

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

DAVID ANDERSON VEIGA GONÇALVES

SIMULADOR DE LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA NO MERCADO  
BRASILEIRO

NITERÓI, RJ

2017

DAVID ANDERSON VEIGA GONÇALVES

MATRÍCULA: M054.214.005

SIMULADOR DE LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA NO MERCADO  
BRASILEIRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Bruno Soares Moreira Cesar Borba, D. Sc.

Coorientador: Prof. Bruno Henriques Dias, D. Sc.

Niterói

2017

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

G635 Gonçalves, David Anderson Veiga  
Simulador de leilões de energia elétrica no mercado brasileiro /  
David Anderson Veiga Gonçalves. – Niterói, RJ : [s.n.], 2017.  
119 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de  
Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2017.  
Orientadores: Bruno Soares Moreira Cesar Borba, Bruno  
Henrique Dias.

1. Comercialização de energia elétrica. 2. Energia elétrica;  
aspecto econômico. 3. Leilão. 4. Aplicação web. I. Título.

CDD 338.4762131

DAVID ANDERSON VEIGA GONÇALVES

SIMULADOR DE LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA NO MERCADO  
BRASILEIRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Bruno Soares Moreira Cesar Borba, D. Sc. – Orientador  
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

---

Prof. Bruno Henriques Dias, D. Sc. – Coorientador  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

---

Prof. Vitor Hugo Ferreira, D. Sc.  
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

---

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D. Sc.  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

Niterói, RJ

2017

Dedico este trabalho à minha família, especialmente aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus pais e a minha família pelo apoio e ensinamentos que tive em minha vida.

Agradeço ao meu Orientador, professor Bruno Borba, pela dedicação, pela confiança e pelas preciosas orientações fornecidas.

Agradeço ao meu Coorientador, professor Bruno Dias, igualmente pela dedicação, confiança e orientações e por ter aceitado o desafio de me orientar neste trabalho.

Agradeço a todos os professores da UFF e da PUC-Rio, pelos conhecimentos transmitidos nas disciplinas que cursei e pelos conselhos dados.

Agradeço a todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense.

Aos amigos de trabalho Manuel Neto e Fabiano Sousa pelas dicas.

Agradeço à Universidade Federal Fluminense por mais uma vez ter me dado a oportunidade de receber um ensino de qualidade.

Obrigado a todos.

*“Se você acha que educação é cara, experimente a ignorância.”*

Frase atribuída ao Prof. Derek Curtis Bok.

## RESUMO

Com as transformações ocorridas no Setor Elétrico brasileiro a partir da década de 1990 mudaram drasticamente o modo como a energia elétrica é comercializada entre os diferentes agentes. Muito se deve à busca pela eficiência na cadeia produtiva do setor e à atração de empresas privadas como indutores de novos investimentos na infraestrutura energética no país que promoveram uma evolução nos desenhos do Mercado de Energia, visando também à modicidade tarifária. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema Web que simule a dinâmica dos leilões de energia existente do setor elétrico brasileiro, além de analisar o comportamento dos usuários, mediante simulações realizadas. De tal forma que esta simulação ocorra numa aplicação web desenvolvida como parte integrante do trabalho, onde são fornecidos parâmetros sobre o mercado referentes ao ambiente de comercialização regulado, reproduzindo a sistemática dos leilões de energia elétrica. Os usuários, que por sua vez são discentes do curso de graduação em engenharia elétrica da UFF, deverão tomar decisões econômicas, competindo entre si nos leilões ou optando pela contratação no Mercado Livre. Além dos resultados dos leilões foi feita uma avaliação sob o ponto de vista do aluno sobre a efetividade da simulação no seu aprendizado em relação a este conteúdo da disciplina.

**Palavras-chave:** Mercados de Energia Elétrica, Leilões de Energia, Comercialização de Energia Elétrica, Aplicação WEB.

## ABSTRACT

In the 90's, the changes that took place in the Brazilian electricity market changed considerably the way electricity is traded among the different agents. The main reasons for these modifications were the struggle for enhancing the efficiency in the electricity's chain and for attracting private companies to enable new investments in Brazil's energy infrastructure. Also, new energy market design was set to promote a fair tariff. The main objective of this thesis is to develop a web application that simulates the energy auction of existing capacity in the Brazilian market electric sector. Afterward, an analysis of the data generated by the simulation is provided. The system is driven by the auction's inputs provided by the system administrator which plays the role of an auctioneer, thus reproducing the procedures of the energy auctions. The users are electrical engineering undergraduate students at Fluminense Federal University that play the role of generation companies. During a simulation they must take economic decisions and compete among themselves for selling in the regulated wholesale market or trade energy through bilateral contracts. In addition to the results of the auction, an evaluation of the learning activity was made by a survey research.

**Keywords:** Electricity Markets, Energy Auctions, Energy Trading, WEB Application.

## SUMÁRIO

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | INTRODUÇÃO .....  | 1  |
| 2.     | MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA .....  | 5  |
| 2.1.   | Fundamentos econômicos.....   | 5  |
| 2.2.   | Graus de abertura dos mercados de energia .....   | 9  |
| 2.2.1. | Monopólio verticalmente integrado.....  | 9  |
| 2.2.2. | Comprador único .....   | 10 |
| 2.2.3. | Competição no atacado e no varejo .....   | 11 |
| 2.2.4. | Competição no varejo.....   | 11 |
| 2.3.   | Formação de preço .....   | 12 |
| 2.4.   | O mercado de energia elétrica no Brasil .....   | 14 |
| 2.4.1. | Mercado de curto prazo.....   | 19 |
| 2.4.2. | Ambiente de contratação livre .....   | 20 |
| 2.4.3. | Ambiente de contratação regulada.....   | 23 |
| 3.     | TEORIA DE LEILÕES .....   | 28 |
| 3.1.   | Classificação dos leilões .....   | 28 |
| 3.2.   | Teoria de equivalência de receitas .....  | 30 |
| 3.3.   | Preço de equilíbrio nos mercados de energia: preço uniforme vs. <i>pay-as-bid</i> ..... | 31 |
| 3.4.   | Sistemáticas dos leilões no SEB .....   | 32 |
| 3.4.1. | Leilões de transmissão.....   | 34 |
| 3.4.2. | Leilões de energia nova .....   | 34 |
| 3.4.3. | Leilões de fontes alternativas .....  | 36 |
| 3.4.4. | Leilões de energia de reserva .....   | 37 |
| 3.4.5. | Leilões de projetos estruturantes.....  | 37 |
| 3.5.   | Leilões de energia existente.....   | 37 |
| 3.5.1. | Histórico dos LEEs .....  | 38 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.5.2. | Sistemática do 15ºLEE .....                    | 39 |
| 3.5.3. | Resultados DO 15ºLEE .....                     | 42 |
| 4.     | DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR .....             | 47 |
| 4.1.   | Conceituação de aplicação web .....            | 47 |
| 4.2.   | Arquitetura em camadas .....                   | 49 |
| 4.3.   | Desenvolvimento do simulador de leilões .....  | 50 |
| 4.3.1. | Tecnologias aplicadas no desenvolvimento ..... | 52 |
| a)     | Tecnologias do lado do cliente .....           | 52 |
| b)     | Tecnologias do lado do servidor .....          | 54 |
| c)     | Interfaces do simulador .....                  | 55 |
| 5.     | SIMULAÇÃO E RESULTADOS .....                   | 65 |
| 5.1.   | Resultados das simulações dos Leilões .....    | 65 |
| a)     | Resultados da primeira etapa .....             | 68 |
| b)     | Resultados da segunda etapa .....              | 73 |
| c)     | Desempenhos dos grupos .....                   | 77 |
| 6.     | CONCLUSÃO .....                                | 80 |
|        | REFERÊNCIAS .....                              | 82 |
|        | APENDICE A .....                               | 88 |
|        | APENDICE B .....                               | 90 |

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Custos e Análise do <i>break-even point</i> .....                                     | 6  |
| Figura 2 - Exemplo de fluxo de caixa. ....   | 7  |
| Figura 3 - Monopólio Verticalmente Integrado.....  | 9  |
| Figura 4 – Modelo comprador único.....   | 10 |
| Figura 5 - Mercado competitivo no atacado. ....  | 11 |
| Figura 6 - Mercado competitivo no varejo .....   | 12 |
| Figura 7 - Instituições do Setor Elétrico Brasileiro.....  | 18 |
| Figura 8 - Ambientes de Contratação e as Relações entre os Agentes .....                         | 19 |
| Figura 9 - Série Histórica do PLD por submercado .....   | 20 |
| Figura 10 - Evolução do ACL e sua participação na carga do sistema .....                         | 22 |
| Figura 11 - Horizontes de Contratação no ACR.....  | 26 |
| Figura 12 – Sistemática dos Leilões de Energia Nova .....  | 35 |
| Figura 13 – Primeira fase: Abertura do leilão (a) Inserção de Lances da primeira rodada (b)..... | 39 |
| Figura 14 - Processamento do leilão(a) e Inserção de Lances da segunda rodada (b).....           | 40 |
| Figura 15 - Processamento do leilão(a) e Inserção de Lances da terceira rodada (b).....          | 41 |
| Figura 16 – Segunda fase: inserção dos lances(a) e Processamento do lances (b).....              | 41 |
| Figura 17– Resultados: Vencedores (a) e Lotes Atendidos (b).....                                 | 42 |
| Figura 18 - Resultados do 15 <sup>o</sup> LEE: Preço Inicial x Preço Médio.....                  | 46 |
| Figura 19 - Arquitetura Cliente-Servidor aplicada ao Simulador.....                              | 48 |
| Figura 20 - Tabelas do banco de dados e suas relações.....                                       | 51 |
| Figura 21 - Arquitetura do Sistema Desenvolvido. ....  | 54 |
| Figura 22 - Tela de <i>Login</i> . ....  | 56 |
| Figura 23 - Tela de Cadastramento do Leilão. ....  | 57 |
| Figura 24 – Tela de inicialização do Leilão. ....  | 58 |
| Figura 25 – Tela início leilão para o usuário.....   | 59 |
| Figura 26 – Tela de oferta do usuário. ....  | 59 |
| Figura 27 - Tela de Controle do Leilão. ....   | 60 |
| Figura 28 - Tela de Controle do Leilão, solicitação da segunda etapa.....                        | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 29 - Tela de Controle do Leilão, segunda etapa. ....  | 61 |
| Figura 30 - Tela de Oferta, segunda etapa.....   | 62 |
| Figura 31 – Tela de Encerramento, segunda etapa. ....  | 63 |
| Figura 32 - Tela de resultados.....  | 63 |
| Figura 33 – Gráfico da Evolução da Oferta Total em função do Preço Corrente para cada rodada durante o primeiro Leilão Simulado..... | 68 |
| Figura 34 - Gráfico da Evolução da Oferta Total e do seu Excedente para cada rodada durante o primeiro Leilão Simulado.....          | 69 |
| Figura 35 - Gráfico da Evolução da Oferta Total em função do Preço Corrente para cada rodada durante o segundo Leilão Simulado. .... | 70 |
| Figura 36 - Gráfico da Evolução da Oferta Total e do seu Excedente para cada rodada durante o segundo Leilão Simulado.....           | 71 |
| Figura 37 - Gráfico da comparação dos resultados entre as usinas no primeiro leilão.....   | 73 |
| Figura 38 - Gráfico da comparação dos resultados entre as usinas no segundo leilão.....  | 74 |
| Figura 39 - Respostas das perguntas 01 a 03.....   | 91 |
| Figura 40 - Resultados do bloco 03, respostas das perguntas 05 e 06.....   | 93 |
| Figura 41 - Resultados do bloco 04, respostas das perguntas 07 a 10.....   | 94 |
| Figura 42 - Resultados do bloco 05, respostas das perguntas 11 a 13.....   | 95 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Critérios de adesão - Consumidor Livre ou Especial.....          | 21 |
| Tabela 2 – Resultado dos Leilões de Energia Existente. ....                 | 38 |
| Tabela 3 – Produtos oferecidos no certame.....                              | 43 |
| Tabela 4 – Resultados do produto disponibilidade 02.....                    | 44 |
| Tabela 5 – resultados do produto disponibilidade 03 .....                   | 44 |
| Tabela 6 – Resultados produto quantidade 03.....                            | 45 |
| Tabela 7 - Parâmetros das curvas de custos das usinas .....                 | 66 |
| Tabela 8 - Dados sobre o mercado do primeiro leilão.....                    | 67 |
| Tabela 9 – Dados Obtidos da primeira etapa do primeiro Leilão Simulado..... | 72 |
| Tabela 10 – Dados Obtidos da primeira etapa do segundo Leilão Simulado...   | 72 |
| Tabela 11 – Dados Obtidos da segunda etapa do primeiro Leilão Simulado...   | 76 |
| Tabela 12 – Dados Obtidos da segunda etapa do segundo Leilão Simulado..     | 76 |
| Tabela 13 - Resultado econômico-financeiro do primeiro leilão.....          | 78 |
| Tabela 14 - Resultados econômico-financeiros do segundo leilão.....         | 78 |
| Tabela 15 – Quantidade de alunos por respostas antes e depois.....          | 92 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL - Ambiente de Contratação Livre

ACR - Ambiente de Contratação Regulada

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEAL - Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Livre

CCEAR - Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

CSS – *Cascading Style Sheets*

GF – Garantia Física

HTML – *HyperText Markup Language*

ICB – Índice de Custo/Benefício

kV - Kilovolts (unidade de tensão elétrica)

kW - Kilowatt (unidade de potência elétrica)

LEE – Leilão de Energia Existente

LEN - Leilão de Energia Nova

LER – Leilão de Energia Reserva

LFA - Leilão de Fontes Alternativas

MAE - Mercado de Atacado de Energia

MME - Ministério de Minas e Energia

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PHP – *Hypertext Preprocessor*

PLD - Preço de Liquidação de Diferenças

SGBD - Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados

TIC - Tecnologia da Informação e Comunicação

## 1. INTRODUÇÃO

Com o objetivo de aumentar a eficiência da contratação de energia, os mercados de energia elétrica de diversos países têm implantado o sistema de leilões como forma de contratação de energia. No Brasil, é através deles que as concessionárias, as permissionárias e as autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica do sistema interligado buscam garantir o atendimento à totalidade de suas cargas ao negociar no Ambiente de Contratação Regulada (ACR).

Os mercados de energia elétrica devem ser desenhados de forma que sejam proporcionados ao consumidor final os mesmos benefícios de um mercado competitivo, ocorrendo de forma análoga aos mercados onde outros produtos concorrem entre si, resultando em preços justos e na disputa pela qualidade na prestação do serviço.

Outro objetivo de um mercado é incentivar a entrada de novos investimentos. No setor elétrico, em especial, esse crescimento da capacidade instalada propicia o atendimento de uma demanda crescente de energia e mantém a operação do sistema elétrico dentro das condições de segurança.

Ao buscar esses objetivos, tanto o Brasil quanto outros países têm procurado estabelecer um modelo em seus mercados para que esses objetivos sejam atingidos. Para tanto, a eficiência dos mercados de energia tem sido constantemente analisada fazendo com que eles se adaptem às suas condições internas, sendo investigadas possíveis mudanças na sua estrutura baseadas na experiência internacional.

Assim, esta dissertação visa apresentar um sistema desenvolvido para possibilitar a simulação de leilões de energia elétrica. Para cumprir este desafio, foi descrito um referencial teórico dando um panorama sobre os modelos de mercados de energia e como eles se estabelecem no Brasil atualmente, sendo necessária também a descrição das diferentes sistemáticas dos leilões do setor elétrico. A formatação desses leilões explora as diferentes possibilidades disponíveis na teoria de leilões em termos de: forma de se realizar as ofertas, maneira como é definido o preço de fechamento do leilão entre outros aspectos.

Sendo assim, a busca pela melhor definição dos leilões traz consigo uma complexidade inerente na compreensão de como as negociações no setor elétrico são realizadas. Essa dificuldade pode ser contornada através da simulação do funcionamento dos leilões através de uma ferramenta que reproduza a dinâmica encontrada no mercado.

Alguns trabalhos acadêmicos se propuseram a solucionar essas dificuldades, principalmente entre os alunos de graduação, como no artigo exposto em [1], onde são realizados dois experimentos simulando um mercado *day-ahead* de energia elétrica. O sistema elétrico que compõe o mercado foi caracterizado por oito nós, onde as usinas foram distribuídas de acordo com o modelo proposto. Foram definidas 14 unidades geradoras conectadas a um dos nós do sistema, e o fluxo de energia negociada é feito a partir de linhas de transmissão que interligam esses nós. O primeiro experimento é realizado no laboratório da KU Leuven, onde os agentes de geração são representados por alunos de pós-graduação em engenharia elétrica que irão exercer o papel de ofertantes no leilão. Outra informação recebida pelos usuários é a composição de custos de produção para que cada unidade comercialize sua energia em patamares de uma hora levando em conta essa informação. O segundo experimento consiste na simulação de mercados através de modelos baseados em agentes que irão competir no mesmo mercado do experimento anterior. Todavia, os agentes de geração são configurados previamente de acordo com técnicas de inteligência artificial. Ao final, os resultados das duas experiências são comparados e discutidos, observando a diferença entre o comportamento na tomada de decisão da máquina e dos alunos, levando em conta aspectos cognitivos e de aprendizado da turma.

Um trabalho que guarda algumas similaridades com anterior é apresentado no artigo [2]. Nele, uma plataforma de simulação de leilão de energia desenvolvida em MatLab® é apresentada juntamente com os resultados da simulação dos leilões realizados com alunos. A plataforma desenvolvida permite a simulação real de um leilão de energia seguindo o modelo de leilão bilateral adotado em alguns mercados de eletricidade. A sua proposta foi desenvolver a plataforma para possibilitar que ela se tornasse uma ferramenta capaz de auxiliar os alunos de graduação em engenharia elétrica a

compreender melhor o funcionamento dos mercados de eletricidade através da simulação dos seus leilões de energia.

Em [3] é discutido e ilustrado o potencial da ferramenta AMES (*Agent-based Modeling of Electricity Systems*) para a pesquisa, o ensino e o treinamento. O artigo começa pela descrição de alguns dos mercados americanos de energia, citando suas principais instituições. Em seguida, os potenciais da ferramenta são mostrados, bem como as aplicações em pesquisas ilustrando as principais características da ferramenta. Ao final, são ressaltados os potenciais da ferramenta nas atividades de ensino e treinamento, pois conforme descrito no artigo, a ferramenta além de ser de fácil utilização, auxilia a compreender as limitações físicas do sistema. Outros aspectos positivos citados são a disponibilidade do software para download e o fato do programa ser livre e código aberto, possibilitando a inclusão de melhorias sugeridas pelos usuários.

Porém, mesmo com as referências citadas, há poucos trabalhos que tenham disponibilizado uma ferramenta que simule um ambiente real de um leilão, principalmente com a complexa sistemática dos leilões de energia no Brasil.

Desta forma, o escopo deste trabalho é desenvolver um simulador através de uma aplicação web proporcionando um ambiente dinâmico e iterativo, capaz de armazenar, processar e gerenciar dados inseridos pelo usuário simulando o ambiente de um leilão de energia elétrica, seguindo a sistemática do leilão de energia existente.

Esta ferramenta possibilita a realização de simulações de leilões de energia elétrica, obtendo resultados em função dos parâmetros sobre o mercado fornecidos ao sistema e aos usuários.

Adicionalmente, o presente trabalho tem por objetivo empregar o simulador como ferramenta de ensino capaz de facilitar a assimilação da complexa sistemática dos leilões de energia e compreender como as diferentes variáveis do mercado afetam na decisão durante as transações de comercialização.

Para alcançar este objetivo, foi realizada uma atividade de simulação com uma turma de 35 alunos do curso de graduação em engenharia elétrica da Universidade Federal Fluminense. Antes das simulações, os alunos assistiram

a aulas abordando os leilões do SEB e os aspectos econômicos envolvidos na tomada de decisão. Para a simulação, o simulador foi apresentado aos grupos, mostrando seu funcionamento.

Após essa atividade, foi realizada uma avaliação do sistema do ponto de vista dos alunos sobre os aspectos educacionais da atividade envolvendo uma ferramenta tecnológica. Para tanto, foi entregue um questionário do tipo *survey* a cada grupo, mensurando os resultados da atividade em diferentes aspectos.

A estrutura deste trabalho é composta da presente introdução e está dividida em mais cinco capítulos, incluindo a conclusão.

No Capítulo 2, são descritos os desenhos de mercado de energia elétrica. Um destaque é dado ao mercado de energia elétrica no Brasil, abordando suas características e os diferentes ambientes estabelecidos no modelo atual do setor, bem como uma recapitulação histórica, apresentando os antecedentes que contribuíram para o estabelecimento do ambiente de comercialização de energia atual.

No Capítulo 3, é descrita a teoria dos leilões, exemplificando os principais aspectos aplicáveis aos leilões de energia; em seguida é feita a descrição das sistemáticas dos leilões que ocorrem no SEB.

São apresentados no Capítulo 4 o simulador desenvolvido e a teoria sobre Aplicações WEB, abordando as linguagens aplicadas na sua implementação, assim como as suas interfaces.

O quinto capítulo mostra os resultados obtidos das simulações com os alunos, analisando os seus lances e resultados finais dos leilões. Os resultados do *survey* são também mostrados neste capítulo, antecedidos de uma breve discussão sobre os possíveis benefícios da aplicação de tecnologias em atividades educacionais.

Por fim, tem-se uma conclusão geral referente a todo o sistema desenvolvido, juntamente com sugestões para melhorias futuras do que foi proposto neste trabalho.

## 2. MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica é, em termos econômicos, uma *commodity*<sup>1</sup> que possui suas especificidades, tais como: a quase impossibilidade de armazenamento econômico da energia convertida em eletricidade, o tempo relativamente elevado para o acréscimo na sua capacidade de oferta devido às características das usinas, a necessidade de estrutura física para o transporte do produto, dentre outras [4] [5].

Ainda que a compra e a venda de eletricidade sigam os mesmos princípios econômicos de oferta e demanda de outros mercados, as peculiaridades da *commodity* refletirão na forma como ela será comercializada. Conforme abordado em [6], para um entendimento dos mercados de energia, é necessário que sejam conhecidos alguns aspectos econômicos que estão presentes no funcionamento destes mercados.

### 2.1. FUNDAMENTOS ECONÔMICOS

De acordo com [6], a inserção das grandezas elétricas (potência e energia, por exemplo) num mercado de energia elétrica se dá com a precificação para que elas sejam negociadas entre os diferentes agentes que compõe um mercado.

No tocante a este trabalho, há o interesse específico sobre os custos envolvidos no segmento de geração. Para tanto, é preciso caracterizar os custos que compõe a produção de energia elétrica.

Os custos de uma firma podem ser classificados em: fixo e variável [7]. Simplificadamente, os custos variáveis são aqueles que aumentam ou diminuem em função do nível de produção. Já os custos fixos são aqueles que ocorrem em função da manutenção da estrutura da empresa, e independem da quantidade produzida [7].

A soma de ambos os custos, fixo e variável, resulta no custo total. Ao se determinar o custo total para diferentes quantidades produzidas e ao se comparar

---

<sup>1</sup> Commodities são produtos "in natura" ou de origem primária, que se caracterizam pela uniformidade dos seus produtos, não sendo possível a distinção sobre a sua origem dentre os produtores. No setor energético, além do petróleo, a energia elétrica é outra commodity importante. Outros exemplos seriam: o ouro, a soja, o cobre entre outros [69].

esta grandeza com a receita para as mesmas quantidades, são geradas duas curvas, conforme mostrado na Figura 1, baseada em [8].

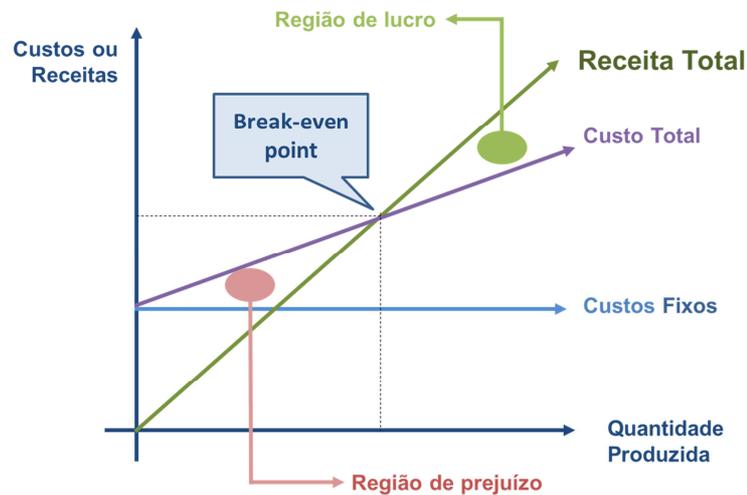


Figura 1 - Custos e Análise do *break-even point*, [9].

O setor elétrico tem como uma de suas características ser intensivo em capital [10]. Com isso, um empreendimento precisará adotar procedimentos para analisar adequadamente seus investimentos a longo prazo.

Uma das análises é o *break-even*, ilustrado na Figura 1, onde se pode perceber que há duas regiões distintas, separadas por um ponto chamado de ponto de equilíbrio (*break-even point*). A região de produção até este ponto configura prejuízo para o produtor (uma usina, por exemplo), a partir desse ponto a empresa (ou empreendimento) passa a obter lucro em suas operações [8].

Além desse método de análise de investimentos, há outras duas abordagens amplamente utilizadas [8]: Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Valor Presente Líquido (VPL). Em ambas as abordagens, é necessária a montagem do fluxo de caixa do empreendimento, levando em consideração as despesas e as receitas para um determinado período de tempo.

A abordagem feita em [11] classifica os custos de duas maneiras: Custo de Capital (CAPEX - *Capital Expenditure*) e Custos Operacionais (OPEX - *Operational Expenditure*). Na Figura 2, tem-se um exemplo de fluxo de caixa com características similares aos projetos de geração de energia, onde são exigidos altos investimentos iniciais e a partir da entrada em operação, o empreendimento adquire receitas e incorre em gastos operacionais.

As receitas obtidas ao longo do contrato de fornecimento da usina de duração  $n$ , esses valores estão relacionados às tarifas estabelecidas e à expectativa de produção.

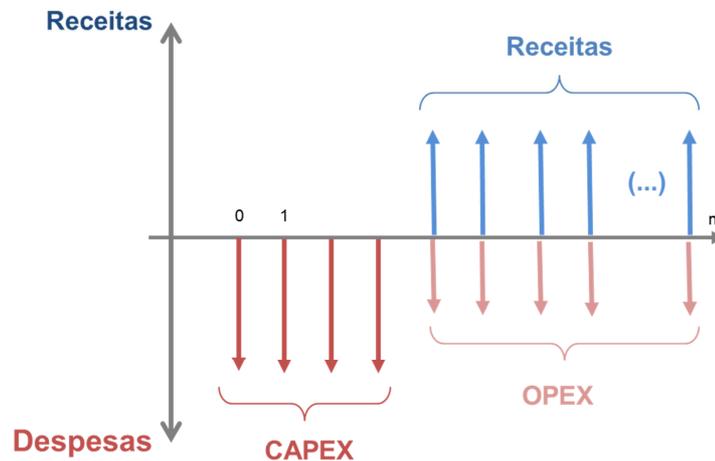


Figura 2 - Exemplo de fluxo de caixa, adaptação de [11] e [12].

Na análise do Valor Presente Líquido, procede-se da seguinte maneira: o investimento inicial do empreendimento deve ser trazido a valor presente através de uma taxa de desconto pré-estabelecida [8], bem como as entradas e as saídas do fluxo de caixa.

Por fim, faz-se o somatório de todas as parcelas respeitando os seus respectivos sinais (positivo para entradas e negativo para saídas). A equação (1) ilustra a aplicação do conceito baseando-se no fluxo de caixa da Figura 2:

$$VPL = \sum_{t=0}^{t=n} \frac{Receita_t + OPEX_t + CAPEX_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

Onde:

$i$  = taxa de retorno

$t$  = tempo de vida do projeto

Caso o VPL calculado resulte numa valor positivo, o projeto é viável economicamente. No entanto, se o VPL for negativo, o projeto deverá ser rejeitado [8].

A TIR é, por definição, a taxa desconto através da qual aplica-se a um fluxo de caixa, fazendo com que os valores das despesas, trazidos ao valor presente, se torne igual aos valores das receitas, também trazidos ao valor presente, tornando o resultado do VPL nulo [8]. Pode-se expressar matematicamente este método através da equação:

$$\sum_{t=0}^{t=n} \frac{\text{Receita}_t + \text{OPEX}_t + \text{CAPEX}_t}{(1 + \text{TIR})^t} = 0 \quad (2)$$

A aceitação, ou rejeição, do projeto é feita através da comparação da TIR calculada com uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) [8]. Uma TIR que resulte num valor maior do que a TMA caracteriza o empreendimento como atrativo [8], caso contrário, fica caracterizado como inviável economicamente.

O trabalho [13] faz uma descrição detalhada das componentes dos custos totais de geração para três tipos de usinas: hidrelétricas, termelétricas e eólicas. Para fazer uma comparação entre os diversos projetos de geração, o estudo propõe um modelo para o cálculo do Custo Total de Geração, que é definido através da Equação 3.

$$C_g = C_{inv} + C_{O\&M} + C_{comb} + C_{MCP} + C_{cnx} + C_{ust} \quad (3)$$

Onde:

$C_{inv}$  = Custo de Investimento

$C_{O\&M}$  = Custo de Operação e Manutenção

$C_{comb}$  = Custo de Combustível

$C_{MCP}$  = Valor esperado do Custo no Mercado de Curto Prazo

$C_{cnx}$  = Custo de Conexão

$C_{ust}$  = Custo de Uso da Rede de Transmissão

Obviamente, cada tecnologia de geração terá diferentes participações dessas componentes no resultado do seu custo total, sendo que cada uma dessas componentes deve ser expressa em termos de custos anualizados para o período de vida útil do projeto.

O resultado da equação é uma alternativa para a tomada de decisão em função da tarifa proposta num leilão. Como em uma análise de custo-benefício, se o valor de  $C_g$  for menor do que a tarifa proposta num certame, o empreendimento será viável, caso contrário, o projeto será inviável [8].

## 2.2. GRAUS DE ABERTURA DOS MERCADOS DE ENERGIA

As instituições responsáveis pela gestão do setor elétrico de um determinado país, ou região, estabelecem no seu respectivo mercado de energia um modelo que melhor se adapte às condições dos seus agentes, proporcionando o equilíbrio entre oferta e demanda, assim como o aumento da eficiência das empresas [5].

Para a sociedade na qual o mercado está inserido, a vantagem percebida é a redução dos custos no consumo para o usuário final. Esses ganhos podem ser obtidos através do aumento da competição do mercado nos seus diferentes segmentos [4]. Sendo assim, podem-se classificar os mercados de acordo com o grau de abertura presente em cada um deles conforme descrito nas próximas seções.

### 2.2.1. MONOPÓLIO VERTICALMENTE INTEGRADO

No monopólio verticalmente integrado, uma única empresa realiza a geração, a transmissão e a distribuição [14]. Este modelo está ilustrado na Figura 3:

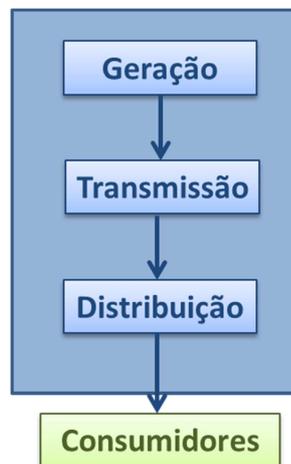


Figura 3 - Monopólio Verticalmente Integrado, adaptado de [14].

De acordo com [15], este modelo é adequado quando os ativos forem altamente específicos para um determinado uso ou local. Porém, o modelo em si não tem o potencial de gerar as melhorias dos serviços e a redução dos preços como num mercado competitivo, como será visto nos próximos modelos.

### 2.2.2. COMPRADOR ÚNICO

Neste modelo uma única instituição é responsável pela compra de toda a eletricidade no atacado e por fazer a venda para as empresas de distribuição.

Na Figura 4, tem-se a representação deste modelo, onde as empresas de geração são representadas pela sigla GenCo (*Generation Company*) e as empresas de distribuição são representadas pela sigla DisCo (*Distribution Company*), que por sua vez estão ligadas diretamente aos consumidores de sua área de concessão.

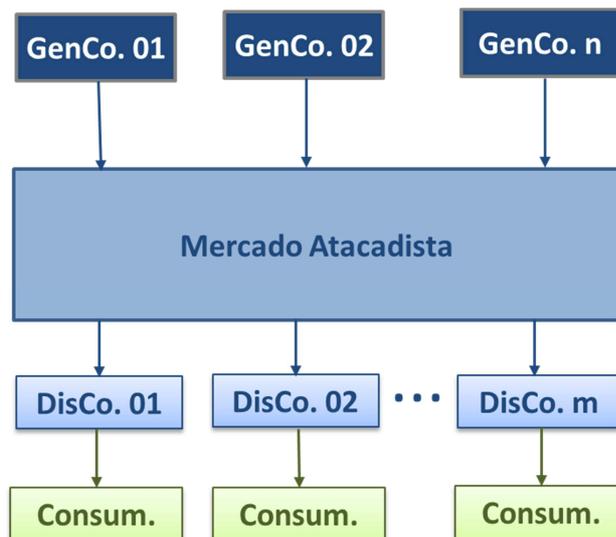


Figura 4 – Modelo comprador único, adaptado de [14].

No modelo de comprador único, a competição se dá entre as empresas de geração. As distribuidoras não podem escolher o seu fornecedor e a energia elétrica é adquirida através de contratos celebrados entre as geradoras e o comprador único, sendo que este irá repassar às distribuidoras um preço médio da energia adquirida ponderando o preço com a demanda declarada pelas distribuidoras [16].

Este modelo é considerado como um modelo de transição entre um mercado monopolista e os mercados com maior nível de competição.

### 2.2.3. COMPETIÇÃO NO ATACADO E NO VAREJO

No modelo competição no atacado, as distribuidoras têm a possibilidade de comprar energia elétrica diretamente dos produtores; com os contratos sendo celebrados no mercado atacadista (Figura 5). Os grandes consumidores de energia estão também autorizados a comprar energia diretamente dos geradores [17].

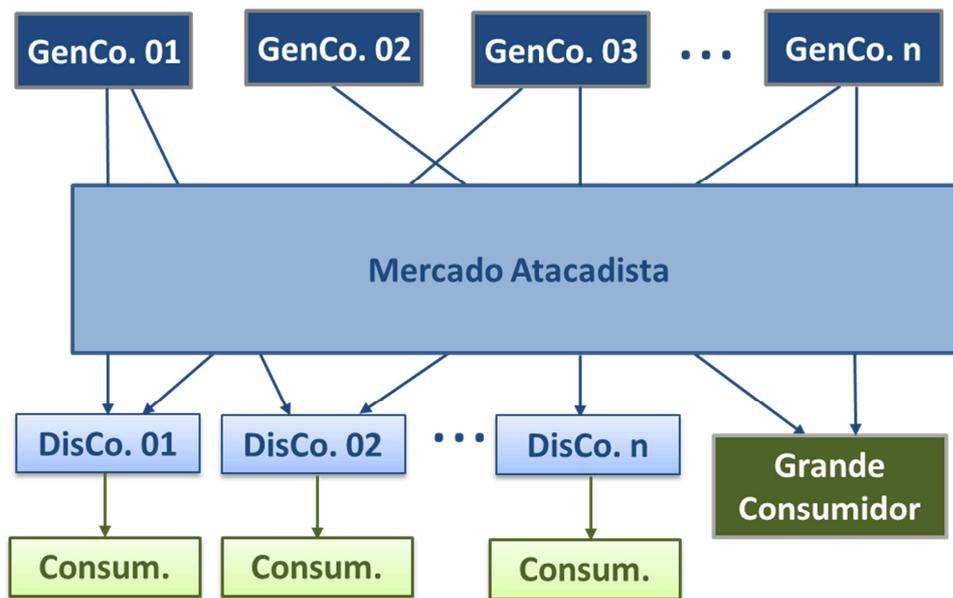


Figura 5 - Mercado competitivo no atacado, adaptado de [17].

Neste mercado, o consumidor final de pequeno porte ainda não é livre para escolher o fornecedor de energia e a tarifa paga por ele é, em geral, regulada devido ao monopólio exercido pelas distribuidoras [17].

### 2.2.4. COMPETIÇÃO NO VAREJO

No modelo de competição no varejo, todos os consumidores podem decidir com quem negociar os serviços de eletricidade [17], conforme ilustrado na Figura 6.

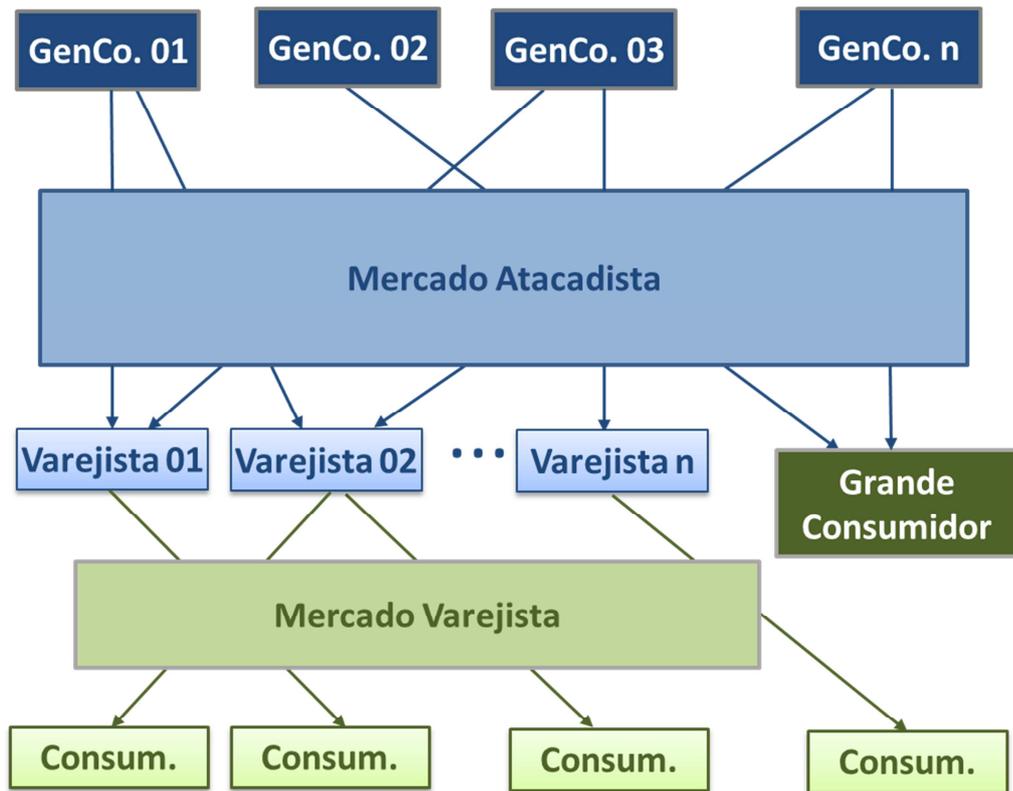


Figura 6 - Mercado competitivo no varejo, adaptado de [17].

Os pequenos consumidores compram energia através de comercializadores varejistas; estes por sua vez, fazem a aquisição de energia no mercado atacadista através de contratos negociados diretamente com os produtores.

### 2.3. FORMAÇÃO DE PREÇO

Os horizontes dos mercados de curto prazo mais comuns são: semanal, diário, horário, meia-hora e em tempo real [5]. Os mercados de curto prazo cumprem papéis importantes num setor elétrico; sendo o principal o de realizar os ajustes entre a energia contratada e a energia gerada, consequentemente, fazendo a sinalização econômica para contratos de longo prazo [18].

No entanto, a busca pelo equilíbrio entre oferta e demanda deve observar critérios econômicos, buscando o menor custo para o balanceamento entre carga e geração. Em [5], são apresentados dois tipos básicos de modelos de formação de preços de mercado de curto prazo – Modelo Centralizado e Bilateral.

### **a) Modelo Centralizado (ou *Pool* de Energia):**

A operação neste modelo é planejada de formada centralizada, sendo feita por um Operador Independente do Sistema (ISO) que não possui os ativos em operação. As diferentes usinas produzem eletricidade de forma agregada, formando um mercado eficiente, objetivando assim a obtenção do custo mínimo de operação do sistema [5].

Assim, as transações comerciais de energia são realizadas com o pool e não diretamente entre os agentes do sistema. Porém, é permitido aos agentes negociar livremente por meio de contratos bilaterais como forma de proteção às oscilações de preços [19].

A obtenção da programação da operação num modelo *pool* se dá por meio de um sistema computacional que otimiza os custos de geração em função da disponibilidade das usinas [5]. Neste formato, a operação é programada pelo ISO e o preço de curto prazo refletirá o despacho físico do sistema. Este modelo foi adotado em países que tem uma participação predominante de usinas hidroelétricas de matriz de energia elétrica [5].

Há ainda uma classificação dentro deste modelo em relação ao critérios de despacho das usinas. No modelo *Tight Pool*, o despacho é baseado em custos, onde os agentes de geração fornecem apenas dados técnico-econômicos de suas usinas ao operador do mercado (ou do sistema) [19].

O oposto ocorre no modelo *Loose Pool*, onde o despacho e a formação de preços se baseiam em ofertas de preço e quantidade (ou ainda, as suas respectivas curvas de oferta) feitas pelos agentes dispostos a vender energia. Da mesma maneira, os consumidores realizam suas ofertas de preço e quantidade, ou mesmo uma curva de demanda, a que estão dispostos a comprar energia [19].

### **b) Modelo Bilateral:**

Como o próprio nome indica, nesse mercado as transações são realizadas através de contratos bilaterais entre vendedores e compradores de energia [5], onde as geradoras e as distribuidoras fazem propostas de volumes e preços que estão dispostas a comercializar.

Neste modelo, não há a determinação de uma instituição para estabelecer a programação da geração, ou seja, cada produtor poderá ofertar o montante que lhe convier baseando-se nas condições do mercado.

Trata-se, portanto, de um esquema descentralizado onde o despacho Físico é determinado através do “despacho comercial” e a otimização dos recursos é feita através das leis econômicas de oferta e demanda, cabendo ao ISO a função de gerenciar os desequilíbrios da rede e manter a estabilidade do sistema [5].

Este modelo foi adotado em países com maior predominância em sua matriz energética de fontes térmicas, pois os preços tendem a ser mais previsíveis [5].

Na próxima seção, são apresentadas as características relacionadas ao mercado brasileiro de energia elétrica.

## **2.4. O MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Entre as décadas de 30 e 90, o Brasil viveu o predomínio estatal das atividades no seu setor elétrico, sendo de responsabilidade do governo, até então, os investimentos necessários para a expansão e consolidação do sistema elétrico [20].

Porém, seguindo a tendência mundial de reformas que vieram a mudar o papel do Estado na economia, o país passou por um processo de desestatização impulsionado pela grave crise fiscal e econômica em que a União e os estados enfrentavam [20].

Nesse sentido, foram feitas mudanças que objetivavam aumentar a eficiência dos serviços prestados e atrair novos investimentos para o setor. No entanto, para que os novos recursos financeiros necessários para a expansão e operação do sistema fossem atraídos, foram feitas concessões dos serviços de energia elétrica através de privatizações das empresas existentes e, para os novos empreendimentos, foram realizadas parcerias público-privadas nas quais concessões de serviços de energia elétrica foram oferecidas a investidores privados através de leilões [20].

A experiência internacional mostra que algumas ações implementadas nos diferentes mercados dos países membros da OCDE<sup>2</sup> se mostraram bem sucedidas e passaram a influenciar os mercados de energia elétrica de outros países na busca pela qualidade dos serviços prestados e pela eficiência do setor [21].

Além das privatizações de empresas públicas e da atração de investidores privados, uma medida adotada foi a desverticalização (*vertical unbundling*) da geração, transmissão, distribuição e comercialização de eletricidade [20]. Objetivou-se com isso fazer com que houvesse competição entre os diferentes agentes nos diferentes mercados estabelecidos com a reforma, possibilitando também a entrada de novos concorrentes.

Outra medida que possibilitou a entrada de novos Agentes foi o livre acesso à rede. Através desta nova abordagem um empreendimento de geração pode se conectar ao sistema de transmissão sem necessariamente ser o proprietário da linha que escoar a sua produção e energia [20]. Outro ponto destacado em [21] foi a criação de uma entidade reguladora independente que zelasse pelo bom funcionamento do modelo adotado.

Acompanhando essas tendências e dando sequência ao processo de reforma ocorrido na década de 90, o Brasil passou por uma remodelagem do seu setor elétrico. Efetuou a desverticalização das atividades do setor, fazendo com que a contratação passasse a ser realizada através do mercado regulado. Com isso, foram extintos os contratos de *self dealing*, nos quais os contratos de compra e venda de energia elétrica eram realizados entre empresas geração integrantes do mesmo grupo das distribuidoras. Como resultado, foram eliminados os ganhos extraordinários que eram obtidos anteriormente através do repasse aos consumidores de custos e de ineficiências que podiam ser cortados.

Além dessas mudanças, o SEB passou por uma reformulação do seu arcabouço regulatório, que se iniciou com a instituição da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – autarquia que tem como missão criar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes, gerando benefícios à sociedade.

Dando continuidade à reforma do setor, foram colocadas em prática as diretrizes elaboradas no Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico (RESEB) [22],

---

<sup>2</sup> OCDE: Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico.

coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e desenvolvido pela consultoria inglesa *Coopers & Lybrand* (C&L), pode-se citar como principais características:

- a) Desverticalização das atividades, conforme citado anteriormente;
- b) Geração: tornando-se uma atividade competitiva com preços definidos pelo mercado;
- c) Transmissão independente: garantindo o Livre Acesso dos geradores ao mercado e dos Consumidores livres às fontes de geração;
- d) Comercializadores livres: competindo pela prestação de seus serviços;
- e) Os segmentos de Transmissão e Distribuição são monopólios naturais<sup>3</sup> com preços administrados pelo poder concedente;
- f) Expansão da oferta como uma oportunidade de investimento, ficando a cargo dos agentes do mercado.

Ainda tomando como base as recomendações sugeridas pela C&L, foram criadas duas instituições:

- a) **O ONS** – Operador Nacional do Sistema Elétrico – operador independente dos sistemas de geração e transmissão, visando sua otimização e viabilizando o instituto do livre acesso, extinguindo, conseqüentemente, o GCOI e CCON<sup>4</sup>;
- b) **O MAE** – Mercado Atacadista de Energia Elétrica que é o ambiente onde a livre competição deve condicionar a formação dos preços, sem prejuízo da otimização.

A ANEEL manteve seu papel, se confirmando como órgão regulador independente atuando como intérprete da legislação específica, garantindo a estabilidade das regras.

Como resultados da implantação das reformas, em 1998, ocorreram os primeiros leilões para novos empreendimentos, sendo licitados pela ANEEL 2.831

<sup>3</sup> Monopólio Natural - a teoria econômica convencionou denominar monopólios naturais os setores nos quais uma única empresa provê o mercado a um menor custo do que qualquer outra situação, devido ao aproveitamento das economias de escala [7].

<sup>4</sup>O GCOI, Grupo Coordenador para a Operação Interligada e o CCON, Comitê Coordenador de Operação do Norte/Nordeste, eram grupos criados com o objetivo de coordenar o uso racional das instalações geradoras e de transmissão existentes no Sistema Elétrico Interligado [20].

MW [12] em aproveitamentos hidrelétricos e no ano seguinte, houve o leilão de mais 4.300 MW [23].

Porém, no ano de 2001, uma grave crise de abastecimento acarretou no racionamento energético, gerando críticas ao modelo em vigência [20]. Como consequência, o setor passou por novas mudanças entre os anos de 2003 e 2004, criando novas instituições com os objetivos de: mitigar os problemas enfrentados na crise energética, garantir a segurança do suprimento de energia elétrica e promover a modicidade tarifária<sup>5</sup> [20].

A Figura 7 ilustra as instituições que compõe o atual arcabouço do setor elétrico, mostrando as relações entre elas e seus papéis [20], conforme a seguir:

- a) **O CNPE**, Conselho Nacional de Política Energética, órgão do governo relacionado com a presidência da república que tem como objetivo propor políticas e diretrizes para o setor elétrico nacional;
- b) **O MME**, Ministério de Minas e Energia, recebe as diretrizes definidas pelo CNPE, ficando responsável pela formulação e implantação das políticas públicas no setor;
- c) **A EPE**, Empresa de Pesquisa Energética, entidade responsável pelo planejamento do setor elétrico a longo prazo;
- d) **O CMSE**, Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico, uma instituição com a função de avaliar permanentemente a segurança do suprimento de energia elétrica;
- e) **A CCEE**, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, dando continuidade às atividades do Mercado Atacadista de Energia (MAE), relativas à comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado.

---

<sup>5</sup> Modicidade Tarifária – Critério para definir tarifas que sejam viáveis para o consumidor pagar e que sejam capazes de assegurar retorno satisfatório do investimento, realizado pelos agentes do setor elétrico, além de viabilizar a expansão da economia, qualidade de vida e desenvolvimento para a sociedade [68].



Figura 7 - Instituições do Setor Elétrico Brasileiro, adaptado de [23].

Em relação à comercialização, foram instituídos dois ambientes para celebrar contratos de compra e venda de energia elétrica, que serão detalhados no próximo capítulo.

A definição do mercado de energia elétrica no Brasil tem se baseado nas características do seu sistema elétrico [22], onde seus agentes de geração são predominantemente usinas hidroelétricas. Essas usinas são implantadas em bacias hidrográficas que possuem diferentes regimes hidrológicos e a interligação entre essas usinas e o sistema é feita através de extensas linhas de transmissão.

Como resultado, foi natural a adoção de um modelo cooperativo na operação eletroenergética que extraísse o melhor benefício através da programação otimizada dos recursos disponíveis [19]. Assim como no modelo *tight pool* a operação é definida de forma centralizada e determinativa.

Como sucessora do MAE, foi criada a CCEE; a partir de então a concepção do mercado de energia passou a alicerçar-se nos pilares definidos na Lei nº 10.848/04, cabendo, portanto, à nova instituição buscar a garantia da segurança no suprimento e a promoção da modicidade tarifária, junto com as demais instituições do setor [20].

Em adição ao cumprimento desses princípios, a CCEE ficou responsável também por efetuar a contabilização e a liquidação financeira das operações realizadas no mercado de curto prazo, assim como viabilizar a comercialização de

energia elétrica no SIN em dois Ambientes de Contratação: Livre e Regulado, ilustrados na Figura 8.

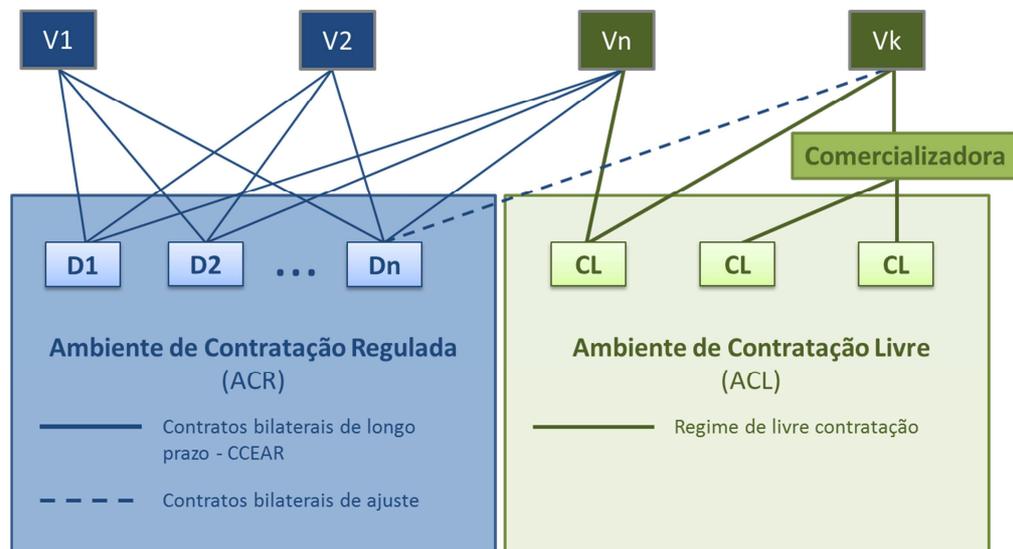


Figura 8 - Ambientes de Contratação e as Relações entre os Agentes, adaptado de [24].

#### 2.4.1. MERCADO DE CURTO PRAZO

As relações comerciais entre os Agentes participantes da CCEE são regidas por contratos de compra e venda de energia. Independentemente do mercado no qual a energia é comercializada, há a obrigatoriedade do registro desses contratos celebrados na CCEE [23]. Porém, geralmente há uma diferença entre o montante contratado e o efetivamente contabilizado (medido).

As diferenças apuradas, positivas ou negativas, são contabilizadas para posterior liquidação financeira no Mercado de Curto Prazo e valoradas ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD). A Figura 9 mostra a evolução do PLD nos diferentes submercados brasileiros<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> O sistema é atualmente dividido em quatro submercados: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte. Cada submercado concentra regiões do país onde a energia circula livremente. A linha que divide cada submercado é determinada por limites de intercâmbio presentes no sistema de transmissão, ou seja, restrições elétricas no fluxo de energia entre as diversas regiões do país [27].

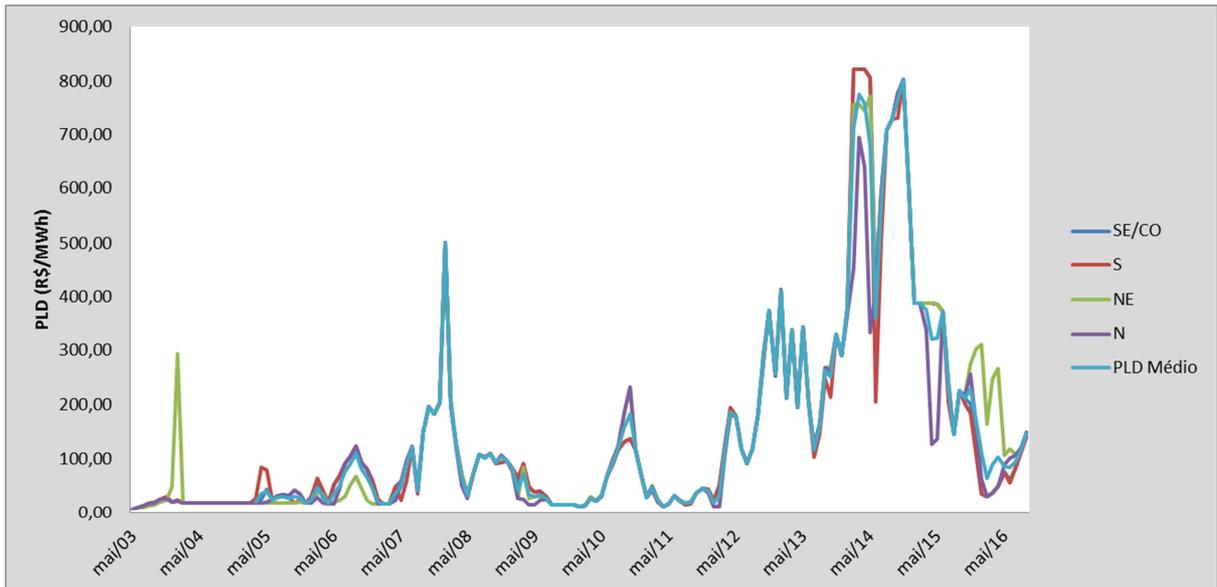


Figura 9 - Série Histórica do PLD por submercado, baseado nos dados disponibilizados em [25].

O PLD é obtido através de modelos computacionais de otimização adotados pelo ONS e oficialmente adotados pelo SEB [19]. Através deles é feita a determinação da programação e do despacho de geração do sistema. Os preços são obtidos semanalmente para cada patamar de carga com base no Custo Marginal de Operação (CMO) [19]. O CMO representa o custo variável de geração mais caro despachado, desde que haja disponibilidade desta unidade para suprir o próximo incremento de carga.

#### 2.4.2. AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO LIVRE

Com a criação do Ambiente de Contratação Livre (ACL), as distribuidoras estão vedadas a comercializar energia com os consumidores chamados “livres”, mantendo apenas o suporte da estrutura física para o transporte de energia. Pelas regras atuais, os consumidores livres têm liberdade para negociar a compra de energia com as comercializadoras, ou diretamente com os produtores independentes, estabelecendo volumes, preços e prazos de suprimento em contratos customizados nos Contratos de Compra de Energia no Ambiente Livre (CCEAL) [23].

Mesmo sendo de livre negociação, é obrigatório que esses contratos sejam registrados na CCEE, que realizará a liquidação financeira das diferenças entre os montantes contratados e os montantes efetivamente consumidos [26]. A Tabela 1 apresenta os critérios que qualificam os consumidores a migrar para o ACL.

Tabela 1 - Critérios de adesão - Consumidor Livre ou Especial, [23].

| <b>Mercado Livre</b> |                        |          |                                   |
|----------------------|------------------------|----------|-----------------------------------|
| Carga (kW)           | Tensão de Fornecimento | Situação | Fornecedor                        |
| Menor do que 500     | Grupo A                | Cativo   | Distribuidora local               |
| Maior do que 500     | Grupo A                | Especial | Fonte incentivada                 |
| Maior do que 3000    | Qualquer <sup>1</sup>  | Livre    | Fonte convencional ou incentivada |

<sup>1</sup> A partir de 07/07/1995, não é mais necessário ser conectado em tensão superior a 69kV

Através de contratos bilaterais, as transações no ACL são predominantemente realizadas no mercado de balcão (*over the counter*). Conforme mostra a Figura 10, os consumidores livres representam cerca de 26% [27], com grande potencial de crescimento, principalmente com as medidas em estudo para a ampliação desse mercado e da maior flexibilidade nos critérios para novos entrantes [27].

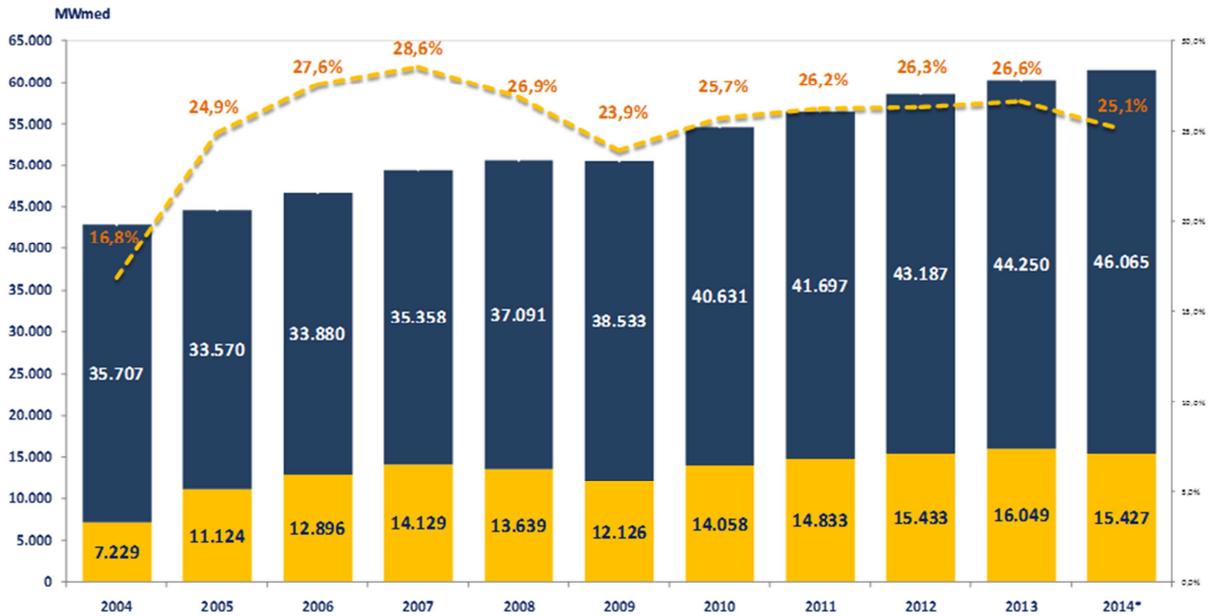


Figura 10 - Evolução do ACL e sua participação na carga do sistema, [28].

Uma das medidas adotadas que tem o potencial de ampliar o mercado livre foi a criação da figura do Consumidor Especial. Conforme mostrado na Tabela 1, o consumidor deverá ser responsável por uma unidade consumidora com um patamar mínimo de 500 kW.

Outra modificação na regulação do setor elétrico que potencializa o crescimento do mercado livre é a criação do Comercializador Varejista. Através deste agente, pequenos consumidores poderão ser representados junto à CCEE, não sendo necessário o conhecimento detalhado da legislação do setor, e também poderão ser representados no caso de obrigações financeiras, como liquidações ou encargos [29].

Assim, espera-se diminuir a burocracia para que os pequenos consumidores possam usufruir das possíveis vantagens proporcionadas pelo mercado livre [28].

Nos casos onde um consumidor livre queira retornar à condição de cativo, o mesmo deve informar essa decisão à concessionária de distribuição local com um prazo mínimo de cinco anos, sendo que esse prazo pode ser reduzido mediante acordo entre as partes.

### 2.4.3. AMBIENTE DE CONTRATAÇÃO REGULADA

O ACR é composto pelas empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas de distribuição, que devem adquirir energia elétrica através de contratação regulada participando de leilões, proveniente de empreendimentos de geração existentes e de novos empreendimentos, para suprir os seus mercados em sua totalidade conforme [30].

Diferentemente do ACL, a comercialização de energia no ACR se dá através de contratos firmados entre compradores registrados e padronizados na CCEE. Os preços, os montantes e as penalidades são definidos nos certames dos leilões de compra de energia elétrica realizados pela CCEE, delegados pela ANEEL [20].

Os contratos resultantes desses leilões são chamados de Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCEARs), sendo celebrados entre cada Agente Vendedor e todos os Agentes de Distribuição (compradores), na proporção dos montantes de consumo declarado para cada leilão [20].

A duração desses contratos pode ser de 15 a 30 anos, contados do início do suprimento de energia, para empreendimentos novos, ou de 5 a 15 anos, contados do ano seguinte ao da realização do leilão quando o certame for de energia existente [20].

Há dois tipos de CCEARs, um firmado por quantidade e outro por disponibilidade [20].

- a) **CCEAR por Quantidade:** consistem em uma modalidade de contratos na qual os riscos hidrológicos são assumidos integralmente pelos Geradores (sendo que esses riscos são mitigados pelo Mecanismo de Realocação de Energia - MRE), cabendo a eles todos os custos referentes ao fornecimento da energia contratada.
  
- b) **CCEAR por Disponibilidade:** são contratos dedicados especificamente às usinas térmicas, que recebem uma remuneração fixa, em R\$/ano, que compensa seu investimento e demais custos fixos. A previsão contratual da cobertura dos custos fixos visa mitigar os riscos do empreendedor que pode se expor a um cenário de hidrologia favorável, pois o montante a ser

gerado pela usina não é definido pelo empreendedor, mas sim pelo ONS. Adicionalmente, os consumidores arcam com os custos variáveis ocorridos em função do seu despacho; este custo é pago pelo consumidor através do Custo Variável Unitário (CVU) declarado pelo agente vendedor ao participar do Leilão. O repasse aos consumidores finais é feito pelas distribuidoras através da inclusão dos gastos ocorridos nas tarifas.

Como o objetivo do leilão é selecionar as usinas de menor custo total, incluindo os custos fixos e variáveis, foi estabelecido um índice que pudesse ordenar, do ponto de vista econômico, os empreendimentos de geração termelétrica.

Todavia, o valor esperado do custo total deste tipo de usina corresponde ao custo de investimento, aos juros durante a construção e a parcela fixa dos custos de operação e manutenção (CF), adicionado ao valor esperado do custo de operação (COP) e ao valor esperado do custo econômico de curto prazo (CEC) [31].

Assim, o Índice de Custo Benefício (ICB), expresso em [R\$/MWh], é definido como a razão entre o seu custo total e o seu benefício energético, matematicamente representado pela Equação 4 [31].

$$ICB = \frac{CF + E[COP] + E[CEC]}{GF} \quad (4)$$

Onde:

**CF** representa a receita requerida pelo investidor de forma a cobrir o custo total de implantação do empreendimento,

**COP** é dado em função do nível de inflexibilidade no despacho da usina (contratos de combustível “take or pay”) e do custo variável de O&M, declarados pelo empreendedor, sendo obtido através da simulação estática do SIN.

**CEC** que resulta das diferenças mensais apuradas entre o despacho efetivo da usina e sua Garantia Física.

**GF** é uma grandeza que corresponde à Energia Assegurada (em MWmédio) do empreendimento de geração.

Em alguns casos, um empreendimento comercializa apenas uma fração ( $x$ ), que varia de zero a 100%, de sua Energia Assegurada seja destinada ao ACR, sendo o restante reservado para uso próprio ou para comercialização no ACL, o ICB é calculado admitindo-se que todas as parcelas de custo e de benefício variem proporcionalmente a  $x$  [31].

$$ICB = \frac{x \cdot CF}{x \cdot GF} + \frac{x \cdot [COP + CEC]}{x \cdot GF} \quad (5)$$

Reinterpretando o numerador e denominador do primeiro termo e observando que o fator  $x$  se cancela no segundo termo, pode-se então escrever [31]:

$$ICB = \frac{RF}{8760 \cdot QL} + \frac{COP + CEC}{8760 \cdot GF} \quad (6)$$

$$ICB = \frac{RF}{8760 x QL} + K \quad (7)$$

Onde:

**RF** é a Receita Fixa requerida pelo empreendedor, relativa à quantidade de lotes ( $QL$ ), informada em R\$/ano;

**QL** é a quantidade de lotes de 1 MW<sub>médio</sub> ofertada para o ACR limitada à GF;

**K** é a parcela invariante do índice, em R\$/MWh, destinada à cobertura dos custos variáveis de operação e custos econômicos no mercado de curto prazo.

Os horizontes de contratação desses leilões são ilustrados na Figura 11. O prazo para a entrega do montante contratado irá depender se a energia é proveniente de novos empreendimentos ou de existentes. Esta segmentação é necessária porque os custos de capital dos empreendimentos existentes não são comparáveis aos novos, ainda a serem amortizados.

No primeiro caso, relativo aos novos empreendimentos, a contratação é feita através dos Leilões de Energia Nova, que são divididos em duas possibilidades de horizonte [20].

- a) **Leilão A-5:** no qual ocorre a contratação de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração realizado com cinco anos de antecedência do início do suprimento. Esse prazo foi determinado para viabilizar empreendimentos de longa maturação, como, por exemplo, os empreendimentos hidrelétricos.
- b) **Leilão A-3:** processo licitatório para a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração novos, realizado com três anos de antecedência do início do suprimento. Este leilão foi criado para viabilizar empreendimentos de médio prazo de maturação, como, por exemplo, os empreendimentos termelétricos.

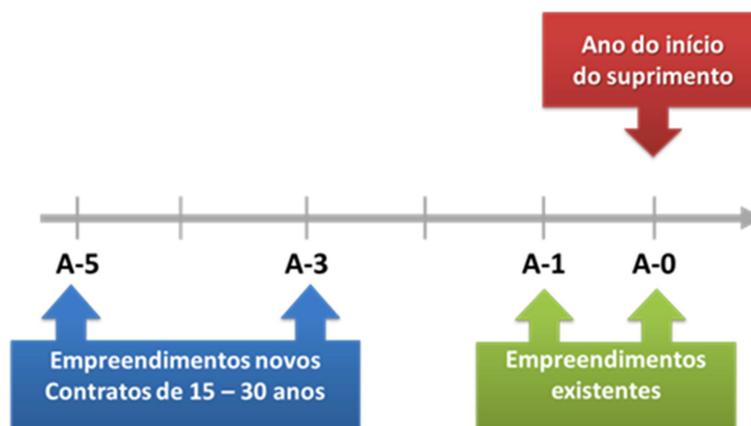


Figura 11 - Horizontes de Contratação no ACR.

Esses prazos têm por finalidade proporcionar o tempo necessário para a construção das novas usinas, assim como fazer com que as distribuidoras contratem nesses leilões seus crescimentos de demanda projetados e tenham tempo para fazer os devidos ajustes em leilões intermediários, tendo como consequência a ampliação do parque gerador.

A correção das projeções é feita nos Leilões de Energia Existente, onde as usinas em operação negociam a recontração de sua energia a ser produzida, havendo dois horizontes possíveis [33].

- a) **Leilão A-1:** criado para a contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração existentes realizado com um ano de antecedência do início do suprimento.

- b) **Leilão A-0 (de Ajuste):** tem por objetivo complementar a carga de energia necessária ao atendimento do mercado consumidor e dos agentes de distribuição, até o limite de 1% do mercado de cada distribuidora.

No próximo capítulo é detalhada a Teoria de Leilões e como ela é aplicada no mercado de energia elétrica, descrevendo as sistemáticas dos leilões no SEB, em especial o de energia existente, por se tratar do leilão realizado na simulação com o sistema desenvolvido.

### 3. TEORIA DE LEILÕES

Os leilões são instrumentos que vêm sendo usados pela sociedade nas mais diversas negociações de mercadorias. Neles, compradores e vendedores avaliam as ofertas feitas e decidem sobre a efetivação da transação. Diante da importância histórica, alguns modelos de leilões são nomeados atualmente de acordo com a origem do seu mercado, como no caso do leilão holandês [34], [35], que tem sua origem no mercado de tulipas na Holanda. Atualmente, diversos mercados utilizam essas sistemáticas herdadas, como no caso dos mercados financeiros, de *commodities*, de ações e mais recentemente nos leilões eletrônicos através de sites especializados.

Com a importância nos mercados, naturalmente os leilões se tornaram objeto de estudo nos mais variados campos [34], desde a Economia Aplicada, passando pela Teoria dos Jogos e a Matemática [35].

#### 3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS LEILÕES

Neste trabalho, são cobertas as características mais comumente aplicadas aos mercados de energia elétrica, em especial nos seus leilões. Uma caracterização mais diversificada quanto a inúmeros critérios, abordando não só os leilões tradicionais, bem como, alguns modelos puramente teóricos é feita em [34] e [35].

A seguir, é apresentada a classificação correspondente a quatro critérios mais usuais nos leilões de energia, sendo eles:

- a) **Quanto ao papel dos participantes:** um leilão é chamado de unilateral quando apenas um dos grupos dos agentes interage na negociação, podendo ser apenas os vendedores fazendo ofertas de vendas ou apenas os compradores com as ofertas de compra. O lado que não realiza as ofertas é representado através da figura do leiloeiro que irá minimizar ou maximizar os preços a depender do lado representado. Já no leilão bilateral, tanto os compradores quanto os vendedores realizam ofertas, sendo muito comum em negociação em bolsas [34];

- b) **Quanto ao preço de liquidação:** nos leilões de preço uniforme, os participantes pagam um mesmo preço pelas suas respectivas ofertas aceitas, seja qual for o valor que cada um tenha dado. Há dois subtipos, o leilão de primeiro preço, onde as ofertas vencedoras são liquidadas pelo melhor lance e, o leilão de segundo preço, onde o vencedor é o participante que fizer o melhor lance, porém, o preço de liquidação será o do “segundo melhor” participante. No caso dos leilões discriminatórios, o agente vencedor irá pagar pela mercadoria exatamente o preço que foi ofertado, sendo conhecido pela expressão em inglês *pay as bid* [34];
- c) **Quanto à forma de lance:** nos leilões de lance único, o vencedor é determinado após a verificação das ofertas de uma única rodada. Por sua vez, nos leilões sequenciais, o vencedor é obtido através de ofertas contínuas entre os participantes. Os preços das rodadas podem ser apresentados de duas formas, ascendente e descendente [35];
- d) **Quanto à revelação dos lances:** um leilão aberto é aquele em que as ofertas são propostas publicamente. Em contraste, no leilão fechado, as ofertas são feitas pelos participantes sem exposição mútua [34].

Conhecidas as diferentes classificações dos leilões, os leilões mais utilizados nos mercados de energia elétrica são descritos, mostrando suas principais características.

Começando pelo caso do Leilão Inglês, onde cada participante faz um lance após o outro, sendo iniciado por um preço mínimo, conhecido como preço de reserva, que é estipulado pelo leiloeiro. As ofertas evoluem lance a lance por um incremento no preço corrente. Por essa razão, esse leilão também é chamado de “preço ascendente”. Quando não houver mais ofertas, o bem é vendido pelo lance mais alto [34].

Sendo um leilão aberto, todos os participantes têm conhecimento do lance corrente e podem rever suas propostas de preço para cima até que o bem seja arrematado pelo mais alto lance [9].

O exemplo seguinte é o do Leilão Holandês, que segue uma lógica inversa ao anterior, onde um preço máximo é estipulado e o bem é oferecido por valores sucessivamente menores até encontrar um comprador, por esse motivo esse leilão é também chamado de “preço descendente” [9].

Outro caso é o do Leilão de Lance Fechado (ou selado), também conhecido como envelope fechado (em inglês: *sealed bid auction*). Neste leilão, todos os ofertantes apresentam simultaneamente suas propostas ao leiloeiro, sem que eles tenham o conhecimento das ofertas dos demais lances. Assim, o vencedor será o maior lance ofertado [34].

O último tipo é o Leilão de Vickrey, que consiste numa combinação de outros tipos de leilões. Nele, os ofertantes dão seus lances seguindo a metodologia do leilão inglês, mas as ofertas são de conhecimento apenas do leiloeiro, como no leilão fechado. Como nos demais, o maior lance ganha, porém, o preço pago é o do segundo maior lance. A justificativa para tal mecanismo é fazer com que os participantes ofertem o preço que eles acreditem que a mercadoria realmente tenha, teoricamente, não se importando com as ofertas dos demais [35].

### **3.2. TEORIA DE EQUIVALÊNCIA DE RECEITAS**

Um dos desafios para o leiloeiro (ou da instituição que exerça este papel num mercado) é definir a sistemática mais apropriada para um leilão objetivando a otimização de seus objetivos, seja a maximização da receita num leilão de venda, seja minimização do custo de aquisição de um bem num leilão de compra [34].

Porém, num leilão onde as suas regras determinam o vencedor como aquele participante que fizer a oferta mais alta e que o menor valor possível do bem é o mesmo para todos os participantes, zero, por exemplo, conclui-se, assumindo algumas suposições, que a receita esperada de qualquer leilão é a mesma [35]. As suposições são as seguintes [35]:

- a) Todos os participantes têm recursos suficientes para fazer suas ofertas;
- b) Todos os participantes são neutros ao risco e visam maximização de suas receitas;

- c) Os valores atribuídos ao bem são diferentes para cada participante;
- d) A função de distribuição de probabilidade dos valores atribuídos ao bem leilado é a mesma para todos os participantes.

Assim como no mercado de energia elétrica, as sistemáticas dos leilões no SEB associaram diferentes modelos teóricos para formar um desenho híbrido de leilões que tenham maiores possibilidades de capturar os potenciais benefícios num certame, conforme apresentado nas próximas seções.

### **3.3. PREÇO DE EQUILIBRIO NOS MERCADOS DE ENERGIA: PREÇO UNIFORME VS. *PAY-AS-BID***

Embora a teoria da equivalência das receitas enuncie que a receita de um leilão será a mesma tanto num modelo de preço uniforme quanto num modelo *pay-as-bid*, não há um consenso sobre qual modelo gera o maior benefício ao leiloeiro [36]. Porém, algumas características do mercado podem levar a preferência de um dos modelos.

Num mercado que tem o preço uniforme como regra, os vendedores são incentivados a ofertarem a custo de produção, pois é de conhecimento que se a sua oferta for aceita, ele será remunerado pelo preço da maior oferta de compra que complete a demanda negociada num leilão, ou seja, ele não só terá seus custos cobertos, como receberá uma margem oriunda da diferença entre a oferta do maior lance aceito e seu custo [37]. E se a sua oferta não for aceita, ainda assim é vantajoso para o vendedor, pois ele não teria os seus custos cobertos caso fizesse uma oferta inferior aos seus próprios custos.

Em contraste, num leilão com regra de preço seguindo o modelo *pay-as-bid*, cada vencedor receberá exatamente o valor que foi ofertado [35]. À primeira vista, é intuitivo supor que o leilão *pay-as-bid* é o mais eficiente, pois não faria sentido pagar a um vendedor um preço mais elevado do que o próprio preço a que ele se ofereceu a vender o produto. Porém, com regras diferentes de preço de fechamento do leilão, não é razoável supor que os participantes manterão sua estratégia de ofertas iguais a de um leilão de preço uniforme [38].

O comportamento natural dos participantes de um leilão *pay-as-bid* é tentar prever o preço de fechamento e dar seu lance com um valor aproximado ao da previsão [37]. Conforme descrito em [37], a opção pelo *pay-as-bid* pode causar algumas consequências indesejáveis, como o aumento dos custos para o pequeno produtor, pois ao se inserir a necessidade de previsão de preços do mercado um grande produtor terá economias de escala já que ele incorreria nos mesmo custos que um pequeno produtor [37].

Outra desvantagem é a possibilidade de *gaming* por parte dos participantes, ao fazer um lance alto para não ser despachado, um vendedor pode acumular capacidade e negociar sua capacidade num momento em que ele tenha previsto escassez de oferta e assim obter lucros extraordinários [37].

Conforme descrito em [38], há algumas desvantagens na aplicação de um modelo de leilão com preço uniforme. Isso se deve ao fato de que os mercados reais de energia não são efetivamente competitivos, sendo na melhor das hipóteses imperfeitos [38].

Portanto, a escolha entre os modelos de determinação dos preços de equilíbrio devem levar em conta as premissas não observadas pelo mercado em análise. Como exemplo, podem-se citar os diferentes produtos<sup>7</sup>, como no caso de um mercado de reserva, fazendo com se reduza a liquidez de cada leilão. Consequentemente, a premissa sobre produtos homogêneos adotada para validar o emprego do modelo de preço uniforme tem sua validade reduzida [38].

Conclui-se que, em situações onde a natureza não-homogênea dos produtos e há uma significativa incompletude do mercado, a modalidade *pay-as-bid* utilizando uma abordagem multiatributo de otimização tem um potencial promissor para o melhor funcionamento do mercado [38].

### **3.4. SISTEMÁTICAS DOS LEILÕES NO SEB**

No Brasil, a principal forma de contratação de energia elétrica é através dos leilões, sendo estes realizados pela CCEE e delegados pela ANEEL. Os certames

---

<sup>7</sup> Como exemplo, há os mercados de reserva da Califórnia e do New York Power Pool (NYPP), onde são negociados: reserva girante, reserva não-girante de dez minutos, reserva não-girante de trinta minutos e uma chamada de *regulation*, que é uma reserva destinada ao controle de frequência disponibilizada para o controle automático de geração [6].

têm como objetivo possibilitar que as distribuidoras cumpram o atendimento ao fornecimento da totalidade de seu mercado.

Na busca pela modicidade tarifária, os leilões são estabelecidos de forma que os vencedores do certame sejam definidos pelo critério de menor tarifa ofertada. A tese apresentada em [39] detalha uma série de propostas de aperfeiçoamento dos leilões de comercialização energia elétrica. Após o detalhamento do arcabouço teórico e da análise dos resultados dos leilões já realizados no SEB, o autor chega a algumas conclusões que resultam em sete propostas:

- a) **Adoção de preço teto adequado:** para aumentar a competitividade dos leilões, propõe-se elevar o preço;
- b) **Internalização dos custos de transmissão:** como os custos de transporte influenciam na competitividade dos empreendimentos, foi feita a proposta de se incluir esses custos nos parâmetros dos leilões;
- c) **Internalização dos custos ambientais:** o objetivo desta proposta é resolver o problema dos custos ambientais dos empreendimentos através da sua inclusão;
- d) **Contratação termelétrica:** o autor propõe que a contratação de energia proveniente das térmicas seja sazonalizada seguindo o modelo tarifário, ou seja, energia na ponta seca ou úmida, fora de ponta seca ou úmida;
- e) **Leilão combinatório:** para se aumentar a competitividade, o autor propõe a combinação entre leilão de geração e transmissão, gerando economias de escopo entre os empreendimentos;
- f) **Desfragmentação dos leilões:** a fim de se evitar a possibilidade de se exercer o poder de mercado pelos grandes players do SEB, o autor propõe a realização conjunta dos leilões de energia nova e existente; e
- g) **Maior integração entre os mercados livre e regulado:** o autor mostra as evidências que apontam para um desalinhamento entre os preços existentes no ACL e no ACR.

Ao concluir, o autor sustenta que a adoção dessas propostas teria o potencial de fazer com que o valor negociado nos leilões de comercialização de energia elétrica reflita melhor o custo social dos projetos, aumentando a eficiência dos certames.

A seguir, são feitas as descrições das sistemáticas de cada leilão no SEB, excluindo a do Leilão de Energia Existente, que será detalhado numa seção a parte.

#### **3.4.1. LEILÕES DE TRANSMISSÃO**

Os leilões de transmissão cumprem o papel da expansão da infraestrutura de transmissão no país. Nos editais publicados pela ANEEL estão contidas as especificações técnicas tanto das linhas de transmissão quanto das subestações que compõem um lote a ser leilado.

O valor teto é definido pela Receita Anual Permitida (RAP) que corresponde à receita anual que a transmissora terá direito pela prestação do serviço público, a partir da entrada em operação comercial da linha [27].

Os lances seguem os mecanismos de “envelope fechado” e primeiro preço. Se a diferença entre a menor oferta e as outras propostas for superior a 5%, vence o proponente da menor proposta. Porém, se a diferença for menor ou igual a esse percentual, o leilão passa para uma segunda etapa onde os lances são feitos por viva voz. Os valores mínimos a serem oferecidos também são fixados entre um lance e outro.

Os vencedores têm o direito a receber a RAP por trinta anos. Para tanto, as instalações devem estar prontas para entrar em operação num prazo que vai de 36 a 60 meses, contados a partir da assinatura dos contratos [27].

#### **3.4.2. LEILÕES DE ENERGIA NOVA**

Nos primeiros leilões de energia nova ocorriam a licitação exclusivamente de empreendimentos com fonte hídrica e térmica. Além da diferença nos certames, há também uma diferença nos prazos de contratação, pois geralmente, as usinas hidrelétricas (UHEs) sendo concedidas por trinta anos e as termelétricas (UTES) por

quinze. A partir do Leilão A-5 de 2014, foi liberada a participação de fontes eólicas e solares [40].

Seguindo o mesmo formato, o 23º Leilão de Energia Nova possibilitou a participação de seis categorias de usinas: UHEs divididas em potência instalada inferior a 50 MW e superior a este valor, UTEs em três combustíveis: a biomassa, a gás natural e a carvão e, por último as usinas eólicas [25].

Para se descrever o funcionamento deste tipo de leilão, foi tomada como base a sistemática descrita em [41]. A metodologia é composta de duas fases, sendo que elas se subdividem em etapas conforme mostra a Figura 12. Na primeira fase, há duas etapas, uma inicial, na qual os empreendedores submetem um único lance para a UHE correspondente, devendo ser igual ou inferior ao preço inicial, “de referência”.



Figura 12 – Sistemática dos Leilões de Energia Nova .

Ao se comparar os lances dos dois menores preços e se a diferença entre eles for superior a 5%, o vencedor é o ofertante de menor preço. Todavia, se a diferença for menor, é iniciada a etapa contínua, com participação do empreendedor que ofertou o menor preço junto com aqueles cujas propostas são superiores em até 5% do menor preço de lance, que será o valor inicial desta etapa contínua. Essa etapa continua até que a diferença entre o menor preço de lance e pelo menos uma das demais propostas seja igual ou inferior a cinco por cento.

Terminada a etapa contínua, se inicia a segunda fase, que é composta por duas etapas, uma “hídrica” e uma de “outras fontes”. Nesta está incluída a fonte térmica.

A etapa hídrica, destinada às UHEs, se divide em: (i) rodadas uniformes, onde há a submissão de um único lance com preço associado à quantidade de lotes ofertados nesta etapa, e, (ii) discriminatória, onde ocorre um único lance de preço associado à quantidade de lotes classificada para essa rodada.

A etapa “outras fontes” também é dividida em rodadas uniforme e discriminatória. A primeira se inicia após o término da etapa hídrica, sendo submetidas ofertas de quantidades associadas ao preço corrente da rodada. Por fim, na etapa discriminatória é feita a submissão de um único lance com preço associado à quantidade de lotes classificada para essa etapa.

### **3.4.3. LEILÕES DE FONTES ALTERNATIVAS**

O objetivo deste leilão é, além de aumentar o parque gerador do SEB, contratar fontes alternativas de energia, como: centrais eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e centrais a biomassa, incentivando, assim, uma maior diversificação da matriz de energia elétrica.

A descrição deste tipo de leilão é feita baseando-se na sistemática do 3º Leilão Fontes Alternativas, que foi composta de três fases, cada uma se dividindo em etapas conforme definido em [42].

Na Primeira Fase, ocorrem duas etapas: uma uniforme, na qual os proponentes vendedores submetem a cada rodada lances com quantidades associadas ao preço corrente e uma discriminatória, onde há a submissão de um único lance, sendo específica para o produto biomassa.

A Segunda Fase é composta apenas de uma etapa, onde os vendedores submetem um único lance seja qual for o produto, biomassa ou eólica. A terceira fase é dividida em duas etapas, uma Uniforme, onde os ofertantes submetem a cada rodada lances em função do preço corrente da rodada e uma Discriminatória, na qual é submetido um único lance através de um preço associado à quantidade de lotes classificada na etapa anterior.

Ambos os produtos negociados nesse certame possuem contratação por vinte anos.

#### **3.4.4. LEILÕES DE ENERGIA DE RESERVA**

Os leilões de energia de reserva exercem o papel de viabilizar investimentos que auxiliam na segurança do fornecimento de energia do SIN. No certame do Oitavo Leilão de Energia de Reserva foi negociada energia proveniente de empreendimentos de geração por fonte solar fotovoltaica, que tenham potência instalada maior ou igual a 5 MW e Custo Variável Unitário (CVU) igual a zero.

A sistemática segue a diretriz exposta em [43], que determina que o leilão seja composto de duas fases. Na primeira ocorre uma etapa única, na qual são ofertados lances de quantidade de lotes e preço de lance igual ou inferior ao valor inicial de cada produto. Em seguida, os lances são classificados por ordem crescente de preço.

A Segunda Fase é composta de duas etapas, uma Uniforme, onde são submetidos os lotes em função do preço de lance e uma Discriminatória, onde é feita a submissão de um único lance com preço associado à quantidade de lotes classificada na etapa anterior.

#### **3.4.5. LEILÕES DE PROJETOS ESTRUTURANTES**

Para os empreendimentos classificados como estratégicos para a expansão do sistema, o governo realiza os chamados Leilões de Projetos Estruturantes [20]. Exemplos recentes deste tipo de leilão são os que aconteceram na licitação das usinas do Rio Madeira: UHE Santo Antônio, em 2007, UHE Jirau, em 2008 e UHE Belo Monte em 2010.

### **3.5. LEILÕES DE ENERGIA EXISTENTE**

Este leilão, também conhecido pela abreviação LEE, foi estabelecido visando a contratação de energia proveniente de empreendimentos existentes, atendendo às demandas das distribuidoras [25], geralmente ocorrendo no horizonte A-1. Desta forma, assegura-se a continuidade da participação no mercado das usinas em operação comercial que já tiveram seus investimentos realizados.

### 3.5.1. HISTÓRICO DOS LEEs

Desde o seu início, em 2004, foram realizados pela ANEEL quinze LEEs [25]. No entanto, no sexto e no 11º leilão, ocorridos em 2007 e 2013, não houve negociação. E em 2008 teria ocorrido o 7º LEE, porém, o certame foi cancelado, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado dos Leilões de Energia Existente. Fonte: [25]

| Leilão       | Data       | Energia Contratada (MWh) | Energia Contratada (MW <sub>méd</sub> ) | Montante negociado (milhões de R\$) | Preço médio (R\$/MWh) |
|--------------|------------|--------------------------|---|-------------------------------------|-----------------------|
| 1º LEE       | 07/12/2004 | 1.192.737.024            | 17.008                                  | 136.985                             | 114,85                |
| 2º LEE       | 02/04/2005 | 92.919.600               | 1.325                                   | 13.957                              | 150,20                |
| 3º LEE       | 11/10/2005 | 2.683.008                | 102                                     | 299                                 | 111,51                |
| 4º LEE       | 11/10/2005 | 81.769.248               | 1.166                                   | 13.747                              | 168,12                |
| 5º LEE       | 14/12/2006 | 14.306.112               | 204                                     | 2.550                               | 178,26                |
| 6º LEE       | 06/12/2007 | -                        | -                                       | -                                   | -                     |
| 7º LEE       | 28/11/2008 | -                        | -                                       | -                                   | -                     |
| 8º LEE       | 30/11/2009 | 3.681.216                | 84                                      | 539                                 | 146,42                |
| 9º LEE       | 10/12/2010 | 2.577.792                | 98                                      | 377                                 | 146,28                |
| 10º LEE      | 30/11/2011 | 5.129.280                | 195                                     | 539                                 | 105,11                |
| 11º LEE      | 24/06/2013 | -                        | -                                       | -                                   | -                     |
| 12º LEE      | 17/12/2013 | 37.316.306               | 2.571                                   | 7.252                               | 194,33                |
| 13º LEE      | 30/04/2014 | 101.692.338              | 2.046                                   | 30.944                              | 304,29                |
| 14º LEE      | 05/12/2014 | 16.361.088               | 622                                     | 3.535                               | 216,05                |
| 15º LEE      | 11/12/2015 | 47.018.016               | 1.954                                   | 6.948                               | 147,77                |
| <b>Total</b> |            | 1.598.191.028            | 27.375                                  | 217.672                             |                       |

O primeiro LEE ocorreu com o início do Novo Modelo do SEB, onde foram negociados 1.192,74 TWh. Este foi o maior volume já negociado num LEE, correspondendo a aproximadamente 75% de todo o montante de energia existente. Além do produto quantidade. No 13º LEE, o produto disponibilidade passou a ser oferecido.

### 3.5.2. SISTEMÁTICA DO 15º LEE

A sistemática deste certame foi composta de duas etapas [44]. A primeira etapa é uniforme, podendo haver diversas rodadas sucessivas. No decorrer das rodadas o sistema fornece o preço corrente, ou ICB no caso do produto disponibilidade. Nas Figuras 13 a 16, é ilustrada a sistemática completa do 15º LEE, acompanhada dos seus respectivos equacionamentos matemáticos que auxiliaram no desenvolvimento da Aplicação WEB descrita no próximo capítulo.

Antes do início do leilão, é definida a oferta de referência (OR), valor que é determinado em função da quantidade demandada (QD) do leilão dividida por um fator referência (FR), conforme a Equação 6.

$$OR = \frac{QD}{FR} \quad (8)$$

Onde: FR é número real positivo e menor do que um.

Também são definidos o preço inicial (PI) e um decremento que irá fazer com que o preço de lance descenda nas sucessivas rodadas da primeira etapa.

O leilão se inicia com a primeira rodada da etapa uniforme, onde o vendedor deverá inserir o número de lotes do empreendimento que ele deseja ofertar ao preço de lance definido pelo sistema, conforme sigla PL1 nas Figura 13a e 13b. A parcela não ofertada da Garantia Física do empreendimento não poderá ser utilizada em um novo lance nas rodadas seguintes.

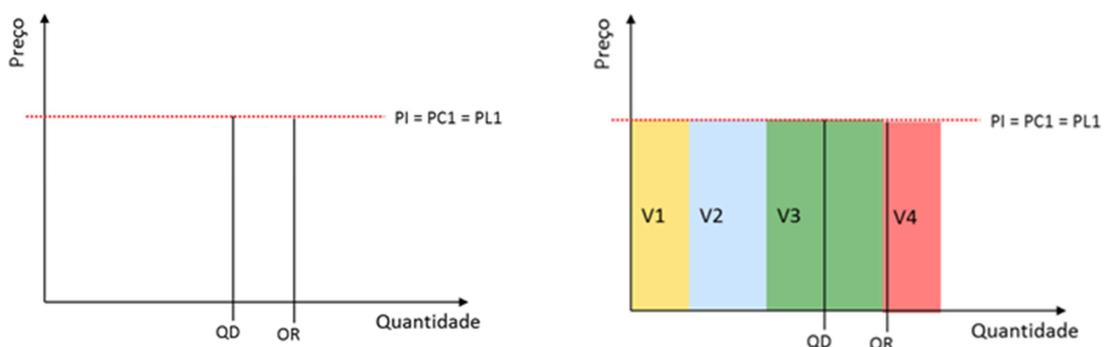


Figura 13 – Primeira fase: Abertura do leilão (a) Inserção de Lances da primeira rodada (b). [23]

O sistema processa as ofertas, e caso a quantidade total ofertada (QTO) seja superior à Oferta de Referência (OR), o Sistema define um novo preço corrente PC2, que é igual a PL1. Ou seja, a situação da primeira rodada atende à condição mostrada em (7):

$$QTO > OR \quad (9)$$

Portanto, o leilão passará para a segunda rodada. Em seguida, conforme mostrado na Figura 14a, é definido também um novo Preço de Lance, PL2, que é igual a PC2 menos o decremento definido para o certame. Os proponentes mais uma vez inserem seus lances que serão processados pelo sistema (Figura 14b).

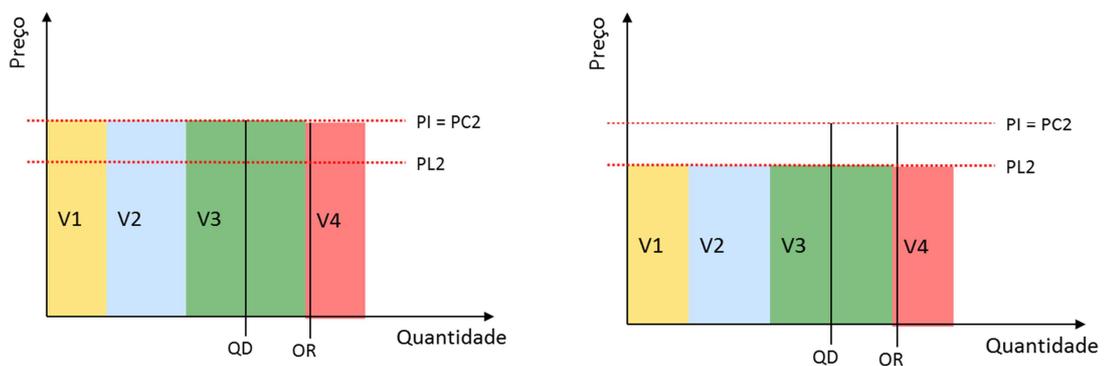


Figura 14 - Processamento do leilão(a) e Inserção de Lances da segunda rodada (b) [23].

Caso a quantidade total ofertada ainda seja superior à oferta de referência, o sistema define um novo preço corrente, PC3 (Figura 15a), que é igual a PL2 e um novo Preço de Lance, PL3, que é igual a PC3 menos o decremento. Os ofertantes mais uma vez definem a quantidade de lotes que desejam vender ao preço PL3 (Figura 15).

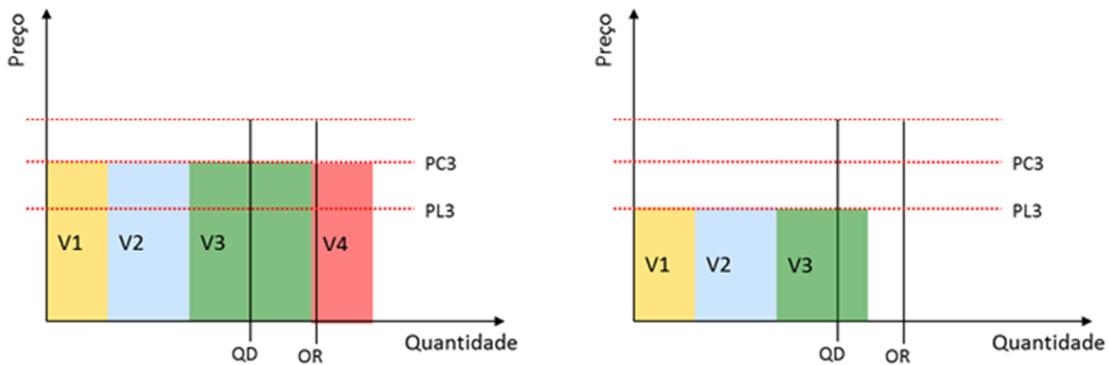


Figura 15 - Processamento do leilão(a) e Inserção de Lances da terceira rodada (b) [23].

Como mostrado na Figura 15b, percebe-se que a quantidade total ofertada é inferior à oferta de referência. Logo a condição  $QTO > OR$  não é atendida. Sendo assim, o sistema encerra a primeira fase, fazendo com que sejam classificados para a segunda fase os lances submetidos com preço igual ao preço corrente da última rodada, PC3.

Assim, é iniciada a segunda etapa, discriminatória, onde cada ofertante define o preço pelo qual venderá as quantidades classificadas para esta fase (Figura 16a). Porém, nesta fase, as ofertas deverão ser iguais ou inferiores ao menor valor entre o preço corrente e o do último lance válido, para a quantidade de lotes ofertada na penúltima rodada da etapa uniforme. Ao receber todas as ofertas desta fase, o sistema classifica os lances em ordem crescente de preços (Figura 16b).

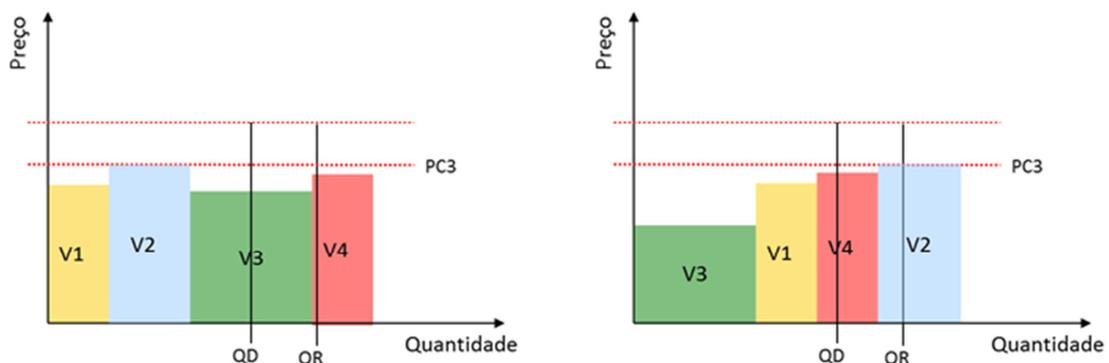


Figura 16 – Segunda fase: inserção dos lances(a) e Processamento do lances (b) [23].

A ordenação dos lances possibilita o sistema determinar o menor custo de aquisição da quantidade demandada a partir das ofertas de preço.

A Figura 17a mostra o resultado da aplicação deste critério após a ordenação dos lances. Assim, os lotes vencedores são determinados considerando como vencedoras, total ou parcialmente, somente as propostas que atenderem até o limite da quantidade demandada (Figura 17b).

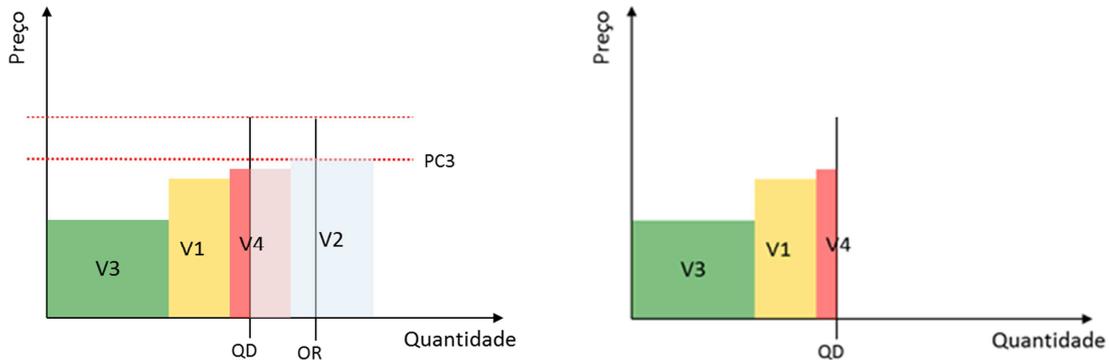


Figura 17– Resultados: Vencedores (a) e Lotes Atendidos (b) [23].

### 3.5.3. RESULTADOS DO 15ºLEE

No 15º LEE, foram oferecidas tanto a modalidade por quantidade quanto a por disponibilidade, sendo que nesta modalidade, foi possibilitada a negociação de energia proveniente não só das termelétricas convencionais, mas também de usinas a biomassa. Foi disponibilizada a comercialização de quatro produtos, todos com início em janeiro de 2016, da seguinte forma [45]:

- a) **Disponibilidade (05 ANOS):** representado pelo código – DIS01-05ANOS, oriundo de fonte termelétrica, incluindo biomassa, com término de contrato no final de 2020, tendo como preço inicial R\$ 112,00 (em R\$/MWh);
- b) **Disponibilidade (03 ANOS):** representado pelo código – DIS02-03ANOS, oriundo de fonte termelétrica, incluindo biomassa, com término de contrato no final de 2018, tendo como preço inicial R\$ 137,00 (em R\$/MWh);
- c) **Disponibilidade (01 ANO):** representado pelo código - DIS3-01ANO, sendo oriundo de fonte termelétrica, incluindo biomassa, com término de

contrato no final de 2016, tendo como preço inicial R\$ 167,00 (em R\$/MWh); e

- d) **Quantidade:** representado pelo código - QTD-03ANOS, sendo oriundo de outras fontes, com término de contrato no final de 2018, tendo como preço inicial R\$ 149,00 (em R\$/MWh).

Resumidamente, as características determinadas para os quatro produtos deste certame estão organizadas na Tabela 03.

Tabela 3 – Produtos oferecidos no certame [25].

| Descrição     | Prazo (anos) | Início de Suprimento | Fim de Suprimento | Produto         | Nº de horas | Preço Inicial (R\$/MWh) |
|---------------|--------------|----------------------|-------------------|-----------------|-------------|-------------------------|
| <b>DIS-01</b> | 05           | 01/01/2016           | 31/12/2020        | Disponibilidade | 43.848      | 112,00                  |
| <b>DIS-02</b> | 03           | 01/01/2016           | 31/12/2018        | Disponibilidade | 26.304      | 137,00                  |
| <b>DIS-03</b> | 01           | 01/01/2016           | 31/12/2016        | Disponibilidade | 8.784       | 167,00                  |
| <b>QTD-03</b> | 03           | 01/01/2016           | 31/12/2018        | Quantidade      | 26.304      | 149,00                  |

Após a realização do leilão, o resultado obtido para o produto disponibilidade por cinco anos, DIS1-05ANOS, foi a não negociação contratual, ou seja, não obteve oferta de venda, sendo o único a obter este resultado.

No entanto, para os demais produtos, foram contratados 1.954 lotes, totalizando 1.954 MW médios, ou 47.018.016 MWh, obtendo ainda o preço médio de R\$ 147,77/ MWh, movimentando aproximadamente R\$ 7 bilhões [25].

Em relação aos resultados dos produtos que obtiveram contratação, iniciando pelo Produto Disponibilidade - DIS2-03ANOS, foram contratados 631.296 MWh, resultando numa receita fixa de R\$27,7 milhões por ano a um preço de R\$ 129,25 MWh<sup>8</sup>, com um deságio de 5,6% em relação ao preço inicial. Os dois empreendimentos térmicos vencedores tem como combustível bagaço de cana e cavaco de madeira, conforme mostrado na Tabela 4.

<sup>8</sup> O preço médio é obtido através da média dos ICBs de cada empreendedor ponderados pelos lotes comercializados.

Tabela 4 – Resultados do produto disponibilidade 02 [25]

| Empresa Proprietária | Subm./UF | Comb.  | Potência (MW) | GF (MWméd) | Lotes contr. | Total (MWh) | ICB (R\$/MWh) | Receita Fixa (R\$/ano) |
|----------------------|----------|--------|---------------|------------|--------------|-------------|---------------|------------------------|
| GLENCANE             | SE/SP    | Bagaço | 40            | 17,30      | 06           | 43.848      | 112,00        | 7.355.189,99           |
| SUZANO               | N/MA     | Cavaco | 254,84        | 96,90      | 18           | 26.304      | 137,00        | 20.422.233,05          |
| Total                |          |        | 294,84        | 114,20     | 24           | 631.296     |               | 27.777.432,04          |

Em relação ao produto disponibilidade - DIS3-01ANO, conforme mostrado na Tabela 5, foram negociados 2.196.000 MWh, com preço médio de R\$ 162,47/MWh<sup>8</sup>, obtendo um deságio de 2,71%. A receita fixa alcançou o valor de R\$ 219,2 milhões.

Tabela 5 – resultados do produto disponibilidade 03 [25]

| Empresa Proprietária | Subm./UF | Comb.  | Potência (MW) | GF (MWméd) | Lotes contr. | Total (MWh) | ICB (R\$/MWh) | Receita Fixa (R\$/ano) |
|----------------------|----------|--------|---------------|------------|--------------|-------------|---------------|------------------------|
| ADECOAGRO            | SE/MS    | Bagaço | 120           | 44,3       | 15           | 131.760     | 161,29        | 22.338.000             |
| A. ALEGRE A          | S/PR     | Bagaço | 30            | 8,1        | 04           | 35.136      | 166,50        | 6.212.242              |
| A. ALEGRE B          | S/PR     | Bagaço | 42            | 20         | 08           | 70.272      | 166,50        | 12.259.094             |
| A. ALEGRE B          | S/PR     | Bagaço | 35            | 16,5       | 08           | 70.272      | 166,50        | 12.538.013             |
| A. ALEGRE B          | S/PR     | Bagaço | 35            | 7,1        | 02           | 17.568      | 166,50        | 3.057.940              |
| BARRA                | SE/SP    | Bagaço | 111           | 42,2       | 06           | 52.704      | 166,50        | 9.350.000              |
| B. GRANDE            | SE/SP    | Bagaço | 62,90         | 30,7       | 12           | 105.408     | 160,45        | 17.408.120             |
| BOA VISTA            | SE/GO    | Bagaço | 80            | 38,9       | 09           | 79.056      | 151,88        | 12.653.820             |
| CACU                 | SE/GO    | Bagaço | 130           | 35,5       | 08           | 70.272      | 164,50        | 12.751.794             |
| COSTA PINTO          | SE/SP    | Bagaço | 75            | 27,8       | 05           | 43.920      | 164,36        | 7.666.000              |
| ERB                  | SE/MG    | Bagaço | 41,40         | 30,9       | 06           | 52.704      | 159,44        | 4.694.394              |
| FERRARI              | SE/SP    | Bagaço | 80,50         | 35,6       | 05           | 43.920      | 165,49        | 7.440.554              |
| OER MIRANTE          | SE/SP    | Bagaço | 110           | 39         | 01           | 8.784       | 163           | 1.501.201              |
| OER N. ALV.          | SE/MS    | Bagaço | 130           | 44         | 01           | 8.784       | 163           | 1.489.191              |
| OER R. BRIL.         | SE/MS    | Bagaço | 141,02        | 35,6       | 05           | 43.920      | 165,50        | 7.732.656              |
| PETROBRAS            | NE/BA    | Gás    | 185,89        | 134,6      | 85           | 74.6640     | 167           | 16.036.171             |
| PETROBRAS            | SE/RJ    | Gás    | 1.058,30      | 986,6      | 29           | 25.4736     | 166,99        | 9.182.711              |
| RAFARD               | SE/SP    | Bagaço | 50            | 14,5       | 02           | 17.568      | 166,15        | 3.144.000              |
| SANTA CRUZ           | SE/SP    | Bagaço | 84            | 28         | 03           | 26.352      | 151,51        | 4.217.940              |
| SUZANO               | N/MA     | Cavaco | 254,84        | 96,9       | 30           | 263.520     | 144,98        | 38.106.000             |
| UNIVALEN             | SE/SP    | Bagaço | 45            | 14,5       | 04           | 35.136      | 165,63        | 6.254.208              |
| USJ                  | SE/SP    | Bagaço | 40,75         | 3,5        | 02           | 17.568      | 166,50        | 3.219.556              |
| Total                |          |        | 2.942,60      | 1.734,8    | 250          | 2.196.000   |               | 219.253.605            |

E por fim, o produto quantidade (QTD-03ANOS) movimentou um total de R\$ 6,5 bilhões, sendo negociados 44.190.720 MWh, com preço médio de R\$ 147,31/MWh, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados produto quantidade 03 [45].

| <b>Empresa Proprietária</b> | <b>Submercado UF</b> | <b>Lotes Contratados</b> | <b>Total (MWh)</b> | <b>Preço (R\$/MWh)</b> |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|------------------------|
| AES TIETE                   | SE/SP                | 90                       | 2.367.360          | 142                    |
| ALUPAR                      | N/SP                 | 39                       | 1.025.856          | 144,89                 |
| AMERICA                     | SE/SP                | 15                       | 394.560            | 145,48                 |
| BTG                         | N/SP                 | 337                      | 8.864.448          | 148,87                 |
| CACHOEIRA DOURADA           | SE/GO                | 85                       | 2.235.840          | 145,9                  |
| CAPITALE                    | N/SP                 | 10                       | 263.040            | 147,49                 |
| CAPITALE                    | S/SP                 | 10                       | 263.040            | 148,39                 |
| CAPITALE                    | SE/SP                | 10                       | 263.040            | 148,5                  |
| CEMIG                       | SE/MG                | 38                       | 999.552            | 147,5                  |
| COMERC                      | SE/SP                | 35                       | 920.640            | 147,5                  |
| COMPASS COM                 | SE/SP                | 17                       | 447.168            | 145                    |
| CPFL COM                    | S/SP                 | 70                       | 1.841.280          | 147,21                 |
| DMEE                        | S/MG                 | 6                        | 157.824            | 145                    |
| DUKE PARANAPAN              | SE/SP                | 70                       | 1.841.280          | 148,49                 |
| ECEL                        | N/PE                 | 10                       | 263.040            | 146,48                 |
| ECEL                        | S/PE                 | 10                       | 263.040            | 145,98                 |
| ECEL                        | SE/PE                | 10                       | 263.040            | 145,98                 |
| ECOM                        | S/SP                 | 10                       | 263.040            | 147,98                 |
| ECOM                        | SE/SP                | 10                       | 263.040            | 147,98                 |
| EDP COM                     | N/SP                 | 10                       | 263.040            | 143,49                 |
| EDP COM                     | S/SP                 | 25                       | 657.600            | 147,89                 |
| EDP COM                     | SE/SP                | 40                       | 1.052.160          | 145,49                 |
| ENERGEST                    | SE/SP                | 05                       | 131.520            | 145,49                 |
| ENERPEIXE                   | SE/SP                | 15                       | 394.560            | 147                    |
| ESBR                        | SE/MG                | 18                       | 473.472            | 148                    |
| GERAMAMORE                  | SE/RJ                | 300                      | 7.891.200          | 147,49                 |
| LEROS                       | N/SP                 | 30                       | 789.120            | 147,85                 |
| MATRIX                      | SE/SP                | 50                       | 1.315.200          | 148,38                 |
| QGCE                        | SE/SP                | 10                       | 263.040            | 144,88                 |
| QGE                         | SE/SP                | 25                       | 657.600            | 146,99                 |
| VOTENER                     | N/SP                 | 40                       | 1.052.160          | 147,9                  |
| VOTENER                     | S/SP                 | 30                       | 789.120            | 147,9                  |
| VOTENER                     | SE/SP                | 200                      | 5.260.800          | 147,9                  |
| <b>Total</b>                |                      | <b>1.680</b>             | <b>44.190.720</b>  |                        |

A Figura 18 mostra um resumo dos resultados do 15º LEE, fazendo uma comparação entre o preço inicial e o preço médio originado pelo certame, dando um resumo dos resultados em relação aos preços dos produtos.

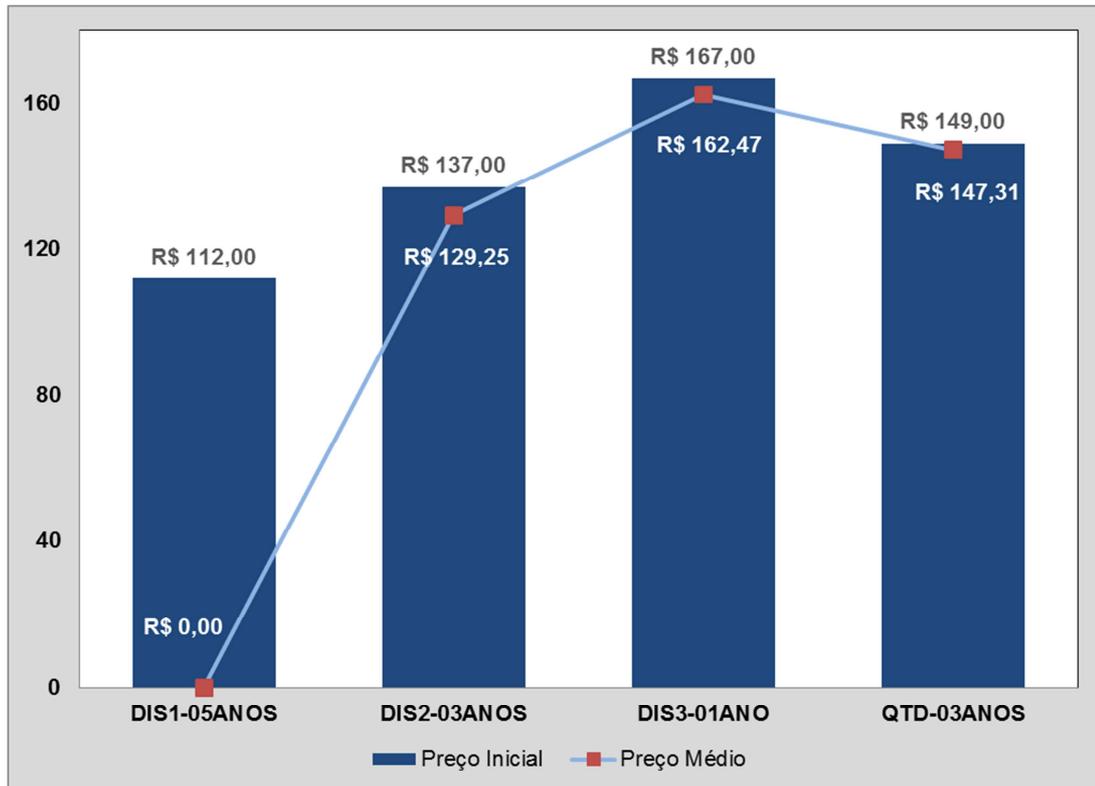


Figura 18 - Resultados do 15º LEE: Preço Inicial x Preço Médio [25].

A compreensão da sistemática exposta nesse capítulo, bem como os resultados obtidos, é essencial para o entendimento das regras definidas nos LEEs. Foi a partir dessas regras que o sistema desenvolvido para este trabalho se baseou. Os resultados serão analisados de maneira similar, conforme mostrado nos capítulos seguintes.

## 4. DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR

Neste capítulo, são abordados: o ambiente web, a concepção da aplicação e os motivos que levaram a optar por uma aplicação web, apresentando como justificativas as suas vantagens e benefícios. Em seguida, é feita a descrição do papel de cada linguagem utilizada no desenvolvimento da ferramenta.

### 4.1. CONCEITUAÇÃO DE APLICAÇÃO WEB

O progresso tecnológico e a difusão do acesso à internet proporcionaram o desenvolvimento de um novo paradigma na sociedade em termos de comunicação, comércio e serviços. Com isso, foi possibilitado também o desenvolvimento de aplicações que aproveitassem as vantagens do ambiente proporcionado pela internet.

Em relação às aplicações web, algumas terminologias importantes podem ser definidas, tais como: *web site*, sistemas *web*, aplicações de internet, aplicações baseadas na *web* [46].

Em [47], é feita uma definição sobre as aplicações web que diz que uma aplicação web é um sistema de software baseado nas tecnologias e nos padrões *World Wide Web* capaz de prover recursos oriundos da web através de um navegador de internet.

Uma descrição mais abrangente, onde são classificadas sete categorias de aplicações web, indo desde as mais básicas até os complexos sistemas com múltiplas funcionalidades, é fornecida em [48], que relaciona os seguintes tipos de aplicações:

- i. **Aplicações Informativas:** jornais on-line, catálogos de produtos, classificados, livros eletrônicos;
- ii. **Aplicações Interativas:** jogos on-line e aplicações com registro de usuários;
- iii. **Aplicações transacionais:** compras eletrônicas (*e-commerce*) e *internet banking*;

- iv. **Workflow:** aplicações que permitem o acompanhamento de processos;
- v. **Ambientes colaborativos de trabalho:** são aplicações que possibilitam que equipes de desenvolvedores realizem em conjunto a produção on-line de alguma tecnologia, um software, por exemplo;
- vi. **Mercados e comunidades on-line:** como, por exemplo, grupos de discussões, fóruns e ambientes de leilões on-line; e
- vii. **Portais Web:** são aplicações que fornecem uma ampla gama de serviços: e-mail, notícias, classificados, entre outros.

Um ponto geralmente em comum entre elas é a utilização da arquitetura cliente-servidor. Através deste conceito, os dados e serviços são intercambiados, podendo ser entre o servidor e o usuário (cliente), ou mesmo para a comunicação entre sistemas que funcionem em conjunto.

Conforme dito, as aplicações geralmente são acessadas através de navegadores de internet que respondem às solicitações feitas pelos usuários. A Figura 19 ilustra como foi aplicado este conceito na concepção do simulador.

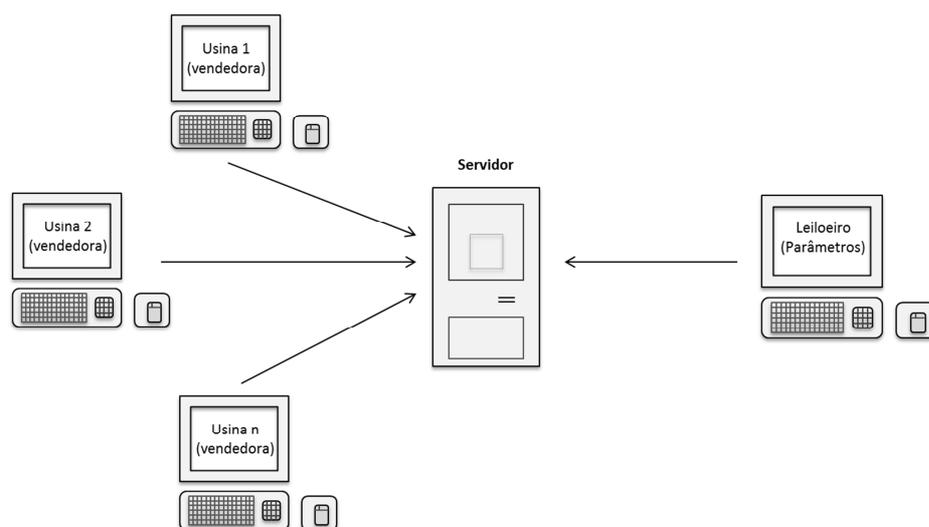


Figura 19 - Arquitetura Cliente-Servidor aplicada ao Simulador.

O funcionamento se dá da seguinte maneira; um usuário acessa o seu navegador, que irá retornar a este mesmo usuário o processamento das regras de

negócio contidas no código armazenado no servidor. Ou seja, o servidor recebe uma solicitação e responde ao cliente conforme o sistema foi programado.

## 4.2. ARQUITETURA EM CAMADAS

A decomposição de sistemas complexos em camadas é uma das técnicas mais utilizadas e facilita a compreensão e o desenvolvimento dos mesmos [49]. Uma aplicação desenvolvida em camadas permite o seu acesso através de vários tipos de dispositivos que tenham um navegador instalado. Isso se deve ao fato de que as camadas especializadas são retiradas do lado do cliente, ficando contidas no servidor.

Assim, não há a necessidade da instalação de softwares específicos na máquina do cliente para acessar a aplicação. Em um modelo em três camadas há as seguintes partes [50]:

- a) **Camada de apresentação:** também chamada de *view*, que consiste na interface da aplicação com o usuário, sendo que é através dela que são exibidas as informações relacionadas aos serviços, onde são visualizadas as páginas de navegação e onde o cliente faz suas requisições às outras camadas da aplicação;
- b) **Camada de negócio:** também chamada de lógica da aplicação (ou ainda, *controller*), onde são implementadas as regras de negócio e funcionalidades. Esta camada não é acessível ao cliente;
- c) **Camada de Dados:** também chamada de *model*; nesta camada são recebidas as requisições da camada de negócios, que por sua vez, demandam da camada de dados requisições a um banco de dados, onde estão armazenados não só os dados, mas também arquivos, por exemplo.

A vantagem desta metodologia é a possibilidade de se dividir as tarefas de desenvolvimento entre profissionais ou equipes que não precisam necessariamente ter um conhecimento profundo das outras camadas que integram o software.

Além disso, há uma maior facilidade na manutenção da aplicação, pois uma mudança necessária no código da aplicação, em virtude de alguma atualização, por exemplo, só precisará ser feita no arquivo depositado no servidor de aplicação e não em cada uma das máquinas, como num sistema nativo. E a separação das camadas permite uma maior flexibilidade para acréscimo de funcionalidades ao sistema.

### **4.3. DESENVOLVIMENTO DO SIMULADOR DE LEILÕES**

Na aplicação deste trabalho, foram identificados dois tipos de usuários que desempenham papéis diferentes durante o leilão. Na Figura 19, é exibida a ilustração desses papéis, onde um usuário (Administrador) faz o papel de leiloeiro, sendo exercido por um único usuário que irá fornecer os parâmetros do leilão e conduzir o fluxo da sistemática implementada. O outro tipo de usuário é o player, que exerce o papel das usinas geradoras ao fazer as ofertas nos leilões.

Como num leilão real, este papel pode ser desempenhado por inúmeros usuários ao mesmo tempo. Uma razão que motivou a adoção de uma aplicação web foi a dinâmica de um leilão tal como acontece no SEB, marcado pela necessidade do processamento em tempo real das suas informações inseridas por múltiplos usuários realizadas concomitantemente.

Adicionalmente, através da opção por uma aplicação web para o desenvolvimento do simulador, é permitido que se reproduza o mesmo ambiente de um leilão sem que seja necessária a utilização de um equipamento com configuração específica, bastando ao usuário apenas um dispositivo com navegador de internet.

Há ainda duas facilidades nessa opção, uma por parte do desenvolvedor e outra por parte dos usuários. A primeira é a utilização de um software livre para a implementação do sistema, sem custos e com uma ampla fonte de recursos disponibilizados na internet. A segunda é a possibilidade do usuário participar da simulação de um leilão sem as possíveis barreiras que haveria caso tivesse sido desenvolvido para um software com licença de uso.

Para que houvesse a distinção desses papéis no simulador, foi necessária a adoção de um sistema de controle de acesso dos usuários à aplicação. Isso foi possibilitado através do uso de *logins* e senhas. Assim, foi necessária a construção de um banco de dados que os armazenasse para a validação do acesso dos usuários ao sistema. Outro requisito identificado que motivou a construção de um banco de dados foi a necessidade de armazenamento dos dados dos leilões para a sua análise posterior.

A lógica por trás da sistemática do leilão requer que os dados de ofertas inseridos pelos participantes sejam armazenados e processados para que em conjunto com os dados inseridos pelo administrador, o sistema possa dar sequência nas regras do leilão e determinar o seu resultado.

Na Figura 20, está ilustrada a estrutura do banco de dados com as respectivas tabelas, campos, e relacionamentos.

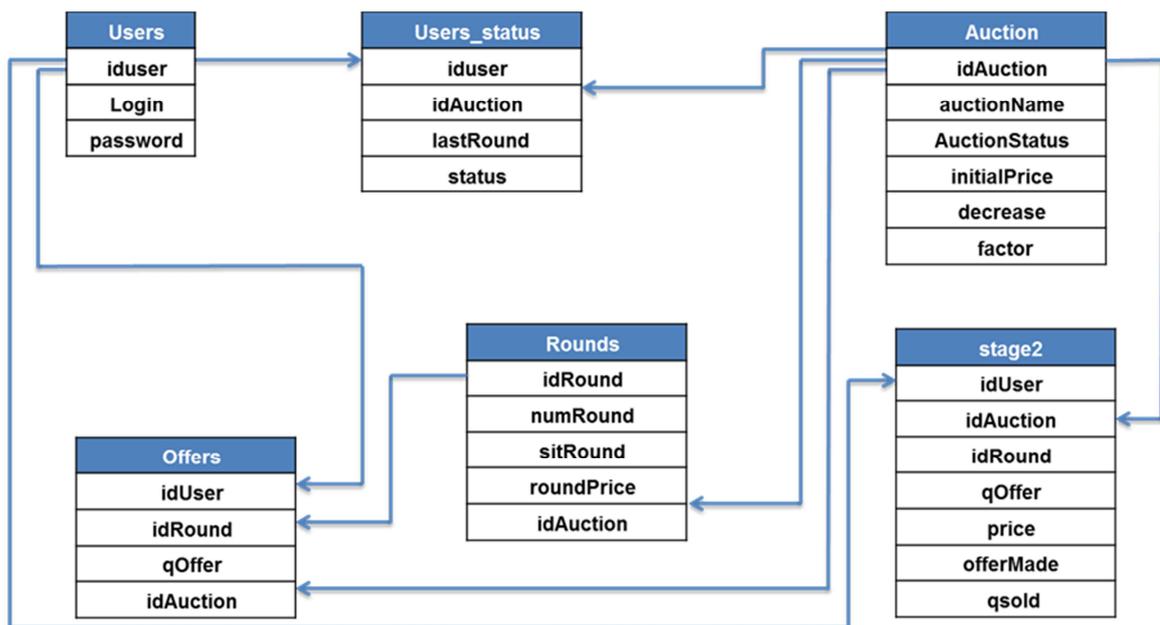


Figura 20 - Tabelas do banco de dados e suas relações.

Conhecidos os requisitos do simulador e as motivações pela adoção de uma aplicação *web* para desenvolvê-lo, o passo seguinte é definir em qual linguagem o simulador pode ser implementado.

### 4.3.1. TECNOLOGIAS APLICADAS NO DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento do simulador, foram escolhidas as tecnologias PHP e MySQL, por serem tecnologias muito eficientes, consolidadas no mercado e terem sido criadas visando o emprego em aplicações web (intranet e internet) [56].

Durante a implementação dos códigos, foi utilizada uma plataforma WAMP que é um software que emula o modelo cliente-servidor através da integração das tecnologias - **W**indows, **A**pache, **M**ySQL e **P**HP, sendo as iniciais de cada uma delas a origem do seu nome [51].

Dentro da terminologia da engenharia *web*, as tecnologias utilizadas no desenvolvimento das aplicações são classificadas em: *server-side* (pelo lado do servidor) e *client-side* (pelo lado do cliente), dependendo a que se destina o código escrito pelo desenvolvedor [49].

#### a) Tecnologias do lado do cliente

No lado do cliente (do usuário), uma tecnologia é empregada para desenvolver códigos que atuem diretamente no navegador do usuário. No simulador, foi empregado o HTML que é uma linguagem de marcação de hipertexto utilizada na construção de páginas. Os seus códigos são interpretados pelos navegadores, através de um documento escrito da linguagem HTML, que possibilita visualização das páginas de um sistema web, por exemplo.

Os arquivos escritos em código HTML contêm textos com etiquetas de marcação (*markup tags*) que direcionam o navegador como mostrar o conteúdo e um arquivo HTML na página [52].

As principais *tags* do HTML5 que formam a estrutura de uma página e suas funções são [52]:

- I. **<header>** define o cabeçalho de uma página ou de uma seção;
- II. **<footer>** define o rodapé de uma página o seção;
- III. **<nav>** define uma área de navegação da página; e
- IV. **<section>** define uma seção de uma página.

O conteúdo de uma página pode ser variável, desde menus, links ou tabelas, até mesmo arquivos como imagens, áudios ou vídeos [53].

Um recurso frequentemente empregado no desenvolvimento do simulador foi o uso de formulários que são implementados através da *tag* `<form>` [52]. Os dados a serem inseridos são desenvolvidos pelas *tags* de controle de entrada ou de lista de seleções [52]. A seguir são mostrados alguns exemplos de *tags* utilizadas na elaboração dos formulários usados no simulador [52].

- I. **<submit>** cria um botão para enviar dados;
- II. **<reset>** limpa os dados de um formulário;
- III. **<radio>** cria uma caixa de seleção única;
- IV. **<checkbox>** cria uma caixa de seleção, como por exemplo, “sim ou não”, “masculino ou feminino”;
- V. **<text>** cria uma caixa de texto; e
- VI. **<password>** cria uma caixa de texto que não permite a visualização do seu conteúdo durante a inserção do dado campo.

Porém, com o aumento da complexidade das páginas, foi demandada uma interface mais amigável para o usuário [54]. Para tanto, foi utilizada a linguagem CSS (*Cascading Style Sheets*), que especifica a apresentação visual de um documento escrito em HTML [54].

A estilização de uma página pode ser feita através de *tags*, porém, para aplicações de grande porte e múltiplas interfaces, isto gera um complicador, pois torna trabalhosa a atualização das diferentes páginas contidas numa aplicação. Com a estilização do HTML através do CSS, a alteração no arquivo de uma folha de estilo irá se refletir em todos os elementos da página que utilizam esta mesma folha para a formação do seu conteúdo.

Todavia, utilizando apenas o HTML, não é possível manipular variáveis declaradas pelo usuário, nem desenvolver aplicações que requeiram páginas dinâmicas ou que requeiram cálculos matemáticos [53]. Este problema pode ser resolvido pela linguagem PHP, conforme descrito na próxima seção.

## b) Tecnologias do lado do servidor

As tecnologias do lado do servidor fornecem a codificação da camada lógica de uma aplicação, recebendo as requisições de uma arquitetura cliente-servidor [49]. A linguagem utilizada para desempenhar este papel no simulador foi o PHP, considerada como uma linguagem extremamente funcional, com recursos voltados para web e em constante evolução [51].

O PHP é classificado como uma linguagem *script*, isso significa que ela é executada no interior de outras linguagens de programação, ou seja, o código PHP é implementado no interior do código HTML [51].

Outra característica é a execução pelo lado do servidor. Nesse tipo de linguagem o usuário, ao executar uma ação na tela do sistema, requisita uma informação ao servidor e o código escrito em PHP gera um arquivo em HTML que é visualizado no navegador do cliente [55]. A Figura 21 mostra como a arquitetura Cliente-Servidor em conjunto com as tecnologias escolhidas foram aplicadas no desenvolvimento do simulador.

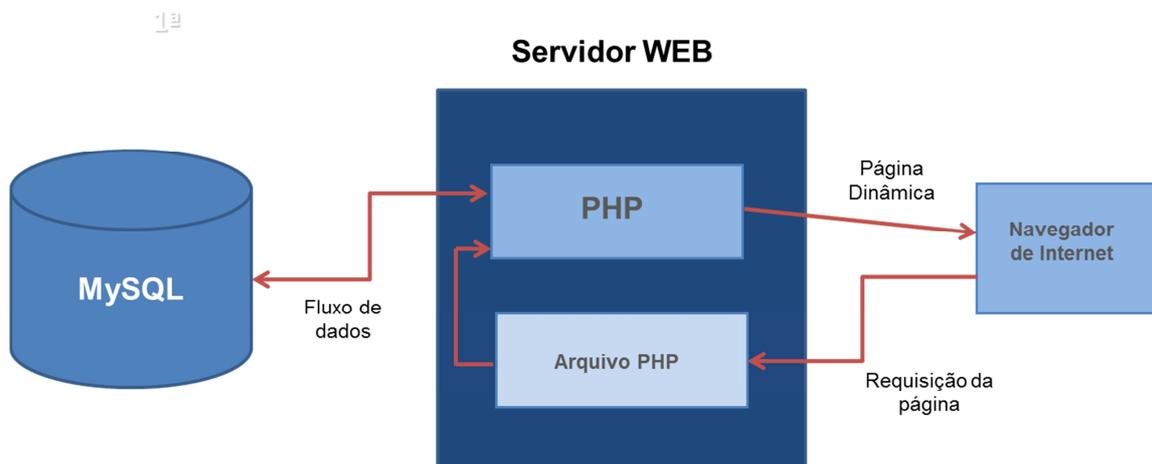


Figura 21 - Arquitetura do Sistema Desenvolvido [55].

Sendo assim, não cabe ao navegador o processamento dos dados intercambiados entre cliente e servidor, diferentemente da linguagem JavaScript, por exemplo, que é uma linguagem *client-side* [55]. Nela, as informações são processadas no próprio navegador.

Além de ser uma linguagem que pode ser executada em qualquer sistema operacional, o PHP possibilita a integração com um banco de dados, como Oracle, PostgreSQL, o MySQL, dentre outros [55].

O PHP conta com uma extensa biblioteca de funções SQL para manipular os dados de um banco. Esta foi uma das razões por ter se optado neste trabalho pelo uso do MySQL como Sistema Gerenciador de Banco de Dados, que usa a linguagem SQL para fazer a conexão entre um banco de dados e um sistema.

Assim como o PHP, o MySQL também tem vantagens que justificam a sua escolha, como por exemplo, a gratuidade da sua licença de uso, servindo também para uma ampla possibilidade de aplicações [51].

### **c) Interfaces do simulador**

No desenvolvimento do simulador, procurou-se seguir as características de qualidade de software baseadas na ISO/IEC 25010 [56], no que se refere ao uso da norma em aplicações web de acordo com as seguintes diretrizes [57]:

- a) Funcionalidade: prover funcionalidades que satisfaçam ao usuário em suas necessidades declaradas e implícitas, dentro de um determinado contexto de uso;
- b) Confiabilidade: manter o nível de desempenho nas condições estabelecidas;
- c) Usabilidade: desenvolver um produto compreensível, com seu funcionamento aprendido, que possa ser operado e ser atraente ao usuário;
- d) Eficiência: ter um tempo de execução e prover recursos envolvidos para que sejam compatíveis com o nível de desempenho do software;
- e) Manutenibilidade: possibilitar que a aplicação seja modificável, possibilitando tanto melhorias ou extensões de funcionalidade quanto correções de defeitos, falhas ou erros; e

- f) Portabilidade: fazer com que o sistema tenha a capacidade de ser transferido de um ambiente para outro.

Para que fossem mantidas as características reais de um ambiente de comercialização de energia elétrica, a aplicação foi desenvolvida com controle de níveis de acesso, realizado através de *logins* diferenciados para cada papel desempenhado, players e leiloeiro, nas simulações dos leilões. Assim, os lances realizados pelos participantes são de conhecimento apenas do leiloeiro e a sistemática implementada é a mesma descrita no quarto capítulo.

A seguir, é feita a descrição das telas que integram o sistema. A navegação pelas telas do sistema foi realizada através da simulação de um leilão “teste”, nomeado LEE100, participando com apenas três usinas: Usina 01, Usina 02 e Usina 03, previamente cadastradas.

Conforme mostrado na Figura 22, a primeira tela é a de *login*, a partir da qual será mostrada ao usuário a interface seguinte a depender do seu papel no sistema.

Simulador de Leilões de Energia

Faça o seu login

Usuário :

Senha :

Login

Copyright © David Anderson Veiga Gonçalves  
Contato: david.engel.uff@gmail.com

Figura 22 - Tela de *Login*.

Caso o usuário logado seja o administrador (exercendo o papel de leiloeiro), e não haja algum leilão em andamento, será mostrada a tela da Figura 23. Nela, o usuário será reconhecido na parte superior da tela, logo abaixo do menu. Nessa

mesma tela o administrador pode cadastrar um leilão através do preenchimento dos campos indicados no formulário e em seguida colocar o leilão em funcionamento.

The screenshot shows a web interface for an administrator. At the top, there is a navigation bar with the following items: 'Definir Estratégias', 'Consultar Leilões', 'Histórico de Leilões', 'Ajuda', and 'Logout' (highlighted in red). Below the navigation bar, a welcome message reads 'Seja bem vindo: Administrador'. The main content area is titled 'Preencha os campos abaixo para criar o leilão' and contains a form with the following fields: 'Nome:' with a text input containing 'nome do leilão'; 'Demanda:' with a text input containing 'quantidade de demanda'; 'Preço inicial:' with a text input containing 'preço inicial'; 'Decremento:' with a text input containing 'decremento'; and 'Estratégia:' with a dropdown menu showing 'Estratégia 01'. A blue 'CRIAR' button is positioned below the form. At the bottom of the page, there is a footer with the text: 'Copyright © David Anderson Veiga Gonçalves' and 'Contato: david.engel.uff@gmail.com'.

Figura 23 - Tela de Cadastramento do Leilão.

Para o LEE100 os parâmetros cadastrados, além do nome do leilão, foram: demanda igual a 5.000 MW, preço inicial de 800,00 R\$/MW e decremento de 5,00 R\$/MW. O campo estratégia foi deixado em branco. Além da criação do leilão, essa tela oferece outras funcionalidades no menu disponível na parte superior, como:

- a) **DEFINIR ESTRATÉGIAS:** onde são definidos os parâmetros de estratégias para a máquina para competir com os usuários. Essa função está em desenvolvimento e será aplicada em futuros trabalhos;
- b) **CONSULTAR LEILÕES:** onde são consultados os leilões já realizados;
- c) **HISTÓRICO DOS LEILÕES:** onde dados históricos dos leilões já realizados são visualizados graficamente; e

d) **LOGOUT**: onde o usuário deixa o sistema.

Após a criação do leilão, o administrador deverá iniciar o leilão através do botão que consta na Figura 24. Os parâmetros cadastrados no banco de dados também são mostrados, permitindo a conferência dos dados.



Figura 24 – Tela de inicialização do Leilão.

Caso o usuário logado seja um *player* (representando uma usina) e havendo um leilão a ser iniciado, a tela visualizada é mostrada na Figura 25. Nessa tela, além da identificação do usuário, são mostrados os parâmetros do leilão a ser iniciado. Todos os demais usuários logados no papel de *player* verão telas similares mudando apenas o nome do usuário mostrado na parte superior da tela.



Figura 25 – Tela início leilão para o usuário.

Ainda para os usuários definidos como *player*, há a tela visualizada após o início do leilão dado pelo administrador, Figura 26, onde é disponibilizado um campo para receber os lances. O preço corrente e o número da rodada são mostrados juntamente com um botão para efetivar o lance.

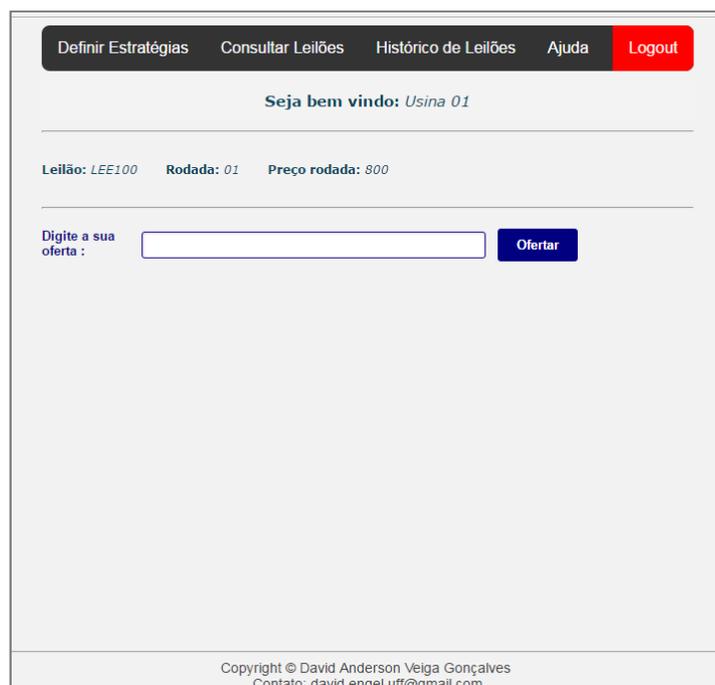


Figura 26 – Tela de oferta do usuário.

Após todos os usuários inserirem seus lances, o administrador visualizará na tela, mostrada na Figura 27, os dados da rodada atual através de uma tabela. O botão para iniciar uma nova rodada também será mostrado.

Copyright © David Anderson Veiga Gonçalves  
Contato: david.engel.uff@gmail.com

Figura 27 - Tela de Controle do Leilão.

Conforme a sistemática preconiza, essa dinâmica segue até que o somatório das ofertas dos usuários atinja um patamar inferior à oferta de referência, definida em função da quantidade demandada.

A oferta total é indicada a cada rodada na coluna “Oferta” da tabela (Figura 28). A cada rodada o sistema alerta ao administrador a situação das ofertas, dizendo se o somatório está acima ou abaixo da oferta de referência através da coluna “Excedente”.

Ao atingir um valor inferior à oferta de referência, o sistema disponibiliza ao administrador um botão para solicitar a segunda etapa, conforme mostrado na Figura 29.



| Rodada | Participantes | Preço | Oferta | Excedente |
|--------|---------------|-------|--------|-----------|
| 1      | 3             | 800   | 9000   | 80%       |
| 2      | 3             | 750   | 7000   | 40%       |
| 3      | 3             | 700   | 5100   | 12%       |
| 4      | 2             | 650   | 9000   | -32%      |

Copyright © David Anderson Veiga Gonçalves  
Contato: david.engel.ufr@gmail.com

Figura 28 - Tela de Controle do Leilão, solicitação da segunda etapa.

Após solicitar a segunda etapa, será mostrada ao administrador a tela ilustrada na Figura 29. Através dessa tela, é possível acompanhar os lances da segunda etapa e um botão para encerrar o leilão é habilitado, que só deverá ser acionado após a realização dos lances pelos usuários.



| Empreendedor | Energia Ofertada | Lance de Preço | Energia Comercializada |
|--------------|------------------|----------------|------------------------|
| Usina 01     | 2000             | 0              | 0                      |
| Usina 02     | 2000             | 0              | 0                      |
| Usina 03     | 1600             | 0              | 0                      |

Copyright © David Anderson Veiga Gonçalves  
Contato: david.engel.ufr@gmail.com

Figura 29 - Tela de Controle do Leilão, segunda etapa.

Durante a segunda etapa, os usuários visualizarão a tela mostrada na Figura 30, onde são disponibilizados ao usuário o lance de energia válido da primeira etapa e o preço máximo associado a esse lance. Através desses dados, o ofertante fará seu lance na segunda etapa. Abaixo dessas informações, é habilitado um campo para a inserção do lance de preço associado à energia a ser comercializada. A efetivação do lance é feita através do botão “ofertar”.

A imagem mostra a interface de usuário para a segunda etapa de um leilão. No topo, há uma barra de navegação com links: "Definir Estratégias", "Consultar Leilões", "Histórico de Leilões", "Ajuda" e um botão "Logout" em vermelho. Abaixo, uma mensagem de boas-vindas diz "Seja bem vindo: Usina 01". O título principal da seção é "Segunda Etapa". As informações do leilão são: "Leilão: LEE100", "Energia a ofertar: 2000MW" e "Preço máximo de lance: R\$ 700,00". Abaixo disso, há um campo de entrada rotulado "Digite a sua oferta:" e um botão "Ofertar" em azul escuro. No rodapé, há o texto: "Copyright © David Anderson Veiga Gonçalves" e "Contato: david.engel.ufrj@gmail.com".

Figura 30 - Tela de Oferta, segunda etapa.

Após os usuários finalizarem suas ofertas da segunda, etapa será mostrada ao administrador a tela da Figura 31. Através da coluna “Preço do Lance”, é possível visualizar quais usinas efetuaram os lances, pois os preços ofertados de cada usina serão mostrados à medida que as ofertas forem realizadas.

Definir Estratégias Consultar Leilões Histórico de Leilões Ajuda Logout

Seja bem vindo: *Administrador*

Leilão: *LEE100* Segunda Etapa Finalizar 2ª Etapa

Controle de Ofertas da 2ª Etapa

| Empreendedor | Energia Ofertada | Preço do Lance | Energia Comercializada |
|--------------|------------------|----------------|------------------------|
| Usina 01     | 2000             | 625            | 0                      |
| Usina 02     | 2000             | 680            | 0                      |
| Usina 03     | 1600             | 700            | 0                      |

Copyright © David Anderson Veiga Gonçalves  
Contato: david.engel.ufr@gmail.com

Figura 31 – Tela de Encerramento, segunda etapa.

Quando todos os usuários tiverem ofertado, ou se um prazo de tempo estipulado para efetivar os lances tiver expirado, o administrador deverá finalizar a segunda etapa através do respectivo botão. Em seguida, todos os usuários visualizam a tela mostrada na Figura 32.

Definir Estratégias Consultar Leilões Histórico de Leilões Ajuda Logout

Seja bem vindo: *Administrador*

Leilão: *LEE100* Quantidade demandada: *5000 MW*

Resultados do leilão: *LEE100*

| Empreendedor | Energia Ofertada | Preço do Lance | Energia Comercializada |
|--------------|------------------|----------------|------------------------|
| Usina 01     | 2000             | 625            | 2000                   |
| Usina 02     | 2000             | 680            | 2000                   |
| Usina 03     | 1600             | 700            | 1000                   |

Copyright © David Anderson Veiga Gonçalves  
Contato: david.engel.ufr@gmail.com

Figura 32 - Tela de resultados.

A tela ilustrada na Figura 32 mostra os resultados da energia comercializada por cada um dos participantes. Essa mesma tela, é disponibilizada no menu “Consultar Leilões”, à qual todos os usuários têm acesso.

## 5. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Como forma de verificar a utilidade e a funcionalidade do simulador como ferramenta educacional, foi realizada uma atividade prática envolvendo os conceitos teóricos sobre leilões, expostos para uma turma de alunos composta de 35 estudantes do curso de engenharia elétrica da Universidade Federal Fluminense.

A atividade consistiu na simulação de dois leilões e, após o experimento, os alunos foram solicitados a responder um questionário tipo *survey* disponibilizado no Apêndice A sobre a atividade; os resultados das respostas ao questionário estão no Apêndice B.

### 5.1. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS LEILÕES

Antes de realizar o experimento do leilão, foi apresentada aos alunos a estrutura dos custos envolvidos na geração, baseada no modelo descrito em [6]. Nesse modelo, os custos de geração são representados por curvas quadráticas que relacionam o custo total de produção (C) com a respectiva potência gerada ( $P_g$ ):

$$C(P_g) = \alpha + \beta P_g + \gamma P_g^2 \quad [$/hora] \quad (10)$$

Onde:  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são parâmetros que dependem das características de cada usina do grupo, como: tecnologia, combustível e modelo.

Em seguida, foram apresentados o funcionamento do sistema e a sistemática do Leilão de Energia Existente, detalhando suas características e premissas adotadas.

Foram simulados dois leilões, no primeiro leilão, nomeado LEE250716, cada grupo recebeu um *login* que representava uma usina com a sua respectiva senha de acesso ao simulador, bem como os parâmetros que compõem a curva de custo da sua usina, mostrados na Tabela 7. Foram fornecidas também as garantias físicas que serão os lastros a serem comercializados no leilão.

Tabela 7 - Parâmetros das curvas de custos das usinas

| UG | $\alpha$  | $\beta$ | $\gamma$ | Garantia Física |
|----|-----------|---------|----------|-----------------|
| 01 | 1.315,118 | 41,095  | 0,008280 | 189             |
| 02 | 1.338,087 | 61,215  | 0,014992 | 190             |
| 03 | 1.818,299 | 11,791  | 0,007039 | 490             |
| 04 | 3.427,912 | 56,613  | 0,024493 | 405             |
| 05 | 1.042,366 | 70,644  | 0,000915 | 541             |
| 06 | 829,888   | 37,768  | 0,000498 | 531             |
| 07 | 1.681,333 | 81,140  | 0,022095 | 194             |
| 08 | 874,2880  | 46,310  | 0,003849 | 190             |
| 09 | 5.119,300 | 44,647  | 0,045934 | 250             |
| 10 | 4.965,124 | 64,125  | 0,030266 | 379             |
| 12 | 3.138,754 | 61,520  | 0,007540 | 250             |
| 13 | 3.918,780 | 54,736  | 0,024667 | 250             |

No segundo leilão, nomeado LEE1000B, os 12<sup>9</sup> grupos simularam sua participação através de usinas idênticas em termos de custos e garantia física de 561MW. Os alunos não foram informados que participariam da simulação com uma usina com mesmas características. Os parâmetros que compõem a Equação (10) para todos os grupos são mostrados em (11).

$$\alpha = 2.781,705; \beta = 87,682 \text{ e } \gamma = 0,000131 \quad (11)$$

Adicionalmente, cada grupo recebeu os dados sobre o Mercado de Energia. No primeiro leilão, os contratos do ACR têm duração de dez anos e do ACL os prazos e os preços variam para cada grupo, conforme mostrado na Tabela 8. Outra informação fornecida ao grupo foi a taxa mínima de atratividade com a qual os participantes deverão analisar a viabilidade econômica da participação de sua usina em cada contrato.

<sup>9</sup> Ao reproduzir os dados das simulações, foram mantidos seus valores originais. O grupo que representaria a UG 11 foi dissolvido e os integrantes foram realocados em outros grupos.

Tabela 8 - Dados sobre o mercado do primeiro leilão

| UG | TMA<br>(anual) | Contratos no ACL   |                   |
|----|----------------|--------------------|-------------------|
|    |                | Preço<br>(R\$/MWh) | Duração<br>(anos) |
| 01 | 10.0%          | 70                 | 03                |
| 02 | 10.0%          | 65                 | 05                |
| 03 | 10.0%          | 40                 | 08                |
| 04 | 14.0%          | 50                 | 04                |
| 05 | 14.0%          | 45                 | 06                |
| 06 | 14.0%          | 40                 | 05                |
| 07 | 12.0%          | 70                 | 05                |
| 08 | 10.0%          | 50                 | 03                |
| 09 | 14.0%          | 65                 | 02                |
| 10 | 12.0%          | 55                 | 04                |
| 12 | 14.0%          | 50                 | 03                |
| 13 | 14.0%          | 40                 | 03                |

Em relação ao segundo leilão, também foram fornecidos os mesmos dados sobre os contratos disponíveis no ACL. A TMA exigida foi de 15% e a duração do contrato no ACR é a mesma do primeiro leilão, dez anos. Como opção, os grupos podem negociar no ACL a 85 R\$/MW com duração de três anos.

Para a participação no leilão, os alunos que compuseram os grupos foram orientados a montar sua estratégia de lances no leilão levando em consideração os custos de sua respectiva usina em cada leilão, sendo que os custos fixos, representados pela componente  $\alpha$  da Equação (10), são totalmente cobertos contratualmente.

A análise de viabilidade da participação de cada grupo deve seguir o modelo de fluxo de caixa exposto no capítulo dois. A tomada de decisão consiste em vender energia no ACR e/ou no ACL, ou ainda de abandono do mercado. Caso ambas as opções do mercado não se mostrem viáveis, os grupos devem obter o melhor resultado econômico possível. Como parte da sistemática real, os participantes correm o risco de não serem contratados dependendo do resultado do leilão.

### a) Resultados da primeira etapa

O primeiro leilão teve o preço inicial de R\$ 80,00 por MW com um decremento de R\$ 5,00 por MW. A quantidade demandada foi de 2.200 MW. A Figura 33 mostra como a oferta total, composta pelas ofertas de todas as usinas, se comportou em relação ao preço corrente de cada rodada.

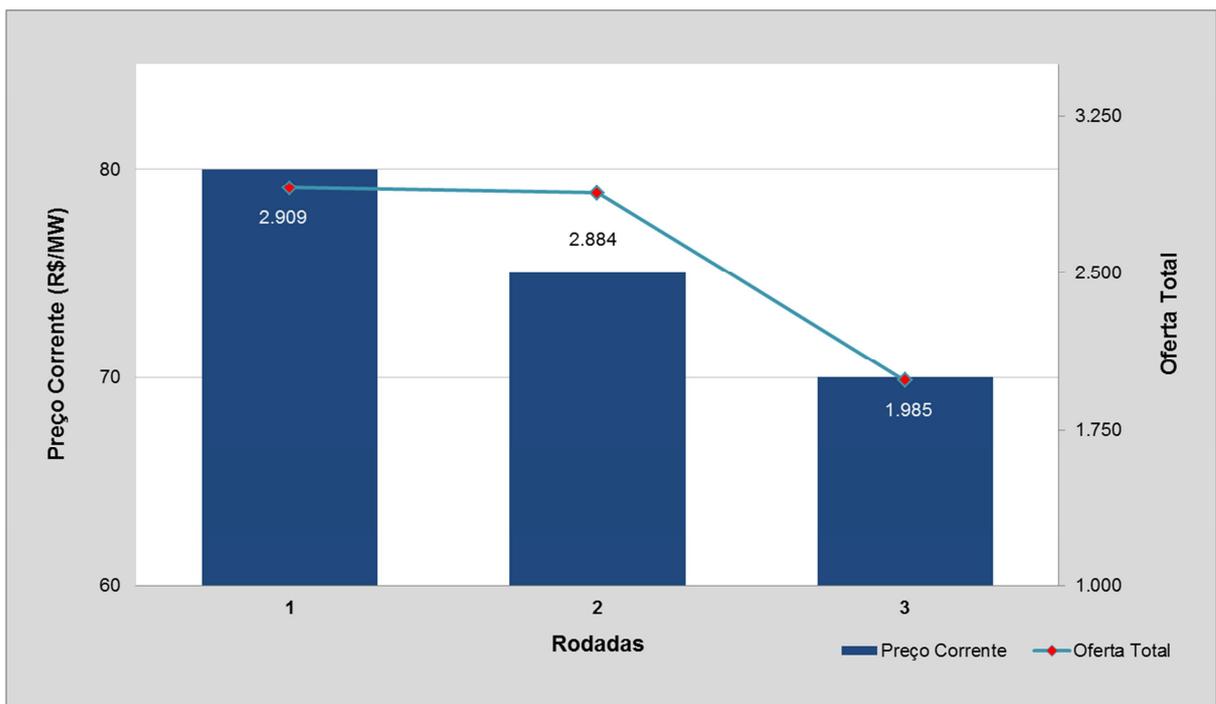


Figura 33 – Gráfico da Evolução da Oferta Total em função do Preço Corrente para cada rodada durante o primeiro Leilão Simulado.

Outra variável de interesse para a análise do leilão é o Excedente ao longo de cada rodada. O gráfico representado na Figura 34 mostra a evolução dessa variável para o primeiro leilão.

Na primeira rodada havia um excesso de 29,95% na oferta total em relação à quantidade demandada para esse leilão. Na segunda rodada houve uma pequena diminuição e o excedente foi de 28,82%, porém, na terceira e última rodada, a oferta ficou em 23,41% abaixo da quantidade demandada, passando para a segunda etapa.

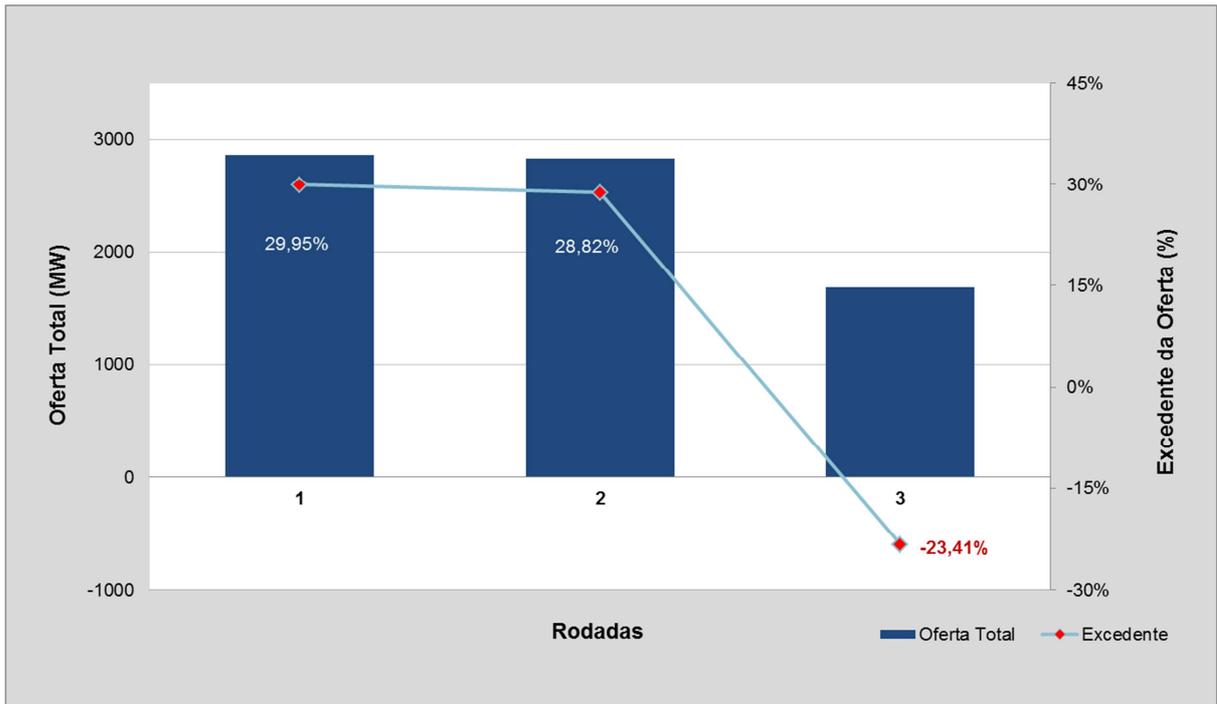


Figura 34 - Gráfico da Evolução da Oferta Total e do seu Excedente para cada rodada durante o primeiro Leilão Simulado.

Os dados obtidos da primeira fase do leilão são sumarizados na Tabela 09. Como era previsto, alguns grupos não exerceram ofertas a partir de determinadas rodadas. Isso se deve ao fato de que dependendo das características de custos da usina e da TMA exigida, a contratação não era viável ao preço corrente.

Um exemplo foi o Grupo UG 04 que não ofertou na terceira rodada, pois o preço corrente (75 R\$/MW) era inferior ao preço mínimo de 76,45 R\$/MW para que a contratação fosse viável no ACR a uma taxa de 14,0%a.a. O mesmo ocorreu para o Grupo UG 05.

Em relação ao segundo leilão, esse certame teve o preço inicial de R\$ 110,00 por MW e o decremento de R\$ 5,00 por MW. A quantidade demandada foi de 3.750 MW.

Analogamente ao primeiro leilão, a Figura 35 mostra como a oferta total se desenvolveu em relação ao preço corrente de cada rodada, sendo que na quinta rodada o leilão passou para a segunda etapa.

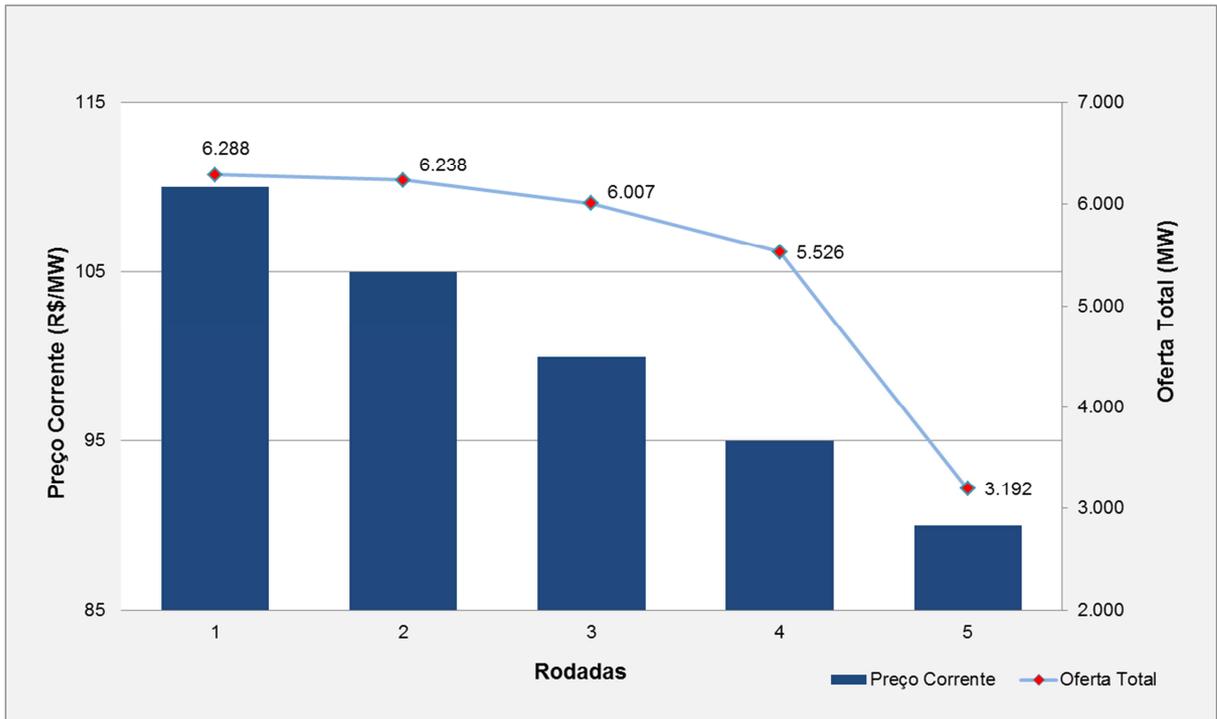


Figura 35 - Gráfico da Evolução da Oferta Total em função do Preço Corrente para cada rodada durante o segundo Leilão Simulado.

A Figura 36 mostra como a Oferta Total e o seu Excedente se comportaram ao longo de cada rodada.

Na primeira rodada, havia um excesso de 67,68% na oferta total em relação à quantidade demandada para esse leilão. Na segunda e na terceira rodadas, a diminuição do excedente foi pequena se comparada ao leilão anterior, registrando os percentuais de 66,35% e 60,19%, respectivamente.

Na quarta rodada, houve uma mudança significativa no valor excedente, diminuindo em mais de vinte pontos percentuais em relação à primeira rodada, resultando num percentual de 47,36% em relação à quantidade demandada.

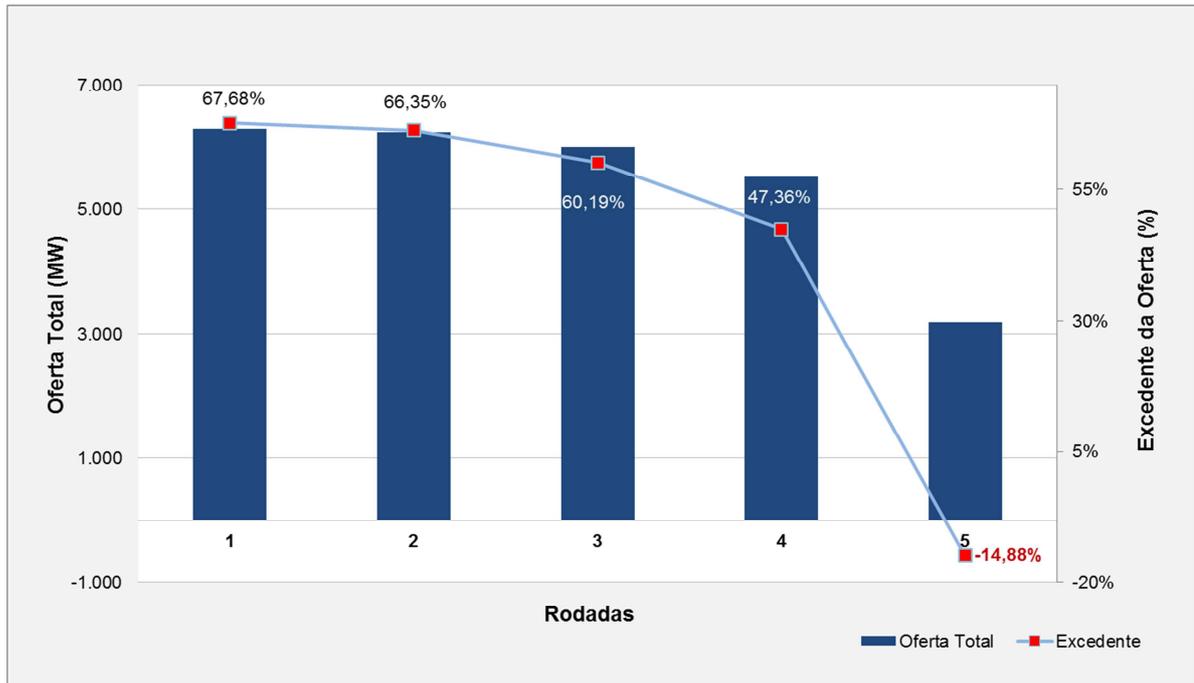


Figura 36 - Gráfico da Evolução da Oferta Total e do seu Excedente para cada rodada durante o segundo Leilão Simulado.

A mudança ocorrida na última rodada foi ainda maior, a oferta ficou em 14,88% abaixo da quantidade demandada, uma variação de mais de 60 pontos percentuais em relação à rodada anterior.

O comportamento da oferta total do segundo leilão em relação ao primeiro pode ser explicado pelas características das usinas de cada leilão, já que no segundo leilão simulado as usinas eram idênticas em termos de custos.

Através dos dados de custos e TMA fornecidos obtém-se que a contratação no ACR não é mais viável ao preço de 90,00 R\$/MW, fazendo com que a maioria dos grupos não ofertasse na quinta (última) rodada.

Os dados obtidos das primeiras fases de ambos os leilões são sumarizados na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9 – Dados Obtidos da primeira etapa do primeiro Leilão Simulado

| Rodada | Preço Corrente | LEE250716 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Total |
|--------|----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |                | UG 01     | UG 02 | UG 03 | UG 04 | UG 05 | UG 06 | UG 07 | UG 08 | UG 09 | UG 10 | UG 12 | UG 13 |       |
| 01     | 80             | 90        | 190   | 490   | 250   | 405   | 300   | 194   | 190   | 250   | -     | 250   | 250   | 2.909 |
| 02     | 75             | 80        | 190   | 490   | 250   | 390   | 300   | 194   | 190   | 250   | -     | 250   | 250   | 2.884 |
| 03     | 70             | 70        | -     | 490   | -     | 0     | 300   | 135.8 | 190   | 250   | -     | 250   | 135   | 1.685 |

Tabela 10 – Dados Obtidos da primeira etapa do segundo Leilão Simulado

| Rodada | Preço Corrente | LEE1000B |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Total |
|--------|----------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        |                | UG 01    | UG 02 | UG 03 | UG 04 | UG 05 | UG 06 | UG 07 | UG 08 | UG 09 | UG 10 | UG 12 | UG 13 |       |
| 01     | 110            | 450      | 561   | 561   | 561   | 350   | 500   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 500   | 6.288 |
| 02     | 105            | 450      | 561   | 561   | 561   | 300   | 500   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 500   | 6.238 |
| 03     | 100            | 450      | 561   | 450   | 561   | 280   | 500   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 400   | 6.007 |
| 04     | 95             | 450      | 561   | 450   | 561   | -     | 500   | 561   | 561   | 561   | 561   | 560   | 200   | 5.526 |
| 05     | 90             | 450      | -     | 400   | -     | -     | -     | 561   | -     | 561   | 561   | 559   | 100   | 3.192 |

## b) Resultados da segunda etapa

De maneira idêntica à sistemática no SEB, após a não obtenção da oferta de referência, os leilões passaram para a segunda etapa. Nessa etapa, os *players* deverão efetuar uma única oferta de preço para a mesma quantidade ofertada da última rodada válida. O preço de lance deverá respeitar o valor máximo de acordo com os preços da etapa anterior. Nessa etapa são declarados os vencedores, assim como, a energia comercializada de cada usina e seus respectivos preços.

Nos gráficos representados na Figura 37 e na Figura 38 é mostrado de forma sintética o desempenho dos participantes na etapa final. As usinas que não participaram dessa etapa foram suprimidas do gráfico.

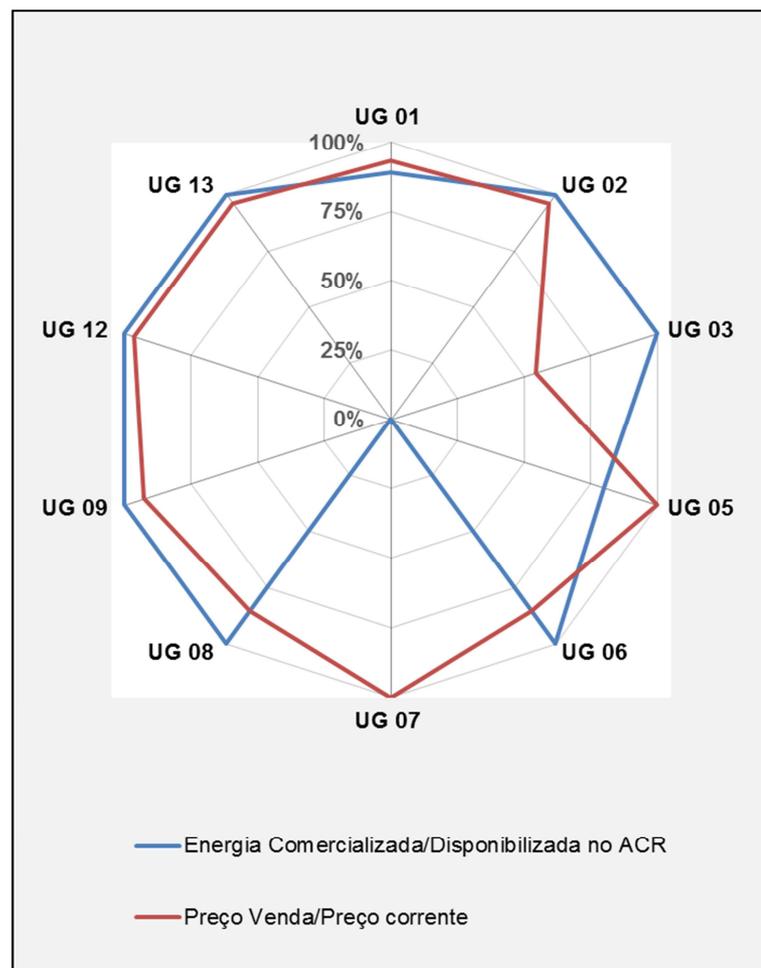


Figura 37 - Gráfico da comparação dos resultados entre as usinas no primeiro leilão.

Nesses gráficos são feitas duas comparações com o objetivo de ilustrar como o comportamento dos grupos em relação à oferta na segunda etapa refletiu no seu desempenho nessa fase. A linha em vermelho mostra a relação entre o preço máximo de lance que cada usina habilitada poderia ofertar e o preço que foi efetivamente realizado. A linha em azul compara em termos percentuais a energia destinada pelo grupo a ser comercializada no ACR e a energia efetivamente comercializada.

Conforme era de se esperar, os participantes que deram um lance de preço mais próximos do valor máximo determinado pela sistemática obtiveram menos sucesso. Como por exemplo, o grupo que exerceu o papel da usina UG 07 fez uma oferta no primeiro leilão igual ao preço máximo permitido e não foi contratada no certame.

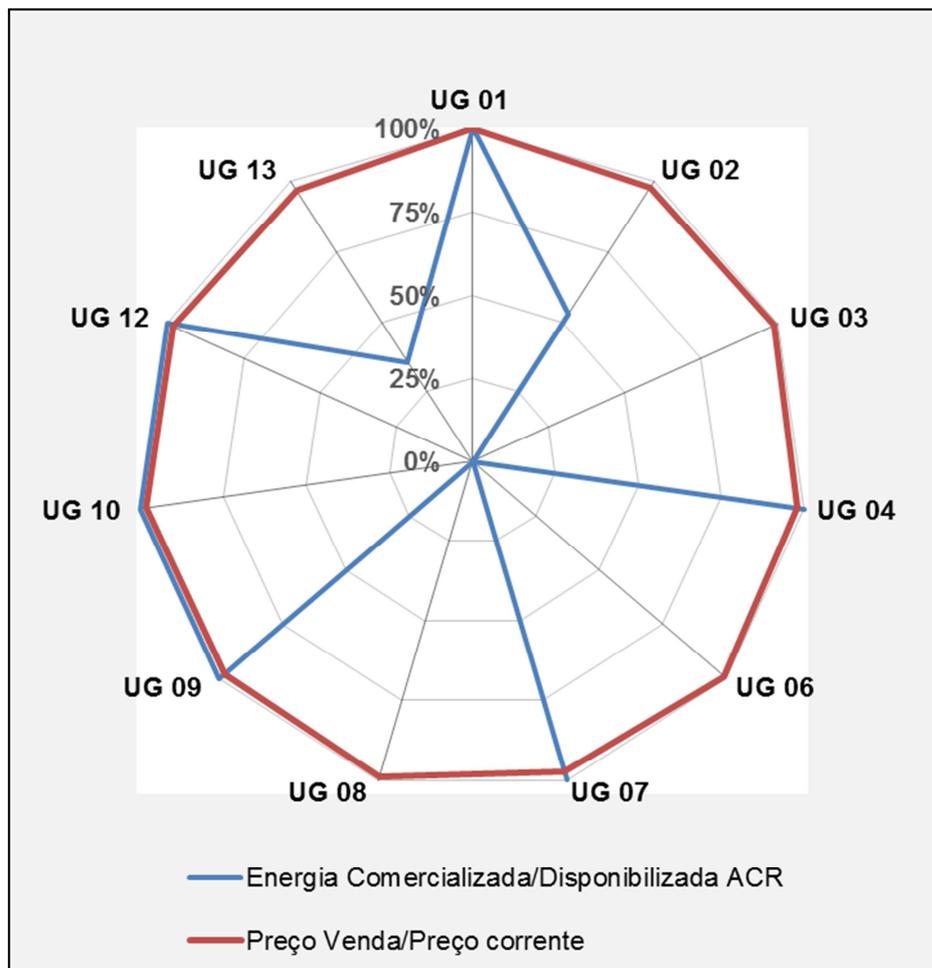


Figura 38 - Gráfico da comparação dos resultados entre as usinas no segundo leilão.

Em contraste a essa situação, no mesmo leilão, o grupo da usina UG 03 adotou uma estratégia mais conservadora na segunda etapa e ofertou um preço pouco maior do que a metade do preço máximo da segunda etapa definido pela sistemática, mas ainda assim a contratação era viável considerando os custos da usina e TMA exigida.

Nas tabelas 11 e 12 são mostrados os resultados consolidados da segunda etapa de ambos os leilões.

Tabela 11 – Dados Obtidos da segunda etapa do primeiro Leilão Simulado

|                      | UG 01 | UG 02 | UG 03 | UG 04 | UG 05  | UG 06 | UG 07 | UG 08 | UG 09 | UG 10 | UG 12 | UG 13 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Garantia Física      | 189   | 190   | 490   | 250   | 541    | 531   | 194   | 190   | 250   | -     | 250   | 250   |
| Contratado ACL       | 99    | -     | -     | -     | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| Destinado ao ACR     | 90    | 190   | 490   | 250   | 405    | 300   | 194   | 190   | 250   | -     | 250   | 250   |
| Comercializada (%)   | 77,8% | 100%  | 100%  | 0%    | 49,38% | 100%  | 0%    | 100%  | 100%  | -     | 100%  | 100%  |
| Preço máx. a ofertar | 75    | 75    | 70    | -     | 75     | 70    | 75    | 70    | 70    | -     | 70    | 75    |
| Preço Lance          | 70    | 72    | 38    | -     | 75     | 60    | 75    | 60    | 65    | -     | 67,5  | 72    |
| Percentual           | 93,3% | 96%   | 54,3% | -     | 100%   | 85,7% | 100%  | 85,7% | 92,9% | -     | 96,4% | 96%   |

Tabela 12 – Dados Obtidos da segunda etapa do segundo Leilão Simulado

|                      | UG 01 | UG 02  | UG 03  | UG 04 | UG 05 | UG 06 | UG 07 | UG 08 | UG 09 | UG 10 | UG 12 | UG 13 |
|----------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Garantia Física      | 561   | 561    | 561    | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   |
| Contratado ACL       | 111   | -      | -      | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| Destinado ao ACR     | 450   | 561    | -      | 561   | 350   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 561   | 200   |
| Comercializado (%)   | 100%  | 52,76% | -      | 100%  | 0%    | 0%    | 100%  | 0%    | 100%  | 100%  | 100%  | 36%   |
| Preço máx. a ofertar | 90    | 95     | 95     | 95    | -     | 95    | 90    | 95    | 90    | 90    | 95    | 95    |
| Preço Lance          | 90    | 93     | 93,95  | 93    | -     | 94    | 87,76 | 93,9  | 88    | 88,50 | 92,98 | 92    |
| Percentual           | 100%  | 97,9%  | 98,89% | 97,9% | -     | 98,9% | 97,5% | 98,8% | 97,8% | 98,3% | 97,9% | 96,8% |

### c) Desempenhos dos grupos

A Tabela 13 mostra os resultados econômico-financeiros de cada grupo em termos de valor presente, utilizando as respectivas taxas mínimas de desconto fornecidas aos grupos.

Alguns grupos resolveram formar um portfólio alocando parte do seu lastro em contratos no ACL, ainda que no ACR fosse oferecido um contrato com um retorno melhor. Esta decisão é explicada pelo risco presente no ACR, pois havia a possibilidade de não ser contratado em função dos resultados do leilão.

De forma geral, a maioria dos grupos agiu em concordância com a sistemática do leilão, mantendo a racionalidade nas suas decisões, levando em conta os dados fornecidos e em conformidade com os princípios técnico-econômicos abordados na disciplina.

Alguns casos merecem destaque, como, por exemplo, o resultado do grupo que representou a UG 10 que optou acertadamente por não participar de nenhuma modalidade de contratação, pois em ambos os ambientes a contratação resultaria em prejuízo.

Como exceções, houve o caso do grupo que representou a UG 05 que alocou apenas 300 MW dos seus 541 MW de lastro, sem nenhuma motivação econômica para tal. Como resultado do leilão, apenas 200 MW obtiveram sucesso na contratação.

A segunda exceção à observação dos conceitos econômicos foi o comportamento da UG 07 que mesmo com um preço que inviabilizava a sua contratação participou do ACR, porém, em função dos resultados do leilão, a usina não foi contratada.

Tabela 13 - Resultado econômico-financeiro do primeiro leilão

| <b>UG</b> | <b>VPL no ACR</b><br>(R\$x1000) | <b>VPL no ACL</b><br>(R\$x1000) | <b>Total</b><br>(R\$x1000) |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 01        | 144.404                         | 60.571                          | 204.975                    |
| 02        | 81.167                          | -                               | 81.167                     |
| 03        | 600.291                         | -                               | 600.291                    |
| 04        | -                               | -                               | -                          |
| 05        | 10.720                          | -                               | -                          |
| 06        | -                               | 14.707                          | 14.707                     |
| 07        | -                               | -                               | -                          |
| 08        | 132.529                         | -                               | 132.529                    |
| 09        | 101.319                         | -                               | 101.319                    |
| 10        | -                               | -                               | -                          |
| 12        | 46.778                          | -                               | 46.778                     |
| 13        | 126.767                         | -                               | 126.767                    |

Os resultados econômico-financeiros do segundo leilão são mostrados na Tabela 14. Os resultados destacam algumas situações mais relevantes. Como, por exemplo, a não opção por parte dos grupos pela contratação no ACL, esse comportamento é justificado, pois o VPL do contrato à TMA disponibilizada resultava em um valor negativo.

Tabela 14 - Resultados econômico-financeiros do segundo leilão.

| <b>UG</b> | <b>VPL no ACR</b><br>(R\$x1000) | <b>VPL no ACL</b><br>(R\$x1000) | <b>Total</b><br>(R\$x1000) |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 01        | 44.693                          | -                               | 44.693                     |
| 02        | 68.701                          | -                               | 68.701                     |
| 03        | -                               | -                               | -                          |
| 04        | 129.351                         | -                               | 129.351                    |
| 05        | -                               | -                               | -                          |
| 06        | -                               | -                               | -                          |
| 07        | 111                             | -                               | 111                        |
| 08        | -                               | -                               | -                          |
| 09        | 6.031                           | -                               | 6.031                      |
| 10        | 18.363                          | -                               | 18.363                     |
| 12        | 128.631                         | -                               | 128.631                    |
| 13        | 37.737                          | -                               | 37.737                     |

Tanto o grupo responsável pela UG 03 quanto o da UG 04 tiveram resultados semelhantes, mesmo negociando a totalidade do seu lastro no ACR, o grupo não obteve sucesso na sua contratação. Ambos os grupos fizeram o maior lance de preço na segunda etapa. Conseqüentemente, não obtiveram sucesso na contratação para este certame.

Todavia, os grupos das UGs 04 e 13 tiveram uma performance em termos econômicos consideravelmente superior aos demais. A soma do resultado do VPL destes dois grupos é superior ao somatório dos VPLs dos demais grupos, superando este valor em quase 50%.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os mercados de energia, detalhando os principais desenhos encontrados, destacando o modelo em funcionamento atualmente, evidenciando-se que a sua estrutura vem passando por transformações como forma de aprimoramento e adequação aos novos cenários.

Em seguida descreveu-se a teoria de leilões e como ela foi aplicada nas sistemáticas dos diferentes leilões e, em especial, quais foram os resultados obtidos com o leilão de energia existente desde o seu início.

No capítulo posterior foi abordada a concepção do simulador de leilões desenvolvido através da teoria de aplicação web que serviu de base para o seu projeto. Foram apresentadas também as linguagens utilizadas no seu desenvolvimento.

No quinto capítulo foi relatada a experiência realizada com os alunos durante a simulação dos mercados de energia, obtendo-se tanto os resultados do desempenho das usinas às quais eles representavam quanto avaliação da atividade sob o ponto de vista do aluno sobre a utilização do simulador no auxílio à aprendizagem sobre: os mercados de energia, a sistemática do leilão de energia existente; bem como o modelo adotado para a tomada de decisão nos e como a competição e as opções adotadas influenciam no resultado do leilão e no desempenho econômico de uma agente de geração.

Com base nas respostas do questionário, conclui-se que este tipo de atividade e o sistema tiveram alta receptividade entre os alunos, sendo considerada como uma ferramenta capaz de fixar os complexos conceitos envolvidos na tomada de decisão que um agente deve ter em mente ao competir num mercado de energia. A combinação entre a utilização do simulador desenvolvido e a simulação proposta em sala de aula mostrou ter um potencial razoável para despertar o interesse dos alunos sobre o tema e encorajá-los a se aprofundar no assunto.

Levando-se em consideração esses aspectos, propõe-se continuar o desenvolvimento de funcionalidades que estão previstas no próprio simulador, como a inclusão de estratégias de comercialização para que possam ser testadas num ambiente simulando disputa entre usuários e máquina, tendo sido programada através de técnicas computacionais inteligentes.

Outra possibilidade de desenvolvimento como trabalho futuro é a implementação das funcionalidades que executem uma análise estatística dos dados provenientes dos leilões realizados, fornecendo gráficos e tabelas dinâmicas como relatórios de saída.

Por fim, a maneira como o simulador foi concebido permite que sejam realizadas simulações diferentes da proposta neste trabalho, pois não foram incluídas no simulador variáveis externas ao leilão.

A flexibilidade do simulador permite ainda que ele seja adaptado para outras sistemáticas de leilão, inclusive testando os impactos numa possível mudança nas regras do leilão de energia existente em relação preço de fechamento, ou ainda, o simulador permite, com certa facilidade, uma adaptação do seu código para realizar simulações de outros tipos de leilões de energia do SEB.

Em síntese, os fatos mencionados ao longo dos capítulos deixam claro que o estabelecimento de um modelo bem adequado dos leilões de um mercado de energia elétrica tem o potencial de gerar ganhos não só para seus agentes, mas como também para a sociedade, através do aumento da competitividade na disputa pelos serviços de eletricidade, refletindo em tarifas módicas para os consumidores finais, mantendo a qualidade do seu fornecimento.

Portanto, é de fundamental importância a continuidade dos estudos dos mercados de energia avaliando o modelo em funcionamento, bem como os impactos positivos e negativos da adoção de novos desenhos antes de sua implantação, para que possamos extrair dos mesmos benefícios possíveis para a sociedade na qual ele está inserido.

## REFERÊNCIAS

- [1] Q. C. TRINH, M. SAGUAN e L. MEEUS, “Experience With Electricity Market Test Suite: Students Versus Computational Agents,” IEEE Transactions on power systems, VOL. 28, NO. 1, fevereiro 2013.
- [2] E. B. XAVIER, D. A. GONÇALVES, B. H. DIAS e B. S. M. C. BORBA, “Electricity Auction Simulation Platform for Learning Competitive Energy Markets,” IEEE Potentials, novembro 2016.
- [3] T. SUEYOSHI e G. R. TADIPARTHI, “A Wholesale Power Trading Simulator with Learning Capabilities,” IEEE Transactions on power systems, VOL. 20, NO. 3, August 2005.
- [4] S. HUNT, Making Competition Work in electricity, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [5] R. MAYO, Mercados de Eletricidade, SYNERGIA, 2012.
- [6] S. STOFT, Power System Economics: Designing Markets for Electricity, Wiley-IEEE Press, 2002.
- [7] H. R. VARIAN, Microeconomia - Uma Abordagem Moderna - 8ª Ed, Elsevier - Campus, 2012.
- [8] L. BLANK e A. TARQUIN, Engenharia Econômica, São Paulo: McGraw-Hill, 2007.
- [9] H. R. VARIAN, Intermediate Microeconomics - A modern approach, Berkley: NORTON, W. W. & COMPANY, 2005.
- [10] Banco Nacional do Desenvolvimento, “O papel do BNDES na expansão do setor elétrico nacional e o mecanismo de project finance,” BNDES Setorial, Rio de Janeiro, 2009.
- [11] S. A. ROSS, R. WESTERFIELD e J. JAFFLE, Finanças Corporativas, 6ª Ed., Atlas, 2009.
- [12] ANEEL, “Relatório ANEEL 10 anos / Agência Nacional de Energia Elétrica,” Brasília, 2008.

- [13] CPFL, GESEL e A.-. SRE, “Projeto de P&D: “Panorama e análise comparativa da tarifa de energia elétrica do Brasil com tarifas praticadas em países selecionados, considerando a influência do modelo institucional vigente”.” 2015.
- [14] S. HUNT e G. SHUTRLEWORTH, *Competition and Choice in Electricity*, Wiley, 1996.
- [15] O. Williamson, Brickley, Smith e Zimmerman, “The Vertical Integration of Production: Market Failure Considerations,” *American Economic Review* 61, p. 531, may 1971.
- [16] A. N. ZUCARATO, “Aspectos Conceituais de Desenho de Mercados de Eletricidade,” outubro 2010. [Online]. Available: [http://www.abraceel.com.br/zpublisher/paginas/ccee\\_apresentacoes.asp?pag=3](http://www.abraceel.com.br/zpublisher/paginas/ccee_apresentacoes.asp?pag=3). [Acesso em 06 maio 2016].
- [17] D. KIRSCHEN e G. STRBAC, *Fundamental of Power system Economics*, JOHN WILEY & SONS, LTD, 2004.
- [18] D. M. NEWBERY, “Competition, Contracts, and Entry in the Electricity Spot Market,” *The RAND Journal of Economics*, vol. 29, pp. 726-749, 1998.
- [19] E. L. d. SILVA, *Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica*, Sagra Luzzatto, 2001.
- [20] M. T. TOLMASQUIM, *Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro- 2ª Ed*, Synergia Editora, 2015.
- [21] I. E. Agency, *Competition in electricity markets*, OECD/IEA, 2001.
- [22] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, “PROJETO RESEB: Sumário Executivo das sugestões,” 2001.
- [23] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “[www.ccee.org.br](http://www.ccee.org.br),” novembro 2015. [Online]. [Acesso em 09 junho 2006].
- [24] “ABRACEEL - Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia,” [Online]. Available: [www.abraceel.com.br](http://www.abraceel.com.br). [Acesso em 05 maio 2016].
- [25] CCEE, “CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica,” [Online]. Available: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/precos\\_medios?\\_afLoop=1308065580430078#%40%3F\\_afLoop%3D1308065580430078%26\\_adf.ctrl-state%3D18e3rsjcpb\\_4](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afLoop=1308065580430078#%40%3F_afLoop%3D1308065580430078%26_adf.ctrl-state%3D18e3rsjcpb_4). [Acesso em 10 maio 2016].

- [26] Ministério de Minas e Energia - MME, "Portaria MME nº 455/2012," 2012.
- [27] ANEEL, "www.aneel.gov.br," [Online]. [Acesso em dezembro 2015].
- [28] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, "Portal da Câmara dos Deputados," [Online]. [Acesso em 21 agosto 2015].
- [29] Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa Aneel nº 570/2013, 2013.
- [30] Presidência da República, Art. 2º Dec. 5.163/2004, 2004.
- [31] Empresa de Pesquisa Energética, "www.epe.gov.br," [Online]. Available: [http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/LeilaoA-52005\\_5/Metodologia%20de%20Calculo%20do%20ICB\\_R2.pdf](http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/LeilaoA-52005_5/Metodologia%20de%20Calculo%20do%20ICB_R2.pdf). [Acesso em 29 outubro 2015].
- [32] Empresa de Pesquisa Energética, "Metodologia de Cálculo: Índice de Custo Benefício (ICB) de Empreendimentos de Geração Termelétrica," 2011.
- [33] Ministério de Minas e Energia, "www.mme.gov.br," dezembro 2015. [Online]. [Acesso em 11 fevereiro 2016].
- [34] P. KLEMPERER, "Auction theory: a guide to the literature," *Journal of economic surveys*, vol. 13, pp. 227-286, 1999.
- [35] F. MENEZES e P. KRISHNA M., *An Introduction to Auction Theory*, Oxford University Press, 2008.
- [36] A. R. B. Belém, "Leilão dos Aeroportos: uma análise da Restrição de Oferta Unitária.," *Dissertação de Economia da Universidade de Brasília – UnB*, 2013.
- [37] A. E. KAHN, P. C. CRAMTON e R. PORTER, "Uniform Pricing or Pay-as-Bid Pricing: A Dilemma for California and Beyond," *The Electricity Journal*, p. 70 a 79, 2001.
- [38] S. OREN, "When is a Pay-as Bid Preferable to Uniform Price in Electricity Markets.," *University of California at Berkeley*, 2010.
- [39] E. E. REGO, *Proposta de aperfeiçoamento da metodologia dos leilões de comercialização de energia elétrica no ambiente regulado: aspectos conceituais, metodológicos e suas aplicações*, 2. Universidade de São Paulo, Ed., São Paulo,

São Paulo: Tese de Doutorado, 2012.

- [40] Ministério de Minas e Energia, Portaria N° 231, 2008.
- [41] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, [www.ccee.org.br](http://www.ccee.org.br), [Online]. Available: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/comercializacao?\\_afLoop=1308948778780278#%40%3F\\_afLoop%3D1308948778780278%26\\_adf.ctrl-state%3D18e3rsjcpb\\_181](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/comercializacao?_afLoop=1308948778780278#%40%3F_afLoop%3D1308948778780278%26_adf.ctrl-state%3D18e3rsjcpb_181). [Acesso em 22 novembro 2015].
- [42] Ministério de Minas e Energia, Portaria n° 039, 2015.
- [43] Ministério de Minas e Energia, Portaria n° 427, 2015.
- [44] Ministério de Minas e Energia, Portaria N° 459, 2015.
- [45] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, “InfoLeilão N° 017 – 15° Leilão de Energia Existente (A-1),” 2015.
- [46] E. M. N. C. S. MENDES, *The Need for Web Engineering: An Introduction*, New York: Springer Verlag, 2006.
- [47] G. KAPPEL, “Web Engineering - Old Wine in New Bottles?,” em *Fourth International Conference on Web Engineering (ICWE'04)*, Munique, 2004.
- [48] A. GINIGE, “Web Engineering – An Introduction,” *IEEE Multimedia*, p. vol. 18, Janeiro 2001.
- [49] G. KAPPEL e B. PROLL, *Web Engineering: The Discipline of Systematic Development of Web Applications*, Wiley, 2006.
- [50] W. W. ECKERSON, “Three Tier Client/Server Architecture: Achieving Scalability, Performance, and Efficiency in Client Server Applications,” *Open Information Systems* 10,, 1 Janeiro 1995.
- [51] M. K. S. Y. I. ., N. E. GLASS, *Beginning PHP, Apache, MySQL Web Development*, Wiley, 2004.
- [52] C. GRANELL, *The Essential Guide to CSS and HTML Web Design*, Berkeley, CA: Friendssoft, 2007.
- [53] R. Nixon, *Learning PHP, MySQL, JavaScript, CSS & HTML5*, Sebastopol, CA

95472: O'Reilly, 2014.

- [54] G. C., The Essential Guide to CSS and HTML Web Design, FRIENDSOF, 2007.
- [55] R. NIXON, Learning PHP, MySQL, JavaScript, CSS & HTML5, 3rd Edition, O'Reilly Media, 2014.
- [56] ISO/IEC, "ISO/IEC 25010:2011 : Systems and software engineering - Systems and software Quality Requirements and Evaluation," 2011.
- [57] A. M. GINIGE, "Web Engineering:A Methodology for Developing Scalable, Maintainable Web Applications,," Cutter IT Journal, p. Vol.14, 7 Julho 2001.
- [58] W. S. L. SOARES e C. A. d. R. NASCIMENTO, "A inclusão das TICs na educação brasileira: problemas e desafios.," Revista Internacional de Investigación en Educación, vol. 5, n. (10), pp. 173-187, 2012.
- [59] M. E. B. ALMEIDA, "Tecnologias na educação: dos caminhos trilhados aos atuais desafios," Boletim de Educação Matemática, 2008.
- [60] E. MARÇAL, R. ANDRADE e R. RIOS, "Aprendizagem utilizando dispositivos móveis com sistemas de realidade virtual," Revista novas tecnologias na educação, 2005.
- [61] E. R. BABBIE, Métodos de pesquisas de survey, Editora da UFMG, 1999.
- [62] P. V. Marsden e J. D. Wright, Handbook of Survey Research, Second Edition, Emerald Publishing Group Limited, 2010.
- [63] K. Takahashi e E. Liang, "Analysis and Design of Web-based Information Systems," International World Wide Web Conference, 1997.
- [64] IEEE, IEEE Spectrum, 2014. [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/computing/software/the-2015-top-ten-programming-languages>. [Acesso em dezembro 2015].
- [65] S. S. McPherson, Tim Berners-Lee: Inventor of the World Wide Web, Twenty-First Century Books, 2009.
- [66] C. Cláudio e A. Nardi, "Desenvolvimento em Camadas," 2007.
- [67] CAISO, "An Analysis of the June 2000 Price Spikes in the California ISO's Energy

and Ancillary Services Markets,” 2006.

[68] CCEE, “VISÃO GERAL DAS OPERAÇÕES NA CCEE,” 2010.

[69] G. KLEIMAN, Trading Commodities and Financial Futures: A Step-by-Step Guide to Mastering the Markets, FT Press, 2013.

## APÊNDICE A – MODELO DO QUESTIONÁRIO *SURVEY*

|          |                        |
|----------|------------------------|
| Período: | Previsão de Formatura: |
|----------|------------------------|

1) Pensando no uso de tecnologias como o sistema utilizado nesta atividade, você acredita auxiliar na sua aprendizagem?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

2) Após a simulação, você se sente mais familiarizado com a terminologia empregada nos leilões?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

3) A atividade através da simulação com sistema fez com você compreendesse melhor a sistemática do leilão?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

4) Pensando no seu nível de conhecimento antes e depois da simulação, avalie:

a) Como você consideraria o seu nível de conhecimento sobre a sistemática dos leilões **ANTES** de utilizar o sistema?

muito baixo  baixo  nem baixo nem alto  bons conhecimentos  total conhecimento

b) Como você consideraria o seu nível de conhecimento sobre a sistemática dos leilões **DEPOIS** de utilizar o sistema?

muito baixo  baixo  nem baixo nem alto  bons conhecimentos  total conhecimento

5) Em minha opinião, esta atividade me ajudou a desenvolver o pensamento crítico em relação à tomada de decisões no mercado de energia?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

6) Em minha opinião, através desta atividade pude perceber como as decisões tomadas por mim podem influenciar nos resultados do leilão? (em termos de energia comercializada, preços etc.)

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

7) Após a realização desta atividade me sinto confiante em explicar a outras pessoas sobre o funcionamento do leilão?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

8) Após a realização desta atividade me sinto confiante em explicar a outras pessoas sobre como tomar decisões racionais no mercado de energia elétrica, principalmente em como avaliar a participação em os mercados?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

9) Após a realização desta atividade me sinto confiante em explicar a outras pessoas sobre os meus resultados obtidos na simulação?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

10) Acredito que a simulação do leilão com o sistema tenha me ajudado a entender melhor a sistemática de outros leilões, como o de Energia Nova, Leilão de Transmissão etc.?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

11) Após a realização desta atividade me sinto mais interessando nos aspectos técnicos do mercado de energia elétrica?

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

12) Em função da minha participação nesta atividade, pretendo desenvolver algum trabalho relacionado ao assunto? (TCC, artigo, dissertação etc.)

Discordo Completamente  Discordo  Concordo  Concordo em grande parte  Concordo Completamente

## APÊNDICE B - RESULTADOS DO QUESTIONÁRIO (SURVEY)

A inserção das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) na educação pode ter como resultado uma melhoria significativa no processo de ensino-aprendizagem [58].

Em [59], após um apanhado histórico sobre o uso das TIC em atividades educacionais no Brasil e no exterior, a autora conclui que a combinação entre as tecnologias web e educação tem o potencial de promover um projeto amplo, dinâmico e flexível do conteúdo de uma disciplina, podendo ainda estabelecer conexões entre diferentes áreas de conhecimento e aumentar as relações entre professores e alunos nas instituições de ensino. Os argumentos a favor do uso de TIC na educação são inúmeros, como por exemplo [60]:

- a) Aprimora os recursos de ensino, usando esses dispositivos para executar tarefas, manter registros e outras funções;
- b) Possibilita o acesso ao conteúdo em qualquer lugar e a qualquer hora;
- c) Amplia o alcance das estratégias de ensino existentes através de novas tecnologias de aprendizagem tanto formal quanto informal; e
- d) Fornece de meios para o desenvolvimento de métodos de ensino inovadores, utilizando recursos móveis.

Com a finalidade de avaliar a atividade de simulação dos leilões de energia com os alunos do ponto de vista educacional, foi realizada uma pesquisa de natureza qualitativo-descritiva sobre a percepção que eles tiveram da atividade [61].

O levantamento foi realizado logo após o leilão através de um questionário do tipo *survey* contendo treze perguntas, disponível no Apêndice B. As perguntas foram respondidas de forma individual e anônima conforme recomendado em [62]. Seguindo as mesmas recomendações, as respostas seguiram a escala Likert, com cinco níveis de respostas: discordo totalmente, discordo em parte, concordo, concordo em parte e concordo totalmente.

As perguntas se dividem em cinco blocos, no primeiro é feita uma avaliação sobre a ação em si, questionando sobre a validade de se utilizar este tipo de ferramenta no aprendizado e, especificamente, sobre a utilidade do ferramental e da atividade como auxílio na compreensão do conteúdo exposto.

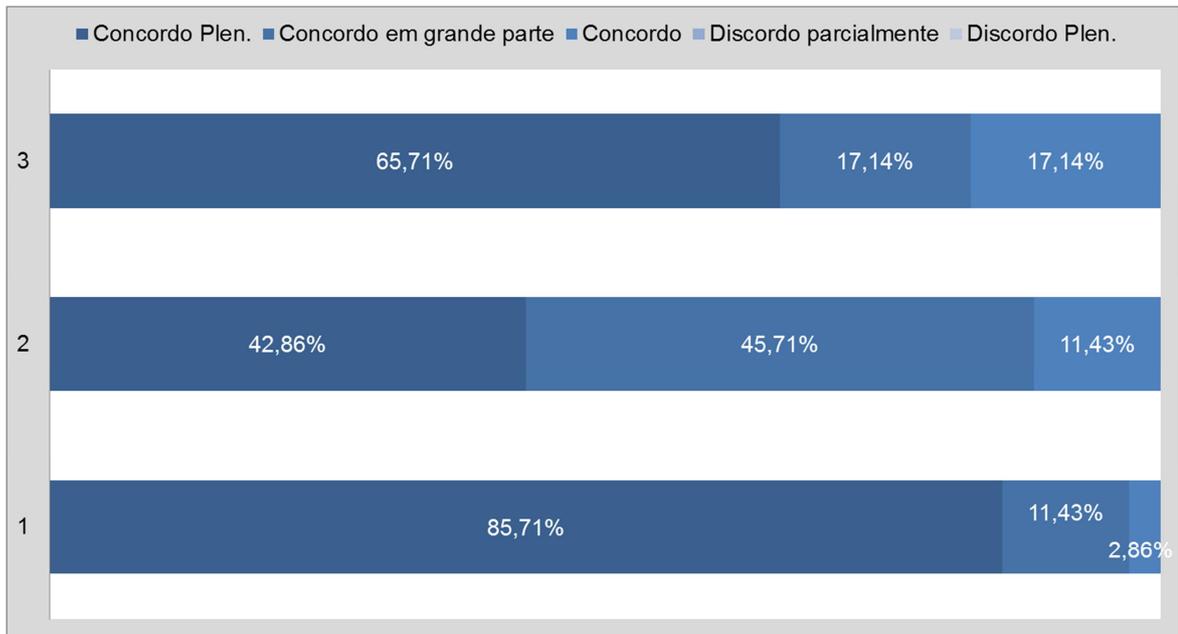


Figura 39 - Respostas das perguntas 01 a 03.

A primeira pergunta foi: “Você acha que o uso de tecnologias, como o sistema desenvolvido, nessa atividade pode ajudar no processo de ensino-aprendizagem?”, como resultado, todos os alunos responderam positivamente a ideia, ou seja, todas as respostas foram “concordo plenamente” ou “concordo em parte” ou “concordo”. Sendo que a resposta “concordo plenamente” alcançou o percentual de 97,14% dos alunos.

No item seguinte foi perguntado se “após a simulação, Você se sente mais familiarizado com a terminologia empregada nos leilões?”, as respostas também foram positivas em sua totalidade, somando os resultados dos alunos que concordaram plenamente ou concordaram em grande parte chega-se ao percentual de 88,57%.

No segundo bloco temos a avaliação da eficácia da simulação realizada em sala de aula especificamente no aprendizado sobre os mercados de energia elétrica e no aprendizado também da sistemática do leilão de energia existente. Como resposta a terceira pergunta “A atividade através da simulação com o sistema fez com que você compreendesse melhor a sistemática do leilão?”, mais uma vez os alunos responderam

positivamente a esse item, os que concordaram plenamente ou concordaram em grande parte chegaram ao percentual de 82,86%.

A quarta pergunta buscou dar uma medida da evolução do conhecimento sobre mercados de energia antes e depois da simulação realizada com os alunos. Para isso, foi perguntado aos alunos como eles consideravam o seu nível de conhecimento sobre a sistemática do leilão, antes e depois de utilizar o sistema.

Para essa pergunta o conjunto de possibilidades de repostas foi alterado passando a ser representando da seguinte forma: muito baixo, baixo, médio, bons conhecimentos e total conhecimento.

A Tabela 15 mostra como o nível de conhecimento dos alunos foi alterado em função da utilização do sistema.

Tabela 15 – Quantidade de alunos por respostas antes e depois

| Conhecimento após simulação | Conhecimento antes da simulação |       |       |              |               |
|-----------------------------|---------------------------------|-------|-------|--------------|---------------|
|                             | Muito baixo                     | Baixo | Médio | Bons conhec. | Total conhec. |
| Muito baixo                 | -                               | -     | -     | -            | -             |
| Baixo                       | -                               | -     | -     | -            | -             |
| Médio                       | 01                              | 01    | 05    | -            | -             |
| Bons conhecimentos          | -                               | 01    | 10    | 09           | -             |
| Total conhecimento          | -                               | -     | 03    | 05           | 01            |

Nas colunas temos o nível de conhecimento antes da simulação e para cada linha temos um nível de conhecimento após o experimento. As células são preenchidas com as quantidades de alunos que se enquadraram na respectiva combinação.

No bloco seguinte, foi feita uma avaliação da compreensão dos alunos sobre como as variáveis econômicas que determinam a tomada de decisão dos agentes influenciaram nos resultados da simulação, nesse sentido, foi feita a pergunta número cinco: “Esta atividade de aprendizagem me ajudou a desenvolver o pensamento crítico, me levando a tomar decisões econômicas de forma racional durante os leilões?”. As repostas mostraram que 37,14% dos participantes concordaram plenamente em ter entendido como as decisões tomadas por eles influenciaram nos resultados dos leilões.

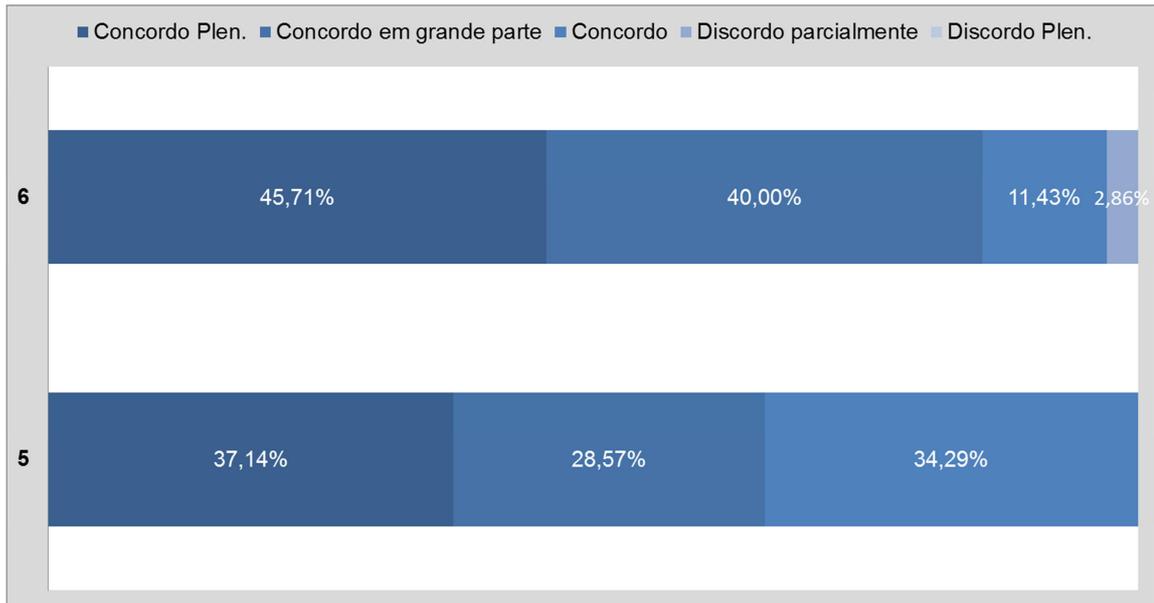


Figura 40 - Resultados do bloco 03, respostas das perguntas 05 e 06.

E, quando perguntados se “através desta atividade de aprendizagem pude perceber como as decisões por mim tomadas podem influenciar nos resultados do leilão?”, 45,71% concordaram plenamente com a questão proposta na sexta pergunta.

No quarto bloco, foi verificado se os alunos tinham não só aprendido, mas também se se sentiam capazes de transferir o aprendizado e explanar sobre os resultados obtidos. Para tanto foi feita a sétima pergunta: após a simulação, me sinto confiante em explicar aos outros sobre o funcionamento do leilão? Aproximadamente 6% dos participantes discordaram ou discordaram parcialmente com a proposição, porém, 20% disseram concordar plenamente com a questão.

A oitava pergunta indagava se “após a simulação, me sinto confiante em explicar aos outros como tomar decisões racionais no mercado de energia elétrica no que se refere à participação de agentes em leilões?”. Cerca de 9% disseram discordar em parte, somando-se os que concordaram em grande parte ou plenamente chega-se ao percentual de 42,86%.

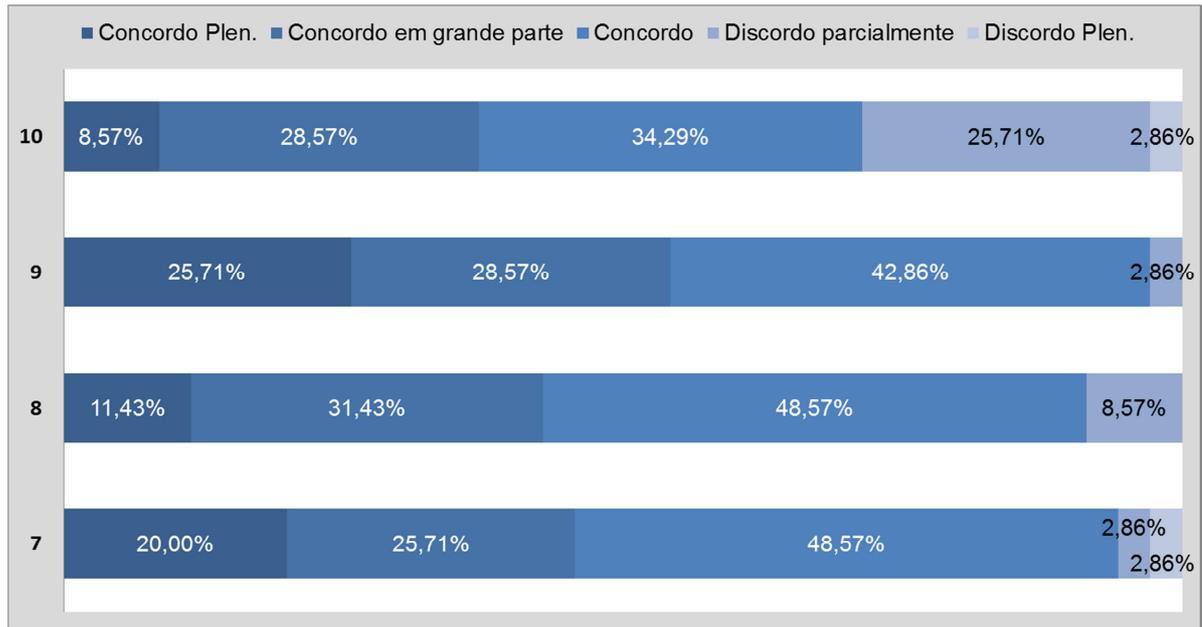


Figura 41 - Resultados do bloco 04, respostas das perguntas 07 a 10.

Seguindo a mesma linha, a nona questão dizia: “Após a simulação, me sinto confiante em explicar aos outros sobre os resultados obtidos na simulação?”, obtendo um resultado superior a 50% entre aqueles que concordavam em grande parte ou concordavam plenamente.

Terminando o bloco, foi feita a décima questão que perguntou: “Você acredita que a atividade tenha ajudado também a entender a sistemática de outros leilões, como o de Energia Nova, Leilão de Transmissão?”. Entre os alunos que discordaram em parte ou discordaram totalmente chegou a quase 30%, os que concordaram em grande parte ou plenamente chegaram a um percentual de 37,14%.

O objetivo do último bloco de perguntas era verificar se a atividade havia despertado o interesse do aluno sobre o tema. Foi feita a pergunta “Após a simulação, me sinto mais interessado nos aspectos técnicos do mercado de energia elétrica?”, cerca de 5% dos alunos discordaram em parte, porém, cerca de 30% disseram concordar plenamente com a questão.

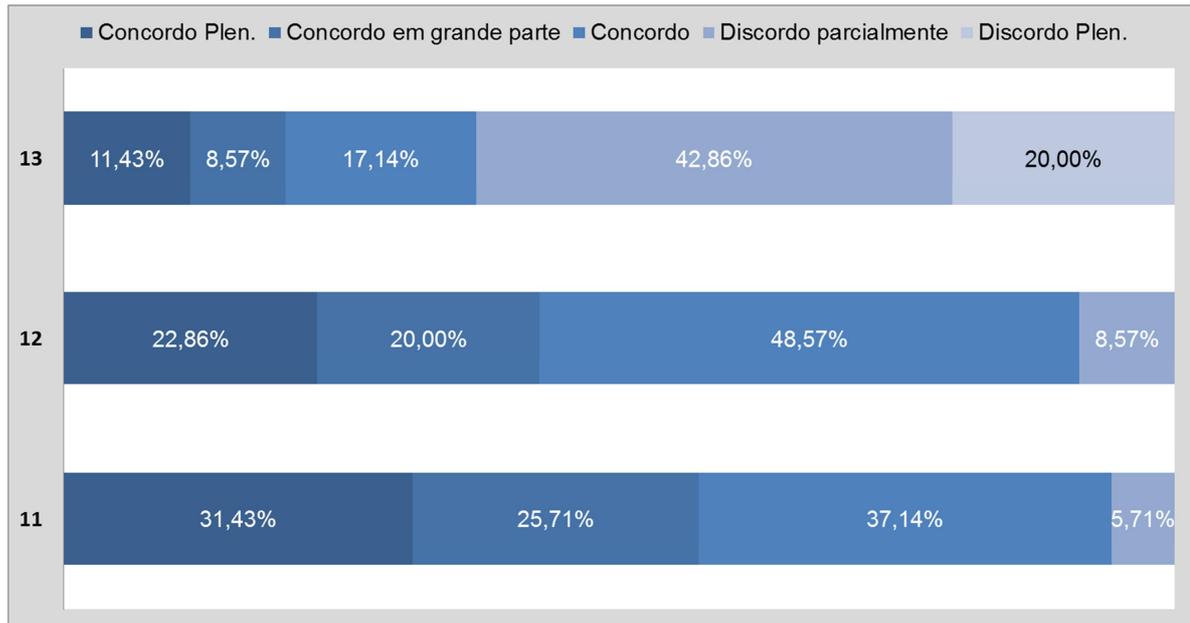


Figura 42 - Resultados do bloco 05, respostas das perguntas 11 a 13.

A pergunta seguinte, a de número 12, foi “Pretendo me aprofundar no assunto?”, em torno de 8% dos alunos disseram discordar em parte e cerca de 22% afirmaram concordar plenamente em se aprofundar no assunto.

E, por último, foi perguntado se “Após a simulação, pretendo desenvolver algum trabalho (escrever artigo, TCC, dissertação) sobre o assunto?”. Disseram discordar plenamente 20% dos alunos, 42,9% disseram discordar em parte, mas as respostas positivas chegaram a 12,4%.

Conforme vistos nos resultados da pesquisa, o uso do simulador de leilões no auxílio do ensino da disciplina teve alta aceitação por parte dos alunos, sendo ainda uma ferramenta que tem o potencial de fixar o conhecimento adquirido em sala de aula.