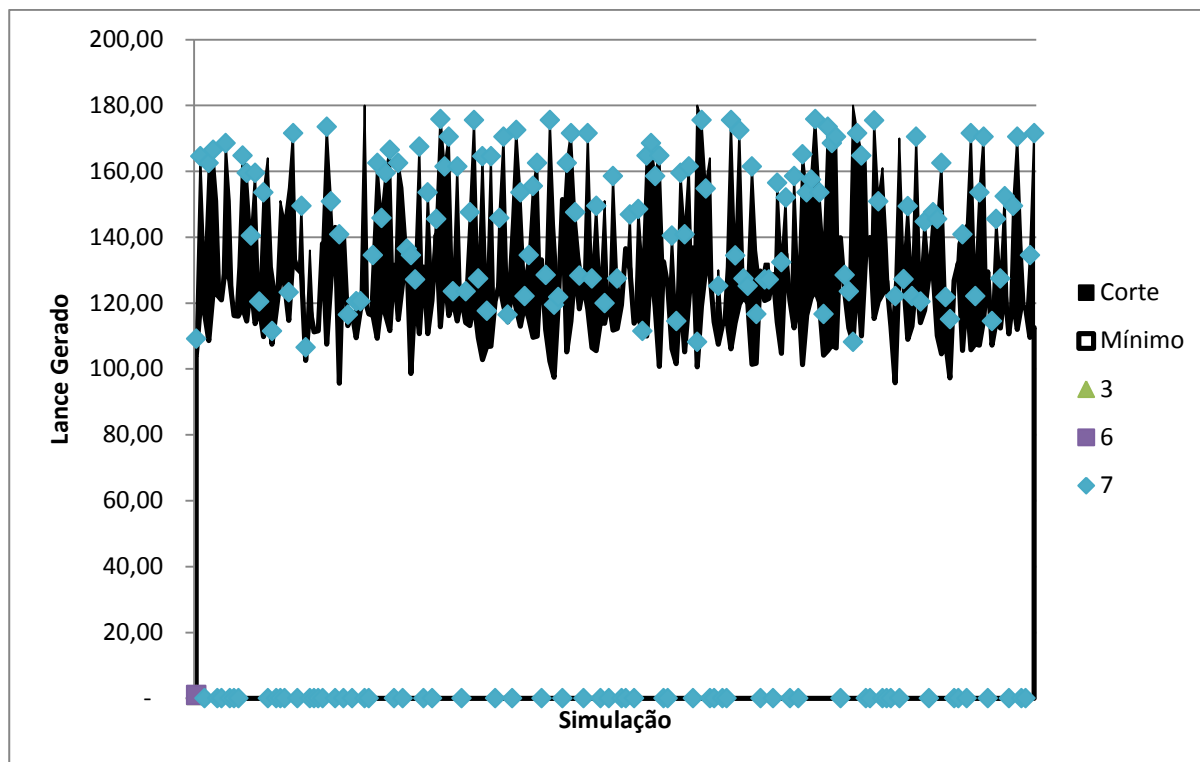
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 11 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 2, 5 e 8



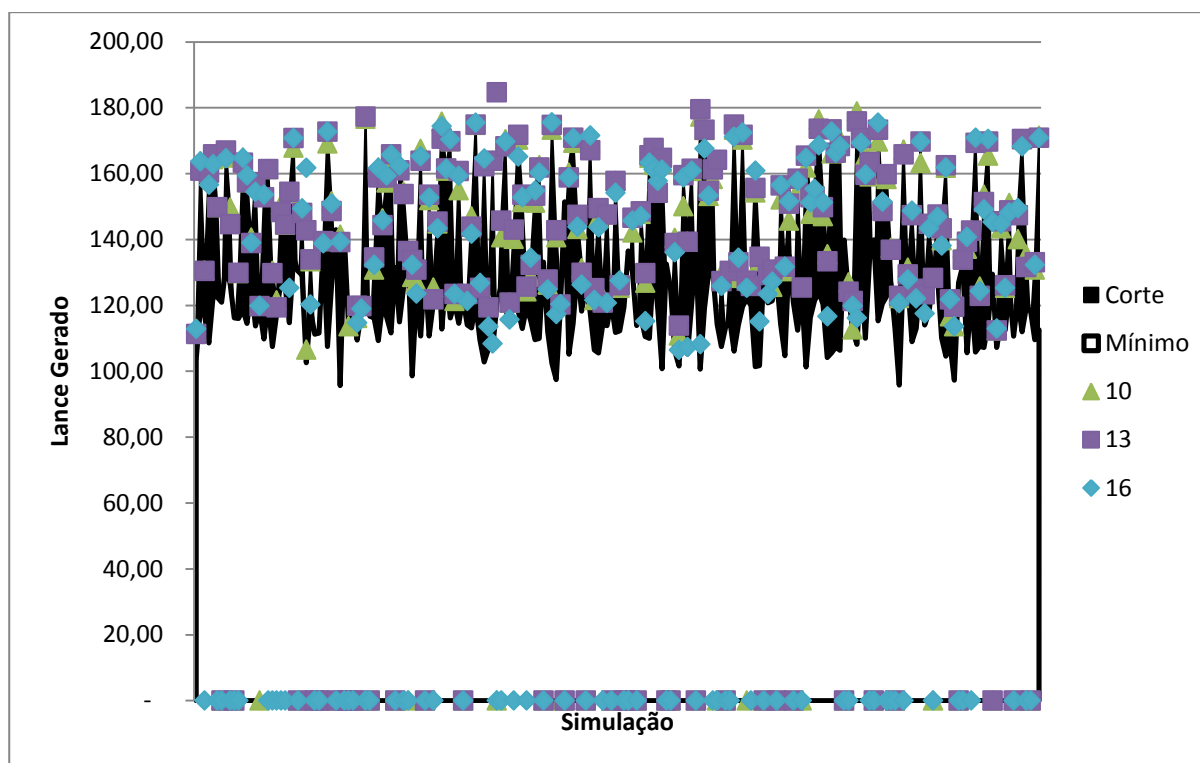
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 12 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 3, 6 e 7



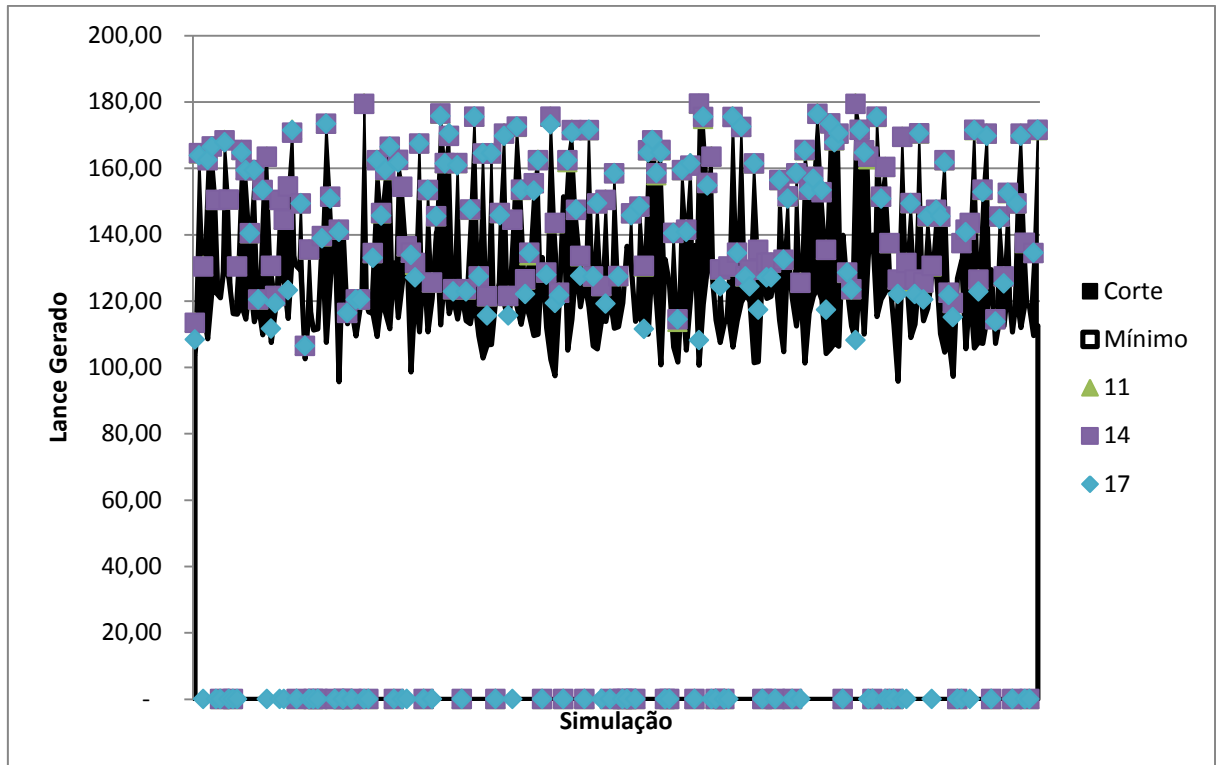
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 13 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 10, 13 e 16



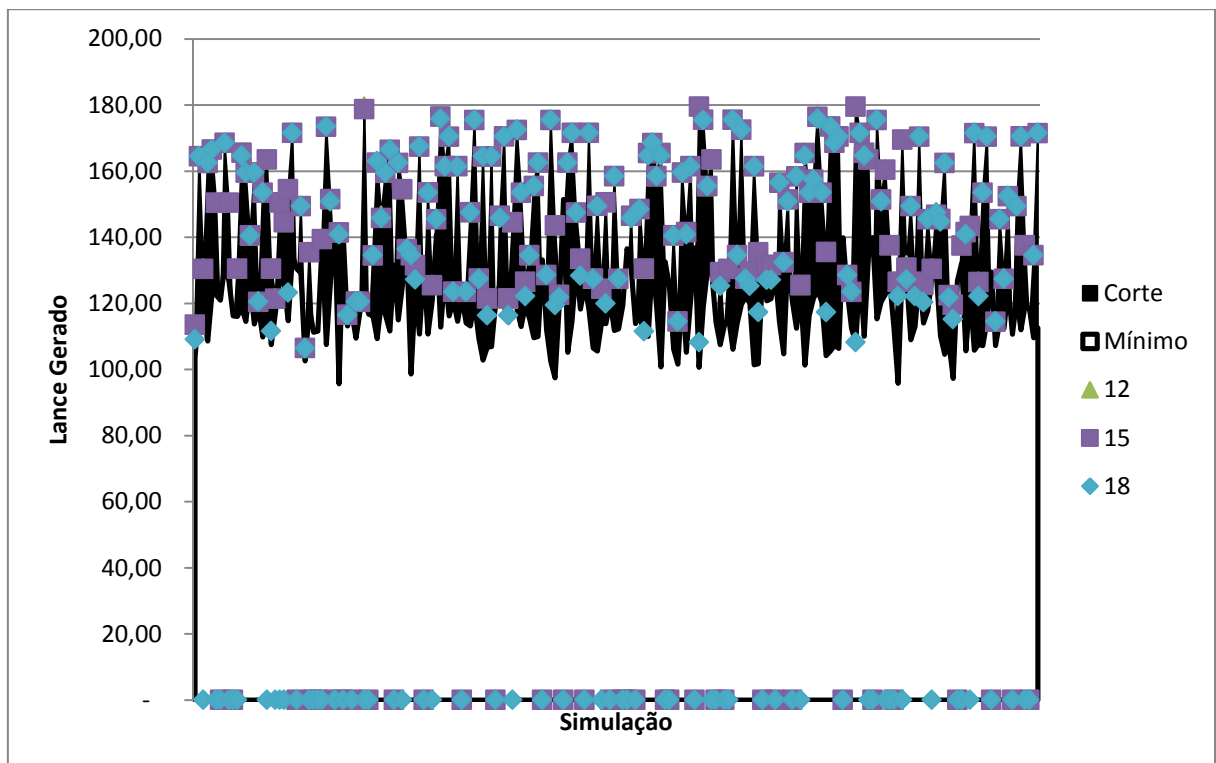
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 14 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 11, 14 e 17



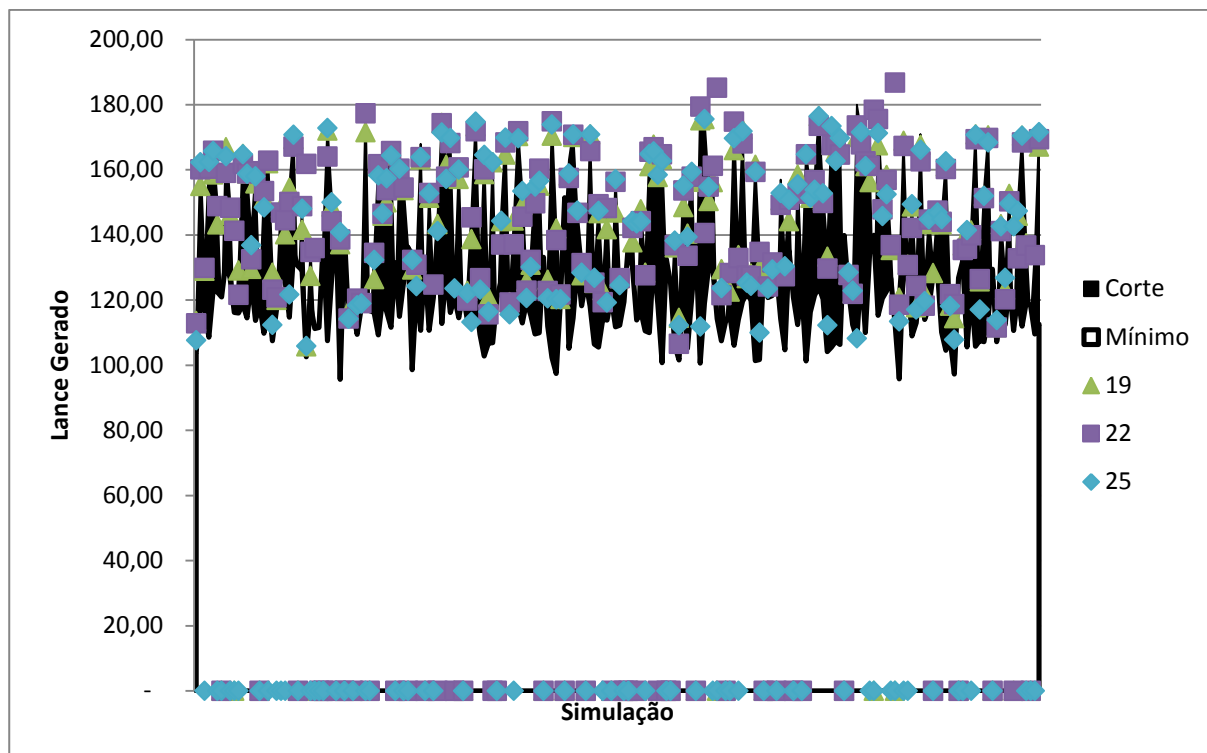
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 15 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 12, 15 e 18



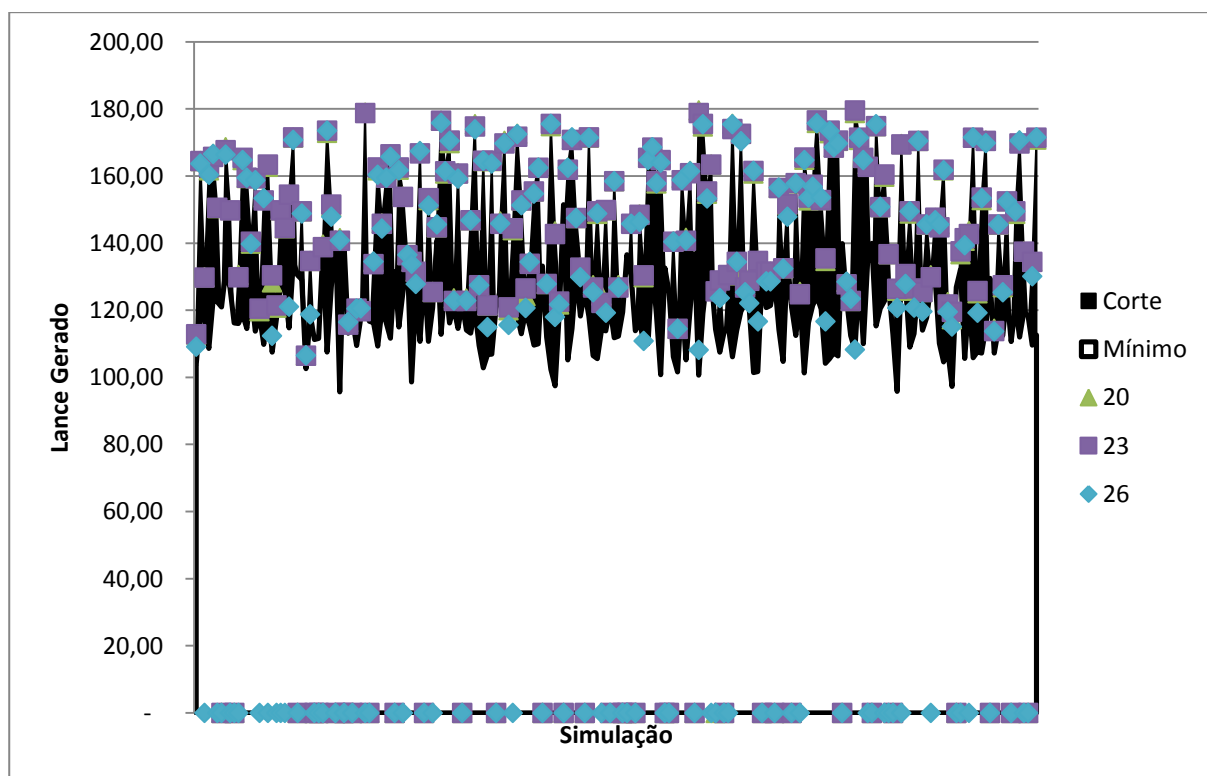
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 16 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 19, 22 e 25



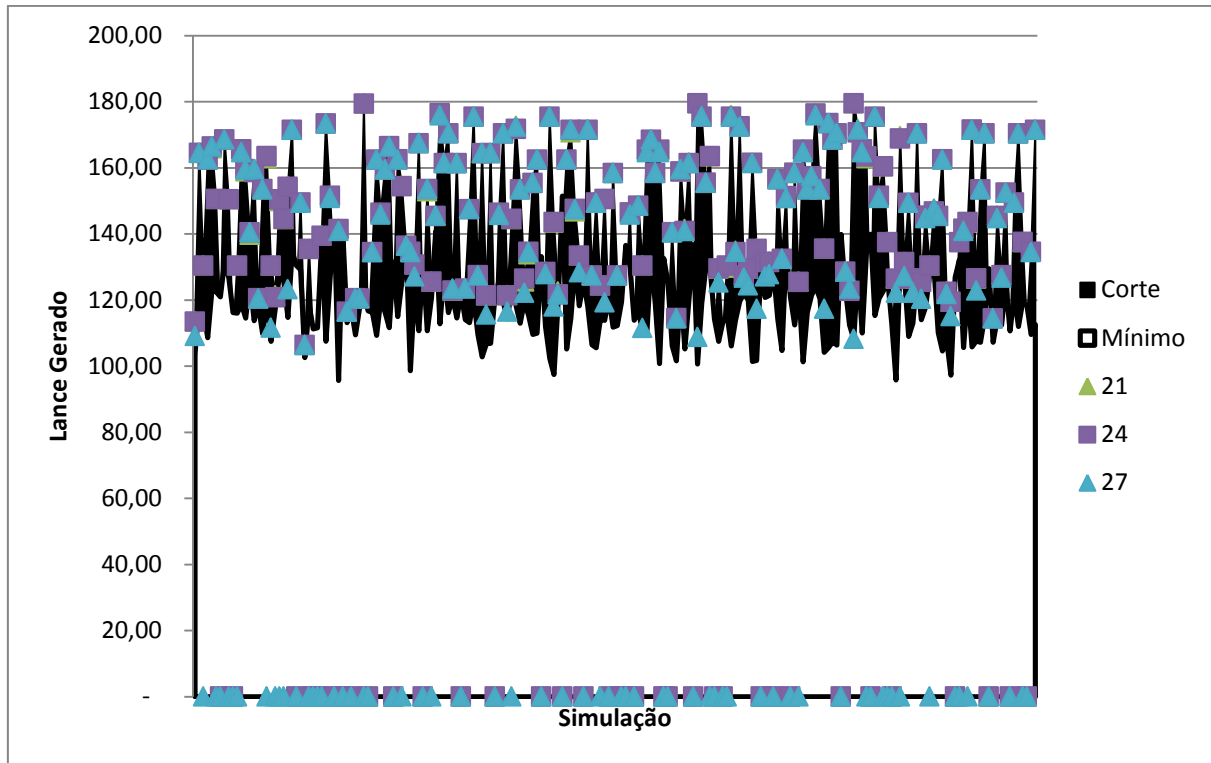
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 17 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 20, 23 e 26



Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 18 – Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 21, 24 e 27

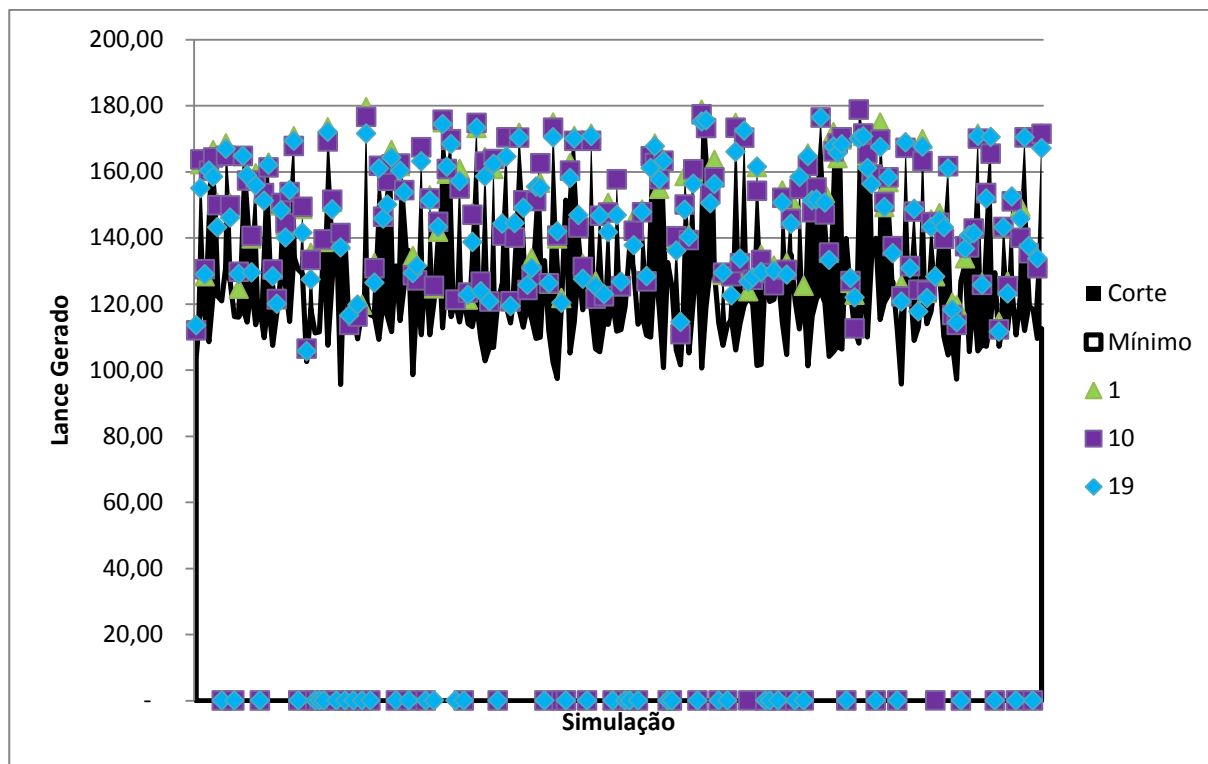


Fonte: elaborado pelo Autor

De modo geral, podemos dizer que as séries que utilizam o Método 5 incorreram em uma maior quantidade de Lances Finais abaixo do Lance Mínimo a que o gerador estaria disposto a ofertar. Com relação a posição do Lance Final no intervalo entre Lance Mínimo e Preço de Corte, podemos dizer que os Métodos 3 e 4 geraram Lances Finais muito próximos do Preço de Corte, o que é bom da perspectiva do lucro que o gerador terá, porém não podemos afirmar que tal gerador será o ganhador do Leilão uma vez que seus competidores podem dar lances muito abaixo do Preço de Corte. Já os Lances Finais gerados pelo Método 5 possuem uma variabilidade maior de posição no intervalo entre Lance Mínimo e Preço de Corte, o que garante um retorno financeiro considerável (pois o lance estará acima do mínimo a que o gerador está disposto a ofertar) e garante também uma probabilidade maior de ser o vencedor do Leilão, uma vez que a distância ao Preço de Corte aumenta.

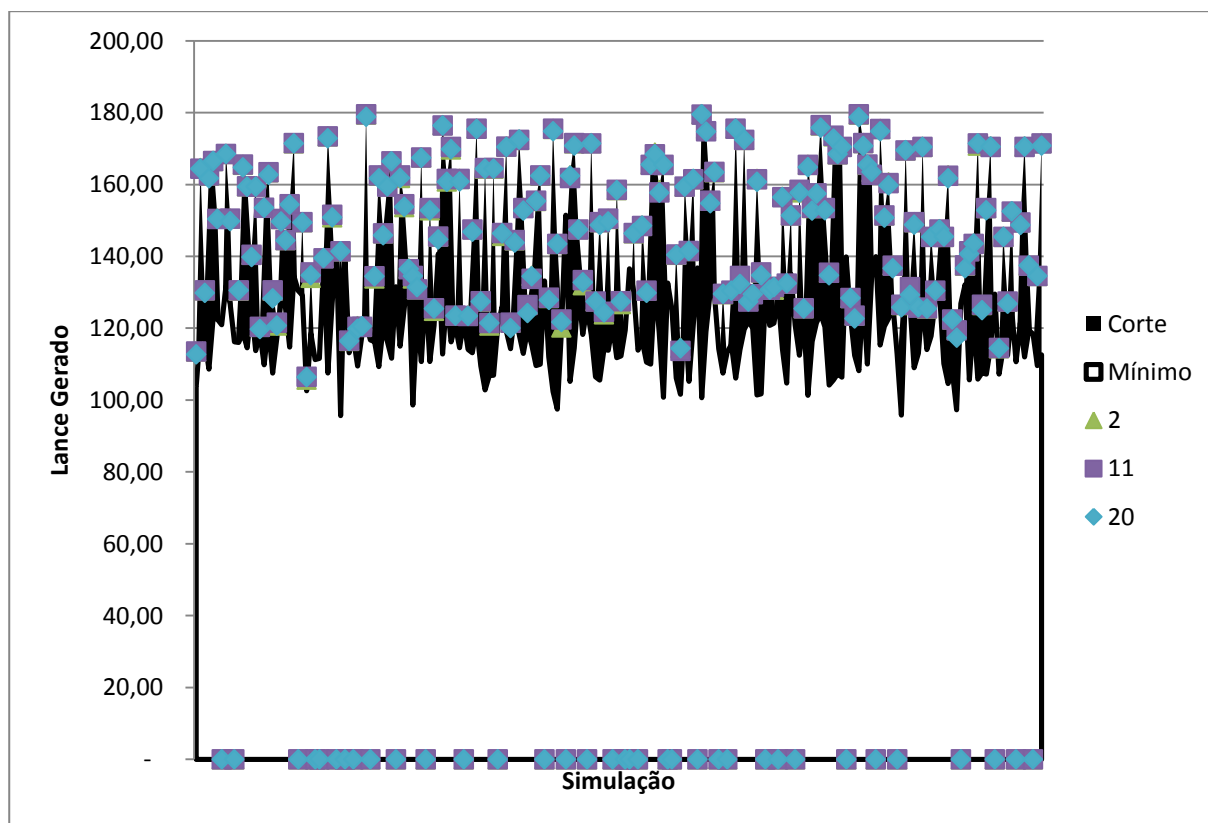
A seguir, apresentamos comparações entre os resultados gerados a partir de um mesmo Método e $n_{iteracoes}$, mas variando o parâmetro γ .

Figura 19 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 1, 10 e 19



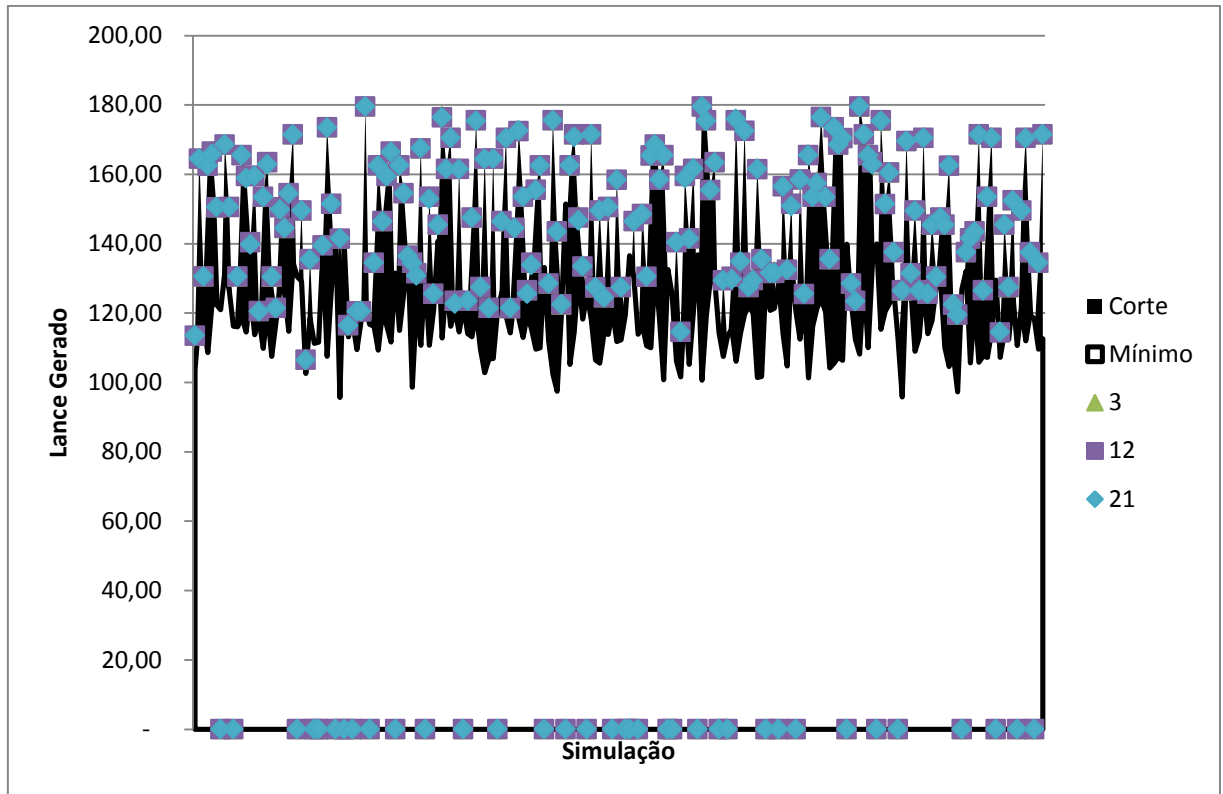
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 20 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 2, 11 e 20



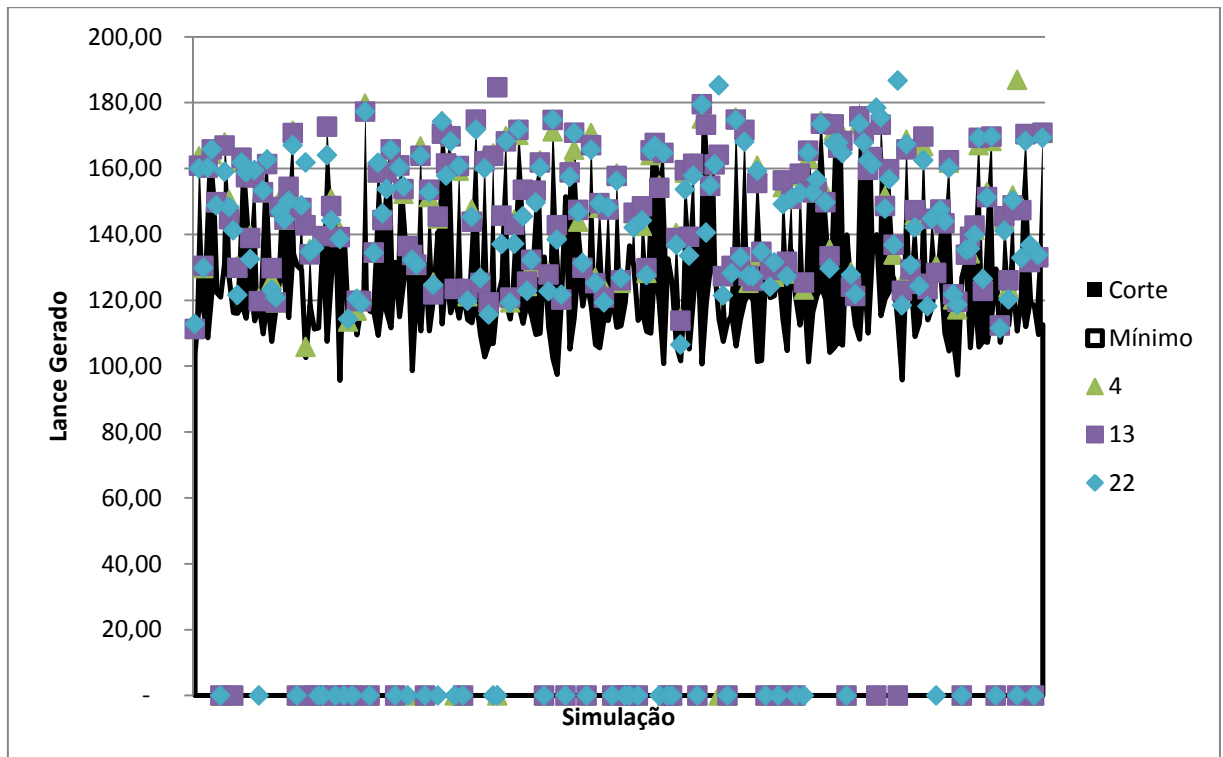
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 21 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 3, 12 e 21



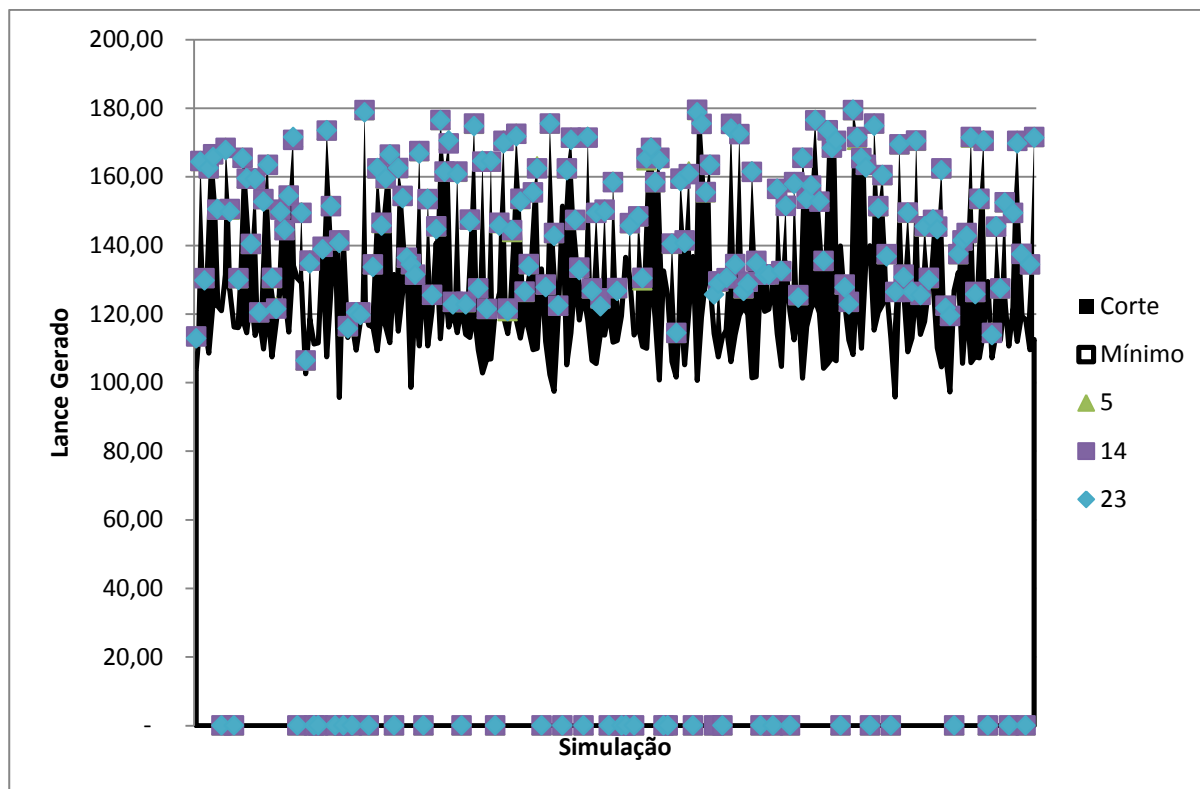
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 22 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 4, 13 e 22



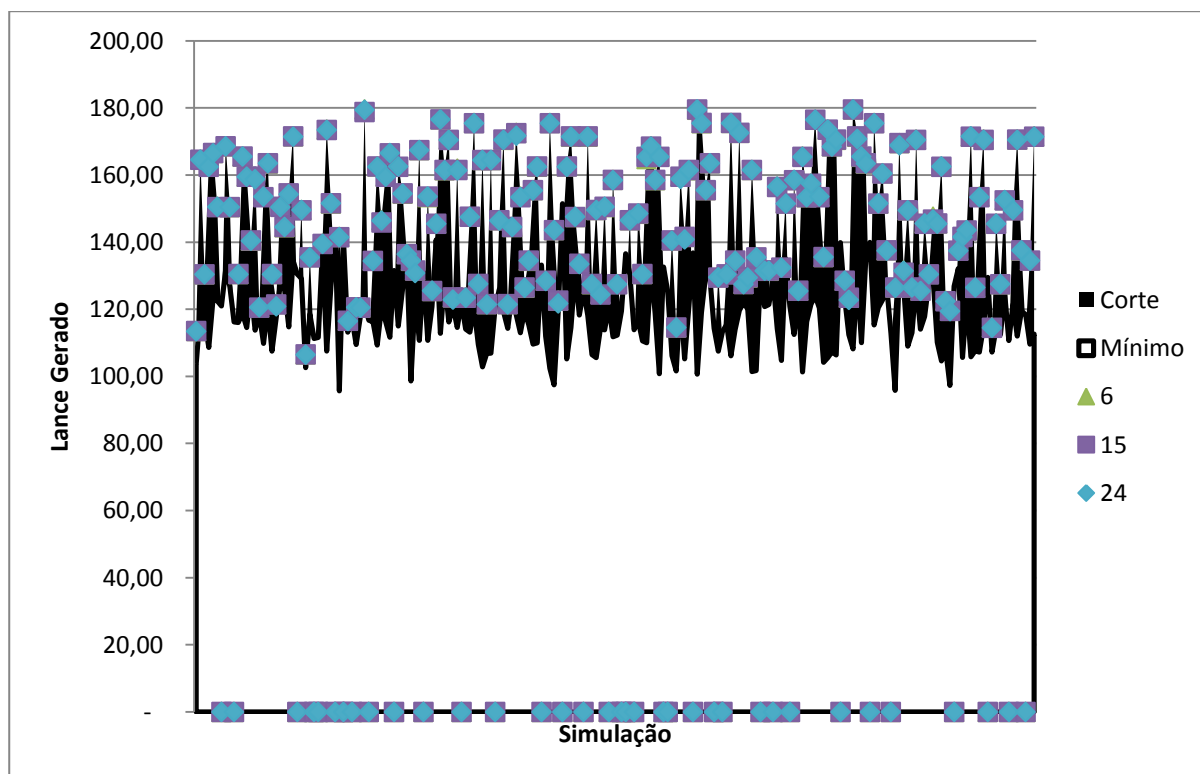
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 23 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 5, 14 e 23



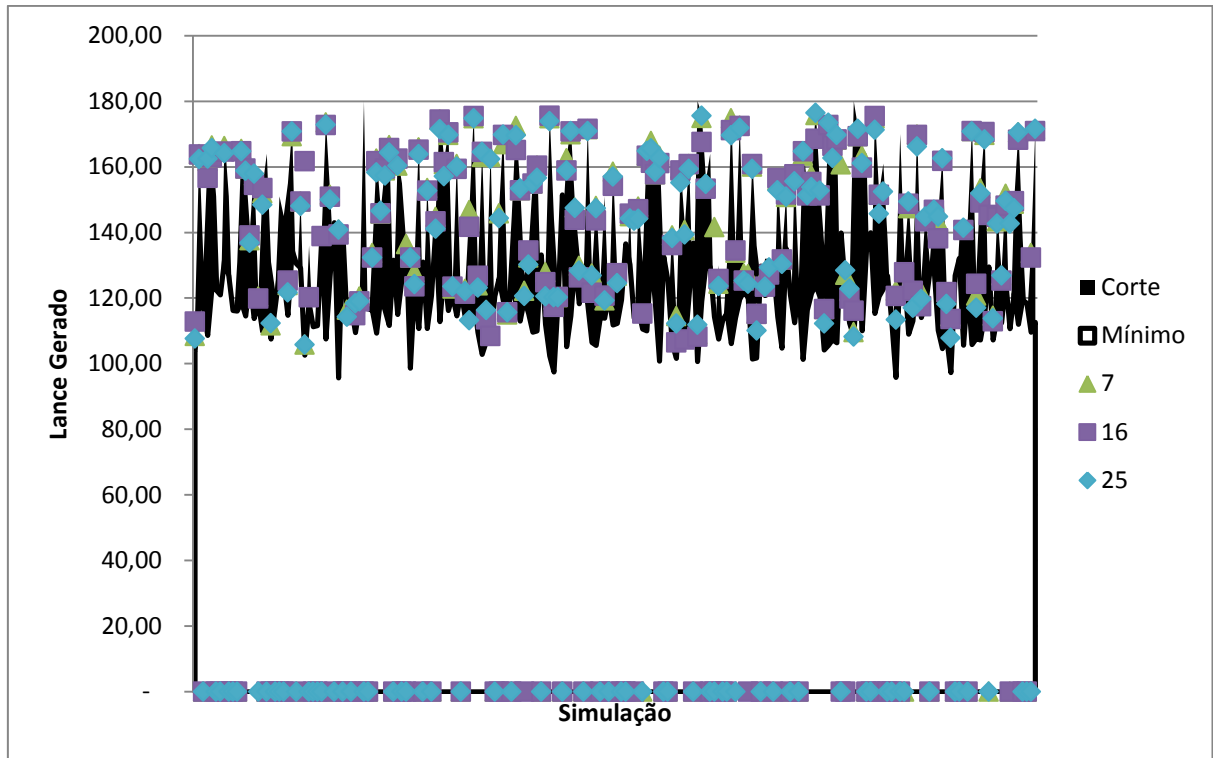
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 24 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 6, 15 e 24



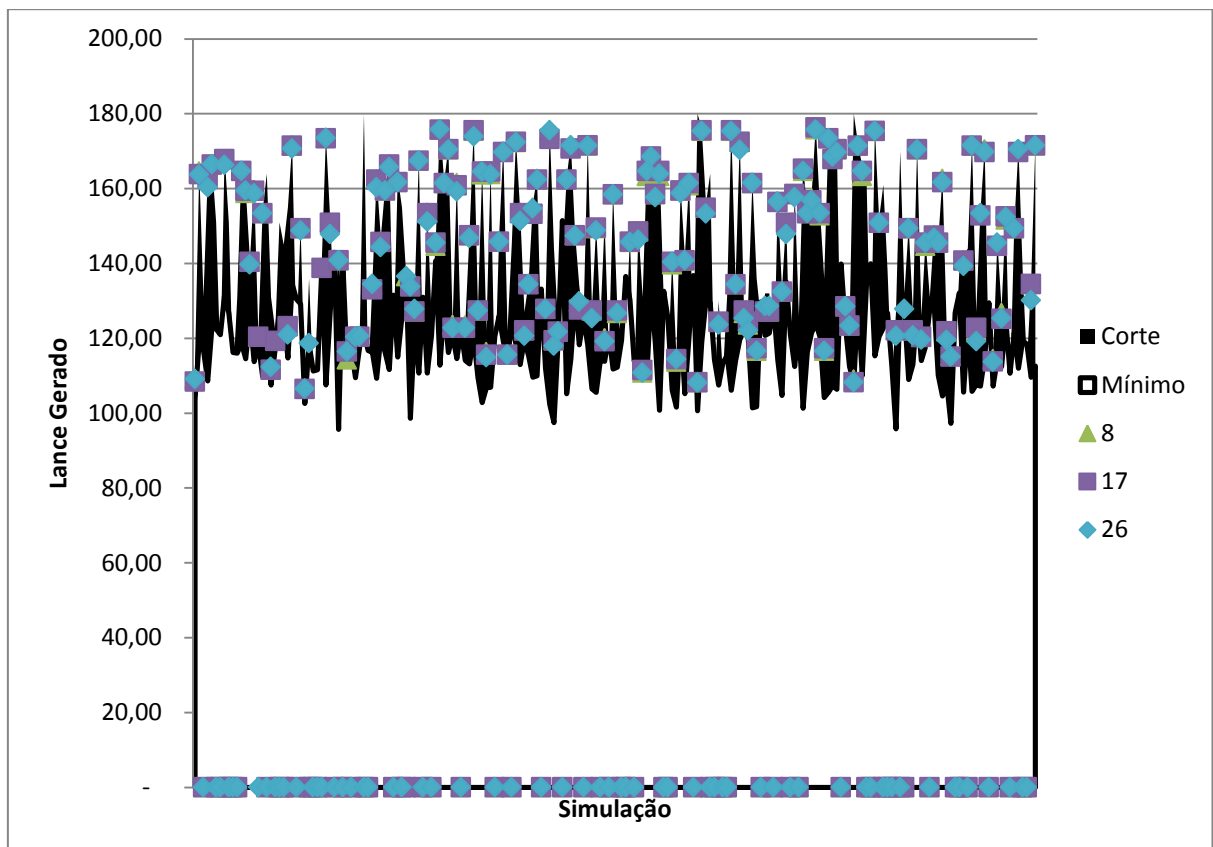
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 25 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 7, 16 e 25



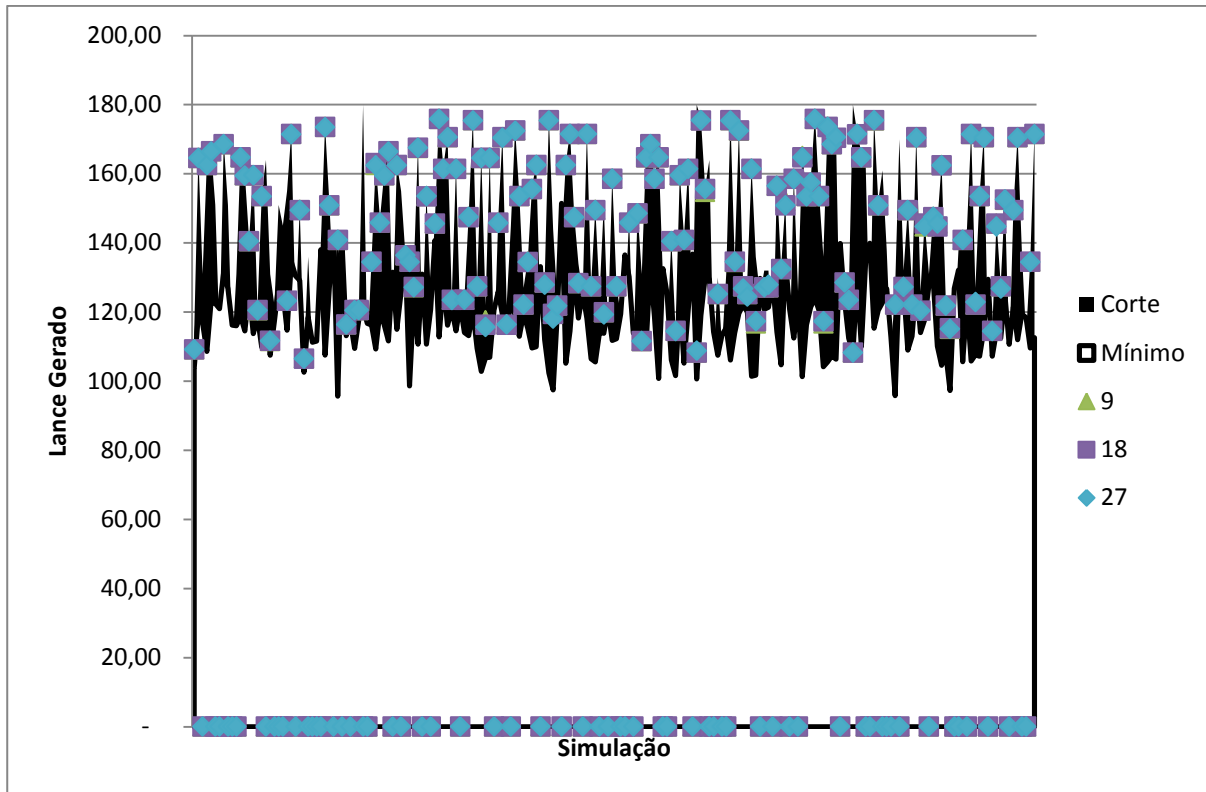
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 26 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 8, 17 e 26



Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 27 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 9, 18 e 27

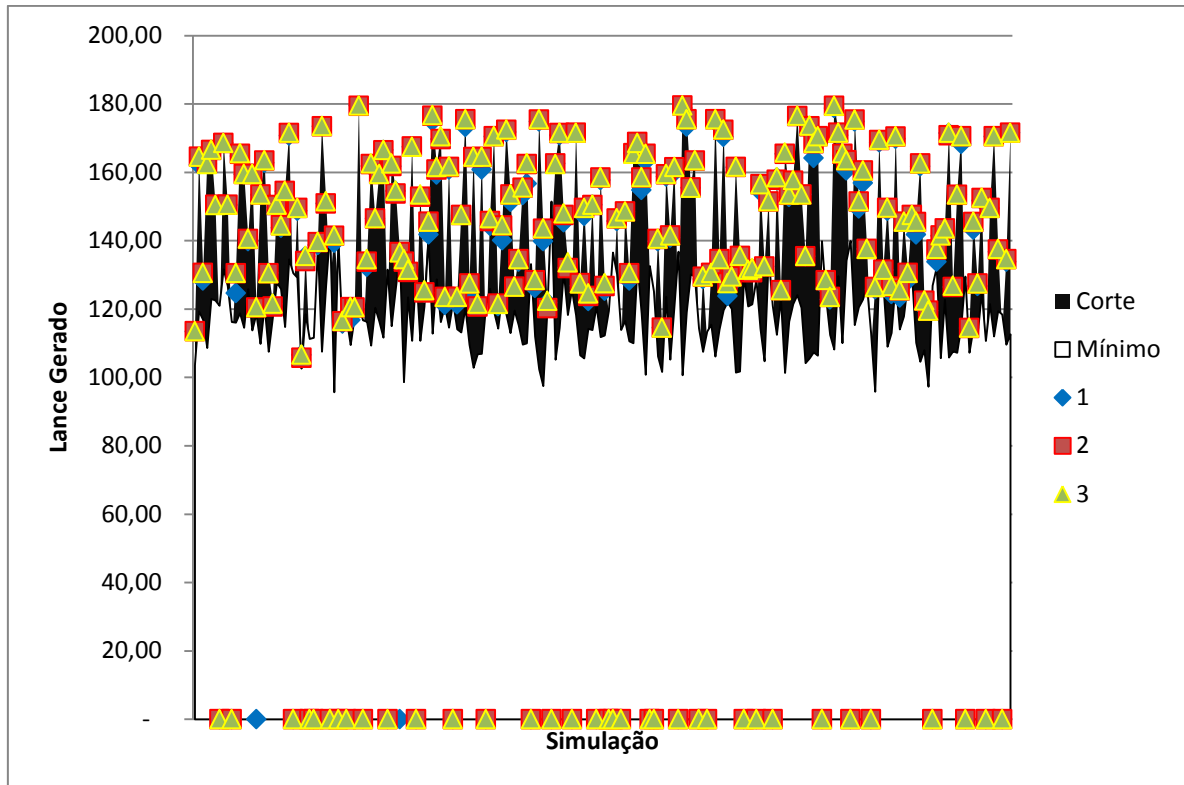


Fonte: elaborado pelo Autor

De modo geral, podemos dizer que há pouca variabilidade entre os Lances Finais conforme se varia o valor de γ . Contudo, podemos perceber através dos gráficos que as séries que possuem um maior valor de γ tem uma probabilidade maior de gerar um Lance Final com maior variabilidade de posição no intervalo entre Lance Mínimo e Preço de Corte, o que pode garantir uma maior chance de o gerador ganhar o Leilão. Essa é a justificativa para, na Fase II, utilizarmos um alto valor de γ e $n_{iteracoes}$.

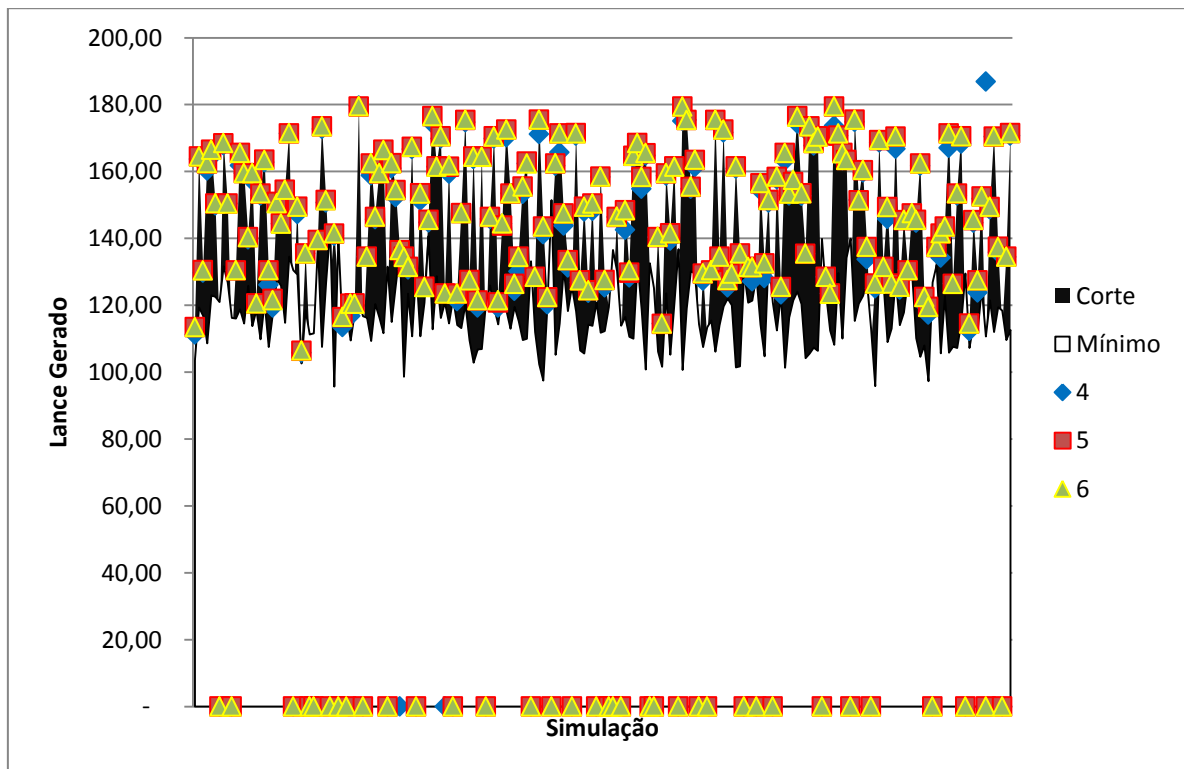
A seguir, apresentamos comparações entre os resultados gerados a partir de um mesmo Método e γ , mas variando o parâmetro $n_{iteracoes}$.

Figura 28 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 1, 2 e 3



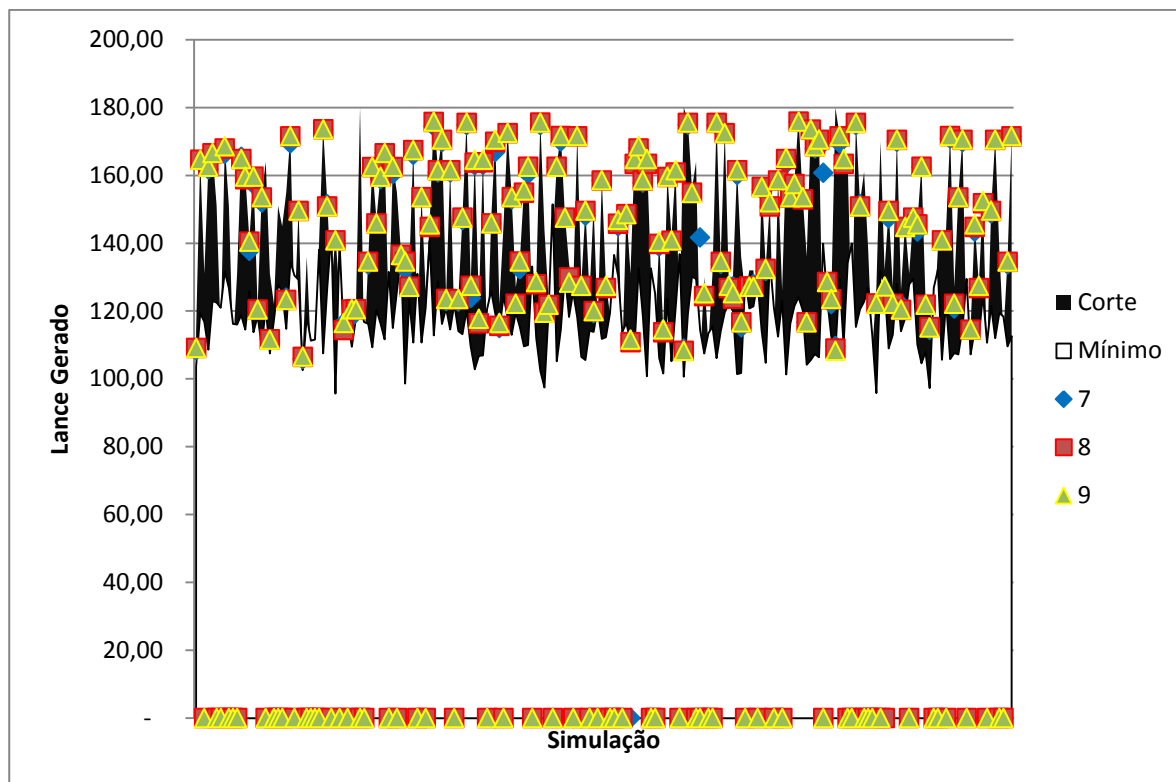
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 29 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 4, 5 e 6



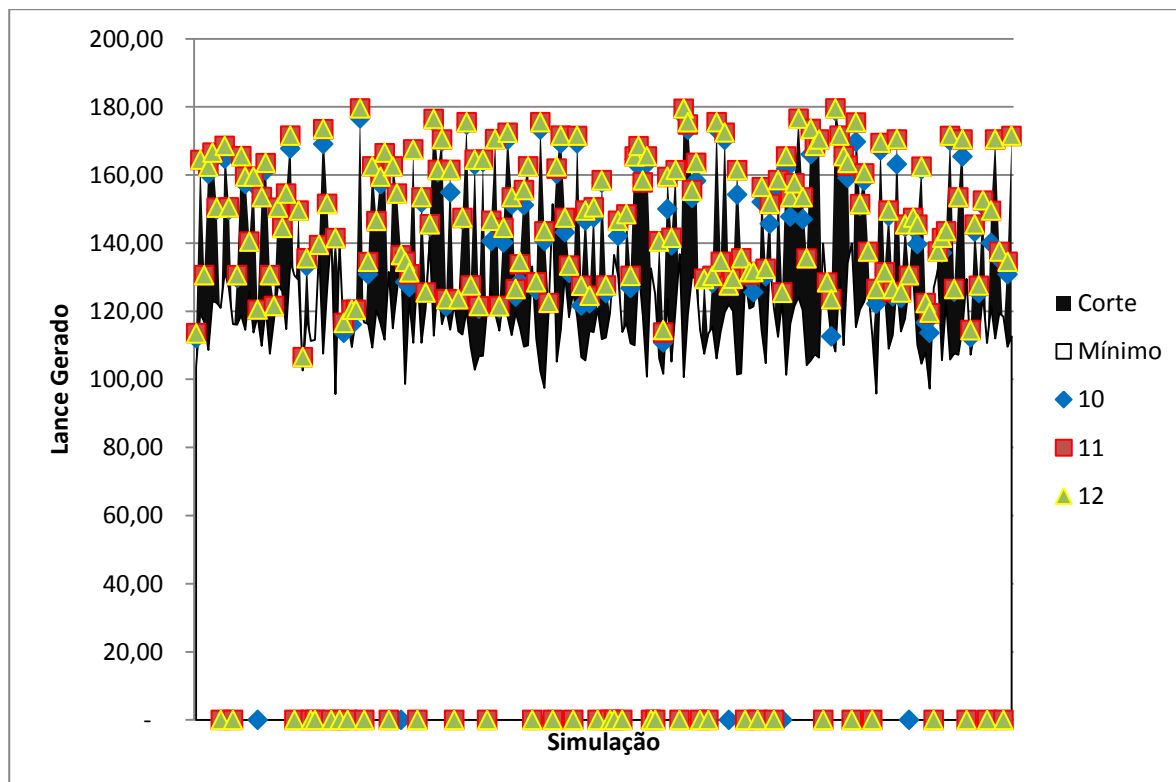
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 30 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 7, 8 e 9



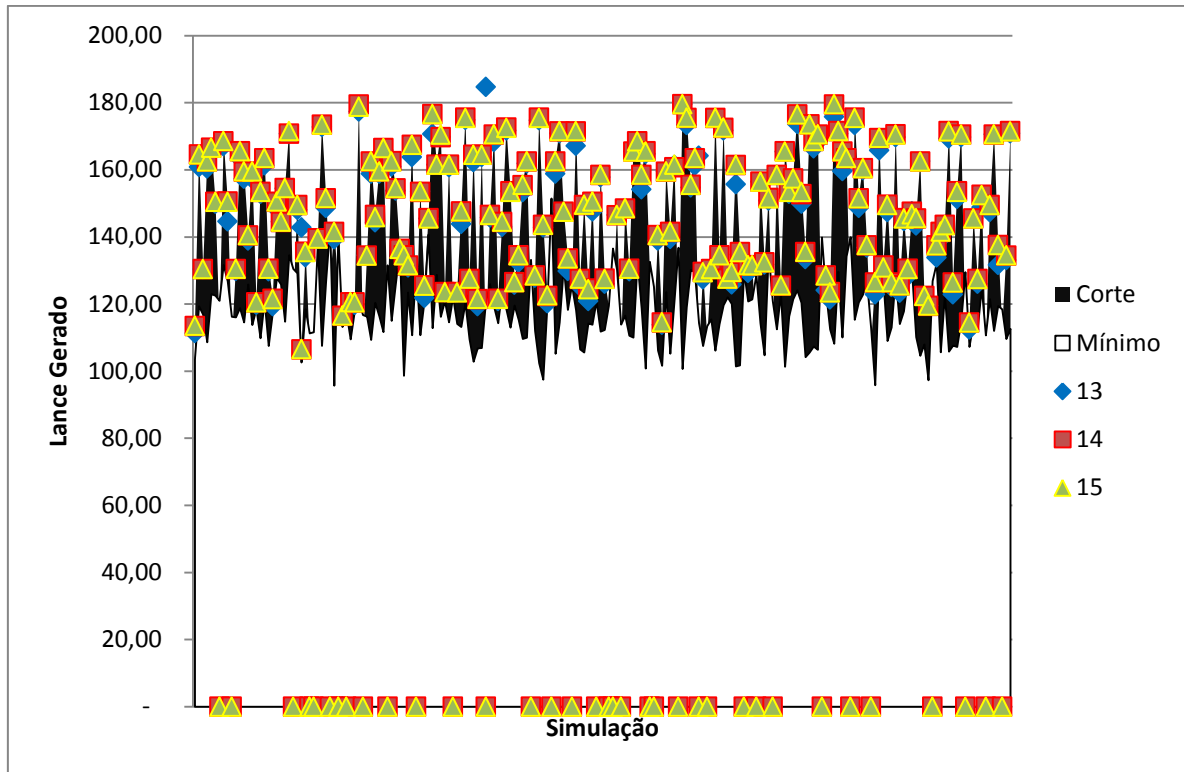
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 31 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 10, 11 e 12



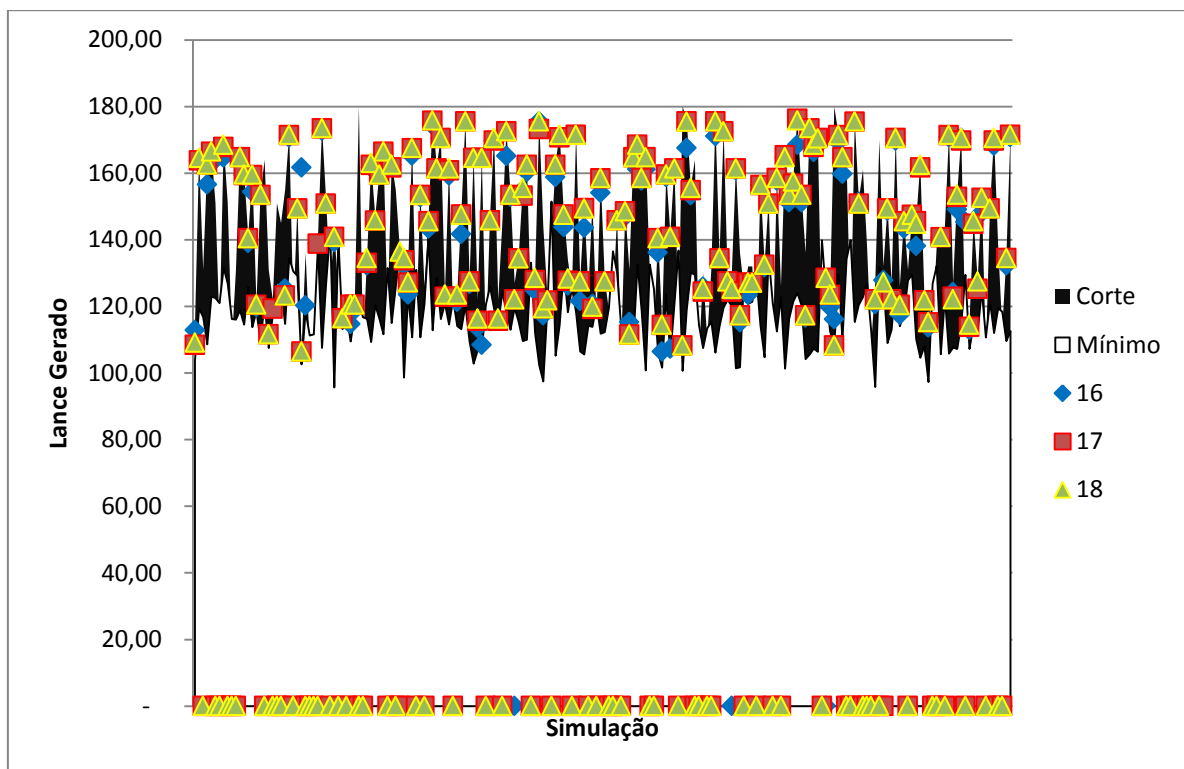
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 32 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 13, 14 e 15



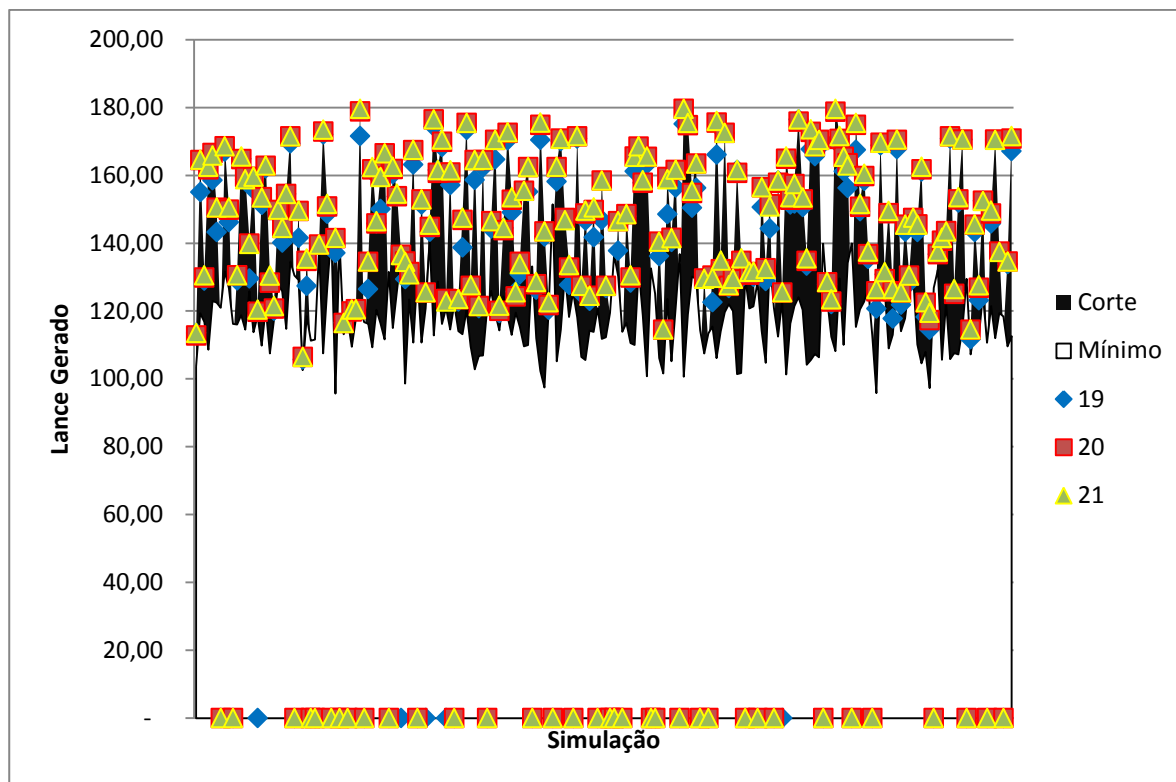
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 33 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 16, 17 e 18



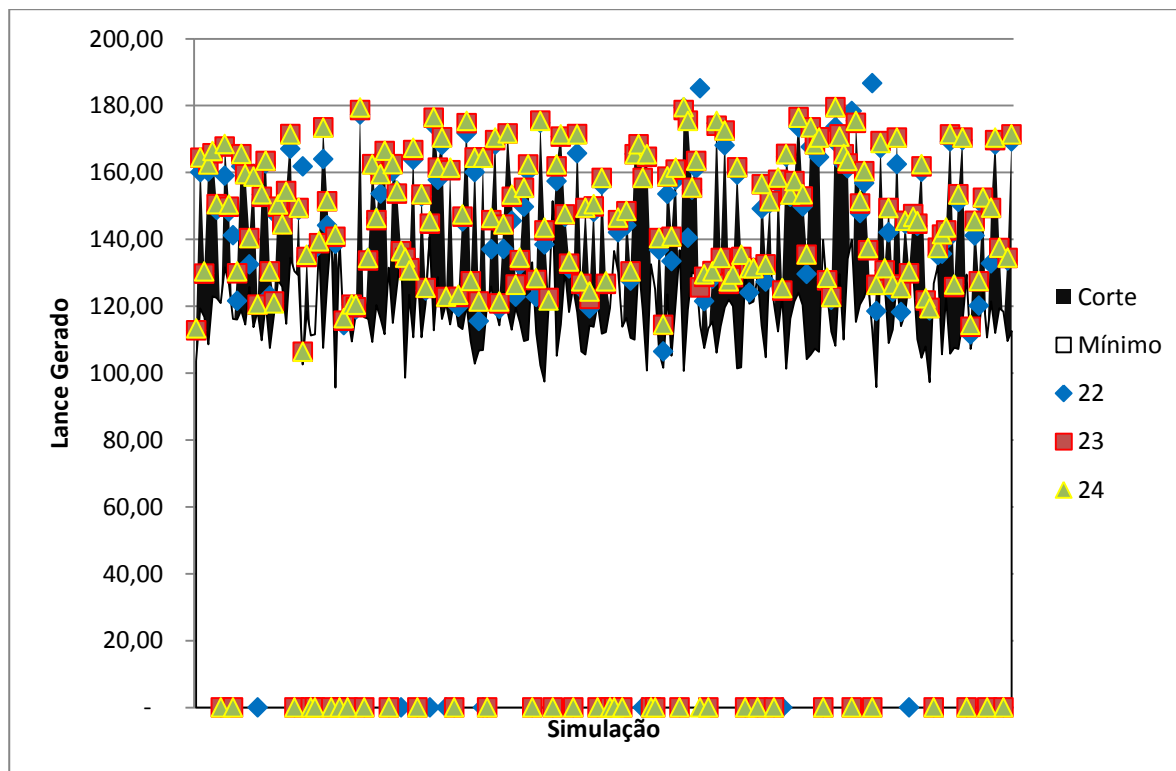
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 34 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 19, 20 e 21



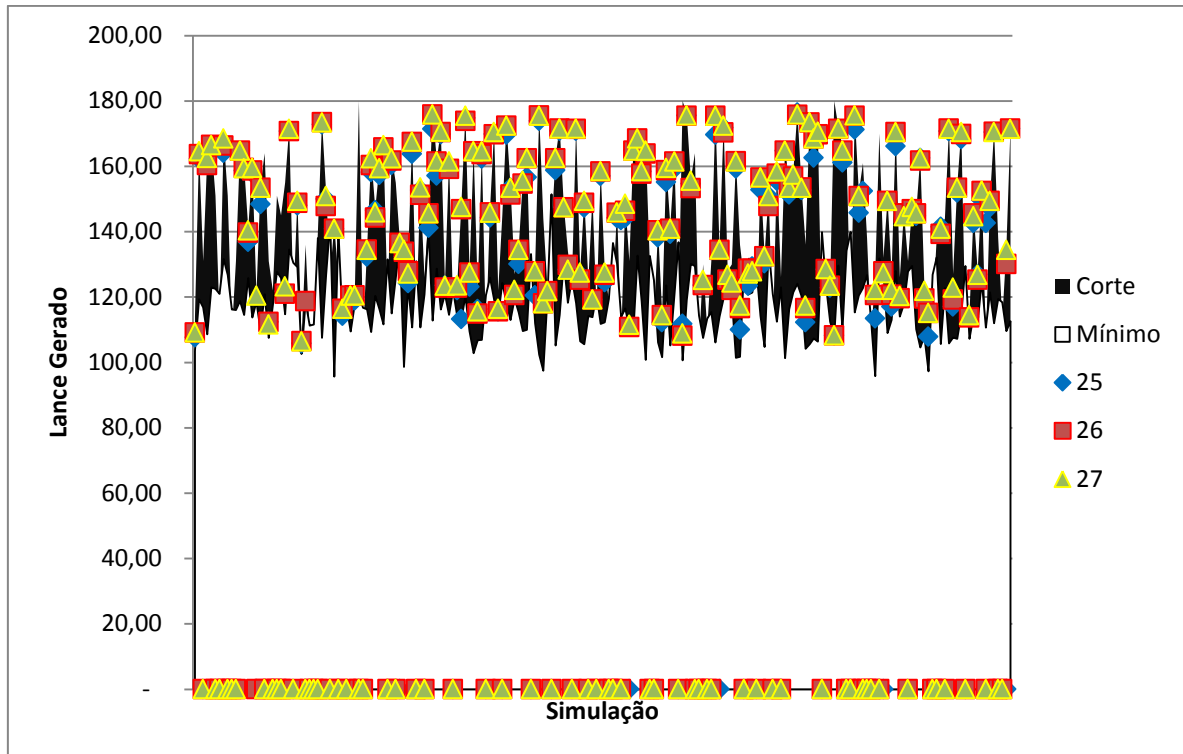
Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 35 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 22, 23 e 24



Fonte: elaborado pelo Autor

Figura 36 - Comparação dos Resultados das Simulações das Séries 25, 26 e 27



Fonte: elaborado pelo Autor

De modo geral, podemos dizer que há pouca variabilidade entre os Lances Finais conforme se varia o valor de $n_{iteracoes}$. Contudo, podemos dizer que quanto maior for o valor de $n_{iteracoes}$, a matriz Q estará em um estado mais estacionário.

4.2.Resultados Fase II

A seguir, apresentamos uma análise estatística dos lances finais gerados através do simulador para cada uma das metodologias utilizadas e descritas na seção 3.4. A lembrar, foram utilizados o Método 1, Método 2 e Método 3. Para o cálculo de cada um dos testes a seguir, foi utilizado o *software Microsoft Excel*.

Teste de Igualdade de Média

O resultado do teste é:

Tabela 10 - Teste de Igualdade de Média

Caso	Média	Desvio Padrão	Teste Igualdade Média	
			Método 1 e Método 3	Método 2 e Método 3
Método 1	113,66104	4,81740	0,0000	0,0000
Método 2	114,08769	5,42844		
Método 3	117,69793	4,81304		

Fonte: elaborado pelo Autor

A partir do qual podemos dizer que as médias dos lances gerados dos três métodos de cálculo são diferentes entre si.

Teste de Média

Considerado um grau de significância de 0,05, o resultado do teste é:

Tabela 11 - Teste de Média

Caso	Média	Desvio Padrão	Teste de Média: Método 3 > (Método 1 e Método 2)	
			Método 1 e Método 3	Método 2 e Método 3
Método 1	113,64947	4,82739	0,0000	0,0000
Método 2	114,07403	5,44053		
Método 3	117,68873	4,82418		

Fonte: elaborado pelo Autor

A partir do qual podemos dizer que a média dos lances gerados através dos três métodos são todos diferentes entre si e que a média obtida a partir do Método 3 é maior do que a média do Método 1 e também maior do que a média do Método 2. Esse resultado já era esperado, uma vez que buscamos um lucro maior para o método com Aprendizagem por Reforço.

Teste de Normalidade

O resultado do teste é:

Tabela 12 - Teste de Normalidade de Jarque-Bera

	Método 1	Método 2	Método 3
Observações	300	300	300
Assimetria	-0,33526	-0,48611	0,766236
Curtose	1,810195	2,374038	4,125193
Jarque-Bera	23,31534	16,71286	45,18161
Grau liberdade	299	299	299
Limite	259,9454	259,9454	259,9454
Normalidade?	NORMAL	NORMAL	NORMAL

Fonte: elaborado pelo Autor

O Teste de Normalidade de Jarque-Bera (JARQUE e BERA, 1980) é um teste para verificar se os dados da amostra têm assimetria e curtose em conformidade com os mesmos parâmetros de uma distribuição normal. A saber, o coeficiente de Jarque-Bera é calculado da seguinte maneira:

$$Jarque - Bera = \frac{Observações}{6} \times \left(Assimetria^2 + \frac{(Curtose - 3)^2}{4} \right)$$

Dessa forma, se esse coeficiente for menor do que o coeficiente “Limite”, que é o inverso da probabilidade de cauda esquerda da distribuição qui-quadrada calculada com intervalo de confiança de 0,05 e grau de liberdade igual a 299, então podemos dizer há a possibilidade de os dados terem distribuição normal.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou construir um simulador para gerar lances na segunda fase do leilão de energia no Brasil empregando os conceitos referentes ao modelo de aprendizagem computacional por reforço conhecido como *Q-Learning*. Esse modelo busca encontrar uma política de seleção de ações ideais para um sistema baseado em processos de decisão de Markov através da aprendizagem de uma função que atribui valores a cada par estado-ação sendo que esses valores representam quão satisfatória é uma dada política num certo contexto.

Com base nas simulações realizadas e nos resultados que foram obtidos podemos dizer que o simulador atende o propósito inicial de fornecer uma base rudimentar para iniciar estudos mais aprofundados e simulações mais sofisticadas no que diz respeito à aplicação de algoritmos com aprendizagem por reforço na determinação de lances de segunda fase em leilões de energia no Brasil.

Os próximos trabalhos a serem desenvolvidos poderiam explorar critérios de definição de uma função de recompensa mais representativa para o modelo, além de sofisticacões que podem ser feitas tanto para analisar o efeito do uso de diferentes estratégias de oferta em diferentes tipos de leilões de energia elétrica, bem como o efeito que alterações em práticas de leilões poderiam impactar na dinâmica de preços do setor elétrico brasileiro.

ANEXO – Entradas para Simulação e Resultados

Pcorte	Pmin	Série 1	Série 2	Série 3	Série 4	Série 5	Série 6
114,00	103,70	113,40	113,50	113,50	111,30	113,50	113,50
165,00	119,35	162,20	164,50	164,50	163,70	164,50	164,50
131,00	116,83	128,30	130,50	130,50	129,70	130,50	130,40
163,00	108,62	162,40	162,50	162,40	160,30	162,40	162,50
167,00	122,98	166,50	166,50	166,60	164,30	166,50	166,50
151,00	122,50	150,40	150,50	150,40	149,80	150,40	150,50
113,00	120,97	-	-	-	-	-	-
169,00	131,66	168,50	168,50	168,50	167,80	168,40	168,50
151,00	126,78	150,40	150,50	150,50	150,40	150,40	150,40
109,00	116,21	-	-	-	-	-	-
131,00	116,04	124,60	130,40	130,50	130,40	130,40	130,50
166,00	118,79	164,70	165,40	165,50	161,80	165,50	165,50
160,00	114,54	159,40	159,50	159,50	159,50	159,50	159,50
141,00	125,82	139,80	140,40	140,50	139,70	140,40	140,40
160,00	113,76	159,40	159,50	159,50	157,30	159,40	159,50
121,00	118,54	-	120,40	120,50	120,50	120,50	120,50
154,00	109,82	153,40	153,50	153,50	152,80	153,40	153,50
164,00	120,88	162,70	163,40	163,50	162,80	163,50	163,40
131,00	107,51	130,50	130,40	130,40	126,10	130,40	130,50
122,00	117,42	121,40	120,70	121,50	119,30	121,90	121,50
151,00	127,73	149,70	150,40	150,50	150,50	150,90	150,50
145,00	125,87	143,70	144,50	144,40	144,40	144,50	144,40
155,00	114,75	154,40	154,50	154,50	153,70	154,50	154,50
172,00	134,55	170,70	171,40	171,50	171,40	171,40	171,50
119,00	130,47	-	-	-	-	-	-
150,00	129,17	148,70	149,50	149,50	147,30	149,50	149,50
107,00	102,59	106,50	105,70	106,60	105,80	106,40	106,50
136,00	118,48	135,40	134,00	135,50	135,50	135,50	135,50
108,00	111,27	-	-	-	-	-	-
111,00	111,60	-	-	-	-	-	-
140,00	138,07	138,70	139,50	139,60	-	139,50	139,50
174,00	107,54	173,40	173,40	173,50	172,70	173,50	173,50
152,00	126,85	150,80	150,80	151,50	150,70	151,50	151,40
127,00	142,99	-	-	-	-	-	-
142,00	95,67	139,30	141,40	141,50	140,70	141,40	141,50
125,00	140,35	-	-	-	-	-	-
117,00	113,16	115,70	116,40	116,50	113,50	116,40	116,50
108,00	117,26	-	-	-	-	-	-
121,00	109,48	116,80	120,50	120,50	116,80	120,40	120,40
121,00	117,87	119,70	120,40	120,50	119,70	120,50	120,40
180,00	121,28	179,50	179,40	179,50	179,70	179,40	179,50
108,00	116,73	-	-	-	-	-	-
135,00	116,25	132,30	133,80	134,50	134,50	134,50	134,50

163,00	109,32	161,80	162,40	162,50	158,80	162,40	162,50
147,00	120,37	146,40	146,40	146,50	145,70	146,40	146,50
160,00	116,34	159,40	159,50	159,50	159,40	159,40	159,50
167,00	111,65	166,50	166,40	166,50	165,70	166,50	166,40
118,00	131,54	-	-	-	-	-	-
163,00	115,00	161,70	161,80	162,50	160,90	162,50	162,50
155,00	125,83	154,50	153,70	154,60	152,30	154,40	154,40
137,00	136,23	-	136,60	136,50	-	136,40	136,50
135,00	98,63	134,40	133,80	134,50	133,80	134,50	134,40
132,00	123,44	130,80	130,80	131,50	130,70	131,50	131,50
168,00	110,72	167,40	167,50	167,40	166,70	167,40	167,40
114,00	130,98	-	-	-	-	-	-
154,00	110,72	152,70	152,80	153,50	151,30	153,50	153,40
126,00	120,76	124,70	124,80	125,50	125,40	125,50	125,40
146,00	140,70	141,80	145,50	145,50	144,80	145,50	145,50
177,00	112,82	174,90	176,50	176,70	174,30	176,50	176,50
162,00	128,70	159,30	160,80	161,50	161,40	161,50	161,40
171,00	116,20	169,70	169,70	170,50	169,80	170,50	170,50
124,00	120,86	121,20	123,50	123,50	-	123,50	123,50
162,00	114,57	160,80	161,50	161,70	159,30	161,40	161,80
117,00	122,05	-	-	-	-	-	-
124,00	114,09	121,30	123,50	123,50	121,20	123,40	123,50
148,00	113,17	147,40	147,50	147,50	147,50	147,50	147,50
176,00	120,32	173,20	175,50	175,50	174,70	175,40	175,50
128,00	109,51	125,30	127,40	127,40	126,80	127,50	127,40
165,00	102,83	164,40	164,40	164,50	163,70	164,50	164,40
122,00	106,82	121,40	120,70	121,50	119,30	121,40	121,50
165,00	106,91	160,80	164,40	164,50	164,50	164,40	164,40
108,00	120,57	-	-	-	-	-	-
147,00	125,95	144,30	145,70	146,50	145,80	146,40	146,50
171,00	119,23	170,40	170,50	170,50	169,80	170,50	170,40
122,00	114,30	120,80	121,50	121,40	119,30	120,80	121,50
145,00	124,33	140,10	144,40	144,50	144,40	143,80	144,50
173,00	118,43	171,70	172,40	172,50	170,20	172,50	172,50
154,00	112,98	151,30	153,50	153,50	153,50	153,40	153,50
127,00	119,55	126,50	126,50	126,50	124,30	126,40	126,40
135,00	115,30	133,80	134,50	134,50	130,10	134,50	134,40
156,00	109,61	153,30	155,40	155,50	153,30	155,50	155,50
163,00	109,98	156,60	162,40	162,60	162,40	163,00	162,40
118,00	133,16	-	-	-	-	-	-
129,00	111,98	126,10	128,40	128,50	128,40	128,50	128,50
176,00	102,38	174,80	175,40	175,50	171,20	175,50	175,50
144,00	97,47	139,80	143,40	143,50	141,20	143,50	143,50
123,00	119,70	121,80	120,20	122,40	120,30	122,40	122,50
141,00	151,46	-	-	-	-	-	-
163,00	105,20	162,50	162,50	162,40	161,70	162,40	162,50

172,00	114,52	170,80	171,40	171,50	165,70	171,40	171,40
148,00	131,00	145,30	147,50	147,90	143,80	147,40	147,40
134,00	118,26	132,00	131,90	133,60	131,30	133,50	133,50
125,00	125,58	-	-	-	-	-	-
172,00	118,19	171,40	171,50	171,50	170,70	171,50	171,40
128,00	106,48	126,80	127,50	127,40	126,80	127,40	127,40
150,00	105,57	147,20	149,50	149,50	148,00	149,50	149,50
125,00	114,22	122,30	123,80	124,50	123,70	124,50	124,50
151,00	113,86	150,50	150,40	150,50	148,20	150,40	150,40
116,00	120,83	-	-	-	-	-	-
159,00	111,80	157,70	158,40	158,50	158,40	158,50	158,50
128,00	112,28	125,30	126,70	127,50	125,30	127,50	127,50
119,00	119,46	-	-	-	-	-	-
121,00	136,54	-	-	-	-	-	-
147,00	130,23	145,70	146,40	146,50	146,40	146,40	146,50
107,00	113,89	-	-	-	-	-	-
149,00	116,53	148,50	148,50	148,50	142,60	148,40	148,40
131,00	110,57	128,30	130,40	130,50	128,30	129,70	130,50
166,00	110,01	165,50	165,50	165,40	164,00	164,70	164,70
169,00	132,68	168,40	168,80	168,50	166,30	168,50	168,50
159,00	118,74	154,80	158,40	158,50	154,80	158,40	158,40
166,00	100,78	163,20	165,40	165,40	164,80	165,40	165,50
130,00	132,58	-	-	-	-	-	-
113,00	125,16	-	-	-	-	-	-
141,00	106,14	139,80	140,40	140,50	140,40	140,40	140,50
115,00	101,61	114,50	114,50	114,50	114,50	114,40	114,50
160,00	123,59	158,70	159,40	159,50	158,70	159,40	159,50
142,00	105,21	140,80	141,50	141,50	139,30	141,50	141,50
162,00	120,68	160,00	161,40	161,50	161,50	161,50	161,40
117,00	136,79	-	-	-	-	-	-
180,00	100,65	178,70	179,50	179,50	175,10	179,40	179,40
176,00	119,03	173,30	175,50	175,50	175,40	175,40	175,40
156,00	130,16	155,40	155,50	155,40	154,80	155,40	155,50
164,00	129,48	163,50	163,40	163,50	161,30	163,40	163,50
105,00	114,31	-	-	-	-	-	-
130,00	107,50	128,70	129,40	129,50	127,30	129,40	129,50
110,00	113,40	-	-	-	-	-	-
131,00	115,43	130,50	130,50	130,50	129,80	130,40	130,50
176,00	106,12	174,70	175,50	175,50	175,40	175,40	175,50
135,00	113,97	130,10	134,50	134,50	130,80	134,50	134,50
173,00	119,65	170,30	172,40	172,50	171,70	172,50	172,50
128,00	122,01	123,80	127,70	127,50	125,30	127,40	127,50
130,00	120,02	127,30	129,50	129,50	129,50	129,40	129,40
162,00	101,42	161,40	161,50	161,60	160,80	161,50	161,50
136,00	101,74	134,80	135,50	135,50	133,30	135,50	135,50
125,00	129,75	-	-	-	-	-	-

132,00	120,78	130,80	131,50	131,50	131,50	131,40	131,50
132,00	121,39	131,50	130,70	131,90	127,10	131,50	131,40
107,00	128,65	-	-	-	-	-	-
157,00	114,24	154,30	156,50	156,50	154,30	156,40	156,50
133,00	104,74	132,40	132,40	132,50	128,10	132,50	132,50
152,00	135,07	151,50	151,40	151,50	150,70	151,50	151,50
107,00	120,89	-	-	-	-	-	-
159,00	112,48	158,40	157,80	158,50	157,70	158,40	158,50
126,00	123,01	125,40	125,50	125,50	123,20	125,40	125,50
166,00	101,32	165,40	165,40	165,70	163,20	165,50	165,50
154,00	116,31	152,70	153,40	153,50	152,80	153,50	153,40
158,00	121,45	153,80	157,50	157,70	155,30	156,80	157,50
177,00	124,08	176,40	176,40	176,50	174,30	176,50	176,40
154,00	120,36	153,50	153,50	153,50	152,70	153,50	153,50
136,00	104,18	135,40	135,40	135,50	135,40	135,40	135,50
174,00	105,56	171,90	173,40	173,60	171,30	173,50	173,50
169,00	107,33	164,10	168,40	168,50	167,70	168,50	168,50
171,00	106,38	169,70	170,50	170,50	170,40	170,50	170,40
106,00	139,85	-	-	-	-	-	-
129,00	123,49	126,30	128,40	128,50	128,50	128,50	128,50
124,00	112,43	122,70	123,50	123,50	123,50	123,50	123,40
180,00	108,18	178,70	179,40	179,40	173,70	179,40	179,50
172,00	129,65	170,80	171,50	171,50	170,70	170,70	171,40
166,00	110,04	164,80	165,40	165,50	163,30	165,50	165,40
164,00	134,18	160,50	163,50	163,50	163,40	163,40	163,40
112,00	139,93	-	-	-	-	-	-
176,00	115,32	174,80	175,40	175,40	174,80	175,50	175,50
152,00	120,50	149,30	151,40	151,50	151,50	151,40	151,40
161,00	122,76	156,80	160,50	160,50	159,70	160,40	160,50
138,00	126,74	137,50	137,50	137,50	133,80	137,40	137,50
108,00	112,82	-	-	-	-	-	-
127,00	95,82	125,70	126,40	126,40	125,00	126,50	126,50
170,00	131,84	168,70	169,40	169,50	168,70	169,40	169,50
132,00	127,12	131,40	131,50	131,50	128,60	131,50	131,50
150,00	108,99	148,70	149,50	149,60	145,80	149,40	149,40
127,00	113,01	124,30	126,50	126,70	125,70	126,50	126,50
171,00	128,02	169,80	170,40	170,50	166,80	170,40	170,50
126,00	114,05	123,30	125,40	125,50	124,70	125,50	125,50
146,00	117,82	145,50	145,50	145,50	145,50	145,40	145,50
131,00	127,83	128,30	130,50	130,50	130,50	130,40	130,50
148,00	129,53	147,40	147,50	147,50	145,20	147,40	147,50
146,00	110,15	141,80	145,40	145,50	144,70	145,50	145,50
163,00	104,59	161,70	162,50	162,50	161,70	162,40	162,40
123,00	107,97	120,30	122,40	122,50	120,20	122,50	122,50
120,00	97,29	119,50	119,50	119,50	117,20	119,50	119,50
115,00	126,83	-	-	-	-	-	-

138,00	132,13	133,80	137,40	137,50	137,40	137,40	137,50
142,00	105,63	141,40	141,50	141,50	134,20	141,40	141,50
144,00	122,78	142,80	143,50	143,50	141,30	143,50	143,50
172,00	105,83	171,40	170,80	171,50	167,10	171,40	171,40
127,00	107,62	126,40	126,40	126,80	126,50	126,40	126,40
154,00	107,22	153,50	153,40	153,50	152,80	153,40	153,50
171,00	114,84	168,30	170,50	170,50	168,30	170,50	170,50
111,00	129,50	-	-	-	-	-	-
115,00	107,23	114,40	114,40	114,50	112,30	114,50	114,50
146,00	114,49	143,20	145,40	145,50	144,70	145,40	145,50
128,00	112,43	126,70	127,40	127,40	123,80	127,40	127,40
153,00	124,86	151,70	152,40	152,50	151,80	152,50	152,50
106,00	110,67	-	-	-	186,90	-	-
150,00	121,46	149,40	149,50	149,50	148,70	149,40	149,50
171,00	112,00	170,40	170,50	170,50	170,40	170,40	170,50
138,00	119,43	136,70	137,40	137,50	135,90	137,50	137,40
113,00	118,41	-	-	-	-	-	-
135,00	109,59	133,80	134,50	134,50	134,40	134,50	134,50
172,00	112,61	171,50	171,50	171,50	170,70	171,50	171,50

Série 7	Série 8	Série 9	Série 10	Série 11	Série 12	Série 13	Série 14
108,40	109,10	109,10	112,00	113,50	113,40	111,30	113,40
163,80	164,50	164,50	163,70	164,40	164,50	160,80	164,50
-	-	-	130,50	130,50	130,50	130,40	130,40
161,70	162,50	162,50	160,30	162,50	162,40	160,30	162,40
166,40	166,40	166,50	164,30	166,50	166,50	165,80	166,50
-	-	-	149,80	150,40	150,40	149,80	150,40
-	-	-	-	-	-	-	-
166,20	167,80	168,50	164,80	168,50	168,50	167,00	168,40
-	-	-	149,70	150,50	150,50	144,60	150,50
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	129,70	130,50	130,50	129,80	130,40
165,40	164,70	164,70	164,80	165,50	165,50	163,30	165,50
159,40	158,80	159,50	157,30	159,50	159,50	157,30	159,40
137,60	140,40	140,40	140,50	140,40	140,40	138,90	140,40
157,30	159,50	159,50	157,20	159,40	159,50	157,30	159,40
120,40	120,40	120,40	-	120,40	120,50	119,70	120,40
151,90	153,40	153,50	153,50	153,50	153,50	152,80	153,40
-	-	-	161,30	163,40	163,50	161,30	163,40
111,60	111,60	111,50	130,40	130,50	130,50	129,70	130,50
-	-	-	121,50	121,50	121,50	119,30	121,50
-	-	-	150,50	150,40	150,40	148,30	150,40
-	-	-	144,40	144,50	144,50	144,50	144,40
123,90	123,20	123,20	153,80	154,50	154,50	154,40	154,50
169,30	171,40	171,50	167,80	171,50	171,50	170,70	170,70

-	-	-	-	-	-	-	-
149,40	149,40	149,50	149,40	149,50	149,50	148,00	149,40
105,80	106,40	106,50	106,50	106,50	106,50	142,80	106,40
-	-	-	133,30	135,50	135,50	133,90	135,50
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	139,50	139,40	139,50	139,50	139,50
173,50	173,50	173,50	169,10	173,40	173,50	172,70	173,40
151,40	150,80	150,80	151,50	151,50	151,50	148,60	151,40
-	-	-	-	-	-	-	-
140,80	140,80	140,80	141,40	141,40	141,40	139,20	141,40
-	-	-	-	-	-	-	-
116,40	114,30	116,40	113,60	116,50	116,50	-	116,40
-	-	-	-	-	-	-	-
118,20	120,40	120,50	116,10	120,40	120,40	119,80	120,40
120,40	120,50	120,50	-	120,40	120,40	119,70	120,40
-	-	-	176,60	179,50	179,50	177,30	179,40
-	-	-	-	-	-	-	-
133,70	134,40	134,50	130,80	134,40	134,50	134,50	134,40
162,40	162,40	162,50	161,80	162,50	162,50	158,80	162,40
145,70	145,80	145,80	146,40	146,40	146,50	144,30	146,50
158,80	159,50	159,50	157,20	159,40	159,50	158,80	159,50
166,50	166,40	166,50	162,10	166,40	166,50	165,80	166,40
-	-	-	-	-	-	-	-
160,30	162,40	162,50	162,40	162,50	162,50	160,90	162,50
-	-	-	154,40	154,50	154,50	153,70	154,40
136,40	136,50	136,40	-	136,40	136,50	136,40	136,40
132,30	134,40	134,50	128,60	134,50	134,50	133,70	134,50
127,80	127,10	127,10	127,10	130,80	131,40	130,80	131,40
165,90	167,40	167,40	167,40	167,50	167,40	163,80	167,40
-	-	-	-	-	-	-	-
153,50	153,50	153,50	151,90	153,40	153,50	153,50	153,40
-	-	-	125,40	125,50	125,50	121,80	125,50
144,70	144,70	145,50	144,80	145,50	145,50	145,40	145,50
174,30	175,70	175,80	175,70	176,40	176,40	170,60	176,50
160,80	161,40	161,40	160,80	161,50	161,50	161,50	161,50
169,70	170,40	170,50	169,80	170,40	170,50	169,80	169,70
122,80	123,50	123,50	121,30	123,50	123,50	123,40	123,50
160,80	161,40	161,40	154,90	161,50	161,50	160,70	161,50
-	-	-	-	-	-	-	-
122,70	123,40	123,50	123,40	123,40	123,50	123,40	123,50
146,70	147,50	147,50	146,90	147,40	147,50	143,80	147,50
174,70	175,40	175,50	174,70	175,50	175,50	174,80	175,50
123,80	127,40	127,40	126,70	127,50	127,50	125,30	127,40
162,90	163,70	164,50	163,00	164,50	164,50	162,20	164,40
116,30	116,30	117,60	120,70	121,40	121,50	119,30	121,40

163,00	163,80	164,50	163,80	164,50	164,50	163,80	164,40
-	-	-	-	-	-	184,60	-
145,80	145,80	145,80	140,60	146,50	146,50	145,70	146,50
166,80	169,80	170,50	170,40	170,50	170,50	168,20	170,40
114,90	115,60	116,40	120,80	121,50	121,40	120,80	121,50
-	-	-	140,10	144,50	144,50	143,00	144,40
172,40	172,40	172,50	170,30	172,40	172,40	171,70	172,50
152,80	153,50	153,50	151,30	153,40	153,50	153,50	153,50
122,10	122,10	122,10	124,20	126,40	126,50	125,70	126,50
132,30	134,50	134,50	128,70	133,70	134,50	132,30	134,50
154,80	154,80	155,50	151,10	155,50	155,50	153,30	155,40
160,30	162,50	162,50	162,50	162,50	162,50	161,80	162,40
-	-	-	-	-	-	-	-
127,80	127,80	128,50	126,20	128,50	128,50	127,80	128,50
174,70	175,50	175,50	173,30	175,50	175,50	174,70	175,50
119,40	119,40	119,40	140,60	143,40	143,50	142,80	143,50
120,20	121,70	121,80	-	122,40	122,50	120,20	122,40
-	-	-	-	-	-	-	-
162,50	162,50	162,50	160,30	161,80	162,50	158,80	162,40
169,90	171,50	171,50	169,30	171,50	171,50	170,80	171,40
147,50	147,50	147,50	143,10	147,40	147,50	147,40	147,40
129,80	129,80	128,30	131,20	133,40	133,40	129,80	133,50
-	-	-	-	-	-	-	-
171,40	171,40	171,50	169,30	171,40	171,50	167,10	171,40
127,40	127,40	127,40	121,60	127,40	127,40	125,20	127,40
148,00	149,40	149,50	146,60	149,50	149,50	149,50	149,40
-	-	-	122,30	124,50	124,50	120,80	124,50
119,20	119,90	119,90	147,60	150,50	150,50	147,50	150,40
-	-	-	-	-	-	-	-
158,40	158,40	158,50	157,70	158,50	158,40	157,70	158,40
126,70	126,70	127,40	125,30	127,50	127,50	126,00	127,50
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
144,90	145,70	146,80	142,10	146,50	146,50	146,50	146,40
-	-	-	-	-	-	-	-
147,80	148,50	148,50	147,70	148,40	148,50	148,50	148,40
-	110,80	111,50	126,80	130,40	130,40	129,70	130,50
163,30	163,30	164,70	164,70	165,40	165,40	165,50	165,40
167,80	167,80	168,50	162,60	168,40	168,50	167,70	168,40
157,70	158,40	158,50	157,70	157,80	158,40	154,10	158,40
163,30	163,30	164,70	163,30	165,40	165,50	164,70	165,50
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
139,00	139,70	140,40	140,40	140,50	140,40	138,90	140,50
114,40	113,70	114,50	110,80	113,70	114,50	113,80	114,40
159,40	159,40	159,50	150,00	159,40	159,50	159,50	159,40

140,70	140,70	140,80	139,30	141,50	141,50	139,30	141,40
160,80	160,80	161,40	160,70	161,40	161,50	161,40	160,70
-	-	-	-	-	-	-	-
108,90	108,20	108,20	177,30	179,40	179,50	179,50	179,50
174,80	175,40	175,50	173,20	174,80	175,50	173,30	175,40
154,70	154,80	154,70	153,20	155,50	155,40	154,70	155,50
-	-	-	158,30	163,50	163,50	161,20	163,40
141,60	-	-	-	-	-	164,10	-
124,30	124,30	125,20	129,40	129,50	129,40	127,30	129,50
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	128,30	130,40	130,40	130,40	130,40
174,70	175,40	175,50	173,30	175,50	175,50	174,80	175,40
133,80	134,40	134,40	132,30	134,50	134,50	133,00	134,50
172,50	172,40	172,40	170,30	172,40	172,50	171,70	172,40
127,40	126,70	127,40	-	127,40	127,50	127,40	127,50
127,20	123,60	125,20	127,30	129,40	129,50	125,80	129,40
160,00	161,40	161,40	154,20	161,40	161,40	155,60	161,40
115,10	116,60	116,60	133,30	135,50	135,50	134,70	135,40
-	-	-	-	-	-	-	-
127,10	127,20	127,10	129,30	130,70	131,50	129,20	131,40
127,80	127,10	127,10	125,60	131,50	131,50	130,80	131,50
-	-	-	-	-	-	-	-
155,80	156,50	156,50	152,10	156,40	156,50	156,40	156,40
131,70	132,40	132,40	130,30	132,40	132,40	131,70	132,40
150,70	150,80	152,00	145,70	151,40	151,50	150,80	151,50
-	-	-	-	-	-	-	-
158,40	158,40	158,50	154,80	158,50	158,50	158,40	158,40
-	-	-	-	125,50	125,40	125,40	125,40
163,30	164,70	165,10	161,80	165,40	165,50	165,40	165,50
153,40	153,40	153,50	147,70	153,50	153,50	152,80	153,50
157,40	157,40	157,40	155,20	157,50	157,50	153,10	157,40
175,70	175,80	175,80	176,40	176,50	176,50	173,60	176,40
152,80	152,80	153,50	147,00	153,40	153,50	149,80	152,70
116,60	116,60	116,60	135,50	135,40	135,50	133,30	135,40
171,90	173,40	173,50	166,10	173,50	173,50	173,40	173,50
167,80	168,50	168,50	168,50	168,40	168,50	166,30	168,50
168,20	170,40	170,50	170,40	170,40	170,40	168,30	170,40
160,70	-	-	-	-	-	-	-
127,00	128,50	128,50	126,90	128,40	128,50	124,10	128,50
122,00	123,40	123,50	112,60	123,50	123,50	121,30	123,50
109,60	108,90	108,20	178,80	179,50	179,50	175,80	179,40
169,30	171,40	171,50	171,50	171,50	171,50	170,70	171,50
163,30	163,30	164,70	165,50	165,50	165,50	159,60	165,40
-	-	-	159,10	162,70	163,50	163,50	163,40
-	-	-	-	-	-	-	-
174,70	175,40	175,40	169,70	175,40	175,50	173,30	175,50

151,40	150,80	150,80	150,80	151,40	151,40	148,60	151,40
-	-	-	158,30	160,40	160,50	159,80	160,40
-	-	-	137,40	137,40	137,50	136,80	137,40
-	-	-	-	-	-	-	-
122,10	122,20	122,10	122,20	126,50	126,50	122,80	126,40
-	-	-	167,20	169,40	169,50	165,80	169,40
-	-	127,20	131,40	131,40	131,40	129,30	131,40
147,30	149,40	149,40	147,90	149,50	149,50	147,30	149,50
122,10	122,10	122,10	124,30	125,70	126,50	125,00	126,40
169,80	170,40	170,50	163,20	170,40	170,50	169,70	170,50
121,80	120,30	120,40	123,90	125,50	125,50	123,30	125,50
144,70	144,70	144,70	144,70	145,40	145,50	144,70	145,50
-	-	-	-	130,40	130,50	128,30	130,50
145,20	147,50	147,50	144,50	147,40	147,50	147,50	147,40
143,30	145,50	145,50	139,70	145,40	145,50	143,30	145,40
162,40	162,50	162,50	161,70	162,40	162,40	162,50	162,40
121,80	121,80	121,80	116,60	122,40	122,40	121,80	122,40
114,30	115,20	115,10	113,60	119,40	119,50	119,50	119,40
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	137,40	137,50	137,50	133,80	137,40
140,80	140,80	140,80	137,10	141,40	141,50	139,30	141,40
-	-	-	142,80	143,40	143,50	142,70	143,50
170,80	171,50	171,50	170,00	171,40	171,50	169,30	171,50
120,70	122,10	122,10	125,70	126,50	126,50	122,80	126,40
153,40	153,40	153,50	153,50	153,40	153,50	151,30	153,50
169,70	170,40	170,50	165,40	170,40	170,50	169,70	170,40
-	-	-	-	-	-	-	-
114,50	114,40	114,50	112,30	114,50	114,40	112,30	114,40
143,30	144,70	145,50	143,30	145,40	145,50	145,50	145,40
126,80	126,70	127,40	125,30	127,40	127,50	126,00	127,40
151,70	151,70	152,40	151,00	152,40	152,50	148,80	152,50
-	-	-	-	-	-	-	-
148,70	149,40	149,50	140,00	149,40	149,50	147,30	149,40
170,40	170,40	170,50	170,40	170,40	170,50	170,50	170,40
-	-	-	135,30	137,40	137,50	131,60	137,50
-	-	-	-	-	-	-	-
133,70	134,40	134,50	130,80	134,50	134,50	133,00	134,40
171,40	171,40	171,50	171,40	171,40	171,50	170,80	171,50

Série 15	Série 16	Série 17	Série 18	Série 19	Série 20	Série 21	Série 22
113,50	112,80	108,40	109,10	113,50	112,70	113,50	112,80
164,50	163,70	163,80	164,50	155,00	164,40	164,50	160,10
130,40	-	-	-	128,90	129,80	130,50	129,80
162,40	156,60	162,50	162,50	160,30	161,70	162,50	160,30
166,50	162,80	166,40	166,50	158,50	166,50	165,80	165,80

150,40	-	-	-	143,20	150,40	150,50	148,80
-	-	-	-	-	-	-	-
168,50	164,60	167,80	168,50	166,90	168,50	168,50	159,00
150,40	-	-	-	146,10	149,80	150,50	148,30
-	-	-	-	-	-	-	141,20
130,50	-	-	-	129,00	130,50	130,50	121,60
165,50	164,70	164,70	164,70	164,80	164,70	165,50	161,80
159,50	159,40	159,40	159,50	158,80	159,40	158,80	158,80
140,50	139,00	140,40	140,40	129,50	139,80	139,70	132,50
159,50	154,40	159,40	159,50	155,80	159,40	159,50	159,50
120,40	119,80	120,40	120,50	-	119,70	120,40	-
153,40	153,50	153,40	153,50	151,20	153,50	153,40	153,40
163,50	-	-	-	162,00	162,70	162,80	162,70
130,50	-	111,60	111,60	128,30	128,30	130,40	123,10
121,40	-	119,30	-	120,00	120,70	121,40	120,80
150,50	-	-	-	148,30	149,70	149,80	146,80
144,50	-	-	-	140,10	144,40	144,40	144,50
154,50	125,30	123,20	123,20	154,40	154,40	154,40	150,10
171,50	170,70	171,40	171,50	169,30	171,40	171,40	167,10
-	-	-	-	-	-	-	-
149,40	149,40	149,40	149,40	141,50	149,40	149,50	148,80
106,50	161,70	106,40	106,40	105,70	106,40	106,40	161,80
135,40	120,20	-	-	127,40	134,70	135,40	134,70
-	-	-	-	-	-	-	135,90
-	-	-	-	-	-	-	-
139,40	138,80	138,80	-	-	139,50	139,50	-
173,40	172,70	173,40	173,50	172,00	172,80	173,40	164,00
151,50	150,80	150,80	150,80	148,60	150,80	151,50	144,20
-	-	-	-	-	-	-	-
141,40	139,30	140,80	140,80	137,10	141,40	141,50	138,60
-	-	-	-	-	-	-	-
116,50	-	116,40	116,40	116,50	116,40	116,40	114,30
-	-	-	-	-	-	-	-
120,50	114,70	120,40	120,50	119,70	119,80	120,40	120,40
120,40	118,90	120,40	120,50	-	120,50	120,50	119,00
178,70	-	-	-	171,50	178,80	179,50	177,30
-	-	-	-	-	-	-	-
134,40	132,30	133,00	134,50	126,40	134,40	134,50	134,40
162,50	161,70	162,40	163,00	161,00	161,70	162,40	161,70
145,80	145,80	145,70	145,80	145,80	145,80	146,40	146,40
159,50	159,40	159,50	159,50	150,00	159,50	159,40	153,70
166,40	165,70	166,40	166,50	164,30	166,40	166,40	165,70
-	-	-	-	-	-	-	-
162,40	162,40	161,70	162,50	160,30	161,80	162,50	160,30
154,50	-	-	-	153,70	153,80	154,50	154,50
136,40	-	-	136,40	-	136,50	136,40	-

134,50	132,30	133,80	134,50	129,30	134,50	134,40	132,30
131,50	123,50	127,10	127,20	131,40	131,40	130,80	130,80
167,40	165,20	167,40	167,50	163,10	167,40	167,50	163,80
-	-	-	-	-	-	-	-
153,50	152,70	153,40	153,40	151,30	152,80	152,80	152,80
125,40	-	-	-	-	125,40	125,50	124,70
145,40	143,30	145,50	145,50	143,30	144,70	145,40	-
176,50	174,30	175,70	175,80	174,30	176,40	176,40	174,20
161,50	161,40	161,40	161,40	161,50	160,70	161,50	157,80
170,40	170,40	170,50	170,50	168,30	169,80	170,50	168,20
123,50	123,40	122,80	123,50	-	123,50	122,70	-
161,50	159,30	160,80	161,40	157,10	160,80	161,40	160,70
-	-	-	-	-	-	-	-
123,40	121,30	122,80	123,50	122,70	123,40	123,50	119,80
147,50	141,70	147,50	147,40	138,70	146,80	147,50	145,30
175,40	175,40	175,50	175,50	173,30	175,40	175,40	171,80
127,50	126,70	127,40	127,40	123,80	127,40	127,50	126,70
164,40	164,50	164,50	164,50	158,60	164,40	164,40	160,10
121,50	113,50	115,60	116,30	120,80	121,40	121,40	115,60
164,40	108,40	164,50	164,50	162,30	164,40	164,50	-
-	-	-	-	-	-	-	-
146,50	-	145,80	145,80	144,20	146,40	146,40	137,00
170,50	169,70	169,70	170,50	164,60	170,40	170,40	168,30
121,50	115,60	115,60	116,30	119,30	120,00	121,50	119,20
144,50	-	-	-	144,40	143,80	144,40	137,10
172,40	165,10	172,50	172,50	170,30	172,50	172,60	171,80
153,40	152,80	153,40	153,50	149,10	152,70	153,50	145,50
126,50	-	122,10	122,10	125,70	124,20	125,50	122,80
134,50	134,40	134,40	134,40	130,80	134,40	133,80	132,30
155,50	154,80	153,20	155,50	155,50	155,40	155,40	149,70
162,50	160,30	162,40	162,50	155,10	162,40	162,40	160,30
-	-	-	-	-	-	-	-
128,50	124,80	127,80	128,50	126,20	127,80	128,50	122,70
175,40	175,50	173,20	175,50	170,40	174,80	175,50	174,80
143,50	117,30	119,40	119,40	141,90	143,40	143,40	138,40
122,50	120,30	121,70	121,80	120,30	121,70	122,50	121,70
-	-	-	-	-	-	-	-
162,50	158,80	162,40	162,50	158,10	162,40	162,50	157,40
171,50	170,70	170,70	171,50	170,00	170,80	170,70	170,70
147,40	143,80	147,50	147,40	146,80	147,40	146,70	146,70
133,50	126,20	127,60	128,30	127,60	132,70	133,50	131,30
-	-	-	-	-	-	-	-
171,50	171,50	171,50	171,50	170,80	171,40	171,50	165,70
127,50	121,60	127,40	127,40	125,20	127,40	127,40	125,30
149,50	143,60	149,50	149,40	146,60	148,70	149,50	149,40
124,40	-	-	-	122,90	124,40	124,40	119,30

150,50	120,70	119,20	119,90	141,70	149,70	150,50	148,20
-	-	-	-	-	-	-	-
158,50	154,10	158,40	158,50	146,80	158,40	158,40	156,30
127,40	127,50	127,40	127,40	126,70	127,40	127,40	126,70
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
146,50	145,70	145,80	145,80	137,70	146,40	146,40	142,10
-	-	-	-	-	-	-	-
148,50	147,00	148,50	148,50	147,80	148,50	148,50	144,20
130,50	115,20	111,50	111,50	128,30	129,80	130,50	127,60
165,40	163,30	164,70	164,70	161,10	165,50	165,40	165,50
168,40	161,20	168,50	168,50	167,70	168,40	168,50	166,90
158,50	157,70	158,50	158,50	157,70	157,70	158,50	-
165,40	161,10	164,70	164,70	163,20	165,40	165,50	164,70
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
140,50	136,10	140,40	140,40	136,10	140,40	140,40	136,80
114,50	106,40	114,40	114,50	114,50	114,40	114,50	106,50
159,50	158,80	159,50	159,50	148,50	159,40	158,80	153,60
141,50	107,30	140,80	140,80	140,30	141,50	141,40	133,50
161,50	160,80	161,40	161,40	156,30	161,50	161,60	157,80
-	-	-	-	-	-	-	-
179,50	108,20	108,20	108,20	175,10	179,50	179,50	179,40
175,50	167,50	175,50	175,40	175,50	174,70	175,40	140,50
155,50	153,30	154,80	155,50	150,40	154,70	155,40	154,80
163,50	-	-	-	156,20	163,40	163,40	161,20
-	-	-	-	-	-	-	185,20
129,40	125,80	124,40	125,20	129,40	129,50	129,40	121,50
-	-	-	-	-	-	-	-
130,40	-	-	-	122,50	130,40	129,70	128,20
175,50	171,10	175,50	175,50	166,00	175,50	175,90	174,70
134,50	134,40	134,40	134,50	133,70	132,30	134,80	132,90
172,50	172,40	172,50	172,50	172,40	172,50	172,50	168,10
127,50	125,30	127,40	127,40	126,70	127,40	127,50	127,50
129,50	-	124,40	125,20	128,00	129,40	129,40	127,30
161,50	160,80	161,40	161,40	161,50	160,70	161,50	159,30
135,40	115,10	117,30	117,30	129,60	134,70	135,50	134,70
-	-	-	-	-	-	-	-
131,50	123,40	127,10	127,10	-	130,70	131,50	124,10
131,50	127,10	127,10	127,10	130,00	131,40	131,50	131,50
-	-	-	-	-	-	-	-
156,40	156,50	156,40	156,50	150,60	156,40	156,40	149,20
132,40	131,70	132,40	132,40	128,80	132,50	132,40	127,30
151,40	151,50	150,80	150,80	144,20	151,40	150,80	150,80
-	-	-	-	-	-	-	-
158,40	157,70	158,50	158,50	158,40	157,70	158,40	152,60

125,50	-	-	-	-	125,40	125,50	-
165,40	164,70	165,30	164,70	164,70	164,80	165,50	164,70
153,40	151,20	153,40	153,50	151,30	152,70	153,50	152,70
157,40	155,30	156,80	157,40	151,60	157,40	157,40	156,70
176,40	168,50	176,30	175,80	176,40	175,80	176,40	173,50
153,40	151,20	153,40	153,50	150,60	152,80	153,40	149,80
135,50	116,60	117,30	117,30	133,30	134,70	135,50	129,60
173,50	172,70	173,40	173,50	167,60	172,70	173,50	167,60
168,50	166,30	167,80	168,50	165,60	168,50	168,50	167,80
170,50	168,30	170,50	170,40	168,20	170,40	170,40	164,60
-	-	-	-	-	-	-	-
128,50	-	128,50	128,50	127,80	128,40	128,50	127,70
123,40	119,80	123,40	123,50	122,00	122,70	123,40	121,90
179,50	116,10	108,20	108,20	170,00	178,70	179,50	173,60
171,50	169,30	171,40	171,40	170,70	170,70	171,50	167,80
165,50	159,70	164,70	164,70	161,10	165,40	165,40	162,50
163,50	-	-	-	156,20	163,50	162,80	161,20
-	-	-	-	-	-	-	178,40
175,40	175,40	175,40	175,50	167,50	174,80	175,40	175,50
151,40	151,40	150,80	150,80	149,30	150,70	151,50	147,80
160,40	-	-	-	158,30	159,70	160,40	156,80
137,50	-	-	-	135,30	136,70	137,50	136,80
-	-	-	-	-	-	-	186,70
126,50	120,60	122,10	122,10	120,70	125,80	126,40	118,50
169,50	-	-	-	168,80	169,50	169,50	167,30
130,80	127,80	-	127,20	130,80	129,30	131,40	130,70
149,40	148,70	149,40	149,40	148,70	148,80	149,40	142,10
126,50	122,10	122,10	122,10	117,70	125,80	126,40	124,30
170,40	169,70	170,50	170,50	167,60	170,40	170,50	162,50
125,50	117,50	120,40	120,30	121,80	125,40	125,50	118,20
145,40	143,30	145,50	145,50	143,30	145,40	145,40	144,70
130,40	-	-	-	128,20	130,40	130,40	-
146,70	146,80	147,40	147,40	145,30	147,40	147,50	147,40
145,50	138,10	145,50	144,70	143,20	145,50	145,40	144,00
162,40	161,80	161,70	162,40	161,00	161,70	162,50	160,20
122,40	121,80	121,80	121,80	118,20	122,40	122,50	121,80
119,50	113,60	115,10	115,20	114,40	117,30	119,40	118,70
-	-	-	-	-	-	-	-
137,40	-	-	-	136,70	136,70	137,50	135,30
141,50	140,70	140,70	140,80	140,70	140,70	141,50	135,70
143,40	-	-	-	141,30	143,50	143,40	139,80
171,40	170,80	171,40	171,50	170,80	171,40	171,40	169,30
126,40	124,30	122,80	122,10	125,70	125,00	126,40	126,40
153,40	149,10	152,80	153,50	151,90	152,80	153,50	151,20
170,40	170,50	169,70	170,50	170,50	170,50	170,50	169,70
-	145,30	-	-	-	-	-	-

114,40	112,90	113,80	114,50	111,60	114,40	114,50	111,50
145,40	144,70	144,70	145,50	143,20	145,40	145,50	141,10
127,40	125,30	125,20	127,40	123,10	126,80	127,50	120,20
152,40	148,10	152,50	152,50	152,50	152,50	152,40	150,30
-	-	-	-	-	-	-	-
149,40	149,50	149,40	149,40	145,80	148,70	149,50	132,80
170,50	168,20	169,70	170,50	170,40	170,50	170,40	168,30
137,50	-	-	-	137,40	137,50	137,40	136,70
-	-	-	-	-	-	-	-
134,50	132,30	134,50	134,50	133,80	134,50	134,50	133,70
171,40	170,80	171,50	171,50	167,10	170,80	171,50	169,30

Série 23	Série 24	Série 25	Série 26	Série 27
112,80	113,40	107,60	109,10	109,10
164,40	164,50	162,30	163,70	164,50
129,70	130,40	-	-	-
162,50	162,40	162,40	160,30	162,50
165,70	166,40	165,70	166,50	166,40
150,50	150,50	-	-	-
-	-	-	-	-
167,70	168,50	164,10	166,30	168,50
149,70	150,40	-	-	-
-	-	-	-	-
129,80	130,40	-	-	-
165,40	165,50	164,70	164,70	164,70
159,50	159,50	158,70	159,50	159,40
140,40	140,40	136,80	139,70	140,40
159,30	158,70	157,90	158,70	159,50
120,40	120,50	-	-	120,40
152,70	153,50	148,40	153,40	153,40
163,40	163,50	-	-	-
130,40	130,40	112,30	112,30	111,60
121,40	120,80	-	-	-
149,70	150,40	-	-	-
144,50	144,50	-	-	-
154,40	154,20	121,70	121,00	123,20
171,50	171,40	170,70	170,70	171,40
-	-	-	-	-
149,40	149,50	148,00	148,80	149,40
106,40	106,40	105,80	106,50	106,40
134,70	135,40	-	118,70	-
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
138,80	139,40	-	-	-
173,50	173,40	172,80	173,50	173,40

151,40	151,50	150,00	147,80	150,80
-	-	-	-	-
140,70	141,40	140,80	140,80	140,80
-	-	-	-	-
115,70	116,40	114,20	116,40	116,40
-	-	-	-	-
120,40	120,50	118,30	120,40	120,40
119,70	120,40	118,90	120,50	120,50
178,70	179,40	-	-	-
-	-	-	-	-
133,70	134,40	132,30	134,50	134,40
162,50	162,40	158,20	160,30	162,40
145,70	146,40	146,50	144,30	145,80
159,50	159,50	157,30	159,50	159,40
166,40	166,50	164,30	165,70	166,40
-	-	-	-	-
162,50	162,50	160,30	161,70	162,40
153,70	154,40	-	-	-
136,40	136,40	-	136,50	136,40
134,40	134,50	132,30	133,80	134,40
131,40	130,70	124,20	127,80	127,10
166,70	167,40	163,80	167,40	167,50
-	-	-	-	-
153,40	153,50	152,70	151,20	153,50
125,40	125,50	-	-	-
144,70	145,40	141,10	145,50	145,50
176,40	176,50	171,40	175,80	175,80
161,40	161,40	157,10	161,40	161,40
170,50	170,40	169,70	170,40	170,50
122,70	122,80	123,50	122,80	123,40
160,70	161,40	160,00	159,20	161,40
-	-	-	-	-
122,70	123,40	122,00	122,80	123,50
146,80	147,40	113,20	146,80	147,50
174,70	175,40	174,70	173,90	175,40
127,40	127,50	123,10	127,40	127,40
164,50	164,40	164,50	164,50	164,50
121,40	121,40	116,30	114,90	115,60
164,50	164,40	162,30	163,70	164,50
-	-	-	-	-
145,70	146,40	144,30	145,80	145,70
169,70	170,40	169,80	169,70	170,40
120,80	121,40	115,60	115,60	116,40
144,40	144,50	-	-	-
171,70	171,70	169,60	172,40	172,40
152,70	153,40	153,40	151,30	153,40

126,50	126,40	120,60	120,60	122,10
133,80	134,50	130,10	134,40	134,40
155,40	155,40	154,80	154,70	155,50
162,40	162,40	156,60	162,40	162,50
-	-	-	-	-
127,80	128,40	120,50	127,80	127,80
175,50	175,40	173,90	175,50	175,40
142,70	143,50	120,20	118,00	118,00
122,50	121,70	120,20	121,70	121,70
-	-	-	-	-
161,80	162,40	158,80	162,40	162,50
170,70	171,40	170,80	171,50	171,50
147,40	147,50	147,40	147,40	147,40
132,70	133,40	128,30	129,80	128,30
-	-	-	-	-
171,50	171,40	170,80	171,40	171,50
126,70	127,40	126,80	125,30	127,40
149,40	149,50	147,30	148,80	149,40
122,20	124,40	-	-	-
149,80	150,50	119,20	119,20	119,20
-	-	-	-	-
158,40	158,40	157,00	158,40	158,50
126,70	127,40	124,50	126,70	127,40
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
145,70	146,50	144,20	145,70	145,80
-	-	143,50	-	-
148,40	148,50	144,10	146,30	148,50
130,40	130,40	-	110,80	111,50
165,40	165,40	164,80	164,70	164,70
168,40	168,40	165,60	168,50	168,50
158,40	158,40	158,40	157,70	158,50
164,70	165,40	162,60	163,90	164,70
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
140,40	140,40	138,20	140,40	140,40
114,40	114,50	112,20	114,40	114,40
158,70	158,80	155,10	158,80	159,50
140,70	140,80	139,30	140,80	140,80
160,80	161,40	159,30	161,40	161,40
-	-	-	-	-
178,70	179,50	111,80	108,10	108,80
175,50	175,40	175,50	175,40	175,50
155,40	155,50	154,70	153,30	155,50
163,40	163,50	-	-	-
125,60	-	-	-	-

128,80	129,50	123,60	123,60	125,20
-	-	-	-	-
130,50	130,40	-	-	-
174,00	175,40	169,60	175,40	175,40
134,40	134,40	-	134,40	134,50
172,50	172,50	171,80	170,30	172,40
126,70	127,40	125,30	125,30	126,70
128,70	129,40	124,30	122,10	124,40
161,50	161,50	159,30	161,50	161,40
134,70	135,40	110,00	116,60	117,30
-	-	-	-	-
131,40	131,40	123,40	128,60	127,10
131,40	131,40	129,30	128,60	127,80
-	-	-	-	-
156,40	156,50	152,80	156,50	156,50
132,50	132,40	130,30	132,40	132,40
151,50	151,40	150,80	147,80	150,80
-	-	-	-	-
157,80	158,50	155,50	157,70	158,40
124,70	125,40	-	-	-
165,50	165,40	164,70	164,70	164,70
153,50	153,40	151,30	153,50	153,40
157,40	157,40	153,80	156,80	157,40
176,50	176,40	176,40	175,70	175,80
152,80	153,50	152,70	153,50	153,40
135,40	135,50	112,20	116,60	117,30
173,50	173,50	173,40	173,40	173,50
168,40	168,40	162,60	168,50	168,50
170,50	170,40	169,70	169,70	170,50
-	-	-	-	-
127,70	128,50	128,40	128,50	128,50
122,70	122,70	122,80	123,40	123,40
179,50	179,50	108,20	108,20	108,20
171,40	170,70	171,50	171,40	171,50
165,40	165,50	161,10	164,70	164,70
162,70	163,40	-	-	-
-	-	-	-	-
174,80	175,40	171,20	175,40	175,50
150,70	151,50	145,70	150,80	150,80
160,40	160,40	152,40	-	-
136,70	137,40	-	-	-
-	-	-	-	-
126,40	126,40	113,40	120,60	122,10
169,40	168,80	-	-	-
130,70	131,40	-	127,80	127,20
149,40	149,40	149,40	149,40	149,40

126,50	126,50	117,00	120,70	122,10
170,40	170,40	166,10	170,40	170,40
125,40	125,40	119,60	119,60	120,30
145,50	145,50	144,80	145,50	144,70
129,80	130,40	-	-	-
147,50	146,70	146,80	146,80	147,50
144,70	145,40	144,80	145,50	145,50
161,80	162,50	162,50	161,70	162,40
121,70	122,40	118,10	119,50	121,80
119,50	119,40	107,80	115,10	115,10
-	-	-	-	-
137,50	137,40	-	-	-
141,40	141,50	141,40	139,30	140,80
142,70	143,50	-	-	-
171,40	171,50	170,70	171,50	171,40
125,70	126,50	117,00	119,20	122,80
153,50	153,40	151,90	153,40	153,40
170,40	170,40	168,30	169,80	170,40
-	-	-	-	-
113,80	114,40	113,80	113,70	114,40
145,50	145,40	142,60	145,50	144,70
127,40	127,50	126,80	125,30	126,70
152,40	152,50	149,60	152,40	152,50
-	-	142,60	-	-
149,40	149,50	147,30	149,40	149,40
169,70	170,40	170,40	170,50	170,40
137,40	137,50	-	-	-
-	-	-	-	-
134,40	134,50	-	130,10	134,40
171,40	171,40	171,50	171,50	171,40

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Relatório de Informações Gerenciais / março de 2015. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Z_IG_Mar_2015-170615.pdf. Acesso em: jun/2016

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Banco De Informações De Geração. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: mar/2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Banco De Informações De Geração. Fontes de Energia. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>. Acesso em: mar/2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Energia Eólica. 2005. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf). Acesso em: out/ 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Evolução da energia eólica no Brasil - ANEEL Essencial. 2016a. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aneel-essencial/-/asset_publisher/c4M6OIOMkLad/content/evolucao-da-energia-eolica-no-brasil?inheritRedirect=false. Acesso em: out/ 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas - Informações Técnicas. 2016b. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/proinfa-programa-de-incentivo-as-fontes-alternativas-de-energia-eletrica/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Finformacoes-tecnicas%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2%26_101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E_advancedSearch%3Dfalse%26_101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E_keywords%3D%26_101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E_delta%3D12%26p_r_p_564233524_resetCur%3Dfalse%2

6_101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E_cur%3D2%26_101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E_andOperator%3Dtrue. Acesso em: out/2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. Visão Geral do Setor Elétrico. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>. Acesso em: mar/2016.

Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – Abradee. Visão Geral do Setor. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor>. Acesso em: jun/2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA – ABEEÓLICA. Nosso Setor. ANO 2013 ou 2015?. Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>. Acesso em: nov/2016.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. Tipos de Leilões - Entenda como funciona um leilão. Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/tipos_leiloes_n_logado?_afLoop=698443184483202#%40%3F_afLoop%3D698443184483202%26_adf.ctrl-state%3D1cil8f9vyj_49. Acesso em: nov/2016.

CASA CIVIL – Subchefia Para Assuntos Jurídicos. Lei Nº 8.987 de 13 de Fevereiro de 1995. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8987cons.htm. Acesso em: mar/2016.

CASA CIVIL – Subchefia Para Assuntos Jurídicos. Lei Nº 9.074 de 7 de Julho de 1995. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9074cons.htm#art3. Acesso em: mar/2016.

CASA CIVIL – Subchefia Para Assuntos Jurídicos. Lei Nº 10.848 de 15 de Março de 2004. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm. Acesso em: mar/2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Balanço Energético Nacional 2015. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf. Acesso em: jun/2016

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Informe à Imprensa: Leilão de Energia de Reserva – Eólica. 2009b. Disponível em: http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20091214_1.pdf. Acesso em: out/2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Nota Técnica PRE 01/2009-r0. Proposta para a Expansão da Geração Eólica no Brasil. 2009b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%A3o%20de%20E%C3%B3lica%202009/NT-%20Eolica%20EPE-PRE01-2009-R1.pdf>. Acesso em: out/2016.

FREITAS FILHO, P. J. Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena. 1. Ed. Florianópolis: Visual Books, 2001.

GUERCI, Eric; SAPIO, Alessandro. High Wind Penetration In An Agent-Based Model Of The Electricity Market. *Revue de l'OFCE*, n. 5, p. 415-447, 2012. JARQUE, C. M.

BERA, A. K. Os testes eficientes para a normalidade, homocedasticidade e independência série de resíduos da regressão. *Economics Letters* (3): 255-259 doi : 10.1016 / 0165-1765 (80) 90024-5, 1980.

JUNIOR, A. R. C.; CAMARINHA, D. A. M. Algoritmo K-MEANS. Universidade de São Paulo. Instituto de Matemática e Estatística. São Paulo, SP. Trabalho apresentado à disciplina Aprendizagem Computacional.

KLEMPERER, P. Auction Theory: A Guide To The Literature. *Journal Of Economic Surveys*, v. 13, n. 3, p. 227-286, 1999.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial On Agent-Based Modelling And Simulation. *Journal Of Simulation*, v. 4, n. 3, p. 151-162, 2010.

MASILI, G. S. Metodologia e software para simulação de leiloes de energia elétrica do mercado brasileiro. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP: Dissertação de Mestrado, 2004

PALOMINO, J. M. G. Formação de Preço de Energia Elétrica Gerada por Biomassa no Ambiente de Contratação Livre Brasileiro: Uma Abordagem Computacional Baseada em Agentes. Universidade de São Paulo. Departamento de Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, SP. Dissertação de Mestrado, 2009.

REGO, E. E. Proposta de Aperfeiçoamento da Metodologia dos Leilões de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado: Aspectos Conceituais, Metodológicos e suas Aplicações. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. Tese de Doutorado. 2012.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. Inteligência Artificial. Rio de Janeiro, Elsevier Editora LTDA, 2004.

SAMUELSON, D. A. Agents Of Change: How Agent-Based Modeling May Transform Social Science. OR/MS Today. Vol 32. No 1. 2005. Disponível em: <http://www.orms-today.org/orms-2-05/fragents.html>. Acesso em: abr/2016

SAMUELSON, D. A.; MACAL, C. M. Agent-Based Simulation Comes of Age: Software opens up many new áreas of application. OR/MS Today. Vol 33. No 4. 2006. Disponível em: <http://www.orms-today.org/orms-8-06/agent.html>. Acesso em: abr/2016

SANTORO, M. C. Simulação de Sistemas de Produção: Introdução à Simulação – Notas de Aula da Disciplina Modelagem e Simulação de Sistemas de Produção. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2010.

SARTINI, Brígida Alexandre et al. Uma introdução à teoria dos jogos. II Bienal da SBM– Universidade Federal da Bahia, 2004. Disponível em <http://www.ime.usp.br/~rvicente/IntroTeoriaDosJogos.pdf>. Acesso em: nov/2015.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS DO SETOR ELÉTRICO – SIGEL. Disponível em: <http://sigel.aneel.gov.br/>. Acesso em: jun/2016

SOUZA, T. F. A simulação a eventos discretos como ferramenta de apoio à tomada de decisão em empresas do ramo de mineração: aplicação em uma unidade da Yamana Gold. 2009. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

WINSTON, W. L. Operations Research: Applications and Algorithms. 4 ed. California, 2003