

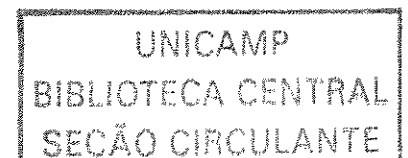
ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
TESE DEFENDIDA POR Fernando Colli
Munhoz E APROVADA PE
COMISSÃO JULGADORA EM 10/02/04.
Paulo de Barros Correia
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Metodologia e *software* para fixação de lances em
leilões de energia elétrica**

Autor: Fernando Colli Munhoz
Orientador: Paulo de Barros Correia

02/04



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

**Metodologia e *software* para fixação de lances em
leilões de energia elétrica**

Autor: Fernando Colli Munhoz
Orientador: Dr. Paulo de Barros Correia

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2004
S.P. – Brasil

UNIDADE	BC
Vº CHAMADA	III/unicamp
	M925m
/	EX
COMBO BC/	58933
PROC.	16-117-04
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	15/03/04
Nº CPD	

CM00198486-1

Bib. d: 317640


FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M925m	<p>Munhoz, Fernando Colli</p> <p>Metodologia e software para fixação de lances em leilões de energia elétrica / Fernando Colli Munhoz. -- Campinas, SP: [s.n.], 2004.</p> <p>Orientador: Paulo de Barros Correia.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Estratégia. 2. Leilões. 3. Teoria dos jogos. 4. Otimização matemática. 5. Energia Elétrica - Mercado.</p> <p>I. Correia, Paulo de Barros. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
-------	--

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Metodologia e software para fixação de lances em
leilões de energia elétrica

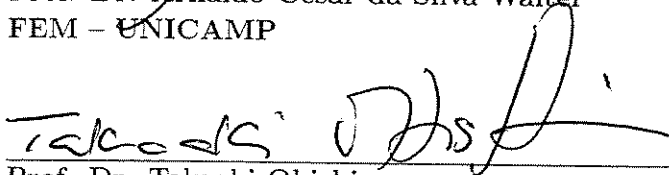
Autor: Fernando Colli Munhoz
Orientador: Dr. Paulo de Barros Correia



Prof. Dr. Paulo de Barros Correia, Presidente
FEM – UNICAMP



Prof. Dr. Arnaldo César da Silva Walter
FEM – UNICAMP



Prof. Dr. Takaaki Ohishi
FEEC – UNICAMP

Campinas, 10 de fevereiro de 2004

Aos meus pais
Valdenice Aparecida Colli Munhoz
e
Edson Luiz Duarte Munhoz.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio e o incentivo de algumas pessoas muito especiais as quais gostaria de agradecer: meus pais Edson Luiz Duarte Munhoz e Valdenice Aparecida Colli Munhoz e minha irmã Juliana Colli Munhoz; meus companheiros de pesquisa Adriano Jerônimo da Silva, Carla Regina Lanzotti, Gustavo Santos Masili, Tiago de Barros Correia, Erick Menezes Azevedo e Marco Aurélio Keiler; o engenheiro Márcio Luiz Freire pelas críticas e sugestões apontadas nesta dissertação e a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF); o professor Paulo de Barros Correia pela sua sábia orientação; a professora Marilda Sotomayor; os professores Arnaldo Cesar da Silva Walter e Takaaki Ohishi pelas correções e sugestões assinaladas no exame de qualificação; os funcionários e professores do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp; o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro. Enfim, a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a concretização deste projeto.

*“Cada um de nós constrói a sua história
e cada ser, em si, carrega um dom de ser capaz de ser feliz”.*

Renato Teixeira

Resumo

Munhoz, F. C. (2004). *Metodologia e software para fixação de lances em leilões de energia elétrica*. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - Brasil.

A reforma do setor elétrico brasileiro criou um ambiente de competição por contratos de compra e venda de energia. Neste contexto, agentes estatais e privados comercializam seus contratos através de um mercado bilateral e liquidam as diferenças entre o mercado previsto e o realizado através do mercado *spot*. As negociações bilaterais podem ser realizadas diretamente entre compradores e vendedores de energia ou através de leilões. Muitos países empregam leilões como forma de precificar a energia elétrica e estes se caracterizam por serem mecanismos que garantem velocidade de venda, revelam informações sobre avaliações dos agentes e tornam as negociações transparentes. O Mercado Atacadista de Energia (MAE) formatou quatro tipos de leilões de energia no Brasil: o leilão de certificados, de excedentes, de venda e de compra. Este trabalho objetiva desenvolver um modelo de estratégias para os agentes do setor elétrico fixarem seus lances nos leilões de venda e de compra. Toda a metodologia apresentada nesta dissertação é gerada do ponto de vista de um vendedor de energia elétrica, entretanto, como esses dois leilões são simétricos, a adaptação dessa metodologia para um agente comprador é facilmente realizada. Para a produção desse modelo foram utilizados os conceitos da teoria dos jogos, portfólio, leilões e técnicas de otimização. O modelo é dividido em duas partes. A primeira objetiva fixar lances para um agente vendedor no leilão de venda e, para isto, um modelo de jogo estratégico é realizado. A segunda visa determinar os lances para o vendedor no leilão de compra e, nesse leilão as estratégias são analisadas utilizando os conceitos de jogos dinâmicos. O resultado do modelo é uma alocação ótima de lances, por parte de um vendedor, nos diversos produtos (contratos de energia) disponíveis no leilão. Como resultado dessa metodologia foi desenvolvido um *software* para auxiliar os agentes na aplicação do modelo. Esse *software* pode ser utilizado para realizar simulações e, com isso, pode prever alguns prováveis resultados do leilão. Por fim, este trabalho busca contribuir no processo de tomada de decisão introduzindo uma metodologia de auxílio aos agentes para fixação de lances, tendo como foco os leilões de venda e de compra organizados pelo MAE.

Palavras-chave: *estratégias, leilões, teoria dos jogos, otimização, mercado de energia elétrica.*

Abstract

Munhoz, F. C. (2004). *Methodology and software to fix bids in electricity auctions*. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - Brasil.

The reform of the Brazilian electric sector created a competitive environment for purchase and sale of electricity contracts. In this context, public and private agents trade their contracts through a bilateral market and liquidate the differences between the foreseen and the occurred market in the spot market. The negotiations in the bilateral market can be made directly among electricity's buyers and sellers or by auctions. Many countries in the world use auctions to put price in the electricity and its characterize by being a mechanism that guarantee velocity in the sale, reveal information about buyers and sellers evaluations, and became the negotiation transparent. The Brazilian Wholesale Market (MAE) formatted four kinds of electricity auctions in Brazil: the auction of certificates, excesses, sale and purchase. This work objectifies to develop a strategic model for the agents of the electricity market to fix their bids in the sale and purchase auction. The whole methodology developed in this dissertation is generating by a seller viewpoint. However, as both auctions are symmetrical the adjustment of this methodology for a buyer agent is made easily. For the production of this model were used the concepts of game theory, portfolio theory, auction theory and optimization techniques. This model is divided in two parts. The first part objectifies to fix bids for a seller agent in the sale auction and, for this, the strategic model is built using a strategic game. The second part aim at establish seller's bids in the purchase auction and, in this auction the strategies of the seller are analyzed using the concepts of dynamic game. The result of the two parts is an optimal allocation of bids for a seller in the several products (electricity contracts) available in the auction. As a result of this methodology was developed a software to help the agents in the application of the model. This software can be use to make simulations and, with this, can foresee some probably results of the auction. In front of the market rules impose by the introduction of a new institutional model in the electrical sector, this work search to contribute in the process of decision making in electricity auctions introducing a methodology to help the agents to fix bids. It has in focus the purchase and the sale auction organized by MAE.

Palavras-chave: *strategies, auctions, game theory, optimization, electricity market.*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Estrutura do trabalho	4
2	Considerações iniciais	5
2.1	Sistema elétrico brasileiro	5
2.1.1	Geração de energia elétrica	6
2.1.2	Sistema de transmissão	7
2.1.3	Sistema de distribuição	8
2.2	Reestruturação do setor elétrico	8
2.3	Caracterização do problema	13
3	Conceituação da base teórica	15
3.1	Teoria dos jogos	15
3.1.1	Jogos estratégicos e dinâmicos	16
3.1.2	Equilíbrio e tipos de informação	18
3.1.3	Teoria dos leilões	20
3.2	Teoria do portfólio	22
3.2.1	Risco na estrutura de um portfólio	24
3.2.2	Retorno esperado de um portfólio	25
3.2.3	Relação risco e retorno	27
3.2.4	Seleção de portfólio	28
4	Mercado brasileiro de energia elétrica	37
4.1	Mercado bilateral	39
4.2	Mercado <i>spot</i>	39
4.3	Leilões de energia	41
4.3.1	Leilões de venda	42
4.3.2	Leilões de compra	46
4.3.3	Leilões de comercializadores	50
4.3.4	Outros leilões	51

5	Métodos para fixar lances em leilões de energia	56
5.1	Leilões de venda	56
5.1.1	Construção de cenários	57
5.1.2	Descrição do modelo	59
5.1.3	Formulação do modelo	66
5.1.4	Verificação dos resultados	67
5.2	Leilão de compra	68
5.2.1	Descrição do modelo	69
5.2.2	Formulação do modelo	70
5.2.3	Verificação dos resultados	73
6	<i>Software</i> de simulação	78
6.1	Módulo 1 - Leilão de venda	81
6.2	Módulo 2 - Leilão de compra	83
7	Conclusões	88
	Referências Bibliográficas	94

Lista de Figuras

2.1	Monopólio com integração vertical.	10
2.2	Competição no varejo.	11
2.3	Visão geral do modelo de contratação.	12
3.1	Jogos estratégicos: matriz de <i>payoffs</i>	17
3.2	Jogos dinâmicos: representação.	18
3.3	Leilão de demanda.	21
3.4	Leilão de oferta.	21
3.5	Leilão duplo com participantes identificados.	21
3.6	Redução do risco pela diversificação.	25
3.7	Retornos esperados de diferentes composições de portfólio.	27
3.8	Seleção de um ativo.	28
3.9	Conjunto de combinações.	33
3.10	Representação gráfica da fronteira eficiente.	36
4.1	Competição no mercado de energia elétrica.	38
4.2	Variação do preço <i>spot</i> no Sudeste, carga média, de Mar-2002 - Fev-2004. . .	40
4.3	Curva de oferta para um produto.	43
4.4	Início do leilão de venda.	44
4.5	Novo valor de P_l	44
4.6	Valor de $P_l = P_c$	45
4.7	Novo valor de P_l	45
4.8	Novo valor de $P_c = P_l$	45
4.9	$P_c = P_l = R_2$	45
4.10	Curva de demanda para um produto.	47
4.11	Início do leilão de compra.	48
4.12	Novo valor de P_l	48
4.13	Valor de $P_l = P_c$	49
4.14	Novo valor de P_l	49
4.15	Novo valor de $P_c = P_l$	50
4.16	$P_c = P_l = R_2$	50
4.17	Mercado de certificados de energia.	53
4.18	Curva de oferta para um produto.	54

5.1	Matriz de <i>payoffs</i> utilizando cenários.	58
5.2	Árvore de decisão para lances para um produto.	69
5.3	Leilão do ponto de vista do vendedor V_j	70
5.4	Características dos quatro tipos de contratos visto por V_j	74
6.1	Arquitetura do <i>software</i>	80
6.2	Tela 1: dados de entrada do leilão de venda.	81
6.3	Tela 2: dados de saída do leilão de venda.	83
6.4	Tela 1: dados do leilão de compra.	84
6.5	Tela 2: cálculo das horas do contrato.	85

Lista de Tabelas

2.1	Empreendimentos de geração no Brasil.	6
3.1	Função frequência.	26
3.2	Ativos de um portfólio.	31
3.3	Conjunto de carteiras possíveis.	32
3.4	Características de dois ativos.	34
3.5	Carteiras com diferentes composições.	35
4.1	Prazo de duração dos produtos.	47
4.2	Consumidores com livre opção de compra de energia.	51
5.1	Cenários definidos por V_j	58
5.2	Especificação dos produtos.	59
5.3	Dados de entrada do leilão de venda.	60
5.4	Retorno e risco esperado para cada produto.	61
5.5	Aplicação máxima em cada produto.	62
5.6	Matriz covariância.	63
5.7	Matriz correlação.	65
5.8	Alocação ótima de lances pelo vendedor.	67
5.9	Preço mínimo de venda por produto.	73
5.10	Dados de entrada do leilão.	75
5.11	Resultados da primeira otimização.	75
5.12	Dados do leilão após a primeira rodada de lances.	76
5.13	Resultados do leilão após a segunda otimização.	76
5.14	Distribuição dos lances de V_j no leilão.	76

Capítulo 1

Introdução

A reforma do setor elétrico brasileiro teve início em meados da década de 1990. O objetivo do governo era focar suas atenções no papel de regulador e promotor de políticas públicas, transferindo a responsabilidade de investimentos e operação do mercado para a iniciativa privada. Porém, essa reforma não foi totalmente implementada e, atualmente, o setor elétrico é caracterizado por um modelo misto, no qual coexistem agentes privados e estatais.

Os principais objetivos a serem alcançados com a reforma do setor elétrico eram: expansão da oferta através de investimentos privados, continuidade e qualidade da prestação de serviços de fornecimento de energia elétrica, modicidade tarifária e universalização do acesso aos serviços de energia elétrica.

A competição de mercado era entendida pelo governo como a melhor alternativa para atingir esses objetivos. Entretanto, para atrair novos agentes para o mercado, de forma que exista competição, é necessário a definição de regras claras e estáveis ou, pelo menos, o conhecimento prévio da direção das mudanças de funcionamento do setor.

Para promover a competição foram realizadas diversas alterações na antiga estrutura institucional. Algumas das medidas tomadas foram a criação do Mercado Atacadista de Energia (MAE) e a desverticalização das empresas, buscando promover uma competição justa, sem a prática de subsídios cruzados e de discriminação do acesso, como, por exemplo, uma empresa dificultando o acesso às suas linhas de transmissão, seja por alegar problemas técnicos, seja por cobrar tarifas proibitivas aos concorrentes.

A introdução de agentes comercializadores de energia elétrica foi uma das novidades desse modelo setorial, embora o desmembramento da comercialização como uma atividade isolada já existisse há alguns anos em países como a Inglaterra, Noruega, Chile, Austrália, Nova Zelândia e alguns estados norte-americanos. Os comercializadores compram energia dos geradores e revendem para outros agentes do sistema, tais como consumidores livres e distribuidoras.

Essa estrutura de mercado introduziu novos riscos e intensificou alguns existentes, deixando investidores e empresários do setor com receio de investir. Tanto a experiência internacional, como a crise energética da Califórnia e a falência de grandes empresas como a experiência nacional, principalmente com o racionamento de energia ocorrido em 2001, mostram a necessidade de um estudo dos parâmetros dos modelos de suporte à decisão de negócios, com base em regras de interação dos agentes e nas características do sistema elétrico brasileiro.

1.1 Objetivos

As empresas do setor elétrico brasileiro experimentam a transição de um regime de monopólio para um ambiente competitivo. Diante desse fato, a estrutura das empresas e o sistema de suporte à decisão em negócios no mercado de energia devem ser construídos com base em conceitos próprios à ação nesse ambiente.

A análise de uma metodologia de suporte para estratégias de negócios em energia elétrica visa desenvolver modelos que representem a atuação dos agentes do setor elétrico brasileiro para a definição de estratégias empresariais, tendo como foco a atuação dos agentes em leilões de energia elétrica. Nesse sentido, os conceitos de teoria dos jogos, portfólio e leilões fornecem os instrumentos para a análise de problemas de decisão nos quais múltiplos agentes interagem estrategicamente.

O objetivo desta dissertação é utilizar a teoria dos jogos como uma ferramenta de análise para estratégias de negócios no ambiente competitivo em que o setor elétrico foi inserido. Também são utilizadas técnicas de otimização com o emprego de programação inteira e

quadrática para resolver problemas de estratégias em leilões. No decorrer deste trabalho são investigados:

- a base conceitual e a aplicação da teoria dos jogos para modelar conflitos, interesses e a ação estratégica dos agentes que participam dos leilões;
- a base conceitual e a aplicação da teoria do portfólio para analisar e fixar estratégias para os agentes do setor elétrico atuarem no processo de comercialização de energia;
- uma forma sistemática para definição de estratégias bem como os modelos e processos para atuação no mercado;
- os parâmetros dos modelos de suporte à decisão de negócios, com base nas características específicas do sistema eletroenergético brasileiro e nas regras de interação entre os agentes;
- as regras de cada leilão de energia e o procedimento dos agentes para efetuar lances.

O foco deste trabalho está no estudo do comportamento estratégico dos agentes do mercado de energia, principalmente os geradores e comercializadores de energia elétrica que atuam como vendedores nos leilões. A análise é feita do ponto de vista de um agente vendedor que deseja negociar energia elétrica através de contratos bilaterais utilizando leilões. Entretanto, a metodologia desenvolvida também pode ser utilizada por um agente comprador, pois os leilões analisados são simétricos.

O desenvolvimento de uma metodologia para estratégias de lances utilizando programação matemática e teoria dos jogos é a principal contribuição deste trabalho acadêmico. Apesar desse tipo de modelagem já ter sido desenvolvida por alguns autores, estes só o fizeram com relação a outros países. No Brasil, cuja as regras para a realização de leilões de energia se diferem de outros lugares, essa abordagem ainda não havia sido empregada.

1.2 Estrutura do trabalho

O capítulo 2 deste trabalho descreve a estrutura do sistema elétrico brasileiro e alguns aspectos da reestruturação ocorrida no setor elétrico a partir da década de 1990. Ele também apresenta o problema a ser estudado.

No capítulo 3 é feita a conceituação da base teórica. A definição de teoria dos jogos, tipos de informações, jogos cooperativos e não cooperativos, conceito de equilíbrio e dominância, as duas formas de jogos não cooperativos (estratégicos e dinâmicos) e a teoria dos leilões. Ele descreve, além disso, a teoria do portfólio: relação entre risco e retorno, correlação entre produtos e carteira da mínima variância. Estas teorias são utilizadas no decorrer do trabalho para a implementação do modelo de definição de lances em leilões por parte do vendedor.

O capítulo 4 descreve a configuração do mercado brasileiro de energia elétrica com a introdução do ambiente e das formas que podem ser negociados os contratos bilaterais e *spot*. Nesse capítulo são apresentados os principais leilões de energia elétrica que ocorreram e que estão ocorrendo no Brasil.

No capítulo 5 são apresentados os métodos para fixar lances em leilões de energia elétrica. O objetivo desse capítulo é formular um modelo capaz de auxiliar um agente vendedor de energia elétrica a fixar um procedimento para a realização de lances no leilão de venda e no leilão de compra descritos no capítulo 4. A metodologia desenvolvida utiliza a teoria do portfólio para o leilão, no qual o vendedor entrega suas ofertas em um envelope fechado, e um modelo de maximização de lucros para o leilão aberto.

O capítulo 6 apresenta um *software* para simular os modelos desenvolvidos no capítulo 5. Esse *software* implementa os dois modelos de fixação de lances e tem como objetivo facilitar e auxiliar os vendedores de energia elétrica a tomar decisões no leilão. O capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho.

Capítulo 2

Considerações iniciais

2.1 Sistema elétrico brasileiro

O sistema elétrico brasileiro é composto por uma malha de transmissão interligada, dividida em quatro grandes subsistemas regionais, responsável por mais de 95% do consumo brasileiro. Estes subsistemas, também denominados de submercados, existem devido as restrições de interconexão presentes na malha de transmissão. Os quatro subsistemas são: Norte (N), Nordeste (NE), Sudeste/Centro-oeste (SE) e Sul (S). Existem também alguns sistemas isolados, localizados principalmente na região Norte, que são responsáveis por uma pequena parte do consumo de energia elétrica.

O sistema interligado possui grande parte da capacidade de geração instalada de origem hidráulica, com a presença de grandes reservatórios de regulação plurianual, localizados em diferentes bacias. As hidrelétricas utilizam água armazenada nos reservatórios para produzir energia no futuro, substituindo os custos dos combustíveis utilizados pelas usinas térmicas.

A operação centralizada do sistema interligado tem como base à interdependência operativa entre as usinas, a interconexão dos sistemas elétricos e a integração dos recursos de geração e transmissão para o atendimento do mercado. A interdependência operativa é causada pelo aproveitamento conjunto dos recursos hidrelétricos, através da construção e da operação de usinas e reservatórios localizados em seqüência em várias bacias hidrográficas.

2.1.1 Geração de energia elétrica

Segundo o Banco de Informações de Geração (BIG), de fevereiro de 2004, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil possui um total de 1.320 empreendimentos de geração em operação, produzindo 86.280 MW de potência. Para os próximos anos está previsto uma adição de 38.094 MW na capacidade de geração do país, proveniente dos 63 empreendimentos atualmente em construção e mais 474 outorgados.

Atualmente a capacidade instalada de geração é formada por 77% de hidrelétricas, 19% de termelétricas e de 4% de outras fontes como nuclear, eólica, solar e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). Entretanto, nos últimos anos está ocorrendo uma mudança nessa matriz conforme pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Empreendimentos de geração no Brasil.

Tipo	Em Operação			Em Construção			Outorgados		
	Qtd.	Pot. (MW)	%	Qtd.	Pot. (MW)	%	Qtd.	Pot. (MW)	%
MicroCHs	159	85,26	0,10	1	0,85	0,01	40	25,39	0,09
Eólica	9	23,28	0,03	-	-	-	129	7.299,10	25,05
PCHs	242	1.192,67	1,34	28	353,82	3,95	187	3.076,15	10,56
Hidrelétrica	140	69.710,25	77,79	18	4.106,27	45,85	27	5.909,77	20,28
Termelétrica	767	19.690,61	18,43	22	4.494,58	50,19	91	12.827,67	44,02
Nuclear	2	2.007,00	2,33	-	-	-	-	-	-
Solar	1	0,02	0,00	-	-	-	-	-	-
Total	1.320	92.709,09	100,00	72	8.955,52	100,00	474	29.138,08	100,00

Fonte: Banco de Informações de Geração - ANEEL (Fevereiro de 2004).

O planejamento da expansão é realizado com o governo sinalizando as alternativas de expansão através da abertura de leilões de concessões, com cada comprador aderindo ao leilão na medida do seu interesse. Até 2003, os empreendimentos de geração eram licitados em um leilão de demanda, aberto e com preços ascendentes. Ganhava a concessão o licitante que oferecesse o maior preço pelo empreendimento. O valor do lance inicial era definido pelo leiloeiro através de consultoria para avaliação de ativos. O valor do incremento dos lances subsequentes também era fixado pelo leiloeiro que podia modificá-lo no andamento do leilão.

A partir de 2004 houve uma modificação na licitação de novos empreendimentos de

geração. A concessão do serviço, que até então era outorgado ao licitante que oferecesse maior preço, passou a ser concedido àquele que oferecesse a menor tarifa de geração. Com isto, o leilão de empreendimento passou a ser aberto e descendente, com os licitantes oferecendo lances de tarifa em R\$/MWh.

O Ministério das Minas e Energia (MME) outorga, então, aos vencedores da licitação para novos empreendimentos a concessão de prestação de serviço público ou de uso de bem público pelo prazo de 15 até 35 anos.

2.1.2 Sistema de transmissão

O país possui um sistema de linhas de transmissão, na grande maioria de propriedade de empresas estatais, que interligam os parques geradores com as concessionárias de distribuição e os grandes consumidores de energia no território brasileiro.

A atividade de transmissão de energia elétrica também é exercida mediante concessão, precedida de licitação. O acesso e a conexão aos sistemas de transmissão e de distribuição do país é livre e depende de pagamento de encargos definidos pela ANEEL. A chamada Rede Básica do sistema interconectado é constituída por todas as linhas de transmissão em tensões de 230 kV ou superior.

Não são consideradas da Rede Básica as linhas de transmissão e conexões destinadas ao uso exclusivo de uma central geradora ou de um único consumidor, nem as instalações destinadas à conexão de linhas de transmissão e de distribuição, para atendimento de um concessionário de distribuição. As instalações de transmissão não integrantes da Rede Básica devem ser disponibilizadas pelas concessionárias diretamente aos acessantes interessados, através do pagamento dos encargos correspondentes.

A transmissão é uma atividade regulada e sua remuneração é fixada pela ANEEL através dos leilões de concessão. Os interessados efetuam lances que exprimem a remuneração desejada para a construção e exploração da concessão. A linha de transmissão é licitada em um leilão de oferta com duas rodadas e preço de reserva.

A primeira rodada corresponde a um leilão fechado de primeiro preço. Ganha a concessão

o licitante que oferecer o menor preço pelo uso do sistema, desde que este preço seja menor do que o preço de reserva definido pela ANEEL. Se a diferença entre o preço vencedor e os outros menores preços for menor do que 5%, inicia-se a segunda rodada do leilão participando apenas os licitantes que realizaram lance dentro deste intervalo.

A segunda rodada é iniciada como um leilão aberto, descendente e de primeiro preço, cujo lance inicial é o preço de liquidação da primeira rodada, ou seja, o menor preço. Na segunda rodada os participantes competitivos têm a possibilidade de corrigir suas avaliações e ganha a concessão quem oferecer o menor lance, ou seja, aquele que exigir a menor remuneração pela construção, manutenção e administração do empreendimento.

2.1.3 Sistema de distribuição

A propriedade e o desenvolvimento da rede de distribuição são, como a transmissão, considerados um monopólio natural e, da mesma forma, permite a concorrência para operação desse serviço através dos leilões de concessões. Estes leilões são semelhantes aos de empreendimentos de geração. As regras são estabelecidas pela ANEEL e sua sistemática é definida através de um leilão aberto ascendente. Ganha a concessão o licitante que oferecer o maior lance.

O sistema de distribuição é dividido por estados. Todo estado brasileiro possui pelo menos uma empresa de distribuição, podendo ser estatal ou privada. Atualmente, cerca de 80% das empresas de distribuição estão privatizadas, entretanto grandes empresas como a CEMIG (Centrais Elétricas de Minas Gerais) e a COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica) são de propriedade dos respectivos estados.

2.2 Reestruturação do setor elétrico

Em 1993, o governo federal começou uma série de ações para reestruturar e fixar as diretrizes do setor elétrico. O objetivo dessa reforma era permitir que o governo focasse suas ações no papel de promotor de políticas públicas e regulação, transferindo a responsabilidade de operação e investimento para o setor privado.

Do ponto de vista macroeconômico este objetivo não difere de outros países da América Latina ou da Europa que adotaram a privatização. No entanto, certas características singulares do setor elétrico brasileiro impediram que o país simplesmente copiasse os modelos do setor de serviços públicos bem sucedidos em outros países.

Segundo Mendonça e Dahl (1999), a reforma do setor elétrico brasileiro possuía três áreas principais. Primeiro, definia uma nova arquitetura legal que ajustou a regulação econômica dos monopólios naturais e a regulação para facilitar a competição. Segundo, definia um novo arranjo de comércio cobrindo a compra e venda de energia no atacado, acesso às redes de transmissão e distribuição e uma nova visão para o planejamento e a expansão do setor. Terceiro, foram realizadas alterações institucionais nas empresas federais e estaduais para permitir a implementação dos arranjos comerciais propostos e da arquitetura regulatória. As mudanças institucionais incluíam a introdução de um novo órgão regulador independente (ANEEL) e a revisão do papel da Eletrobrás. A reforma incluiu uma série de mudanças estruturais consideradas necessárias para a criação de um mercado competitivo de energia. Os instrumentos legais mais importantes publicados foram:

- Lei 8631/93: primeiro ato legal para a reforma do sistema elétrico. Ela introduziu mudanças radicais na política tarifária, permitindo que as empresas do setor fixassem tarifas para os consumidores cujos valores refletissem o custo da geração.
- Leis 8987/95 e 9074/95 determinam os procedimentos dos leilões de concessão das empresas elétricas e criam o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), entidade sem fins lucrativos, responsável por controlar e operar o sistema interligado, otimizando o despacho da geração e controlando o fluxo de energia nas linhas de transmissão.
- Lei 9427/96 cria a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que é responsável por regular e fiscalizar as empresas de geração, transmissão e distribuição. Além disso, a ANEEL tem a função de fixar tarifas, regular o mercado e atuava como poder concedente até 2003. A partir de 2004, o governo pretende passar esta responsabilidade para o MME;

- Lei 9648/98 define as diretrizes do Mercado Atacadista de Energia (MAE), além de fixar os “contratos iniciais”, definir os procedimentos de reestruturação das empresas federais e permitir a livre negociação entre empresas distribuidoras, comercializadores e geradores.

Essa nova estrutura legal permitiu o início das privatizações e mostrou o indicativo do sistema orientado ao mercado, no qual não existe planejamento central determinístico e onde a força do mercado indica os preços da energia dos geradores e quando devem ser construídas novas unidades. O ponto principal dessa reforma era permitir que as companhias distribuidoras e grandes consumidores escolhessem seus fornecedores, introduzindo a competição na geração e na comercialização de energia. As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram a estrutura verticalizada anterior à reestruturação ocorrida na década de 1990 e a que está em vigor atualmente.

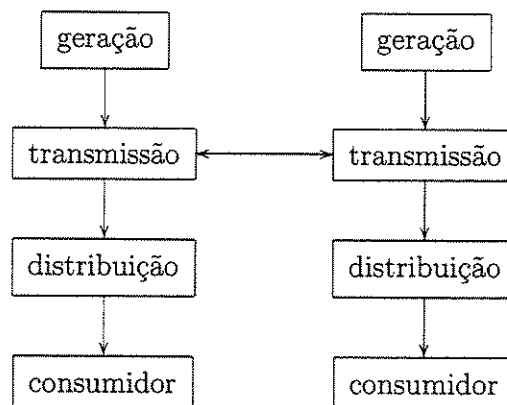


Figura 2.1: Monopólio com integração vertical.

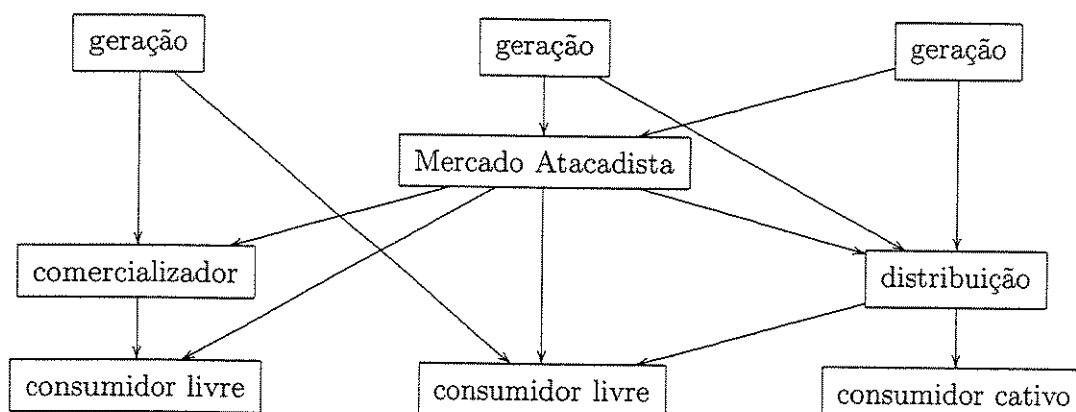


Figura 2.2: Competição no varejo.

As privatizações começaram a acontecer a partir de 1995. A maioria das distribuidoras de energia estaduais foi privatizada, mas algumas continuam tendo os estados como acionistas majoritários. O sistema de transmissão existente não foi privatizado, apenas as novas licitações são concedidas para os agentes privados ou estatais. Na geração poucos empreendimentos foram privatizados, continuando grande parte da capacidade instalada de domínio estatal.

Segundo Munhoz e Correia (2003) a privatização da indústria de energia elétrica correspondeu a uma barganha do Estado brasileiro na tentativa de retomar a expansão da oferta de energia elétrica e construir as bases para um novo ciclo de crescimento nacional. Logo, esperava-se que o capital privado substituísse o Estado, investindo além da demanda e criando espaço para o crescimento econômico.

Entretanto, as reformas adotadas não atingiram seus objetivos. O mercado competitivo não conseguiu fixar preços para a energia elétrica e havia muitas indefinições regulatórias. Os objetivos do governo de alcançar a modicidade tarifária e a segurança no suprimento não foram atingidos, haja visto que a tarifa de energia elétrica cresceu acima da inflação e um racionamento de energia foi imposto aos consumidores no ano de 2001, sendo o governo obrigado a intervir no mercado.

No final do ano de 2003, o MME publicou o documento intitulado “Modelo Institucional

do Setor Elétrico” (MME, 2003) que consiste de uma proposta de re-estruturação do setor elétrico. Propõe-se alterar a estrutura de negociação dos contratos de energia elétrica a partir de 2004, criando dois ambientes de contratação: o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL).

Portanto, a partir de 2004, para os contratos com validade a partir de 2005, todas as empresas distribuidoras de energia serão obrigadas a comprar e negociar sua energia no ACR. Os consumidores livres e os comercializadores de energia devem negociar a energia no ACL. Todos os geradores, sejam concessionários de serviço público de geração, sejam produtores independentes de energia, podem comercializar energia em ambos os ambientes, caracterizando a geração como um segmento competitivo (Figura 2.3).

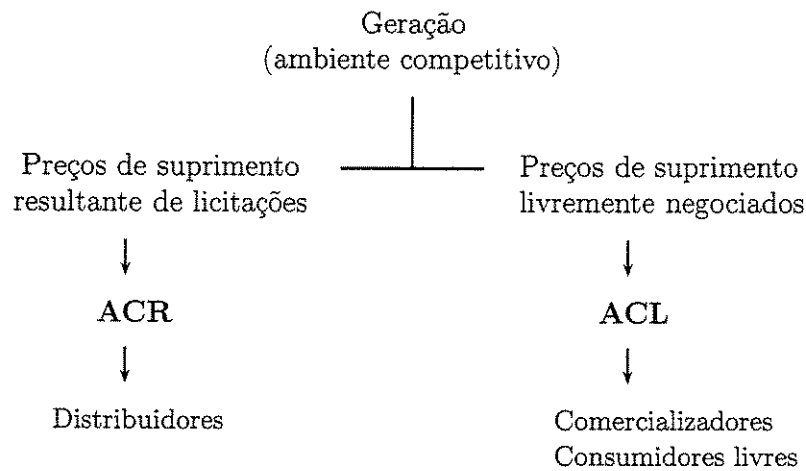


Figura 2.3: Visão geral do modelo de contratação.

Segundo o MME (2003), em termos comerciais, o ACR pode ser visualizado como uma “cooperativa” que agrega as demandas de várias distribuidoras e tem contratos com um conjunto de geradores. A energia comprada pelo *pool* (cooperativa) dos geradores será realizada através de leilões. O primeiro está previsto para setembro de 2004.

2.3 Caracterização do problema

A atuação no mercado de energia elétrica exige dos agentes envolvidos amplo conhecimento dos aspectos regulatórios e de mercado. Este trabalho pretende contribuir para o processo decisório que os agentes enfrentam ao realizar lances em leilões de energia elétrica, ou seja, definição de estratégias e foi elaborado considerando o modelo institucional vigente até o ano de 2003.

Os principais propósitos em investigar estratégias de lances em um competitivo mercado de energia elétrica estão em desenvolver uma metodologia e um *software* para fixar estratégias nos leilões de energia com o objetivo de maximizar o lucro de um agente de mercado. Para isso, foi utilizada a teoria dos jogos, que estuda a interação estratégica entre múltiplos tomadores de decisão. Segundo Costa (2000), o estudo da interação das decisões individuais de cada agente requer a especificação de diversos elementos, entre os quais se destacam:

- as opções para cada agente;
- a seqüência das decisões tomadas pelos agentes;
- as relações de preferência para cada agente;
- as conseqüências, para cada agente, de todo o conjunto possível de decisões tomadas por todos os agentes;
- restrições impostas, nas expectativas dos agentes, sobre como os demais agentes tomam suas decisões e sobre as variáveis agregadas;
- como cada agente escolhe.

No caso do mercado de energia elétrica, alguns dos principais fatores que afetam as decisões de estratégias de lances feitas pelos agentes são:

- Previsão da demanda do sistema;
- Custo variável da geração, custo de partida das máquinas, custo a vazio, entre outros;

- As decisões dos outros agentes, isto é, as estratégias de lance dos outros agentes. Este é um fator de incerteza que compõe as dificuldades de tomar decisões de estratégias de lances no processo. Cada decisão de um agente interage com outras decisões de outros agentes;
- Preço de mercado nas transações, como o preço de liquidação adotado em mercados como o da Califórnia e o Reino Unido, ou o preço marginal adotado em mercados como o da Pennsylvania, New Jersey e Maryland (PJM);
- Formas de contratos. Derivativos, como contratos de opções ou contratos futuros, são empregados em mercados de energia elétrica. Tais contratos influenciam nas estratégias de lances dos geradores;
- Todas restrições impostas nos modelos de decisões de estratégias influenciam nos lances finais dos agentes. Restrições como a malha de transmissão ou imposição regulatória.

Para estabelecer suas estratégias de lances um agente faz o seu modelo. O modelo de um jogador informações que são comuns e, também, que não são de conhecimento público de todos os jogadores. Isso inclui, além da função *payoff* (resultado esperado) do jogador, sua opinião ou crença sobre a função *payoff* dos outros jogadores, sua opinião sobre a opinião dos outros jogadores sobre seu *payoff*, preços de combustíveis, variação do cenário econômico, disponibilidade de instalações de transmissão, risco hidrológico, entre outros. He et al. (2002) apresentam um modelo de estratégias de lances baseado em otimização, cuja função objetivo é maximizar o benefício individual dos geradores.

Um modelo para fixar lances em leilões de energia deve considerar os fatores descritos acima. Os métodos implementados dentro desse modelo nesta dissertação são desenvolvidos sobre uma base teórica que inclui a teoria dos jogos, teoria dos leilões e teoria do portfólio. O objetivo da metodologia desenvolvida é fornecer a um agente de mercado um ferramental que possa ser utilizado na tomada de decisão quando ele precisa realizar lances nos leilões.

Capítulo 3

Conceituação da base teórica

Este capítulo apresenta as definições e os principais conceitos da teoria dos jogos e portfólio necessários para a compreensão deste trabalho. Posteriormente esses conceitos serão utilizados para analisar e formular estratégias para um agente atuar no mercado de energia elétrica brasileiro.

3.1 Teoria dos jogos

A teoria dos jogos é um conjunto de ferramentas analíticas projetadas para ajudar a entender o fenômeno que observamos quando tomadores de decisão interagem. A suposição básica em que se apóia a teoria é que os tomadores de decisão adotam objetivos exógenos bem definidos (eles são racionais) e levam em conta seus conhecimentos e suas expectativas em relação ao comportamento dos outros tomadores de decisão (eles pensam estrategicamente) (Osborne e Rubinstein, 1994).

Heap e Varoufakis (1995) definiram um jogo como qualquer interação entre agentes que é governado por um conjunto de regras especificando os possíveis movimentos para cada participante e um conjunto de resultados para cada combinação possível de movimentos.

A teoria dos jogos começou a ser discutida com maior ênfase após a publicação do livro *Game Theory and Economic Behavior* de von Neumann e Morgenstern (1944), os quais desenvolveram suas teorias baseadas na análise de vários jogos de estratégias e na análise

do comportamento econômico. Por fim, a teoria dos jogos pode ser definida como a teoria das interações estratégicas, nas quais cada participante tem que escolher os seus próprios movimentos, com base no que ele imagina que serão os movimentos dos outros jogadores.

Os principais elementos de um jogo são: os jogadores, as ações, as estratégias e as informações disponíveis para cada jogador, os benefícios, o *payoff* e o equilíbrio do jogo, além da natureza. Estratégia é um tipo de comportamento que um jogador pode utilizar no jogo. Ele terá n tipos de estratégias se puder escolher n tipos de comportamento.

Existem dois tipos de jogos: o cooperativo e o não-cooperativo. Os agentes do setor elétrico utilizam o jogo cooperativo para fazer coalizões com o objetivo de minimizar custos (Loo et al., 2000), tal como os custos de capacidade do sistema (Silva et al., 2001). Tan e Lie (2001) e Kattuman et al. (1999) aplicam os conceitos desse tipo de jogo para alocar os custos das perdas do sistema de transmissão.

Neste trabalho é utilizado o jogo não-cooperativo, cuja essência está na interdependência estratégica: o estratégico (simultâneo ou estático) e o seqüencial (extensivo ou dinâmico). No jogo estratégico os jogadores agem ao mesmo tempo e no dinâmico, eles se movem em seqüência.

3.1.1 Jogos estratégicos e dinâmicos

Em jogos estratégicos cada jogador toma a sua decisão e joga a sua estratégia uma única vez, simultaneamente com as ações tomadas pelos outros jogadores. Embora os jogadores ajam ao mesmo tempo, ignorando as ações simultâneas dos outros, cada um deles deve estar consciente de que existem outros jogadores que, por sua vez, estão simultaneamente conscientes, e assim por diante. Um jogador deve tomar suas decisões raciocinando no que o outro jogador pensa sobre a decisão que ele irá tomar. Por conseguinte, cada qual deverá colocar-se no lugar dos outros e tentar calcular o resultado.

A forma básica de um jogo estratégico possui três elementos: um conjunto de jogadores $i, i = 1, \dots, n$, um conjunto de estratégias puras S_i para cada jogador i , e uma função resultado (*payoff*) que mostra para cada jogador i uma utilidade $u_i(s)$ para cada perfil de estratégia $s =$

s_1, \dots, s_n . A utilidade $u_i(s)$ é comumente representada através de uma matriz denominada matriz de *payoffs*. Se $n = 2$, $S_1 = x_1, x_2, \dots, x_j$ e $S_2 = y_1, y_2, \dots, y_k$, podemos representar na Figura 3.1 uma matriz de *payoffs* na qual $u_{jk}^i = u_i(x_j, y_k)$; $i = 1, 2$; $j = 1, \dots, J$; $k = 1, \dots, K$.

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{2} \\
 \\
 \begin{array}{cccc}
 & y_1 & y_2 & y_3 & y_K \\
 \hline
 x_1 & u_{11}^1, u_{11}^2 & u_{12}^1, u_{12}^2 & \dots & u_{1k}^1, u_{1k}^2 \\
 \mathbf{1} \ x_2 & u_{21}^1, u_{21}^2 & u_{22}^1, u_{22}^2 & \dots & u_{2k}^1, u_{2k}^2 \\
 x_3 & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 x_J & u_{J1}^1, u_{J1}^2 & u_{J2}^1, u_{J2}^2 & \dots & u_{JK}^1, u_{JK}^2 \\
 \hline
 \end{array}
 \end{array}$$

Figura 3.1: Jogos estratégicos: matriz de *payoffs*.

Um dos princípios gerais que um jogador deve seguir num jogo dinâmico é o de prever o futuro e raciocinar sobre o passado. Cada jogador deve procurar perceber o modo como os outros jogadores vão reagir à sua jogada, como ele próprio vai por sua vez reagir, e assim por diante. O jogador antecipa as conseqüências das suas decisões iniciais e utiliza essa informação para definir a sua melhor opção em cada momento.

Jogos dinâmicos podem ser utilizados no mercado de energia elétrica quando contratos bilaterais são negociados entre um demandante e um ofertante. Nesse caso pode acontecer um processo de barganha em que ocorrem ofertas e contra-ofertas. Uma das vantagens que o processo de barganha apresenta é o aprendizado que esse mecanismo fornece quando é elaborado de forma racional. O processo de barganha deve ser projetado para que possua o menor número de etapas possíveis, pois a demora da negociação contribui para que a mesma não ocorra.

Uma empresa que deseja entrar num mercado monopolista (entrante) realiza um jogo dinâmico com o monopolista. Primeiro o monopolista decide quanto produzir num período inicial. A empresa entrante observa o preço correspondente e decide entrar ou não no período seguinte.

A representação gráfica é composta de alguns pontos chamados nós de decisão, vetores

de números, setas que apontam de um nó para o outro e para os vetores, e rótulos para os nós e setas. Cada nó é uma posição no jogo ou um ponto em que algum jogador deve escolher uma ação. A Figura 3.2 esquematiza um jogo dinâmico com dois jogadores, onde o jogador 2 só toma sua decisão após o movimento do jogador 1.

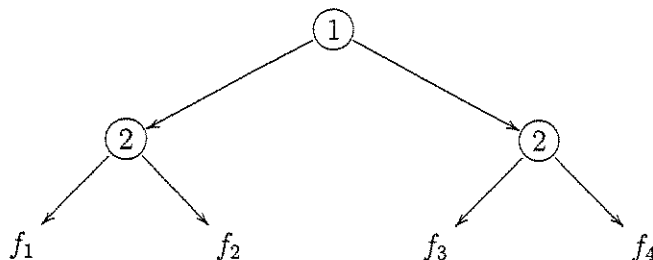


Figura 3.2: Jogos dinâmicos: representação.

3.1.2 Equilíbrio e tipos de informação

A existência de um equilíbrio é um importante conceito da teoria dos jogos. Se um único equilíbrio existe, então os jogadores buscarão este equilíbrio em um mercado para maximizar o seu benefício. Uma estratégia pura é quando um jogador escolhe a sua estratégia deterministicamente. Então, um equilíbrio em estratégias puras ocorre quando os jogadores atingem um equilíbrio através de um conjunto de estratégias deterministicas. Em contrapartida, um equilíbrio de estratégias mistas ocorre quando agentes escolhem suas ações de modo probabilístico atingindo um equilíbrio. Múltiplos equilíbrios estão presentes quando existem algumas ações comuns (estratégia pura ou estratégia mista) as quais os jogadores podem utilizar para maximizar seus benefícios (Cunningham, 2002).

O equilíbrio de Nash (1951) é um dos conceitos mais difundidos de toda a teoria e geralmente é o início de todo estudo sobre teoria dos jogos, pois com algumas considerações específicas ele é aplicável em todos os tipos de jogos. Um equilíbrio de Nash é um perfil de estratégias cuja estratégia de cada jogador é uma resposta ótima para as estratégias dos outros jogadores.

Por vezes, a melhor opção de um jogador é sempre a mesma, independentemente daquilo

que os outros fazem. A isto chamamos de estratégia dominante para esse jogador. Outras vezes, um jogador tem uma opção uniformemente má, uma estratégia dominada, no sentido em que qualquer outra opção é melhor para ele, independentemente daquilo que os outros façam. A procura de um equilíbrio deverá começar pela procura de estratégias dominantes e a eliminação das estratégias dominadas.

No que diz respeito as informações os jogos podem ser de dois tipos: jogos de informação completa e incompleta. Os jogos de informação completa são aqueles em que os participantes possuem todas informações necessárias para definir suas respectivas estratégias e o benefício de cada jogador é de domínio público.

Os jogos de informação incompleta são aqueles em que cada jogador possui informações sobre o jogo que não são de conhecimento mútuo. Além disso, o *payoff* não é previamente conhecido. Os jogos de informação incompleta têm papel relevante em diversos campos do comportamento social, tais como concorrência em negócios, política, estratégia militar e muitos outros. No caso da concorrência em negócios, a informação incompleta envolve a situação em que as empresas, normalmente, sabem muito pouco a respeito da verdadeira estratégia do concorrente e do conjunto completo de estratégias que ele tem disponível.

Além disso, um jogo pode ter informação perfeita e imperfeita. No jogo de informação perfeita, em cada movimento o jogador sabe a história completa do jogo. Já no jogo de informação imperfeita, o jogador pode desconhecer alguma parte da história do jogo ao ter que tomar uma decisão.

Ferrero et al. (1998) modelaram a competição entre agentes do mercado como um jogo não cooperativo na qual os agentes possuem informação incompleta do jogo. Em seu exemplo os agentes sabem os seus custos de operação, mas eles não sabem os custos de operação de seus concorrentes. Então, o jogo com informação incompleta é transformado em jogo com informação completa e imperfeita. O jogo é solucionado utilizando a idéia de equilíbrio de Nash, na qual o preço ótimo é deduzido. Eles mostraram que a estratégia ótima pode mudar dependendo do nível de informação que os agentes têm de seus concorrentes. A estratégia obtida para o equilíbrio de Nash do jogo maximiza os benefícios esperados dos agentes.

3.1.3 Teoria dos leilões

Uma importante utilização da teoria dos jogos no setor de energia elétrica se dá através de leilões. Segundo Klemperer (2000), leilões são mecanismos dinâmicos e eficientes utilizados para comercializar bens em mercados complexos, principalmente quando não existe uma referência estável de preço. Podem ser definidos como um método formal para alocar recursos baseado na competição, na qual vendedor e comprador buscam o maior benefício possível.

Laffont (1997) afirma que leilões são interessantes por duas razões. Primeiro, as regras ligadas ao jogo são bem definidas e muitas características estão disponíveis para definir o modelo estrutural. Segundo, os dados são bastante ricos e mais fáceis de fazê-los públicos do que os dados necessários para a análise de mercados oligopolistas. Conseqüentemente, leilões aparecem como um atrativo exemplo de interação estratégica entre os agentes econômicos, cujo trabalho empírico é prometededor. Segundo Laffont em um lance (*bid*) no leilão existem três tipos de incertezas: uma incerteza é sobre o valor do objeto a ser leiloadado, outra é relacionada às estratégias utilizadas pelos outros participantes e a última é relativa as características dos outros agentes.

A teoria dos leilões (Krishna, 2002) tem sido importante no entendimento de outros métodos de formação de preço, em sua maioria com preços fixados e negociações nas quais o comprador e o vendedor estão envolvidos na determinação do preço. Existe uma estreita ligação entre leilões e mercados competitivos. Há, também, uma analogia entre a teoria de leilões ótimos e a teoria de fixação de preços tanto no monopólio como no oligopólio (Klemperer, 1999).

Um leilão pode ser caracterizado a partir de sua natureza (oferta, demanda ou duplo), pela forma como os lances são oferecidos (aberto ou fechado), pela determinação do preço de fechamento (primeiro ou segundo preço) e se o preço de fechamento é uniforme ou discriminatório (Silva, 2003). Além disso, um leilão pode ser ascendente ou descendente. As Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 ilustram os leilões de demanda, oferta e duplo com participantes identificados.

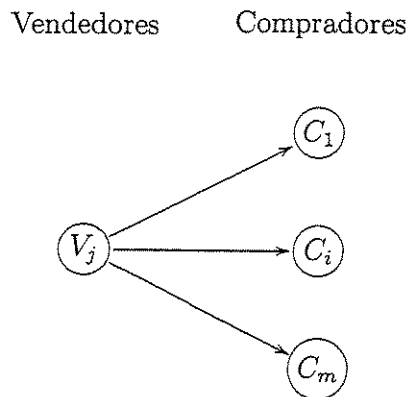


Figura 3.3: Leilão de demanda.

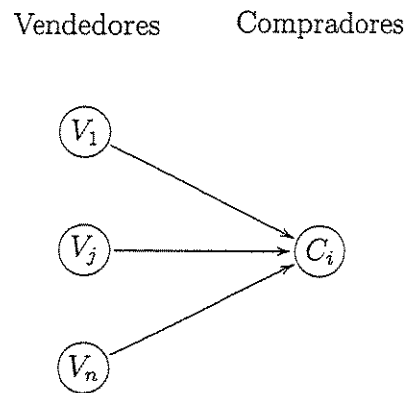


Figura 3.4: Leilão de oferta.

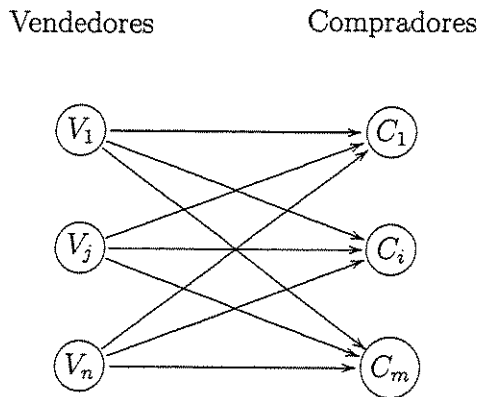


Figura 3.5: Leilão duplo com participantes identificados.

No leilão fechado os licitantes fazem suas ofertas através de um envelope fechado. Seus lances não são de conhecimento público. No leilão aberto os licitantes realizam suas ofertas oralmente ou através de computadores e seus lances são de domínio público. Além disso, no leilão aberto, um licitante pode alterar sua oferta sempre que alguém oferecer um lance melhor que o dele. O leilão fechado é um jogo estratégico, enquanto que o leilão aberto é um jogo dinâmico.

O preço de fechamento do leilão pode ser uniforme, com todos os licitantes pagando o mesmo preço para o bem, ou discriminatório, com os licitantes pagando valores diferentes

para o bem. Ademais, o leilão pode ser de primeiro preço ou segundo preço. No de primeiro preço o licitante que oferece o melhor lance, ganha o leilão pagando o valor do seu lance. No de segundo preço, proposto por Vickrey (1961), ganha o leilão o licitante que oferecer o melhor lance, porém ele paga o valor do segundo melhor lance.

Perry et al. (2000) analisam um leilão fechado de dois estágios que é freqüentemente empregado em privatizações. Este formato de leilão produz sempre o mesmo rendimento esperado do leilão ascendente, mas é menos susceptível a lances que envolvem preempção e colusões. Gan e Bourcier (2002) analisam um modelo de leilão e a caracterização de seu equilíbrio. Eles mostram que a condição essencial de restrição da capacidade de cada supridor e o grau de assimetria de custos têm impacto no procedimento de mercado.

Dekrajangpetch e Sheblé (2000) propõem uma série de estruturas para leilões que podem ser utilizados no mercado de energia. Este trabalho ilustra várias formulações matemáticas para leilões baseadas em técnicas de otimização. São formatados leilões com participantes identificados ou não, preços especificados por compradores, vendedores ou pelos dois, com ou sem reserva de preço, entre outros. Técnicas de otimização também são utilizados por Song et al. (2002) e Azevedo (2004) para desenvolver estratégias de lances em leilões de energia elétrica.

3.2 Teoria do portfólio

Portfólio ou carteira de títulos é o nome dado ao conjunto de ativos financeiros que um investidor possui, que pode ser variável, contendo títulos diversos, ou concentrado, tendo apenas alguns papéis selecionados.

A teoria do portfólio trata essencialmente da composição de uma carteira ótima de ativos, tendo por objetivo principal maximizar a utilidade do investidor pela relação risco e retorno. O problema de portfólio é definir uma estratégia de investimento ótimo para vários ativos. Para ser mais preciso, um investidor dotado de um dado capital inicial x precisa decidir qual a porcentagem de cada ativo em que ele deve empregar esse capital, e em que instante t , para maximizar a utilidade esperada de seu investimento em um dado intervalo de tempo

(Korn, 1997).

Essa teoria, em essência, expõe que o risco de um ativo deve ser avaliado a partir de sua contribuição ao risco total de um portfólio de ativos e não de maneira isolada. O modelo do portfólio sugere que parte do risco de um ativo pode ser eliminado pela diversificação. Ela orienta que um investimento deve ser avaliado pela sua contribuição aos resultados de risco e retorno produzidos por uma ampla (diversificada) carteira de ativos. Não deve predominar entre os aplicadores de capital uma maior preocupação com o desempenho isolado de um ativo, mas com o reflexo que determinada decisão financeira promove sobre todo o portfólio.

A análise teórica do risco foi impulsionada pelo clássico artigo de Markowitz (1952), *Portfolio Selection*, escrito para *The Journal of Finance*, nela o autor propõe estratégias de diversificação que foram consideradas um marco na evolução da teoria financeira.

As aplicações mais conhecidas da teoria do portfólio a problemas reais baseiam-se em variantes do Modelo da Mínima Variância de Markowitz (Elton e Gruber, 1981). O objetivo desse modelo é otimizar o portfólio (ou a segmentação da carteira) de maneira a minimizar os riscos da aplicação (medida pela variância da utilidade conseguida).

Na teoria do portfólio, admite-se que os investidores sejam racionais, isto é, capazes de considerar todas as eventualidades e de analisar todas as informações disponíveis no processo de tomada de decisão. Eles objetivam elevar ao máximo a riqueza, minimizando o risco e maximizando a receita.

Em mercados de energia elétrica, Alcock e Pang (2000) apresentam exemplos ilustrando sobre o que pode ser feito por um agente gerador para minimizar riscos e maximizar seus benefícios quando operam em um mercado competitivo. Já Bjorgan et al. (1999) propõem algumas soluções para os geradores gerenciar riscos na avaliação de contratos utilizando a teoria do portfólio. Domingues et al. (2001) estendem a teoria do portfólio para analisar riscos de projetos de investimento na expansão do sistema elétrico brasileiro.

3.2.1 Risco na estrutura de um portfólio

As decisões financeiras são tomadas em um ambiente de incerteza com relação a seus resultados no futuro. Quando a incerteza, associada à verificação de determinado evento, pode ser quantificada por meio de uma distribuição de probabilidades dos diversos resultados previstos, diz-se que a decisão está sendo tomada sob uma situação de risco. Dessa maneira, o risco pode ser entendido pela capacidade de se mensurar o estado de incerteza de uma decisão, mediante o conhecimento das probabilidades associadas à ocorrência de determinados resultados (Assaf, 2001).

O risco é representado pela medida estatística do desvio padrão, indicando se o valor médio (retorno esperado) é representativo do comportamento observado. Assim, ao se tomarem decisões de investimento com base em um resultado médio esperado, o desvio padrão passa a revelar o risco da operação, ou seja, a dispersão do retorno em relação à média.

Dessa forma, pode-se introduzir que o risco total de qualquer ativo é definido pela soma do risco sistemático e do risco diversificável. O risco sistemático é aquele que não pode ser eliminado ou reduzido mediante a diversificação dos ativos, estando sempre presente na estrutura do portfólio. Esse risco tem origem nas flutuações a que está sujeito o sistema econômico como um todo e suas principais fontes são as variações nas taxas de juros da economia, o processo inflacionário, a situação política e o comportamento das cotações no mercado de títulos.

O risco diversificável é aquele que pode ser total ou parcialmente diluído pela diversificação da carteira. É um risco intrínseco, próprio de cada investimento realizado, e sua eliminação de uma carteira é possível pela inclusão de ativos que não tenham correlação positiva entre si. Dessa maneira, ao se repartir eficientemente as aplicações em ativos com covariâncias inversas, consegue-se reduzir o risco total de uma carteira pela eliminação ou redução do risco diversificável, mantendo-se, contudo, o risco sistemático comum a todos os ativos, conforme ilustrado na Figura 3.6.

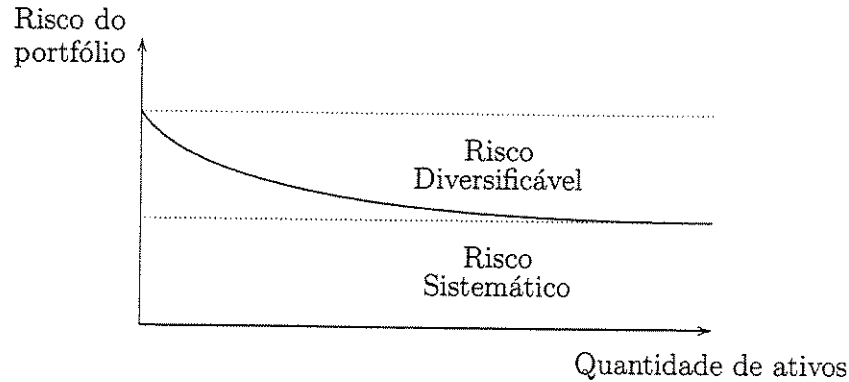


Figura 3.6: Redução do risco pela diversificação.

A diversificação de investimentos é a tentativa de colocar em prática a recomendação implícita “não ponha todos os ovos em uma só cesta”. Pode-se inferir que, quanto maior o número de cestas, menor será a chance de quebrar todos os ovos (Benninga, 1994). Assim, aqueles que buscam uma diversificação esperam reduzir o nível do risco do portfólio, repartindo ao máximo a sua aplicação entre as alternativas de investimentos oferecidas. A diversificação consegue a redução do risco diversificável ou até a sua anulação.

A mensuração do risco de um investimento processa-se por meio de critério probabilístico, o qual consiste em atribuir probabilidades, subjetivas ou objetivas, aos diferentes cenários esperados e, em consequência, aos possíveis resultados do investimento.

A probabilidade objetiva pode ser definida através de séries históricas de dados e informações, freqüências relativas observadas e a experiência acumulada no passado. Por outro lado, a probabilidade subjetiva tem como base a intuição, o conhecimento, a experiência do investimento e, até mesmo, um certo grau de crença da unidade tomadora de decisão.

3.2.2 Retorno esperado de um portfólio

Sob risco, o resultado de qualquer ação com consequência futura não pode ser conhecido com certeza. Por conseguinte, os resultados são geralmente representados por uma função freqüência. Essa função está representada na Tabela 3.1. Ela é uma lista de todos os resultados possíveis junto com a probabilidade da ocorrência de cada um desses resultados.

Tabela 3.1: Função freqüência.

Cenários	Probabilidade	Retorno do ativo A	Retorno do ativo B
Recessão	10%	-5%	2%
Médio	35%	10%	10%
Bom	45%	25%	15%
Excelente	10%	50%	20%

Os retornos esperados de cada ativo da Tabela acima podem ser calculados através da média ponderada.

$$E(R_A) = (-0,05 * 0,10) + (0,10 * 0,35) + (0,25 * 0,45) + (0,50 * 0,10)$$

$$E(R_A) = 0,1925 \text{ (19,25\%)}$$

$$E(R_B) = (0,02 * 0,10) + (0,10 * 0,35) + (0,15 * 0,45) + (0,20 * 0,10)$$

$$E(R_B) = 0,1245 \text{ (12,45\%)}$$

O retorno esperado de uma carteira composta por mais de um ativo é definido pela média ponderada do retorno de cada ativo em relação a sua participação no total da carteira. Supondo que cada ativo receba 50 % do investimento, tem-se o seguinte retorno esperado da carteira:

$$E(R_p) = (19,25\% * 50\%) + (12,45\% * 50\%)$$

$$E(R_p) = 15,85\%$$

A Figura 3.7 ilustra todos os possíveis retornos esperados dos dois ativos (A e B), admitindo diferentes proporções de investimento na carteira.

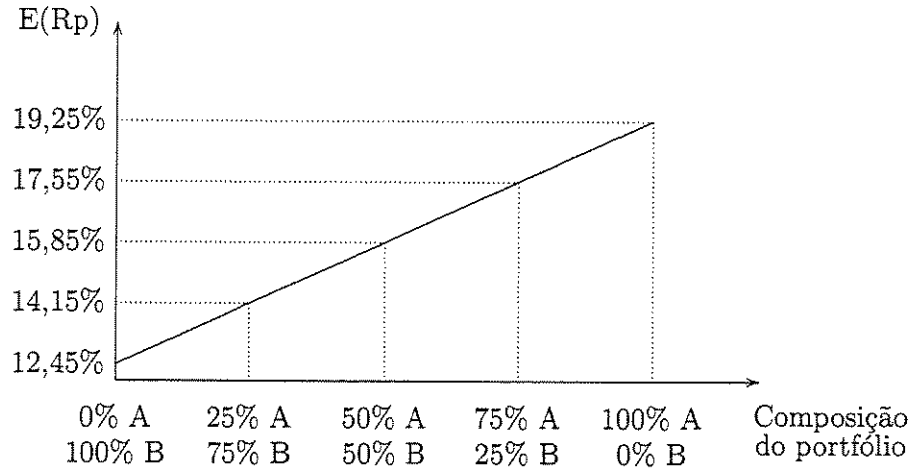


Figura 3.7: Retornos esperados de diferentes composições de portfólio.

Para uma carteira constituída por n ativos, o retorno esperado é obtido pela expressão seguinte:

$$E(R_p) = \bar{R}_p = \sum_{i=1}^n R_i W_i \quad (3.1)$$

onde:

- W_i fração do total investido no ativo i ;
- n número total de ativos que compõe o portfólio;
- R_i retorno esperado do ativo i .

3.2.3 Relação risco e retorno

A formação de um portfólio está essencialmente baseada na relação entre risco e retorno. Como foi visto anteriormente é admitido que os investidores sejam racionais, isto é, capazes de considerar todas as eventualidades e de analisar todas as informações disponíveis no processo de tomada de decisão.

A regra básica de uma decisão racional é selecionar os ativos que apresentam o menor risco e o maior retorno esperado. Para um mesmo nível de risco, um investidor pode selecionar o ativo de maior valor esperado. Ao contrário, quando há dois ou mais ativos que apresentam o mesmo retorno esperado, o investidor racional escolhe sempre aquele de menor risco (Assaf,

2001). A Figura 3.8 ilustra o critério de seleção de investimento segundo um julgamento racional da unidade decisória.

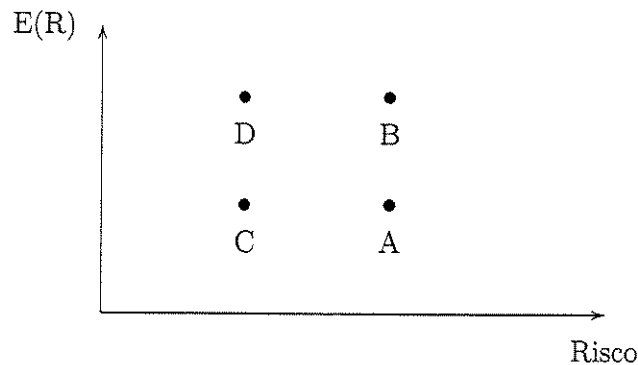


Figura 3.8: Seleção de um ativo.

O ativo B é preferível ao ativo A por apresentar para um mesmo nível de risco um maior retorno esperado. O ativo C , pelo mesmo critério descrito, é preferível ao ativo A , pois sugere menor risco para um mesmo retorno esperado do investimento. O ativo D , por seu lado, é superior a todos os demais, pois é capaz de oferecer o maior retorno esperado para o mais baixo grau de risco.

3.2.4 Seleção de portfólio

A análise de carteiras envolve as projeções de retorno esperado e risco do conjunto de ativos considerado. A seleção de carteiras procura identificar a melhor combinação possível de ativos, obedecendo as preferências do investidor com relação ao risco e retorno esperados. Dentre as inúmeras carteiras que podem ser formadas com os ativos disponíveis é selecionada aquela que maximiza seu grau de satisfação (Assaf, 2001).

Risco de um portfólio

O risco de um portfólio depende não somente do risco de cada elemento que o compõe e de sua participação no investimento total, mas também da forma como seus ativos se relacionam (covariam) entre si. De acordo com o que foi descrito nas seções anteriores e

será exemplificado mais adiante, relacionando ativos com baixa correlação (ou covariância inversa) é possível reduzir o risco total da carteira.

Como foi visto, o risco pode ser mensurado através do desvio padrão. Por exemplo, o risco de uma carteira constituída de dois ativos (A, B) pode ser obtido pela expressão seguinte:

$$\sigma_p = [(W_A^2\sigma_A^2) + (W_B^2\sigma_B^2) + 2W_AW_B\sigma_{A,B}]^{1/2} \quad (3.2)$$

onde:

W_A, W_B proporção do ativo A e B aplicado no portfólio;

σ_A^2, σ_B^2 variância dos retornos dos ativos A e B ;

$\sigma_{A,B}$ covariância entre os ativos A e B .

Observe que o desvio padrão de um portfólio de dois ativos não é obtido unicamente pela soma do desvio padrão de cada ativo ou, até mesmo, pela sua média aritmética ponderada. A expressão de cálculo considera também a covariância entre os ativos, de forma a expressar a contribuição da diversificação sobre o risco do portfólio. A covariância mede o grau de relacionamento entre dois ativos. Para dois ativos ela pode ser determinada pelas equações abaixo:

$$\sigma_{A,B} = \sum_{i=1}^K P_k (R_A - \bar{R}_A)(R_B - \bar{R}_B) \quad (3.3)$$

e

$$\sigma_{A,B} = \rho_{A,B}\sigma_A\sigma_B \quad (3.4)$$

onde:

- k cenários;
- m número de cenários k ;
- P_k probabilidade de verificação dos cenários k ;
- R_A, R_B retorno esperado dos ativos A e B para cada cenário k ;
- \bar{R}_A, \bar{R}_B retorno esperado dos ativos A e B considerando todos os cenários k ;
- $\rho_{A,B}$ coeficiente de correlação entre os ativos A e B .

Substituindo a equação 3.4 na equação 3.2 é possível calcular o risco para uma carteira formada por dois ativos:

$$\sigma_p = [(W_A^2\sigma_A^2) + (W_B^2\sigma_B^2) + 2W_AW_B\rho_{A,B}\sigma_A\sigma_B]^{1/2} \quad (3.5)$$

A expressão para o cálculo do risco de um portfólio com n ativos, baseado no modelo de portfólio desenvolvido por Markowitz fica:

$$\sigma_P = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i W_j \rho_{i,j} \sigma_i \sigma_j \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

Dessa forma é mostrado que o risco associado a um portfólio é função:

- percentual do capital investido em cada ativo;
- do desvio padrão ou variância de cada ativo que compõe o portfólio;
- do coeficiente de correlação entre os ativos.

Correlação entre ativos

O valor do coeficiente de correlação entre os ativos pode variar de $-1 \leq \rho_{i,j} \leq 1$. O risco de um portfólio pode ser reduzido ou aumentado implementando alternativas de investimentos que possuem correlações perfeitamente negativas (igual a -1) ou correlações perfeitamente positivas (igual a 1), respectivamente.

A existência de aplicações perfeitas e negativamente correlacionadas indica a existência de portfólios com investimentos que produzem retornos inversamente proporcionais, isto é, quando o retorno de alguns ativos decrescerem, o retorno de outros ativos se elevarão na mesma intensidade, anulando os reflexos negativos produzidos. Nesse caso, ocorre uma eliminação total do risco da carteira, sendo os resultados desfavoráveis verificados em alguns ativos perfeitamente compensados pelo desempenho positivo de outros.

A opção por aplicações perfeitas e positivamente correlacionadas define um maior risco ao portfólio, pois os ativos convergem seus resultados para uma única decisão. Não se verifica uma compensação do risco assumido pelos ativos como o demonstrado acima. Esse tipo de correlação pode gerar altos lucros e também elevados prejuízos.

Na prática, no entanto, é extremamente difícil a existência de investimentos com perfeita correlação negativa ou positiva. O risco de uma carteira de ativos raramente é anulado pela presença de ativos perfeita e opostamente relacionados, devendo a unidade decisória preocupar-se em minimizar o seu valor mediante a seleção de ativos cujos retornos apresentam correlações mais divergentes possíveis (Assaf, 2001).

O exemplo abaixo ilustra o valor esperado do retorno do portfólio para várias combinações dos ativos A e B, e o desvio padrão nas hipóteses de correlação (-1), (0) e (1). Considere dois ativos com as seguintes características da Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Ativos de um portfólio.

Ativo	Retorno	Risco
A	10%	15%
B	30%	30%

A Tabela 3.3 mostra o conjunto de carteiras possíveis, com seus respectivos retornos utilizando coeficientes de correlação diferentes.

Tabela 3.3: Conjunto de carteiras possíveis.

Portfólio	Combinações		Retorno $E(R_p)$	Risco (σ_p)		
	W_A	W_B		$\rho_{A,B} = 1$	$\rho_{A,B} = 0$	$\rho_{A,B} = -1$
1	0,00	1,00	30%	30,0%	30,0%	30,0%
2	0,10	0,90	28%	38,5%	27,0%	25,5%
3	0,20	0,80	26%	27,0%	24,2%	21,0%
4	0,30	0,70	24%	25,5%	21,5%	16,5%
5	0,40	0,60	22%	24,0%	19,0%	12,0%
6	0,50	0,50	20%	22,5%	16,8%	7,5%
7	0,60	0,40	18%	21,0%	15,0%	3,0%
8	0,65	0,35	17%	20,2%	14,3%	0,7%
9	0,70	0,30	16%	19,5%	13,8%	1,5%
10	0,80	0,20	14%	18,0%	13,4%	6,0%
11	0,90	0,10	12%	16,5%	13,8%	10,5%
12	1,00	0,00	10%	15,0%	15,0%	15,0%

Como pode ser observado da Tabela 3.3 diferentes composições de portfólio oferecem diferentes taxas de retorno e um determinado risco associado. Além disso, pode-se observar que dependendo da correlação entre os ativos também se consegue aumentar ou diminuir o risco associado a uma determinada taxa de retorno.

Observa-se que o portfólio 1, que só possui ativo B, oferece uma taxa de retorno de 30% com um risco associado de 30%. Por outro lado, o portfólio 12, formado apenas pelo ativo A, oferece uma taxa de retorno menor (10%), porém com um risco associado também diminuído (15%). A característica para formação de um portfólio depende do investidor. Se o investidor é mais propenso ao risco, provavelmente escolherá uma carteira com maior quantidade de ativos B, que oferece maior retorno, a um alto grau de risco associado. Um investidor avesso ao risco, talvez, escolhesse uma carteira com predominância do ativo A, que oferece menor retorno a uma taxa de risco menor.

Ainda é interessante observar que é possível eliminar totalmente o risco se os dois ativos apresentarem correlação perfeitamente negativa. Observe a carteira 8. Esta possui um risco associado menor do 1%. A Figura 3.9 mostra o conjunto de combinações possíveis de uma carteira. Como pode ser visto, se os dois ativos possuírem correlação perfeitamente negativa é possível fazer uma combinação entre eles de forma que se obtenha um retorno esperado de 16,7% a um risco zero.

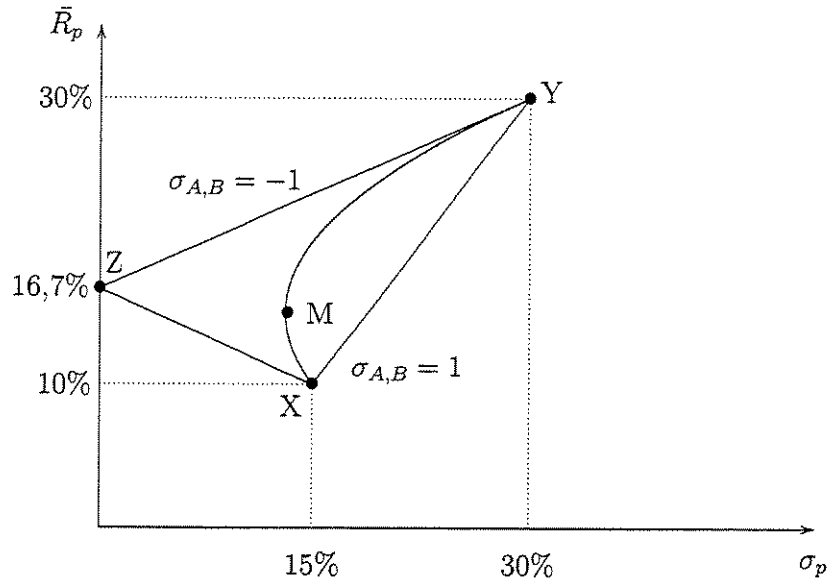


Figura 3.9: Conjunto de combinações.

A curva inserida no triângulo XYZ indica os possíveis resultados de risco e retorno de uma carteira formada por ativos considerados não perfeitamente correlacionados. A reta XY reflete os possíveis resultados que os ativos apresentariam se fosse apurada uma correlação perfeitamente positiva ($\rho = 1$) e as retas XZ e ZY os possíveis resultados se fosse apurada uma correlação perfeitamente negativa ($\rho = -1$). A curva XMY está separada das retas sugerindo o efeito da diversificação da carteira pela redução do risco.

O ponto M , destacado na curva XY , representa uma carteira de ativos que possui o menor risco possível para uma carteira não perfeitamente correlacionada. Quanto mais uma carteira se distancia desse ponto de menor desvio padrão, maior é o risco que ela apresenta e, conseqüentemente, mais elevado é seu retorno esperado. Investidores com nível mais alto

de aversão ao risco tenderão a escolher carteiras mais próximas do ponto M .

Modelo da mínima variância

Considere a carteira M da Figura 3.9. Por envolver risco mínimo ela é preferencial a todas as demais carteiras que oferecem um retorno esperado menor. Em outras palavras, diz-se que M domina todas as demais carteiras que se encontram abaixo dela.

O modelo da mínima variância desenvolvido por Markowitz tem por objetivo encontrar a combinação de ativos ótima na qual o risco do portfólio é minimizado. Por exemplo, para dois ativos o risco mínimo pode ser calculado pela derivada parcial do desvio padrão do portfólio (σ_p) em relação a proporção do ativo A que poderá ser investido (W_A). A proporção do ativo B a ser investido é igual a $W_B = 1 - W_A$. Igualando a equação a zero e resolvendo para W_A obtém-se:

$$\frac{\partial \sigma_p}{\partial W_A} = \frac{2(W_A \sigma_A)^2 - \sigma_B^2 + W_A \sigma_B^2 + (1 - 2W_A) \rho_{A,B} \sigma_A \sigma_B}{(1/2) \sigma_p} = 0 \quad (3.7)$$

$$W_A = \frac{\sigma_B^2 - \rho_{A,B} \sigma_A \sigma_B}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2 - 2\rho_{A,B} \sigma_A \sigma_B} \quad (3.8)$$

O exemplo abaixo é adaptado de (Assaf, 2001). Ele analisa a combinação de dois ativos para formação de uma carteira e faz uma análise dessa carteira através do modelo de mínima variância.

Considere os ativos A e B e suas respectivas taxas de retorno e risco apresentados na Tabela 3.4

Tabela 3.4: Características de dois ativos.

	Ativo A	Ativo B
$E(R) = \bar{R}$	20%	12%
Risco (σ)	36%	22%

A partir dessas informações é possível formar n carteiras com as combinações dos ativos A e B . A Tabela 3.5 apresenta a formação de seis carteiras com suas respectivas taxa de retorno e risco associado. O coeficiente de correlação entre esses dois ativos é de 0,20.

Tabela 3.5: Carteiras com diferentes composições.

Carteira	W_A	W_B	$E_p = \bar{R}_p$	σ_p
A	0%	100%	12,0%	22,0%
B	20%	80%	13,6%	20,3%
C	40%	60%	15,2%	21,4%
D	60%	40%	16,8%	24,9%
E	80%	20%	18,4%	29,9%
F	100%	0%	20,0%	26,0%

A carteira de mínima variância pode ser calculada pelas equações 3.7 e 3.8. Substituindo os valores das tabelas acima nessas equações, obtém-se a carteira M , de variância mínima composta por: $W_A = 22,25\%$ e $W_B = 77,75\%$.

O retorno esperado e o risco da carteira M atingem os seguintes valores:

$$\bar{R}_p = \bar{R}_A W_A + \bar{R}_B W_B$$

$$\bar{R}_p = (20\% * 0,2225) + (12\% * 0,7775)$$

$$\bar{R}_p = 13,78\%$$

$$\sigma_p = (\sigma_A^2 W_A^2 + \sigma_B^2 W_B^2 + 2W_A W_B \rho_{A,B} \sigma_A \sigma_B)^{1/2}$$

$$\sigma_p = (0,36^2 * 0,2225^2 + 0,22^2 * 0,7775^2 + 2 * 0,2225 * 0,7775 * 0,20 * 0,36 * 0,22)^{1/2}$$

$$\sigma_p = 20,2\%$$

Na Figura 3.10 o portfólio M é o de menor risco. O ponto M domina todos os demais formados abaixo, apresentando menor risco para um retorno esperado mais elevado. As oportunidades de investimentos a serem consideradas estão localizadas sobre a curva MY , conhecida como fronteira eficiente.

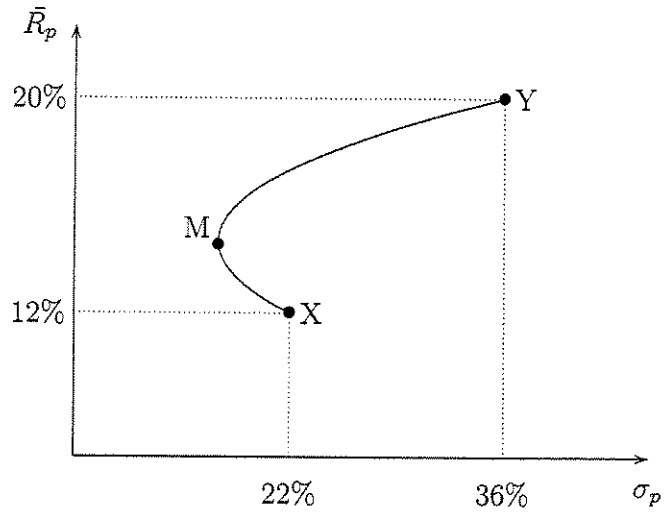


Figura 3.10: Representação gráfica da fronteira eficiente.

A seguir está formulado o problema matemático para o portfólio de mínima variância para n ativos. A taxa de retorno esperada é representada por \bar{R}_p e a covariância por $\sigma_{i,j}$, para $i, j = 1, 2, \dots, n$. Um portfólio é definido por um conjunto com várias combinações $W_i, i = 1, 2, \dots, n$, cuja soma é igual a 1. Para encontrar o portfólio de mínimo risco, deve-se fixar uma taxa de retorno \bar{R} .

$$\min \sum_{i=1}^n W_i W_j \sigma_{i,j} \quad (3.9)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i=1}^n W_i \bar{R}_i = \bar{R}_p \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1. \quad (3.11)$$

Capítulo 4

Mercado brasileiro de energia elétrica

Antes de começar a reestruturação, em 1993, existia um sistema de monopólio no setor elétrico. Os geradores vendiam a energia e ela era transmitida para as distribuidoras que, por fim, revendiam para os consumidores que estivessem conectados as suas redes.

No mercado pluralista as atividades de geração, transmissão e distribuição foram desverticalizadas e o fornecimento de energia elétrica foi desvinculado dos serviços de transmissão e distribuição. Não há vínculo físico entre o fornecimento de energia e a transação financeira. Com essa nova estrutura foi possível a criação do comercializador de energia elétrica que compra energia dos geradores ou outros agentes comercializadores e revende para as distribuidoras, consumidores ou no mercado *spot*.

Atualmente, no mercado brasileiro, a energia elétrica pode ser comercializada através de contratação bilateral e através do mercado *spot*. As negociações bilaterais, nas quais os preços e as condições são determinados livremente entre as partes ou através de leilões, podem ocorrer entre geradores, distribuidores, comercializadores e consumidores livres. O mercado *spot* abrange a parcela não contratada de energia, podendo ser originária dos excedentes das geradoras ou da demanda acima da contratada dos comercializadores e distribuidores.

A partir de 2004, o preço da energia elétrica para os distribuidores não será mais negociado livremente entre vendedores e compradores, mas sim, determinado pelo *pool*. Entretanto, consumidores livres e comercializadores continuarão negociando sua energia livremente.

Até 2003, toda concessionária de distribuição era obrigada a contratar no mínimo 95% do

total de sua demanda prevista bilateralmente. O restante poderia ser negociado no mercado *spot*. A partir de 2004, essas empresas ficaram obrigadas a contratar 100% de sua demanda bilateralmente.

A reestruturação do setor elétrico realizada nos anos 90 insitiu uma imposição regulatória denominada “contratos iniciais”. Esses contratos foram impostos pelo governo para que a passagem do ambiente monopolístico estatal para o concorrencial misto (agentes estatais e privados) ocorresse de uma maneira mais suave. Eles são contratos de compra e venda de energia elétrica com preços e quantidade de energia pré-fixados. Em 2003 esses contratos começaram a ser liberados, e a partir de então, está sendo liberado 25% do total de energia destes contratos a cada ano, sendo que em 2006 toda a energia elétrica estaria disponível para negociações no mercado (Figura 4.1).

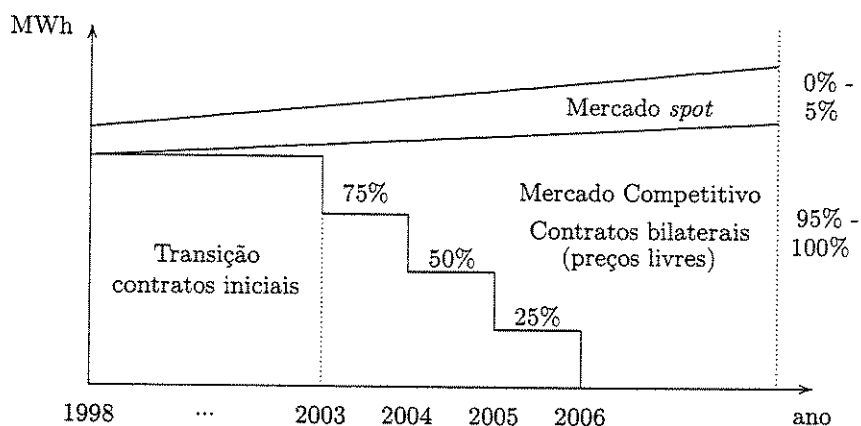


Figura 4.1: Competição no mercado de energia elétrica.

O MAE organizou, em setembro de 2002, o primeiro leilão de energia referente à liberação dos “contratos iniciais”. Participaram desse leilão oito empresas vendedoras, entre geradoras federais, estaduais e privadas, e trinta e sete compradores. Do total de 4,5 mil MW-médio ofertados, 33,3% foram comercializados.

4.1 Mercado bilateral

A forma mais utilizada para a comercialização de energia elétrica é através de negociações bilaterais. Até 2003 essas negociações eram realizadas através de contratos de compra e venda de energia firmada livremente entre as duas partes ou através de leilões organizados pelo MAE ou pelos próprios agentes interessados.

Os contratos bilaterais podem ser de longo, médio ou de curto prazo. Geralmente é dito de curto prazo os contratos com prazo de validade menor que dois anos, de médio prazo contratos de dois a seis anos, e de longo prazo contratos com validade maior que seis anos.

O mercado bilateral é o ambiente de comercialização que apresenta maior liberdade quanto aos formatos dos leilões de comercialização de energia elétrica. Nesse mercado o comercializador pode organizar seu próprio leilão, cujas regras ele define de forma a atrair participantes, participar de leilões organizados por terceiros ou participar dos leilões do MAE. Devido a obrigatoriedade das concessionárias geradoras estatais de vender pelo menos 50% de sua energia produzida através de licitação pública e da obrigatoriedade das concessionárias de distribuição de comprar no mínimo 95% de sua demanda prevista através de contratos bilaterais (até 2003), leilões estão sendo muito utilizados para comercializar os contratos bilaterais.

4.2 Mercado *spot*

Atualmente o preço *spot*, preço no mercado a vista, é dado pelo custo operativo do último gerador despachado, necessário para atender a demanda, conhecido como custo marginal de operação. O despacho de energia é realizado através de modelos de otimização cuja função objetivo é minimizar o custo operativo e o risco da falta de energia no futuro.

No Brasil, o preço *spot* é utilizado para liquidar a energia não contratada bilateralmente. Esse preço é calculado pelo MAE através de um modelo computacional que leva em conta uma série de dados de entrada como: previsão de vazão e cargas, disponibilidade de geração das usinas hidráulicas, custo das usinas térmicas, entre outros. Isto faz com que o custo

marginal de curto prazo seja extremamente instável por estar diretamente relacionado à variabilidade do comportamento hidrológico das bacias em que estão situados os aproveitamentos.

O preço *spot* varia de acordo com três patamares de carga distintos: leve, média e pesada, e também pelo submercado. O MAE publica em seu *site* o preço semanal a ser praticado no mercado *spot*. A Figura 4.2 mostra a variação do preço *spot* de março de 2002 até fevereiro de 2004, considerando a carga média no submercado Sudeste.

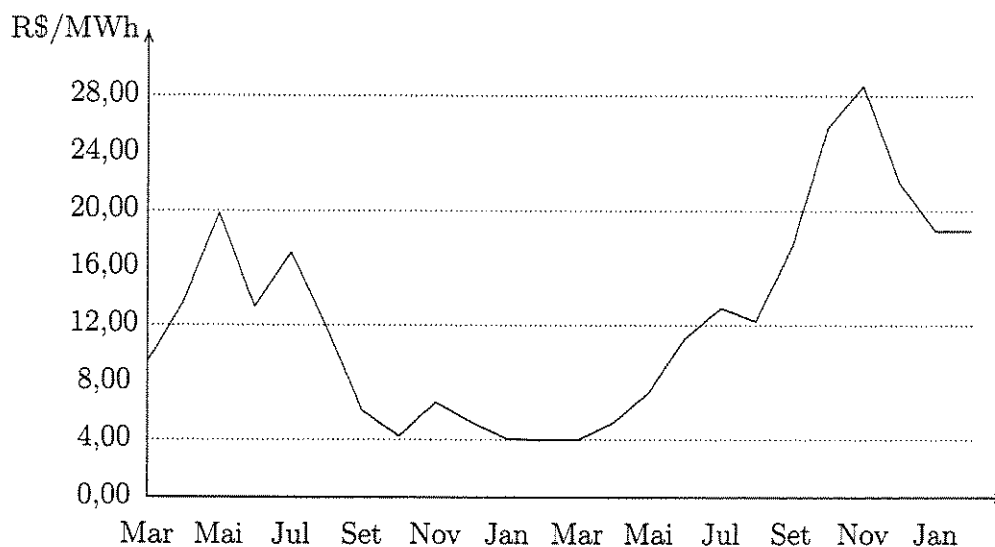


Figura 4.2: Variação do preço *spot* no Sudeste, carga média, de Mar-2002 - Fev-2004.

Como pode ser observado, existe uma alta volatilidade no preço *spot* para carga média na região sudeste. Essa volatilidade ocorre também em outros submercados e para todos os níveis de carga (baixa, média e pesada). No período do racionamento de energia ocorrido em 2001 o valor do preço *spot* ultrapassou a casa dos R\$ 600,00. Essa volatilidade e a incerteza desse preço também faz com que os agentes prefiram os contratos bilaterais às negociações no mercado *spot*.

4.3 Leilões de energia

A lei nº 10.438, de 2002, determina que no mínimo 50% da energia elétrica comercializada pelas concessionárias geradoras de serviço público sob controle federal deve ser negociada através de leilões públicos. Como cerca de 80% da geração de energia elétrica no Brasil está sob controle federal, grande parte da energia elétrica comercializada no Brasil é negociada através de leilões.

Atualmente existem três formas de um agente vendedor negociar sua energia através de contratos bilaterais por leilão: o leilão de venda e o leilão de compra mensal organizados pelo MAE, e o leilão organizado por terceiros. Estes leilões se caracterizam por serem duplos e com participantes identificados.

Os leilões de venda e compra possuem regras bastante parecidas. No leilão de venda os vendedores entregam suas ofertas em um envelope fechado e os compradores irão competir dando lances de quantidade em um leilão de preço ascendente aberto. No leilão de compra ocorre o contrário, os compradores fazem seus lances em envelopes fechados e os vendedores competem dando lances de quantidade em um leilão aberto de preço descendente. O leilão organizado por terceiros, geralmente comercializadoras representando um ou vários consumidores livres, não possuem regras padronizadas, variando de acordo com o objetivo desejado.

Ainda ocorreram no Brasil outros leilões de energia, como o leilão de certificados de energia e o leilão de excedentes. O primeiro foi realizado durante o racionamento de 2001 e foi a primeira experiência da utilização de leilões para fixar o preço da energia elétrica no Brasil. O segundo foi realizado em 2003, em momento oposto ao do racionamento, pois o país passava por um processo de sobre-oferta de energia.

Os leilões descritos nesta seção podem ser simulados através de um *software on-line*, desenvolvido por Masili (2004), através da *internet* ou de redes locais.

4.3.1 Leilões de venda

O leilão de venda de energia elétrica tem como objetivo a oferta, por parte dos vendedores, de lotes de energia no valor de 0,5 MW-médio, provenientes da liberação da parcela de 25% dos contratos iniciais (ANEEL, 2002). O primeiro leilão foi realizado em 2002 e outros três estavam previstos para 2003, 2004 e 2005, mas foram cancelados pelo MME. Os lotes negociados no leilão são disponibilizados para os compradores a partir do primeiro dia do ano subsequente à realização do leilão.

O leilão de venda é se caracteriza por ser duplo, com participantes identificados e operado pelo MAE. Nesse leilão a energia é considerada um produto homogêneo, que não permite diferenciação, e os produtos são negociados através de contratos multilaterais. Estes ocorrem quando a formatação do leilão possibilita a negociação entre vários compradores e vários vendedores. Nesse caso, um contrato multilateral pode ser quebrado em múltiplos contratos bilaterais.

Esse leilão possui dois estágios. No primeiro cada vendedor oferece suas ofertas para os diversos compradores em um envelope fechado que só será aberto no início do leilão. Essas ofertas são feitas através de produtos. As características dos produtos que o vendedor pode disponibilizar para negociação estão descritas a seguir (MAE, 2002):

- nome do vendedor;
- quantidade de lotes;
- submercado de entrega;
- preço de reserva;
- prazo de duração do contrato;
- potência mínima e máxima associadas a cada lote.

O vendedor pode especificar para cada produto até cinco preços de reserva R_j com uma quantidade de lotes associada a cada patamar de preço. Esse preço é o valor mínimo pelo qual

o vendedor está disposto a negociar sua energia. Esse valor é de conhecimento privado do vendedor e só é tornado público durante o andamento do segundo estágio do leilão. Ademais, esse valor, associado com a quantidade de lotes, forma a curva de oferta do vendedor para o produto, conforme mostra a Figura 4.3.

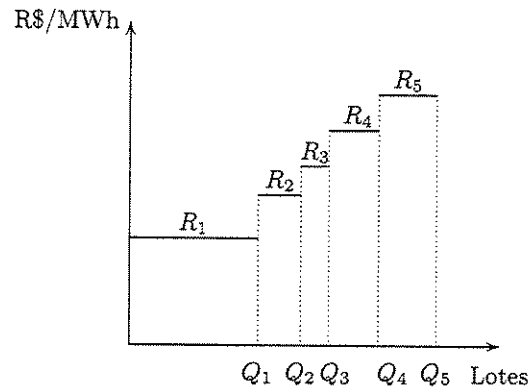


Figura 4.3: Curva de oferta para um produto.

Os compradores participam no segundo estágio do leilão. Nesse estágio o leilão é aberto com preços ascendentes. Os compradores apenas oferecem lances de quantidade de energia e podem escolher em quais produtos ele deseja efetuar lances.

O segundo estágio do leilão começa com os compradores dando lances ao preço inicial, que é dado pelo primeiro preço de reserva R_1 do vendedor para o produto. No início do leilão o primeiro preço de reserva R_1 é igual ao preço corrente P_c e igual ao preço de lance P_l , apresentado na Figura 4.4. A partir do momento que a quantidade Q_1 , requerida pelos compradores ao preço R_1 , vai sendo atendida, o leiloeiro especifica um novo preço de lance P_l , conforme Figura 4.5.

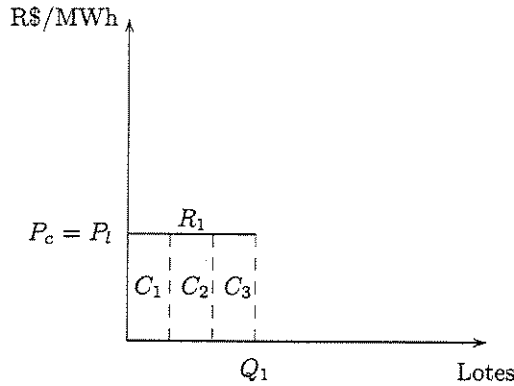


Figura 4.4: Início do leilão de venda.

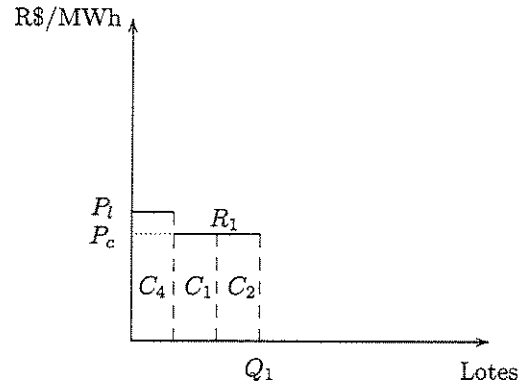


Figura 4.5: Novo valor de P_l .

Existe uma ordem de classificação para os lances feitos para o mesmo produto. Por exemplo, na Figura 4.4 os compradores C_1 , C_2 e C_3 efetuaram lances. Entretanto, o comprador C_1 realizou seu lance antes de C_2 e C_3 . Portanto, ele terá preferência de compra de energia quando o P_l aumenta. O P_l é o valor pelo qual os compradores dão lances para um produto no leilão. O P_c é o preço de fechamento do leilão. A diferença entre P_l e P_c é conhecida como incremento. Esse valor é fixado pelo leiloeiro.

Continuando o leilão, a Figura 4.5 mostra que houve um aumento do valor de P_l e o comprador C_4 efetuou um lance nesse novo valor. Como os compradores C_1 e C_2 efetuaram seus lances antes de C_3 , seus lances permanecem ativos, enquanto o lance de C_3 foi excluído desse produto no leilão. Se o leilão terminasse conforme mostra a Figura 4.5 estariam comprando energia desse produto os compradores C_4 , C_1 e C_2 , ao preço P_c .

A Figura 4.6 mostra que os vendedores C_5 e C_3 efetuaram lances no valor P_l . Portanto, os lances de C_1 e C_2 foram excluídos do leilão. Nesse instante, esse produto está sendo vendido para os compradores C_4 , C_5 e C_3 ao preço $P_c = P_l$. O leiloeiro fixa então um novo valor para P_l e o comprador C_1 realiza um lance, conforme Figura 4.7. O lance de C_3 é excluído desse produto no leilão, enquanto os lances de C_4 e C_5 permanecem ativos.

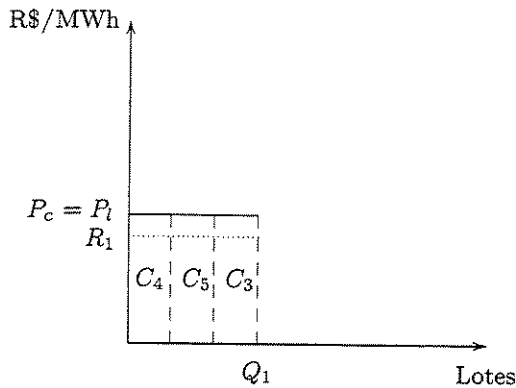


Figura 4.6: Valor de $P_l = P_c$.

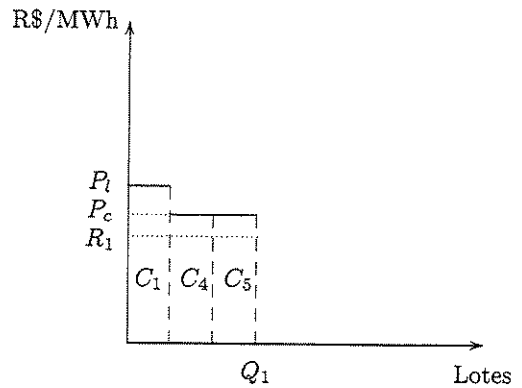


Figura 4.7: Novo valor de P_l .

Os compradores C_2 e C_3 , conforme mostra a Figura 4.8, efetuam lances no valor de P_l e os lances de C_4 e C_5 são excluídos. Nesse momento o preço de fechamento do leilão P_c se iguala a P_l . Além disso, estes preços são iguais ao segundo preço de reserva R_2 do vendedor para o produto. Como a quantidade Q_1 foi demandada, a partir de R_2 a quantidade de energia ofertada pelo vendedor para o produto aumenta para Q_2 . A Figura 4.9 mostra o lance do comprador C_4 considerando que a quantidade de energia do produto para R_2 é Q_2 .

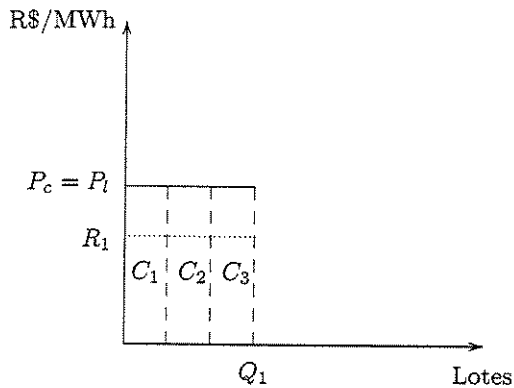


Figura 4.8: Novo valor de $P_c = P_l$.

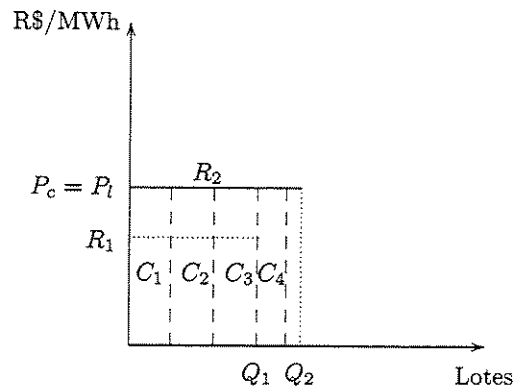


Figura 4.9: $P_c = P_l = R_2$.

Se nenhum comprador efetuar mais lances, esse produto é negociado entre o vendedor e

os compradores C_1 , C_2 , C_3 e C_4 , ao preço P_c , que nesse caso está igual a P_l e R_2 .

Cada comprador pode fazer lances em até 70% do total da quantidade ofertada pelos vendedores para produtos com mais de 100 lotes. Para produtos com oferta inferior a 100 lotes não existe essa restrição. Também não existe um tempo fixo para a finalização do leilão, mas o mesmo não pode ser encerrado antes de no mínimo 2 horas. Passado esse período, o leiloeiro pode encerrá-lo a qualquer momento, desde que decreta um horário com antecedência mínima de 30 minutos.

4.3.2 Leilões de compra

O leilão de compra, assim como o leilão de venda, se caracteriza por ser um leilão duplo com participantes identificados. Entretanto, ele se diferencia do leilão de venda por possuir preços descendentes. Esse leilão também é organizado pelo MAE, sendo realizado mensalmente, e se caracteriza por negociar contratos de curto prazo. A energia é negociada por lotes e cada lote possui 0,5 MW-médio.

Esse leilão também possui dois estágios. No primeiro são os compradores que fixam seus produtos em um envelope fechado, diferentemente do leilão de venda. Eles estabelecem a quantidade de energia e o preço máximo que estão dispostos a pagar por produto. Este é um contrato de energia definido pelo comprador que possui as seguintes características:

- nome do comprador;
- quantidade de lotes;
- submercado de entrega;
- preços de reserva;
- prazo de duração do contrato;
- tipo de energia (base ou ponta).

O subsistema de entrega é o local onde o comprador está localizado. No tipo de energia o comprador pode optar em comprar energia *flat* ou somente para o horário de pico. O prazo de duração do produto é definido por ANEEL (2003) e está ilustrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Prazo de duração dos produtos.

Tipo de produto	Início do suprimento	Prazo de duração
I	30 dias	6 meses
II	60 dias	6 meses
III	60 dias	9 meses
IV	60 dias	12 meses
V	60 dias	até dezembro de 2004

Cada comprador pode estabelecer até cinco preços de reserva para a quantidade de lotes que ele deseja comprar (MAE, 2003b), conforme a Figura 4.10. O preço de reserva é o valor máximo pelo qual o comprador está disposto a comprar uma quantidade de lotes. Esse valor é de conhecimento privado do comprador e corresponde a curva de demanda do produto.

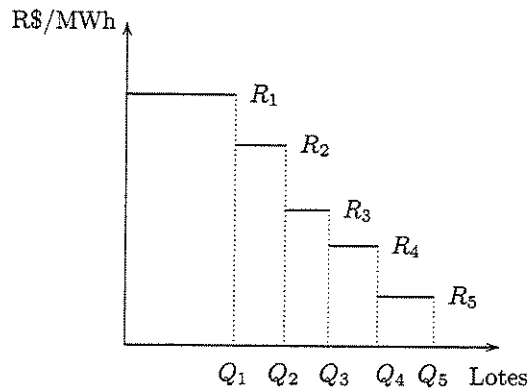


Figura 4.10: Curva de demanda para um produto.

Os vendedores participam no segundo estágio do leilão. Neste estágio o leilão é aberto com preços descendentes. Os vendedores apenas oferecem lances de quantidade de lotes de

energia. A sistemática desse leilão é semelhante ao do leilão de venda. A diferença é que ele possui preços descendentes e agora a diferença entre P_l e P_c é conhecida como decremento, cujo valor também é fixado pelo leiloeiro.

O leilão começa com os vendedores dando lances ao preço inicial que é dado pelo primeiro preço de reserva R_1 do comprador para o produto. No início do leilão o primeiro preço de reserva R_1 é igual ao preço corrente P_c e igual ao preço de lance P_l , apresentado na Figura 4.11. A partir do momento que a quantidade Q_1 , requerida pelos compradores ao preço R_1 , vai sendo atendida o leiloeiro especifica um novo preço de lance P_l , conforme Figura 4.12.

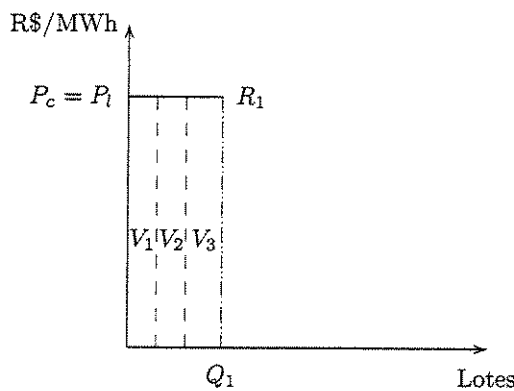


Figura 4.11: Início do leilão de compra.

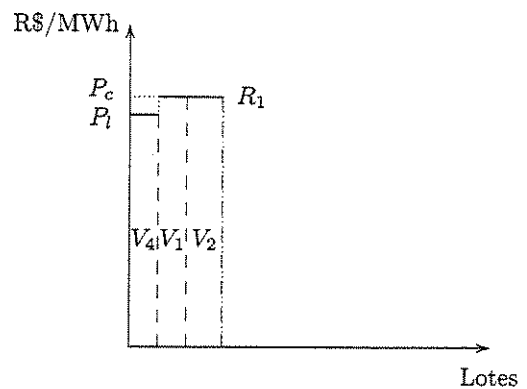


Figura 4.12: Novo valor de P_l .

Existe uma ordem de classificação para os lances feitos para o mesmo produto. Por exemplo, na Figura 4.11 os vendedores V_1 , V_2 e V_3 efetuaram lances. Entretanto, o vendedor V_1 realizou seu lance antes de V_2 e V_3 . Portanto, ele terá preferência de venda de energia quando o P_l diminui. O P_l é o valor pelo qual os compradores dão lances para um produto no leilão. O P_c é o preço de fechamento do leilão.

Continuando o leilão, a Figura 4.12 mostra que houve um decréscimo de P_l e o vendedor V_4 efetuou um lance neste novo valor. Como os vendedores V_1 e V_2 efetuaram seus lances antes de V_3 , seus lances permanecem ativos, enquanto o lance de V_3 é excluído do produto. Se o leilão terminasse conforme mostra a Figura 4.12 estariam vendendo energia para este produto os vendedores V_4 , V_1 e V_2 , ao preço P_c .

A Figura 4.13 mostra que os vendedores V_5 e V_3 efetuaram lances no valor P_l . Portanto, os lances de V_1 e V_2 foram excluídos do leilão. Neste instante, este produto está sendo vendido para os vendedores V_4 , V_5 e V_3 ao preço $P_c = P_l$. O leiloeiro fixa então um novo valor para P_l e o vendedor V_1 realiza um lance, conforme Figura 4.14.

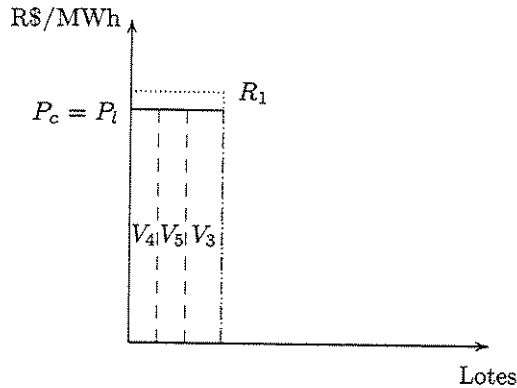


Figura 4.13: Valor de $P_l = P_c$.

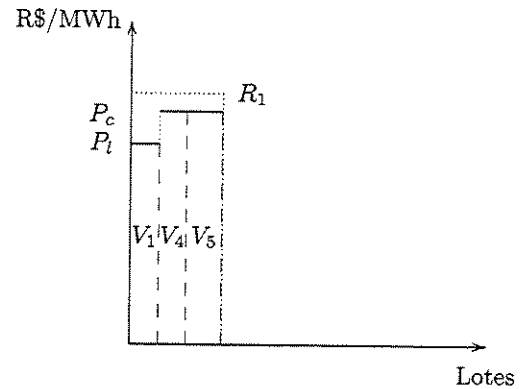


Figura 4.14: Novo valor de P_l .

Os vendedores V_2 e V_3 , conforme mostra a Figura 4.15, efetuam lances no valor de P_l e os lances de V_4 e V_5 são excluídos do leilão. Neste momento o preço de fechamento do leilão P_c se iguala a P_l . Além disso, estes preços são iguais ao segundo preço de reserva do comprador para o produto R_2 . Como a quantidade Q_1 foi demandada, a partir de R_2 a quantidade de energia requerida pelo comprador para este produto aumenta. A Figura 4.16 mostra o lance do vendedor V_4 considerando que a quantidade de energia do produto para R_2 é Q_2 .

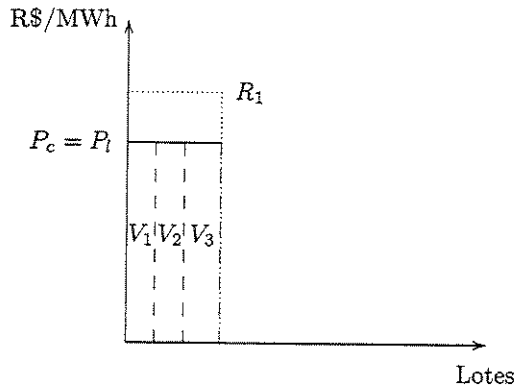


Figura 4.15: Novo valor de $P_c = P_l$.

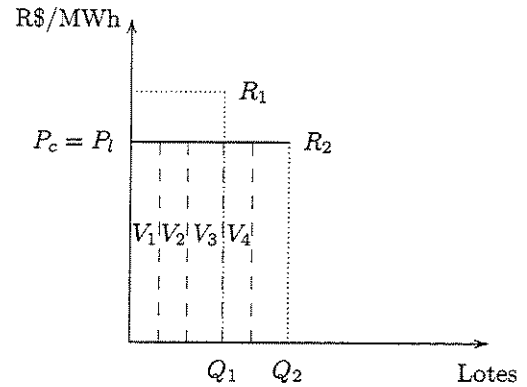


Figura 4.16: $P_c = P_l = R_2$.

Se nenhum vendedor efetuar mais lances, este produto é negociado entre o comprador e os vendedores V_1 , V_2 , V_3 e V_4 , ao preço P_c , que, neste caso, está igual a P_l e R_2 .

As regras do leilão de compra impõe uma restrição: para produtos com demanda acima de 100 lotes, cada vendedor pode negociar no máximo 70% da quantidade de energia requerida pelo comprador. Para produtos com demanda abaixo de 100 lotes não existe esta restrição. O leilão termina quando o leiloeiro verificar que os vendedores não estão mais dando lances. Não existe um tempo pré determinado para seu encerramento, sendo esta decisão tomada unicamente pelo leiloeiro.

4.3.3 Leilões de comercializadores

Este tipo de leilão não possui uma regra padronizada como os leilões de compra e venda realizados pelo MAE. Geralmente eles são organizados por empresas comercializadoras de energia elétrica que representam um ou vários consumidores livres. Estas empresas formatam as regras do leilão de acordo com o objetivo dos consumidores que elas representam. A Tabela 4.2 mostra o perfil dos consumidores que podem adquirir energia livremente no mercado.

Tabela 4.2: Consumidores com livre opção de compra de energia.

Consumidores livres	Característica	Fornecedor
Consumidores existentes	Demanda ≥ 3 MW e tensão de fornecimento ≥ 69 kV	Livre
	Ampliação de carga ≥ 3 MW e tensão de fornecimento ≥ 69 kV	Livre
	Demanda ≥ 500 kW	PCH's
Consumidores novos	Demanda ≥ 3 MW sem restrição de tensão	Livre

Os produtos dos leilões formatados por comercializadores normalmente possuem as seguintes características:

- submercado de entrega;
- preço máximo de compra;
- quantidade a ser demandada;
- prazo do contrato.

Esses leilões geralmente são descendentes. Neles o comercializador define o preço máximo pelo qual está disposto a comprar a energia. Os vendedores competem por preço e, quem oferecer o menor preço de venda fecha o negócio.

4.3.4 Outros leilões

Alguns leilões de energia ocorreram em momentos específicos da história do setor elétrico. O primeiro foi o leilão de certificados de energia realizado no segundo semestre de 2001 e nos dois primeiros meses de 2002, período em que o país passou por um racionamento de energia. O segundo foi o leilão de excedentes, que aconteceu no segundo semestre de 2003, momento este no qual o país passava por um processo de sobre-oferta de energia.

Esses dois leilões foram realizados em períodos de contingência para minimizar problemas de falta e de sobra de energia. Portanto, não são leilões que ocorrem frequentemente. Sua

estrutura foi configurada para aquele momento específico e suas regras foram formatadas para atender os objetivos desejados pelo governo e sociedade. As seções seguintes fazem uma breve descrição desses dois leilões.

Leilões de certificados

O Certificados de Energia foram criados, durante o racionamento de energia, em 1º de junho de 2001, através da resolução nº 13 da Câmara de Gestão da Crise Energética (GCE) e alterada pela resolução nº 29, de 24 de julho de 2001. Esses certificados permitiram que os consumidores que economizaram além da cota estabelecida pelo Programa Emergencial de Redução do Consumo de Energia Elétrica, repassassem a outros consumidores o volume excedente de energia. A comercialização dos certificados durou até 28 de fevereiro de 2002.

O Certificado de Direito de Uso de Redução de Meta (Certificado de Energia) era um documento emitido pelas concessionárias de energia elétrica atestando o valor, em kWh, equivalente à expectativa de consumo ou ao consumo verificado em nível inferior à meta do respectivo mês. Com esses documentos os consumidores enquadrados nos grupos tarifários A e B puderam negociar entre si, através de um agente comercializador ou através do MAE, seus certificados de redução de meta de consumo de energia elétrica. A operacionalização desse mecanismo foi a primeira negociação utilizando leilão como forma de indicativo de preço de energia elétrica no mercado brasileiro. A Figura 4.17 traz um gráfico com a quantidade e valores fechados no MAE durante o período de funcionamento desse leilão.

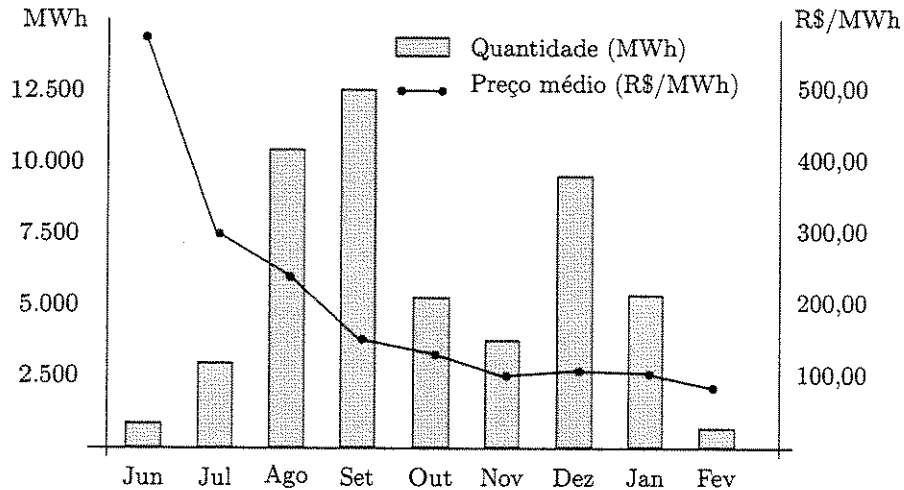


Figura 4.17: Mercado de certificados de energia.

A regra de comercialização desse certificado no MAE constava de um leilão duplo diário, no qual os vendedores e compradores encerravam seus lances em um envelope fechado pela manhã e no período da tarde eles eram informados dos resultados. Esses lances eram constituídos por dois componentes: quantidade de energia, em MWh e preço, em R\$/MWh (Silva, 2003).

Dos 155 leilões efetuados, em 77 houve realização de negócios e nos outros 78 as combinações entre vendedor e comprador eram ineficazes ou inexistentes, ou seja, os lances efetuados não resultavam em negócio devido a disparidade de expectativas entre os agentes ou até a falta de lances por parte dos compradores e/ou vendedores.

Leilões de excedentes

O objetivo do leilão de excedentes era negociar a sobre-oferta de energia que os geradores de energia elétrica possuíam com os consumidores livres. Os lotes de energia ofertados foram de 0,1 MW-médio e tinham características diferenciadas por produtos. O lance inicial mínimo para cada produto era de 10 lotes e o leilão durava no máximo 6 horas (MAE, 2003a).

O prazo dos contratos para os diversos produtos foi fixado em 6 meses, 1 ano ou 2 anos. Além disso, o vendedor deveria definir seu produto com as seguintes características:

- quantidade ofertada;
- preço inicial;
- preço de reserva;
- submercado de entrega;
- tipo de energia (base ou ponta);
- prazo do contrato.

Os vendedores participavam no primeiro estágio do leilão entregando suas ofertas de preço e quantidade de lotes por produto em envelopes fechados. Como no leilão de venda, os vendedores podiam fixar até cinco preços de reserva para cada produto. Os preços de reserva eram de conhecimento privado do vendedor, porém a quantidade de lotes associada a este preço era de domínio público. Os valores do preço de reserva combinados com a quantidade de lotes associados a estes valores determinavam a curva de oferta de cada produto, conforme mostra a Figura 4.18

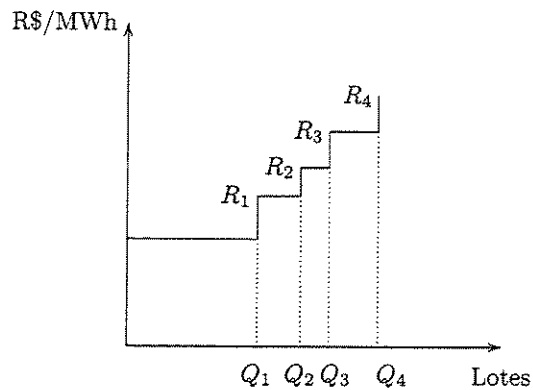


Figura 4.18: Curva de oferta para um produto.

No segundo estágio do leilão participavam os consumidores livres. Eles ofereciam lances de quantidade de lotes em um leilão aberto descendente. O valor do decremento era definido

pelo leiloeiro através de uma formulação previamente conhecida pelos participantes. A medida que o valor de P_l atingisse o valor de algum R_j , a quantidade oferecida pelo vendedor para o produto diminuía.

O leilão encerrava-se quando a demanda de um produto igualasse a oferta, quando o valor de P_l atingisse o menor valor R_j para o produto ou no prazo máximo de 6 horas.

O leilão de excedentes ocorrido em setembro de 2003 vendeu 21 lotes, que totalizam 857,2 MW-médio. Os preços do MWh variaram de R\$ 34 a R\$ 68,50. O maior lote fechado foi o PO24NE, que chegou a 314 MW médios. A energia de ponta negociada pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) por dois anos no submercado Nordeste custou 67,67 R\$/MWh. Esse lote representou 48% do volume disponibilizado no Nordeste. Esse leilão ofertou 1.155,7 MW-médio na ponta e 303,7 MW-médio na base.

Capítulo 5

Métodos para fixar lances em leilões de energia

Este capítulo discorre sobre os métodos formatados para fixar lances em leilões. Ele é dividido em duas seções: a primeira analisa o estabelecimento de lances nos leilões de venda e a segunda estabelece um procedimento para efetuar lances nos leilões de compra. Toda a metodologia desenvolvida neste capítulo é conduzida do ponto de vista do vendedor de energia elétrica. Como produto dessa metodologia é elaborado um *software* para ser utilizado pelo vendedor para simulação dos procedimentos de lances no leilão.

5.1 Leilões de venda

Para um vendedor de energia elétrica o leilão de venda pode ser analisado como um jogo estratégico. Isto se deve ao fato de o vendedor entregar seus lances em envelopes fechados. Portanto, trata-se de um jogo simultâneo no qual um jogador não possui a chance de aprender com o movimento dos outros jogadores. Logo, o pensamento estratégico é tentar compreender qual informação os outros jogadores possuem e tentar predizer o que eles irão fazer.

Além de ser um jogo estratégico, o leilão de venda é um jogo de informação incompleta, pois os vendedores não têm conhecimento comum, ou seja, não possuem a mesma informação sobre o jogo.

Para formular estratégias de um vendedor nesse jogo é utilizada a teoria do portfólio. Como o mercado de energia elétrica é recente e, por conseguinte, não possui dados históricos, não é possível aplicar a teoria de Markowitz avaliando a variação do preço da energia elétrica através de um período. Portanto, o modelo de estratégias para o vendedor atuar no leilão de venda adota a construção de cenários. Seu algoritmo utiliza técnicas de otimização com o emprego de programação quadrática (Luenberger, 1984).

5.1.1 Construção de cenários

A construção de cenários deve levar em conta o caráter estratégico do jogo. O vendedor pode definir vários cenários dependendo da precisão que ele deseja obter com o modelo, das informações que ele possui do mercado e das suas crenças a respeito das informações que os outros jogadores possuem.

A construção de cenários deve considerar as ações passadas, presentes e futuras, procurando associar variáveis que podem interferir na sua concepção. No caso da comercialização de contratos de energia, essas variáveis podem ser: variação da oferta e demanda do sistema interligado e de cada submercado, projeção do preço *spot*, aversão ao risco dos agentes de mercado, risco regulatório, entre outros.

A finalidade dos cenários é identificar ameaças e oportunidades oriundas de mudanças no contexto, ajudar na elaboração do plano estratégico das negociações e auxiliar a tomada de decisão para formulação de objetivos e estratégias. Para negociar contratos em leilões, um vendedor V_j pode assumir, por exemplo, os cenários descritos na Tabela 5.1, que considera a contestação dos mercados pelos jogadores. Essa contestação leva em conta não só as variáveis descritas acima, mas também o uso do poder de mercado que alguns vendedores possuem nesse oligopólio.

Tabela 5.1: Cenários definidos por V_j .

Cenário	Descrição
1	V_j não submete lances nos submercados dos outros vendedores e os outros vendedores não submetem lances no submercado de V_j .
2	V_j submete lances nos submercados dos outros vendedores e os outros vendedores não submetem lances no submercado de V_j .
3	V_j submete lances nos submercados dos outros vendedores e os outros vendedores submetem lances no submercado de V_j .

Transpondo esses cenários para um modelo de jogo estratégico utilizando o vendedor V_j e, denominando os outros vendedores de V_{n-1} , para um determinado produto e, considerando que podem ocorrer os cenários 1, 2 e 3 descritos acima, é possível construir a matriz de *payoffs* apresentada na Figura 5.1.

		V_{n-1}		
		1	2	3
	1	$u_{11}^{V_j, V_{n-1}}, u_{11}^{V_{n-1}, V_j}$	$u_{12}^{V_j, V_{n-1}}, u_{12}^{V_{n-1}, V_j}$	$u_{13}^{V_j, V_{n-1}}, u_{13}^{V_{n-1}, V_j}$
V_j	2	$u_{21}^{V_j, V_{n-1}}, u_{21}^{V_{n-1}, V_j}$	$u_{22}^{V_j, V_{n-1}}, u_{22}^{V_{n-1}, V_j}$	$u_{23}^{V_j, V_{n-1}}, u_{23}^{V_{n-1}, V_j}$
	3	$u_{31}^{V_j, V_{n-1}}, u_{31}^{V_{n-1}, V_j}$	$u_{32}^{V_j, V_{n-1}}, u_{32}^{V_{n-1}, V_j}$	$u_{33}^{V_j, V_{n-1}}, u_{33}^{V_{n-1}, V_j}$

Figura 5.1: Matriz de *payoffs* utilizando cenários.

Essa matriz representa o resultado esperado de V_j frente às estratégias que ele possui e as que os outros V_{n-1} vendedores possuem para cada produto levando em conta cada cenário.

5.1.2 Descrição do modelo

O modelo de portfólio utilizando cenários objetiva fixar um método para um agente vendedor de energia elétrica fixar seus lances nos leilões de venda. Os cenários utilizados são os definidos pela Tabela 5.1. O modelo permite que o vendedor V_j fixe os cenários com diferentes probabilidades associadas.

Os produtos a serem ofertados no leilão são representados por algarismos arábicos. Como existe a possibilidade dos vendedores negociar energia nos quatro submercados e o edital do leilão do MAE (2002) fixa os prazos dos contratos em 2, 4 e 6 anos, tem-se que cada vendedor possui 12 produtos para alocar seus lances. Para esse modelo a numeração dos produtos foi fixada de acordo com a Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Especificação dos produtos.

Produto	Submercado	Prazo de duração
1	Nordeste	2 anos
2	Nordeste	4 anos
3	Nordeste	6 anos
4	Norte	2 anos
5	Norte	4 anos
6	Norte	6 anos
7	Sudeste	2 anos
8	Sudeste	4 anos
9	Sudeste	6 anos
10	Sul	2 anos
11	Sul	4 anos
12	Sul	6 anos

A Tabela 5.3 apresenta os dados de entrada do modelo. Primeiramente, V_j insere os dados referentes à probabilidade de ocorrência de cada cenário. Após isso, ele deve inserir

a rentabilidade desejada, em porcentagem, para cada produto, dado o cenário apresentado. Essa rentabilidade pode ser estimada através da projeção do preço *spot* esperado para o submercado e período de duração do produto, pelas informações que V_j possui dos outros jogadores e pela aversão ao risco de V_j . Os valores da probabilidade de ocorrência dos cenários e da rentabilidade do produto da Tabela 5.3 encontram-se em porcentagem.

Tabela 5.3: Dados de entrada do leilão de venda.

Cen.	Prob.	Produtos											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	30	9,00	13,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	20	5,00	9,00	10,00	20,00	21,00	25,00	22,00	24,00	27,00	21,00	13,00	28,00
3	50	7,00	6,00	7,00	17,00	18,00	20,00	20,00	21,00	22,00	19,00	21,00	21,00

* Valores expressos em porcentagem.

Como pode ser observado na Tabela 5.3, V_j fixou taxas de retorno menores para contratos de curto prazo, enquanto que para os contratos de longo prazo ele optou por fixar taxas de retorno maiores. Ele também fixou taxas de retorno elevadas em seu submercado quando ocorre o cenário 1 e taxas de retorno reduzidas quando ocorre o cenário 3. As taxas de retorno fixadas para os lances em outros submercados nos cenários 2 e 3 também são elevadas.

A determinação dessas taxas leva em conta a exposição ao risco que o vendedor está disposto a enfrentar. Por exemplo, um vendedor mais avesso ao risco fixaria pequenas taxas de retorno para os lances efetuados em seu submercado, de forma a garantir seu mercado, e altas taxas de retorno para lances realizados fora de seu submercado, devido ao risco que ele fica exposto caso o valor do preço *spot* aumente muito.

Com os dados de entrada da Tabela 5.3 é possível calcular o retorno esperado \bar{R}_i para cada produto através da média ponderada do retorno do produto para cada cenário utilizando a Equação 5.1.

$$\bar{R}_i = \sum_{k=1}^m P_k R_k \quad (5.1)$$

onde:

- \bar{R}_i retorno esperado para cada produto i considerando todos cenários k ;
- P_k probabilidade de ocorrer cada cenário k ;
- R_k taxa de retorno fixado por V_j para cada produto em cada cenário k ;
- i índice de cada produto ofertado no leilão;
- k índice do cenário que compõe o jogo estratégico;
- m número total de cenários k .

O desvio-padrão σ_i é calculado pela Equação 5.2, comparando a dispersão da rentabilidade desejada de cada produto, para cada cenário, com a média ponderada do retorno do produto para cada cenário.

$$\sigma_i = \left(\sum_{k=1}^m P_k (R_k - \bar{R}_i)^2 \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

A Tabela 5.4 apresenta os resultados para \bar{R}_i e σ_i para os dados utilizados na Tabela 5.3. Esses resultados representam o valor esperado que V_j obtém em cada produto, considerando todos os cenários, e a dispersão desse valor em relação a média. Os valores do retorno e risco dessa tabela estão expressos em porcentagem.

Tabela 5.4: Retorno e risco esperado para cada produto.

	Produto											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
\bar{R}_i	6,60	8,70	10,00	12,50	13,20	15,00	14,40	15,30	16,40	13,70	15,10	16,10
σ_i	1,74	3,03	13,46	8,26	8,72	10,00	9,46	10,08	10,90	9,00	9,91	10,87

* Valores expressos em porcentagem.

O modelo permite que V_j fixe um valor máximo de aplicação T_i de seus lances em cada produto, ou seja, do total da energia que V_j deseja negociar, ele determina que a quantidade de energia a ser alocada em cada produto não passe de um certo valor. Por exemplo, na Tabela 5.5 V_j fixou o limite máximo de lances para os contratos em seu submercado

em 30%, no submercado Norte em 10% e nos outros submercados em 5%. O valor de T_i funciona como uma restrição ao modelo de otimização e, na prática, ele é utilizado para V_j diversificar seu portfólio de lances nos produtos. Os valores de T_i na Tabela 5.5 estão expressos em porcentagem.

Tabela 5.5: Aplicação máxima em cada produto.

	Produtos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_i	30,00	30,00	30,00	10,00	10,00	10,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00

* Valores expressos em porcentagem.

Com os dados do retorno esperado e do desvio-padrão de cada produto em relação à média é possível construir a matriz covariância entre os produtos. Esta caracteriza não apenas a variação dos preços de um produto individual, mas como cada produto tende a se movimentar com a variação dos outros produtos. A Equação 5.3 calcula a covariância entre dois produtos, por exemplo i e j .

$$\sigma_{i,j} = \sum_{k=1}^3 P_k (R_i - \bar{R}_i)(R_j - \bar{R}_j) \quad (5.3)$$

A matriz covariância da Tabela 5.6 é construída utilizando os dados da Tabelas 5.3 e 5.4.

	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}	σ_{11}	σ_{12}
σ_1	0,0003	0,0005	0,0006	-0,0012	-0,0013	-0,0014	-0,0014	-0,0015	-0,0015	-0,0014	-0,0015	-0,0015
σ_2	0,0005	0,0009	0,0011	-0,0022	-0,0023	-0,0026	-0,0026	-0,0027	-0,0028	-0,0024	-0,0027	-0,0027
σ_3	0,0006	0,0011	0,0012	-0,0026	-0,0027	-0,0030	-0,0030	-0,0032	-0,0033	-0,0029	-0,0032	-0,0032
σ_4	-0,0012	-0,0022	-0,0026	0,0068	0,0072	0,0083	0,0078	0,0083	0,0090	0,0074	0,0082	0,0089
σ_5	-0,0013	-0,0023	-0,0027	0,0072	0,0076	0,0087	0,0082	0,0088	0,0095	0,0078	0,0086	0,0094
σ_6	-0,0014	-0,0026	-0,0030	0,0083	0,0087	0,0100	0,0094	0,0101	0,0109	0,0090	0,0099	0,0109
σ_7	-0,0014	-0,0026	-0,0030	0,0078	0,0082	0,0094	0,0089	0,0095	0,0103	0,0085	0,0094	0,0101
σ_8	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0083	0,0088	0,0101	0,0095	0,0102	0,0110	0,0091	0,0100	0,0109
σ_9	-0,0015	-0,0028	-0,0033	0,0090	0,0095	0,0109	0,0103	0,0110	0,0119	0,0098	0,0108	0,0118
σ_{10}	-0,0014	-0,0024	-0,0029	0,0074	0,0078	0,0090	0,0085	0,0091	0,0098	0,0081	0,0089	0,0097
σ_{11}	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0082	0,0086	0,0099	0,0094	0,0100	0,0108	0,0089	0,0098	0,0106
σ_{12}	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0089	0,0094	0,0109	0,0101	0,0109	0,0118	0,0097	0,0106	0,0118

Tabela 5.6: Matriz covariância.

Utilizando os dados da matriz covariância e do desvio-padrão de cada produto é possível construir a matriz correlação e avaliar como os produtos se correlacionam entre si. O conceito de correlação visa explicar o grau de relacionamento verificado no comportamento de duas ou mais variáveis.

$$\rho_{i,j} = \frac{\sigma_{i,j}}{\sigma_i \cdot \sigma_j} \quad (5.4)$$

A Equação 5.4 é utilizada para correlacionar dois produtos (i e j). Os resultado dessa equação para os dados utilizados nas tabelas anteriores encontra-se na Tabela 5.7, denominada de matriz correlação.

ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	ρ_7	ρ_8	ρ_9	ρ_{10}	ρ_{11}	ρ_{12}
ρ_1	1,0000	0,9979	-0,8331	-0,8371	-0,8030	-0,8636	-0,8466	-0,8123	-0,8615	-0,8654	-0,7685
ρ_2	0,9979	1,0000	-0,8675	-0,8711	-0,8403	-0,8947	-0,8797	-0,8488	-0,8929	-0,8964	-0,8087
ρ_3	0,9934	0,9988	1,0000	-0,8943	-0,8660	-0,9157	-0,9021	-0,8739	-0,9141	-0,9172	-0,8368
ρ_4	-0,8331	-0,8675	-0,8910	1,0000	0,9986	0,9983	0,9997	0,9993	0,9986	0,9981	0,9941
ρ_5	-0,8371	-0,8711	-0,8943	1,0000	0,9982	0,9987	0,9998	0,9990	0,9989	0,9985	0,9933
ρ_6	-0,8030	-0,8403	-0,8660	0,9986	1,0000	0,9939	0,9970	0,9999	0,9944	0,9935	0,9984
ρ_7	-0,8636	-0,8947	-0,9157	0,9983	0,9987	1,0000	0,9995	0,9956	1,0000	1,0000	0,9863
ρ_8	-0,8466	-0,8797	-0,9021	0,9997	0,9998	0,9970	1,0000	0,9981	0,9996	0,9993	0,9911
ρ_9	-0,8123	-0,8488	-0,8739	0,9993	0,9990	0,9956	0,9981	1,0000	0,9959	0,9952	0,9974
ρ_{10}	-0,8615	-0,8929	-0,9141	0,9986	0,9989	1,0000	0,9996	0,9959	1,0000	1,0000	0,9869
ρ_{11}	-0,8654	-0,8964	-0,9172	0,9981	0,9985	1,0000	0,9993	0,9952	1,0000	1,0000	0,9856
ρ_{12}	-0,7685	-0,8087	-0,8368	0,9941	0,9933	0,9984	0,9911	0,9974	0,9869	0,9856	1,0000

Tabela 5.7: Matriz correlação.

5.1.3 Formulação do modelo

A formulação da metodologia para o agente vendedor V_j fixar estratégias no leilão de venda foi realizada utilizando técnicas de otimização com o emprego de programação quadrática. A utilização de um modelo de otimização deve-se à facilidade que esse possui em inserir e retirar restrições da formulação, permitindo um modelo mais flexível.

Programação quadrática é o nome dado para a classe de modelos nos quais a função objetivo é uma função quadrática e as restrições são lineares. Portanto, na função objetivo é permitido possuir termos que são produtos de duas variáveis, tais como x^2 ou $x.y$. A programação quadrática é computacionalmente atraente porque os algoritmos de programação linear podem ser aplicados para esse tipo de programação com pequenas modificações por causa da primeira derivada de uma função quadrática ser uma função linear. A formulação do modelo encontra-se abaixo.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i W_j \sigma_{i,j} \quad (5.5)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i=1}^n W_i \bar{R}_i = \bar{R} \quad (5.6)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (5.7)$$

$$0 \leq W_i \leq T_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (5.8)$$

onde:

W_i porcentagem de lotes alocado em cada produto i ;

$\sigma_{i,j}$ covariância entre os produtos i e j ;

\bar{R}_i retorno esperado do produto i ;

\bar{R} retorno do leilão fixado pelo vendedor;

T_i alocação máxima de lotes em cada produto i ;

n número de produtos i que compõe o leilão.

A função objetivo desse modelo é minimizar o risco do portfólio de produtos dado um

retorno fixado por V_j . A primeira restrição impõe que a porcentagem de lotes a ser alocada em cada produto, multiplicada pelo retorno de cada produto, seja igual ao retorno fixado pelo V_j para o leilão. A segunda impõe que o somatório da porcentagem de lotes alocados nos produtos seja igual a um, enquanto a terceira restringe a quantidade de lotes ao limite de zero até um valor máximo fixado por V_j .

O resultado do problema de otimização é uma alocação ótima dos lances, em porcentagem do total de quantidade de lotes disponibilizadas por V_j para comercializar, nos diversos produtos ofertados no leilão, minimizando o risco desse portfólio, dado um retorno fixado por V_j nesta negociação.

5.1.4 Verificação dos resultados

Esta seção analisa os resultados do modelo apresentado nas seções anteriores.

O valor da função objetivo informa o risco que o agente está exposto ao realizar seus lances de acordo com o indicado no modelo. Esse risco é medido através do desvio-padrão do retorno esperado para cada cenário em relação ao retorno médio e, também, através da correlação que os produtos possuem entre si. Utilizando os dados calculados nas seções anteriores e supondo que V_j fixe um retorno de $\bar{R} = 11\%$ para o leilão, tem-se que o resultado da função objetivo é igual a $\sigma_p = 1,71\%$, que representa o risco do portfólio dado que V_j deseja um retorno de $\bar{R} = 11\%$.

A Tabela 5.8 apresenta como o modelo alocou os lances para atingir os valores citados acima. Nessa tabela, W_i representa a porcentagem do total de lotes de energia que o vendedor deve alocar em cada produto.

Tabela 5.8: Alocação ótima de lances pelo vendedor.

	Produtos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
W_i	7,87	30,00	30,00	0,00	0,00	2,23	5,00	5,00	5,00	4,90	5,00	5,00

* Valores expressos em porcentagem.

O valor de W_i é modificado sempre que o vendedor altera a probabilidade de ocorrência de cada cenário, o retorno desejado para cada produto em cada cenário ou a aplicação máxima do percentual de sua energia em cada produto. Com isso, o agente vendedor pode realizar diversas simulações e obter vários resultados para, então, escolher aquele que será a sua estratégia de lances no leilão.

5.2 Leilão de compra

Um vendedor pode caracterizar o leilão de compra, do ponto de vista da teoria dos jogos, como um jogo dinâmico e de informação incompleta. Por ser um leilão aberto com preços descendentes do lado do vendedor o jogo torna-se dinâmico, pois ele pode realizar seus lances respondendo à movimentação realizada pelos outros vendedores, ou seja, ele pode migrar seus lances de um produto para outro, dependendo dos lances efetuados pelos outros vendedores de forma a maximizar seu lucro. Esse jogo é de informação incompleta porque um vendedor não conhece a avaliação que os outros vendedores dão para determinado produto.

No jogo, na sua forma dinâmica, é dada atenção à velocidade em que os lances do leilão são realizados e na quantidade de informação disponível para cada jogador quando uma decisão é tomada. Esse tipo de jogo, ao contrário do que ocorre no jogo estratégico, não é representado por uma matriz, mas sim por uma árvore de decisão. A Figura 5.2 apresenta como o vendedor V_j analisa a decisão de em qual produto deve efetuar seu lance, respondendo aos movimentos (lances) realizados pelos outros jogadores denominados por V_{n-1} . Em cada nó um jogador deve tomar uma decisão.

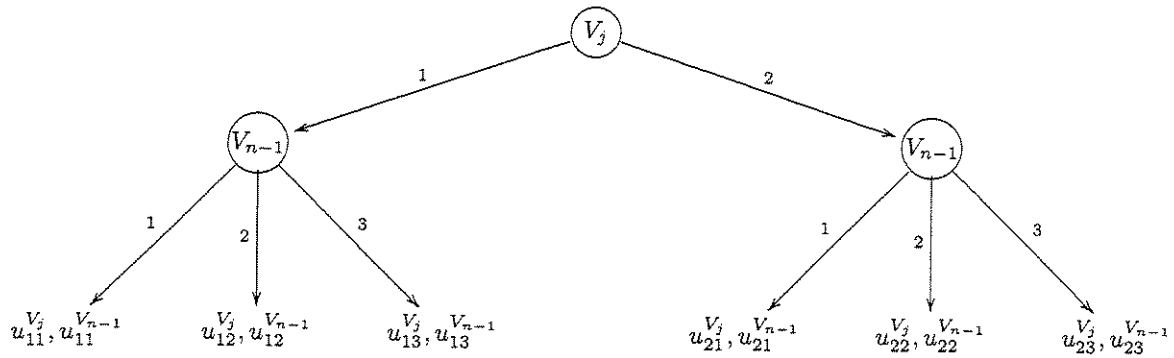


Figura 5.2: Árvore de decisão para lances para um produto.

No caso da Figura 5.2 o vendedor V_j movimenta-se primeiro, ou seja, toma uma decisão. Os outros vendedores verificam se V_j tomou a decisão 1 ou 2 no primeiro ramo da árvore, que pode ser, por exemplo, efetuar ou não um lance para o produto. Os outros vendedores V_{n-1} possuem três decisões a tomar no segundo ramo da árvore. O *payoff* dos jogadores V_j e V_{n-1} são representados na última linha da árvore de decisão.

Obviamente a árvore de decisão da Figura 5.2 está resumida. Durante um leilão aberto ela pode se tornar enorme, dependendo do nível de informação dos participantes, das regras do leilão e da quantidade de lances oferecido pelos vendedores.

5.2.1 Descrição do modelo

O modelo desenvolvido objetiva definir como um vendedor deve efetuar seus lances, em termos de lotes de energia, em um leilão aberto. As variáveis que o vendedor deve definir nesse modelo são a quantidade máxima de lotes que ele deseja comercializar e o preço mínimo pelo qual ele está disposto a negociar esses lotes nos diversos produtos disponíveis.

Esse modelo incorpora o caráter dinâmico do jogo descrito na seção anterior, uma vez que o vendedor sempre realiza seus lances nos produtos que maximizam seu lucro no leilão. Ele efetua seus lances respondendo às alterações do jogo realizadas pelos outros vendedores.

O modelo matemático é construído utilizando técnicas de otimização com o emprego de programação inteira (Nemhauser e Wolsey, 1988), no qual um vendedor V_j realiza seus

lances maximizando seu lucro esperado. Esse modelo oferece uma ferramenta para V_j atuar no instante em que está ocorrendo o leilão. O resultado final é uma alocação ótima de lances, por parte de V_j , nos diversos produtos disponíveis. O modelo matemático é conduzido do ponto de vista de um vendedor que observa o leilão conforme a Figura 5.3.

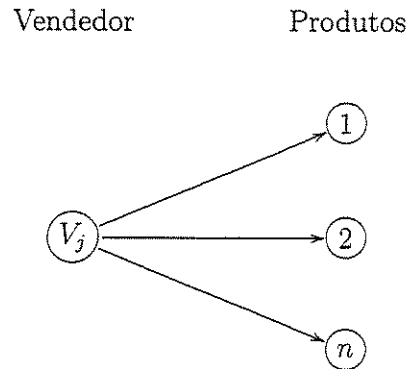


Figura 5.3: Leilão do ponto de vista do vendedor V_j .

5.2.2 Formulação do modelo

O objetivo do modelo é maximizar o lucro de um vendedor no leilão. Para isto foi desenvolvido um algoritmo de otimização, baseado em programação inteira, cujo resultado final é mostrar em qual produto o vendedor deve efetuar seus lances. A utilização de um modelo de otimização deve-se à facilidade de inserir e retirar restrições do modelo, tais como restrição de transmissão e congestionamento de linhas. Esse leilão é modelado como um problema de alocação de produtos entre compradores e vendedores. O modelo matemático é apresentado da seguinte maneira:

$$\max \sum_{i=1}^n ((\varepsilon \cdot Pl_i - Pm_i) \cdot Qn_i + (Pl_i - Pm_i) \cdot Qa_i) \quad (5.9)$$

$$\text{s.a.} \sum_{i=1}^n Qn_i \leq Qt \quad (5.10)$$

$$Pl_i \geq Pm_i \quad i = 1, \dots, n \quad (5.11)$$

$$0 \leq Qn_i + Qa_i \leq fr_i \quad i = 1, \dots, n \quad (5.12)$$

$$\varepsilon = 1,000001. \quad (5.13)$$

if $Qd_i \leq 100$ then

$$fr_i = Qd_i$$

else

$$fr_i = 0,7 \cdot Qd_i$$

(5.14)

onde:

Qn_i lance do vendedor aceito para o produto i em lotes;

Qt quantidade total de energia do vendedor em lotes;

Pm_i preço mínimo pelo qual o vendedor está disposto a vender sua energia para o produto i , em R\$/MWh;

Pl_i preço de lance para o produto i , em R\$/MWh;

Qd_i quantidade de energia demandada pelo comprador para o preço corrente no produto i , em lotes;

Qa_i quantidade de energia do vendedor no produto i , em lotes;

fr_i fator de restrição para produtos com demanda maior que 100 lotes;

ε valor utilizado para alocar os lances nos contratos quando $Pl_i = Pm_i$;

i índice dos n tipos de produtos.

A função objetivo desse problema é maximizar o lucro de um vendedor no leilão. Esse resultado é o lucro mínimo que o vendedor recebe pela sua energia vendida no leilão. No entanto, ele pode obter lucro um pouco maior do que esse, pois o preço de fechamento do

leilão é o preço corrente P_c . Para o desenvolvimento desse modelo foi utilizado o preço pelo qual os vendedores efetuam seus lances, o preço de lance Pl .

A primeira restrição impõe que o somatório dos lances do vendedor seja sempre menor ou igual à sua quantidade total de lotes de energia. A segunda limita o preço de lance a ser sempre maior ou igual ao preço mínimo estabelecido pelo vendedor para cada produto. Se o preço de lance for maior que o preço mínimo do vendedor, o modelo não aloca os lances para o produto. A terceira restrição limita a quantidade de energia negociada a um valor entre zero e 70% para produtos com demanda acima de 100 lotes. A última restrição é utilizada para o modelo efetuar a otimização quando o preço de lance se iguala ao preço mínimo do vendedor. Ela não influi no resultado da função objetivo.

A variável Qn_i representa os lances de quantidade de lotes de energia do vendedor V_j para cada produto i . É esta variável que torna o modelo de otimização um problema de programação inteira, pois não pode assumir valores reais. A quantidade negociada precisa ser, necessariamente, um número inteiro.

Os dados que o vendedor deve definir são: quantidade total de lotes de energia que ele tem para ofertar e o preço mínimo de venda desses lotes para cada produto. Após a abertura dos envelopes dos compradores, definindo os produtos através da sua curva de demanda, o vendedor deve entrar com os dados do 1º preço de reserva do comprador R_1 por produto e a quantidade de lotes Q_1 associada a esse preço. O preço R_1 , no início do leilão, é igual ao preço de lance P_l para o produto.

Com a inserção desses dados é possível realizar a primeira otimização e alocar os lances de lotes de V_j nos produtos. Toda vez que outros vendedores realizarem lances melhores do que o de V_j e o lance de V_j for excluído do produto no leilão, uma nova otimização deve ser efetuada.

O modelo para de efetuar a otimização quando o valor de Pl_i em todos os produtos forem menores do que Pm_i ou quando o leiloeiro decreta o encerramento do leilão.

5.2.3 Verificação dos resultados

Para verificar os resultados do modelo é formatado um estudo de caso simulando um leilão de compra. Para o estudo é utilizado um vendedor V_j que possui 200 lotes para negociar. O decremento do leilão é fixado em 2 R\$/MWh pelo leiloeiro e são definidos quatro tipos de produtos para o leilão, $n = 4$.

O preço mínimo (Pm_i) pelo qual V_j está disposto a negociar sua energia para os produtos 1, 2, 3 e 4 estão dispostos na Tabela 5.9. Este preço pode ser calculado pelo vendedor utilizando projeção de oferta e demanda futura ou simulando, através de *softwares* computacionais, o comportamento do mercado de curto prazo. Como os produtos possuem prazos diferentes de duração, o vendedor deve fixar estes preços considerando o equivalente mensal de cada produto.

Tabela 5.9: Preço mínimo de venda por produto.

Produto (i)	1	2	3	4
Pm_i (R\$/MWh)	48,63	51,22	52,51	71,71

Quando iniciado o leilão, os envelopes dos compradores são abertos e suas ofertas de preços e quantidade para os produtos 1, 2, 3 e 4 tornam-se públicas. Para esse estudo de caso é utilizada a quantidade (Qd_i) de 80 lotes ao preço máximo (Pl_i) de R\$ 100,00 para todos os produtos. A Figura 5.4 ilustra as características dos quatro tipos de produtos do ponto de vista de V_j .

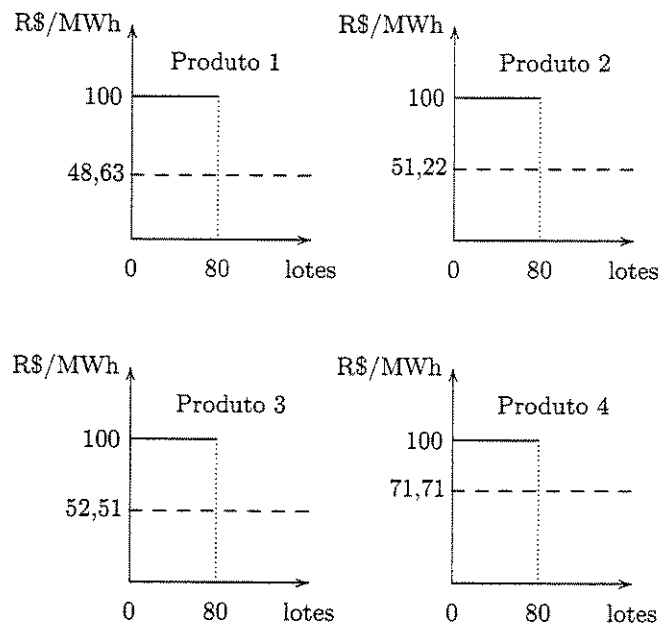


Figura 5.4: Características dos quatro tipos de contratos visto por V_j .

A linha contínua representa o primeiro preço de reserva R_1 do comprador que no início do leilão é igual ao preço de lance P_l . A linha tracejada representa o preço mínimo (P_{m_i}) pelo qual o vendedor está disposto a vender sua energia. Esse valor é de conhecimento privado do vendedor, assim como os preços de reserva são de conhecimento privado do comprador. O valor dos outros preços de reserva só é tornado público quando o preço corrente alcança esse patamar. A Tabela 5.10 apresenta os dados de entrada do modelo, após a abertura dos envelopes no leilão.

Tabela 5.10: Dados de entrada do leilão.

$Qt = 200 \text{ lotes}$				
Produto (i)	1	2	3	4
Qa_i (lotes)	0	0	0	0
Pm_i (R\$/MWh)	48,63	51,22	52,51	71,71
Pl_i (R\$/MWh)	100,00	100,00	100,00	100,00
Qd_i (lotes)	80	80	80	80

Com esses dados é possível fazer a primeira otimização utilizando o modelo matemático apresentado na seção anterior para alocar os lances do vendedor V_j nesses quatro produtos, maximizando seu lucro. O resultado da otimização é apresentado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Resultados da primeira otimização.

Lucro de V_j (R\$)	9.911,06			
Produto	1	2	3	4
Qn_i (lotes)	80	80	40	0

O modelo alocou um lance de 80 lotes para os produtos 1 e 2, 40 lotes para o produto 3 e nada para o produto 4, gerando um lucro para V_j de R\$ 9.911,06 no leilão.

Suponha agora que outros vendedores também efetuaram lances para o produto 2 e os 80 lotes desse produto foram vendidos. Então, o preço de lance P_i do produto sofre um decremento de R\$ 2,00, passando a valer R\$ 98,00. Nesse estágio do leilão, V_j não possui mais energia alocada para o produto 2, pois seu lance foi excluído devido aos lances de outros vendedores. Portanto, V_j possui 80 lotes disponíveis para serem alocados nos produtos provenientes do lance excluído do produto 2. Supondo que não houve lances para os outros produtos, os dados de entrada neste estágio do leilão são apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Dados do leilão após a primeira rodada de lances.

Qt (lotes)	80			
Produto (i)	1	2	3	4
Qa_i (lotes)	80	0	40	0
Pm_i (R\$/MWh)	48,63	51,22	52,51	71,71
Pl_i (R\$/MWh)	100,00	98,00	100,00	100,00
Qd_i (lotes)	80	80	80	80

Como o V_j possui 80 lotes para ofertar, uma segunda otimização é realizada no modelo, apresentando os resultados da Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Resultados do leilão após a segunda otimização.

Lucro de V_j (R\$)	9.779,25			
Produto (i)	1	2	3	4
Qn_i (lotes)	0	40	40	0

O resultado mostra que o modelo alocou 40 lotes para o produto 2 e 40 lotes para o produto 3, gerando um lucro de R\$ 9.779,25. A Tabela 5.14 apresenta como estão alocados os lances de V_j nesse estágio do leilão.

Tabela 5.14: Distribuição dos lances de V_j no leilão.

Produto (i)	1	2	3	4
Qa_i (lotes)	80	40	80	0

Assim, a medida que o leilão vai mudando de estágios e o vendedor V_j possui lotes de energia disponíveis para serem negociados, uma nova otimização é realizada alocando seus

lances de maneira a maximizar seu lucro no leilão. O sistema pára de efetuar a otimização quando o leiloeiro finaliza o leilão ou quando o preço de compra atinge um valor inferior ao preço de mínimo de venda de V_j para o produto.

Capítulo 6

Software de simulação

O produto das duas metodologias apresentadas no capítulo anterior é um *software* computacional que tem o objetivo de funcionar como um simulador de estratégias. O *software* é dividido em dois módulos. O primeiro objetiva simular os procedimentos de lances para um agente vendedor atuar no leilão de venda. O segundo refere-se à fixação de lances para o leilão de compra.

O ponto fundamental para o desenvolvimento do *software* é a escolha das ferramentas necessárias que permitam a implementação e a execução do modelo de maneira segura e eficiente. Para a construção do *software* é necessário o uso de uma linguagem de programação que seja responsável pela interface com o usuário e a comunicação entre as informações armazenadas em um banco de dados e os resultados obtidos após simulação do modelo de otimização. As ferramentas utilizadas para o desenvolvimento e funcionamento do *software* foram o *Excel* e o *Lingo*.

O *Excel* é um aplicativo da família *Microsoft Office* de uso amplo e bastante popular nos mais variados segmentos devido a sua versatilidade para manipulação de dados. Ele consiste de um conjunto de planilhas que podem ser utilizadas para armazenar dados e para realizar cálculos. No *software* de simulação ele é utilizado, principalmente, para armazenar dados, calcular coeficientes de correlação entre ativos, variância, média, desvio-padrão e covariância. Além disso, ele irá fornecer os dados necessários para a otimização no *Lingo*.

O *Lingo* é um aplicativo utilizado em pesquisa operacional. Ele resolve problemas de

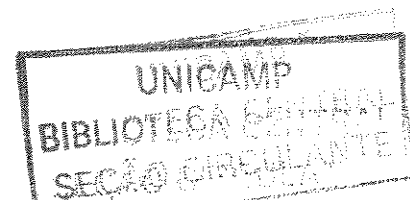
programação linear, inteira e não-linear (LINGO, 2001a). O *Lingo* possui algumas características que o torna uma opção interessante para a otimização do modelo de simulação de estratégias:

- a sintaxe do *Lingo* não é complexa. Ela é uma linguagem de modelação matemática não processual, ou seja, diferente da linguagem *Basic* ou *C*, no *Lingo*, basta informar o *que* se deseja. Não cabe ao usuário determinar a *forma* de como será realizada a tarefa;
- a representação das restrições se faz por linguagem matricial. Isto reduz a possibilidade de enganos na formulação do problema, uma vez que se torna de fácil averiguação a eventual correção;
- é compatível com o *Excel* e sua ligação com o mesmo se dá através da inserção de comandos simples. Além disso, oferece a opção de armazenar os dados no próprio algoritmo do programa ou no *Excel*;

O algoritmo escrito no *Lingo* está disposto em quatro blocos com funções diferenciadas. Essa característica de representação por blocos auxilia na detecção de eventuais falhas e na conferência do modelo. Os quatro blocos de função são:

- declaração de variáveis;
- dados de entrada;
- modelo computacional com a função objetivo e restrições;
- dados de saída.

O primeiro bloco de função é a declaração de variáveis. Ela é realizada através do comando de abertura *SETS* e de fechamento *ENDSETS*. O segundo e quarto blocos são os de entrada e saída de dados. Eles possuem a mesma sintaxe: *DATA* para abertura e *ENDDATA* para fechamento, entretanto, os dados de saída devem ser escritos após a descrição do modelo computacional com a função objetivo e restrições.



As operações, função objetivo e restrições são inseridas logo após o bloco de entrada de dados. Comentários também podem ser introduzidos no algoritmo e, para tanto basta colocar o sinal de ponto de exclamação (!) antes do mesmo. O comando *@OLE* é utilizado para importar e exportar dados para o Excel. O modelo é encerrado com o comando *END* (LINGO, 2001b).

A arquitetura proposta para o *software* é mostrada na Figura 6.1. O usuário escolhe a opção “leilão de compra” ou “leilão de venda”. Os dados de entrada são inseridos em uma planilha no *Excel* que realiza cálculos e ajustes internos. Estes dados passam, então, para o otimizador, *Lingo*, que irá resolver o problema. Após a otimização, os dados de saída (resultados) voltam para o *Excel*.

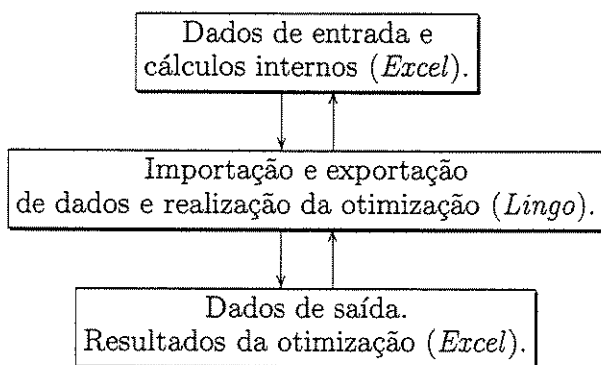


Figura 6.1: Arquitetura do *software*.

A configuração mínima do sistema recomendado para o correto funcionamento deste *software* é:

- processador *Pentium III* ou equivalente;
- memória RAM 128 MB;
- sistema operacional *Windows 98* ou superior;
- espaço disponível no HD de 500 MB.

6.1 Módulo 1 - Leilão de venda

A parte do *software* referente ao leilão de venda, denominada módulo 1, consiste de duas planilhas *Excel*. A primeira funciona como entrada de dados. Nela o vendedor insere os dados referentes à probabilidade de ocorrência dos cenários e o retorno desejado para os produtos quando acontece cada cenário. Além disso, o vendedor define um limite, em porcentagem, de aplicação em cada produto.

Após definidos esses parâmetros, o vendedor deve fixar a rentabilidade desejada para o leilão. A função objetivo desse modelo é minimizar o risco, dado uma rentabilidade fixada pelo vendedor. O retorno médio de cada contrato, bem como o desvio-padrão, a matriz covariância e a matriz correlação são calculados automaticamente pelo programa. A Figura 6.2 apresenta a tela de entrada do módulo 1 do *software* construído no *Excel*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Dados de entrada do modelo													
2														
3														
4	Contratos													
5	Estrategias	Probabilidade de	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	1	30%	3%	13%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
7	2	20%	7%	3%	9%	20%	2%	25%	22%	24%	27%	21%	23%	28%
8	3	50%	5%	8%	7%	17%	18%	20%	20%	21%	22%	19%	21%	21%
9	Retorno Esperado:	6,50%	8,70%	10,00%	12,50%	13,20%	15,00%	14,40%	15,30%	16,40%	13,70%	15,10%	15,10%	16,10%
10	Desvio-padrão:	1,74%	3,03%	3,46%	8,28%	8,72%	10,00%	9,48%	10,08%	10,90%	9,60%	9,92%	10,87%	10,87%
11	Aplicação Máxima:	0,30	0,30	0,30	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
12	Retorno Desejado:	11,50%												
13														
14	Covariância													
15	σ_1	0,0003	0,0006	0,0006	-0,0012	-0,0013	-0,0014	-0,0014	-0,0015	-0,0015	-0,0014	-0,0015	-0,0015	-0,0015
16	σ_2	0,0005	0,0009	0,0011	-0,0027	-0,0023	-0,0026	-0,0027	-0,0028	-0,0028	-0,0024	-0,0027	-0,0027	-0,0027
17	σ_3	0,0006	0,0011	0,0012	-0,0026	-0,0027	-0,0030	-0,0030	-0,0032	-0,0033	-0,0029	-0,0032	-0,0032	-0,0032
18	σ_4	-0,0012	-0,0022	-0,0026	0,0068	0,0072	0,0083	0,0078	0,0083	0,0090	0,0074	0,0082	0,0089	0,0089
19	σ_5	-0,0013	-0,0023	-0,0027	0,0072	0,0076	0,0087	0,0082	0,0088	0,0095	0,0078	0,0086	0,0094	0,0094
20	σ_6	-0,0014	-0,0026	-0,0030	0,0083	0,0087	0,0100	0,0094	0,0101	0,0109	0,0090	0,0099	0,0109	0,0109
21	σ_7	-0,0014	-0,0026	-0,0030	0,0078	0,0082	0,0094	0,0089	0,0095	0,0103	0,0085	0,0094	0,0101	0,0101
22	σ_8	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0083	0,0088	0,0101	0,0095	0,0102	0,0110	0,0091	0,0100	0,0109	0,0109
23	σ_9	-0,0015	-0,0028	-0,0033	0,0090	0,0095	0,0109	0,0103	0,0110	0,0119	0,0099	0,0109	0,0118	0,0118
24	σ_{10}	-0,0014	-0,0024	-0,0029	0,0074	0,0078	0,0090	0,0085	0,0091	0,0099	0,0081	0,0089	0,0097	0,0097
25	σ_{11}	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0082	0,0086	0,0099	0,0094	0,0100	0,0108	0,0089	0,0098	0,0106	0,0106
26	σ_{12}	-0,0015	-0,0027	-0,0032	0,0089	0,0094	0,0109	0,0101	0,0109	0,0118	0,0097	0,0106	0,0115	0,0115
27														
28	Correlação:													
29	ρ_1	1,0000	0,9979	0,9934	-0,8331	-0,8371	-0,8030	-0,8636	-0,8466	-0,8123	-0,8615	-0,8654	-0,7685	-0,7685
30	ρ_2	0,9979	1,0000	0,9989	-0,8675	-0,8711	-0,8403	-0,8947	-0,8797	-0,8488	-0,8929	-0,8964	-0,8087	-0,8087
31	ρ_3	0,9934	0,9989	1,0000	-0,8910	-0,8943	-0,8660	-0,9157	-0,9021	-0,8739	-0,9141	-0,9172	-0,8368	-0,8368
32	ρ_4	-0,8331	-0,8675	-0,8910	1,0000	1,0000	0,9986	0,9993	0,9997	0,9993	0,9986	0,9981	0,9944	0,9944
33	ρ_5	-0,8371	-0,8711	-0,8943	1,0000	1,0000	0,9982	0,9987	0,9998	0,9990	0,9989	0,9985	0,9933	0,9933
34	ρ_6	-0,8030	-0,8403	-0,8660	0,9986	0,9982	1,0000	0,9939	0,9970	0,9999	0,9944	0,9935	0,9884	0,9884
35	ρ_7	-0,8636	-0,8947	-0,9157	0,9983	0,9987	0,9939	1,0000	0,9995	0,9956	0,9959	1,0000	1,0000	0,9863
36	ρ_8	-0,8466	-0,8797	-0,9021	0,9997	0,9998	0,9970	0,9995	1,0000	0,9981	0,9996	0,9996	0,9993	0,9911
37	ρ_9	-0,8123	-0,8488	-0,8739	0,9993	0,9990	0,9989	0,9956	0,9981	1,0000	0,9959	0,9952	0,9974	0,9974
38	ρ_{10}	-0,8615	-0,8929	-0,9141	0,9986	0,9989	0,9944	1,0000	0,9996	0,9959	1,0000	1,0000	0,9869	0,9869
39	ρ_{11}	-0,8654	-0,8964	-0,9172	0,9981	0,9985	0,9935	1,0000	0,9993	0,9952	1,0000	1,0000	0,9856	0,9856
40	ρ_{12}	-0,7685	-0,8087	-0,8368	0,9941	0,9933	0,9984	0,9863	0,9911	0,9974	0,9869	0,9856	1,0000	1,0000

Figura 6.2: Tela 1: dados de entrada do leilão de venda.

Após inserido todos os dados, o algoritmo do modelo de leilão de venda realiza a otimização através do *Lingo*, alocando, de maneira ótima, a quantidade de energia a ser ofertada em cada produto. Além disso, o modelo retorna o resultado da função objetivo que explicita o risco o qual o vendedor está exposto dado o retorno que ele fixou para este leilão. O algoritmo escrito no *Lingo* encontra-se a seguir:

```

!Modelo para o leilão de venda;
SETS:
PRODUTO/1..12/: RETO, MA, W;
COV(PRODUTO, PRODUTO): V;
ENDSETS

DATA:
!IMPORTAR DADOS DO EXCEL;
!Taxa de retorno esperado para cada ativo;
RETO = @OLE('C:\Otimizacao\Tese\Portfolio.xls', 'RETO');
!Aplicação máxima de cada ativo;
MA = @OLE('C:\Otimizacao\Tese\Portfolio.xls', 'MA');
!Matriz covariância;
V = @OLE('C:\Otimizacao\Tese\Portfolio.xls', 'V');
!Taxa de retorno desejada do portfólio;
RETOP = @OLE('C:\Otimizacao\Tese\Portfolio.xls', 'RETOM');
ENDDATA

!O modelo;
!Minimizar o desvio-padrão;
[DEV] MIN = Y;
      Y =((@SUM (COV(I,J):
              V * W(I) * W(J))))^(1/2));

!Somatório das frações investidas em cada ativo;
[FULL] @SUM(PRODUTO: W) = 1;

!Aplicação máxima de cada ativo;

```



```

@FOR (PRODUTO: @BND(0, W, MA));

!Retorno desejado do portfólio;
[RET] Z = @SUM(PRODUTO: RETO * W);
      Z >= RETOP;

DATA:
!EXPORTAR DADOS PARA O EXCEL;
@OLE('C:\Otimizacao\Tese\Portfolio.xls', 'LANCE') = W;
@OLE('C:\Otimizacao\Tese\Portfolio.xls', 'RETOP') = Z;
@OLE('C:\Otimizacao\Tese\Portfolio.xls', 'RISCOP') = Y;
ENDDATA

```

Realizada a otimização, o sistema retorna os resultados para uma outra planilha do *Excel* denominada “resultados”. A Figura 6.3 mostra a tela de resultados do módulo 1 do *software*. Os dados importados do *Lingo* para esta tela do *Excel* são os lances nos produtos, o retorno desejado pelo vendedor e o risco que esse vendedor está exposto para obter esse retorno.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2	Resultado da otimização													
3														
4	Lances:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
5		7,87%	30,00%	30,00%			2,23%	5,00%	5,00%	5,00%	4,90%	5,00%	5,00%	
6														
7		Retorno:	11,00%											
8		Risco:	1,71%											
9														

Figura 6.3: Tela 2: dados de saída do leilão de venda.

6.2 Módulo 2 - Leilão de compra

O módulo 2 do *software* consiste de duas planilhas do *Excel*. A primeira apresenta os dados de entrada e saída do modelo. A segunda realiza cálculos internos, como o número de horas que cada produto possui. O *Lingo* importa e exporta os dados da primeira planilha do *Excel*

e realiza a otimização. As variáveis que o vendedor deve inserir são a quantidade de lotes de energia que ele deseja negociar e o preço mínimo pelo qual ele está disposto a vender estes lotes para cada produto.

O produto é representado por uma sigla criada pelo MAE. Por exemplo, na sigla CNFBA-0960N, os três primeiros dígitos representam o nome do comprador, os próximos dois dígitos refere-se ao tipo de energia (base ou flexível), os dois dígitos seguintes representam o prazo do contrato em meses, os outros dois dígitos indica o início do suprimento em dias e o último dígito o submercado de entrega da energia elétrica.

A Figura 6.4 mostra a planilha de entrada e saída de dados de um agente vendedor no leilão de compra. Essa tela foi adaptada do leilão original do MAE, tentando reproduzir mais fielmente possível o leilão real, facilitando assim, a interface com o usuário.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	MAE - Sistema dos Leilões de Energia Elétrica - Software											
2	Garantia											
3												
4	Vendedores:	Limite de Garantia (lotes)										
5	CHESF	200										
6												
7	Detalhes do leilão											
8	Resultados											
9	Descrição: Leilão de Compra 04				Status: Agendado							
10	Data de Início: 20/10/2003				Produtos: 5							
11	Garantia Vinculada: 0 lote(s)				Garantia Disponível: 40				Lucro do leilão:			
12	Tempo Min. Duração: 2 hs				(lotes)				R\$	773.114,00		
13												
14	Dados do leilão											
15												
16	Produto	Qtd. Demandada Inicial	Preço Inicial	Qtd. Demandada Atual	Preço Corrente Atual	Qtd. Ofertada	Preço de Lance	Qtd. Atendida	Status	Novo Lance	Preço Mín. CHESF	
17	CNFBA0960NE	25	R\$ 100,00	25	R\$ 63,88	1000	R\$ 100,00	0	NA	25	R\$ 55,00	
18	CNFFL1260N	50	R\$ 70,00	50	R\$ 70,00	45	R\$ 67,90	5	A	45	R\$ 5,00	
19	CPEBA0960N	50	R\$ 55,00	50	R\$ 55,00	0	R\$ 55,00	0	NA		R\$ 56,00	
20	CPEFL1260N	50	R\$ 60,00	50	R\$ 60,00	17	R\$ 60,00	17	A		R\$ 100,00	
21	CSPBA1260NE	60	R\$ 46,00	60	R\$ 46,00	50	R\$ 44,62	0	NA	60	R\$ 40,00	

Figura 6.4: Tela 1: dados do leilão de compra.

A Figura 6.4 consiste de quatro campos principais: garantia, detalhes do leilão, dados do leilão e resultados. No campo GARANTIA o vendedor deve inserir a quantidade que ele deseja negociar em lotes. No campo DETALHES DO LEILÃO encontra-se a garantia disponível do vendedor em determinado momento do leilão, além da descrição, data e hora, quantidade de produtos e tempo mínimo de duração.

No terceiro campo estão os DADOS DO LEILÃO. Estes são os dados disponibilizados na tela do *site* do MAE, com exceção das duas últimas colunas (J e K) que representam o lance dado pelo vendedor em determinado momento do leilão (resultado da otimização) e o preço mínimo pelo qual o vendedor está disposto a vender sua energia para determinado produto.

O quarto campo, RESULTADOS, mostra o lucro que o vendedor está obtendo no leilão. O cálculo desse lucro é realizado na segunda planilha do Excel e considera o resultado da função objetivo, bem como a quantidade de lotes e o preço em que os lotes estão sendo negociado no leilão e, também, o período de suprimento de cada um dos produtos.

Os campos dos dados de entrada que o vendedor deve fixar (garantia e preço de venda) são apresentados nesta tela com o fundo de tela azul e com os algarismos em negrito. Os campos dos dados de saída (lucro e novo lance) estão representados com fundo de tela amarelo e algarismos em negrito. Isso facilita o usuário a identificar as variáveis.

A segunda planilha do Excel (Figura 6.5) calcula o lucro do vendedor. Esta planilha realiza alguns cálculos, como o número de horas de cada produto, considerando todos os meses (com 30 e 31 dias) e o prazo de início e final de suprimento, a partir da sigla dada ao produto.

	A	B	C	D	E	F
1	Data do leilão	28/10/03				
2						
3	Produto	Início de Suprimento	Fim de Suprimento	Horas	Lucro	Receita
4	CNFBA0960NE	01/01/04	30/09/04	6552	R\$ 153.562,50	R\$ 341.250,00
5	CNFFL1260N	01/01/04	31/12/04	8760	R\$ 573.962,50	R\$ 619.587,50
6	CPEBA0960N	01/01/04	30/09/04	6552	R\$ -	R\$ -
7	CPEFL1260N	01/01/04	31/12/04	8760	R\$ -	R\$ -
8	CSPBA1260NE	01/01/04	31/12/04	8760	R\$ 50.589,00	R\$ 488.589,00

Figura 6.5: Tela 2: cálculo das horas do contrato.

O algoritmo de otimização foi escrito no *Lingo* e utiliza programação inteira, pois o valor da quantidade negociada não pode assumir valores reais. Os *Lingo* importa os dados da planilha do *Excel* e depois de realizada a otimização exporta os resultados novamente para a planilha do *Excel*. O algoritmo escrito no *Lingo* é apresentado a seguir.

```

!Modelo para o leilão de compra;
model:
SETS:
CONTRATO/1..25/: PL, PV, QD, NL, QA;
ENDSETS

DATA:
!IMPORTAR DADOS DO EXCEL;
!Preço mínimo do vendedor na qual ele esta disposto a vender por contrato;
PV = @OLE('C:\Otimizacao\Relatorio\leilaocompra.xls', 'PV');
!Preço de lance de compra;
PL = @OLE('C:\Otimizacao\Relatorio\leilaocompra.xls', 'PL');
!Quantidade de energia a ser comprada para o patamar de preço de lance associado;
QD = @OLE('C:\Otimizacao\Relatorio\leilaocompra.xls', 'QD');
!Quantidade disponibilizada pelo vendedor para ser comercializada no leilão;
QTD = @OLE('C:\Otimizacao\Relatorio\leilaocompra.xls', 'QTD');
!Quantidade de energia já alocada no produto;
QA = @OLE('C:\Otimizacao\Relatorio\leilaocompra.xls', 'QA');
ENDDATA

!O modelo;
!Maximizar o lucro do leilão;
MAX = (@SUM (CONTRATO: ((1.00000001*PL) - PV) * (NL+QA)));
!Quantidade negociada precisa ser menor do que a garantia disponível;
@SUM(CONTRATO: NL) <= QTD;
!Preço de lance deve ser sempre maior ou igual ao preço de venda;
@FOR (CONTRATO: PL >= PV);
!Quantidade negociada pode variar de zero até o fator de restrição;
@FOR (CONTRATO: 0 <= NL+QA);
@FOR (CONTRATO: NL+QA <= @if((QA+NL)#GT#100,0.7,1)*QD);

```

```

@For(CONTRATO|PV #EQ# 0:NL=0);
!Quantidade negociada precisa ser um número inteiro;
@FOR (CONTRATO: @GIN(NL));

DATA:
!EXPORTAR DADOS PARA O EXCEL;
@OLE('C:\Otimizacao\Relatorio\leilaocompra.xls', 'NL') = NL;
ENDDATA

```

A função objetivo desse modelo é maximizar o lucro do vendedor nesse leilão. O sistema realiza uma otimização toda vez que o vendedor possuir energia disponível para negociar. Por exemplo, no início do leilão o vendedor V_j tem uma quantidade de lotes de energia para negociar. O sistema, então, realiza a otimização, alocando essa energia nos produtos de maneira que a receita de V_j seja maximizada. Com o andamento do leilão, outros vendedores realizam lances melhores que o de V_j e seu lance é excluído do leilão. A partir desse momento, V_j possui uma nova quantidade de energia para ser negociada e então o sistema realiza uma nova otimização.

O sistema pára de realizar a otimização quando o leiloeiro finaliza o leilão ou quando o preço corrente do leilão alcança um valor menor do que aquele pelo qual o vendedor está disposto a vender sua energia para um determinado produto.

Capítulo 7

Conclusões

As mudanças institucionais ocorridas no país desde a década de 1990 introduziram no setor elétrico um modelo concorrencial com atuação de agentes privados e estatais. Um novo paradigma foi estabelecido com a desverticalização e a privatização de algumas empresas de energia elétrica, a instalação de um órgão regulador (ANEEL) e um operador independente para o sistema elétrico (ONS) e, com a criação de um mercado competitivo de energia elétrica.

Dentre as novidades dessa modelagem do setor elétrico estão a criação do Produtor Independente de Energia, a instalação de empresas comercializadoras de energia, a liberação gradual de consumidores cativos e a criação do MAE.

Um dos objetivos da reestruturação era transferir parte dos investimentos de expansão do sistema para a iniciativa privada, ficando o governo com a responsabilidade de promover políticas públicas e regular e fiscalizar o sistema elétrico e o mercado de energia. Além disso, a reforma do setor elétrico objetivava, entre outros, a modicidade tarifária, a universalização do acesso e do uso dos serviços de energia elétrica e a continuidade e qualidade da prestação de serviços de fornecimento de energia elétrica.

Diante de todas essas mudanças há a necessidade das empresas e novos agentes se adaptarem a esse ambiente setorial. O planejamento estratégico deles deve ser orientado a buscar os melhores negócios no mercado. Este trabalho contribuiu para isto no sentido de oferecer uma metodologia para agentes e empresas atuarem em um ramo específico e importante do

mercado de energia elétrica, que são os leilões de contratos bilaterais, pois estes são responsáveis por um grande percentual do total de contratos negociados no mercado de energia elétrica.

Isso acontece porque as empresas geradoras estatais são obrigadas a vender no mínimo 50% do total de sua energia através de leilões e as concessionárias de distribuição devem ter 95% do total de sua demanda negociada através de contratos bilaterais.

Este trabalho teve como foco a análise de dois leilões: o de venda e o de compra, ambos organizados pelo MAE. O leilão de venda ocorre uma vez por ano e a energia elétrica leiloadada é referente à liberação dos contratos iniciais formatados antes da introdução do mercado concorrencial. O leilão de compra possui periodicidade mensal e se caracteriza por negociar contratos de curto prazo.

Para ambos, a metodologia desenvolvida foi conduzida do ponto de vista de um vendedor de energia elétrica. Entretanto, como os dois leilões são simétricos, um agente comprador também pode adotar a mesma metodologia.

Tanto o leilão de venda como o de compra são duplos e com participantes identificados. Para um vendedor o leilão de venda é fechado, ou seja, ele entrega suas ofertas em envelopes lacrados. O leilão de compra, por sua vez, é aberto e com preços descendentes. Utilizando a teoria dos jogos pode-se então definir que, para um vendedor, os dois leilões estão enquadrados no conceito de jogos não-cooperativos de informação incompleta. Entretanto, o leilão de venda é um jogo estratégico e o leilão de compra, um jogo dinâmico.

Técnicas de otimização foram utilizadas para a modelagem dos dois leilões. O uso dessas técnicas promove um modelo mais flexível já que ele possui facilidade em inserir e retirar restrições. Para o vendedor fixar os lances no leilão de venda é utilizada programação não-linear quadrática e para fixar lances no leilão de compra, programação inteira.

A função objetivo do modelo de fixação de lances pelo vendedor no leilão de venda tem como objetivo minimizar o risco dado um retorno fixado pelo vendedor. A formulação é baseada na teoria do portfólio e emprega o modelo da Mínima Variância de Markowitz.

Os parâmetros que o vendedor deve inserir no modelo do leilão de venda são a probabilidade de acontecer cada cenário e o retorno esperado para cada tipo de produto caso ocorra o

referido cenário. O tipo de produto é caracterizado, basicamente, por duas variáveis: prazo de duração e submercado de entrega da energia. Fixando esses parâmetros o modelo calcula a matriz covariância e correlação, que mostra como os produtos interagem entre si, ou seja, como um produto influi no comportamento do outro em um dado período. O resultado final desse modelo é uma alocação ótima de lances nos diversos tipos de produtos de maneira que o risco do vendedor seja minimizado dado um retorno fixado por ele.

O modelo de fixação de lances no leilão de compra tem como função objetivo a maximização do lucro do vendedor. Os parâmetros que o vendedor deve inserir no modelo são a quantidade de energia que ele deseja negociar no leilão e o preço mínimo pelo qual ele está disposto a vender essa energia para cada produto.

Como esse leilão é aberto para o lado do vendedor, este pode migrar seus lances de um produto para o outro caso seja financeiramente melhor. O resultado do modelo é uma alocação ótima de lances nos produtos, de forma que o lucro do vendedor no leilão seja maximizado.

As duas metodologias desenvolvidas servem como subsídio à tomada de decisão do agente vendedor de energia elétrica nas negociações de contratos bilaterais. Elas são um ferramental que utilizam uma base conceitual estruturada que tem como objetivo auxiliar os tomadores de decisão no processo do leilão. Sua modelagem foi configurada de acordo com as regras de cada leilão e sua formulação desenvolvida de forma a tornar o modelo seguro e flexível.

Como produto final dessa metodologia foi desenvolvido um *software* para auxiliar os agentes na aplicação do modelo. Esse *software* pode ser utilizado para realizar simulações e, com isto, prever alguns prováveis resultados do leilão. Ele foi construído em uma linguagem simples e utiliza planilhas do *Excel* como entrada e saída de dados e cálculos internos, e o *software Lingo*, no qual foi escrito o algoritmo e que é responsável pela importação e exportação dos dados do *Excel* e pela realização da otimização.

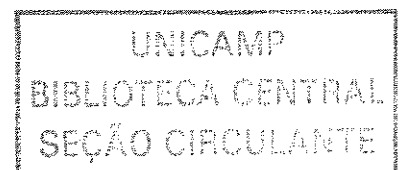
Diante das regras de mercado oriundas da introdução de um novo modelo institucional no setor elétrico, este trabalho buscou contribuir no processo de tomada de decisão em leilões de energia elétrica, introduzindo uma metodologia de auxílio aos agentes para fixação de lances. Ele teve como foco os leilões de venda e de compra e, utilizando conceitos de teoria

dos jogos, dos leilões e portfólio como embasamento teórico, foi desenvolvido e implementado um *software*, baseado em técnicas de otimização, para simular procedimentos e estratégias de fixação de lances.

Referências Bibliográficas

- Alcock, D. e C. K. Pang (2000). Risk management in a power pool. Em *5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, pp. 557–560.
- ANEEL (2002). Resolução nº 423. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ANEEL (2003). Resolução nº 246. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- Assaf, A. N. (2001). *Mercado Financeiro* (4th ed.). Editora Atlas.
- Azevedo, E. M. (2004). *Modelo computacional de teoria dos jogos aplicado aos leilões brasileiros de energia elétrica*. Tese de doutorado, Unicamp, Campinas - Brasil.
- Benninga, S. (1994). *Numerical Techniques in Finance* (4 ed.). MIT Press.
- Bjorgan, R., C.-C. L. Fellow, e J. Lawarree (1999). Financial risk management in a competitive electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems* 14(4), 1285–1291.
- Costa, F. N. (2000). *Economia Em 10 Lições*. Makron Books.
- Cunningham, L. B. (2002). An empirical study of applied game theory: Transmission constrained cournot behavior. *IEEE Transactions on power systems* 17, 167–172.
- Dekrajangpetch, S. e G. B. Sheblé (2000). Structures and formulations for electric power auctions. *Electric Power Systems Research* 54, 159–167.
- Domingues, E. G. et al. (2001). Applying modern portfolio theory to investment projects in electric energy markets. Em *IEEE Porto Power Tech Conference*.
- Elton, E. J. e M. J. Gruber (1981). *Modern Portfolio Theory and Investment Analysis*. John Wiley and Sons.
- Ferrero, R. W., J. S. Rivera, e S. M. Shahidehpour (1998). Application of games with incomplete information for pricing electricity in deregulated power pools. *IEEE Transactions On Power Systems* 13(1), 184–189.
- Gan, D. e D. V. Bourcier (2002). A single-period auction game model for modeling oligopolistic competition in pool-based electricity markets. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 101–106.

- He, Y., Y. H. Song, e X. F. Wang (2002). Bidding strategies based on bid sensitivities in generation auction markets. *IEEE Proceedings Generation, Transmission, Distribution* 149(1), 21–26.
- Heap, S. P. H. e Y. Varoufakis (1995). *Game Theory: A Critical Introduction*. Routledge.
- Kattuman, P. A., J. W. Bialek, e N. Abi-Samra (1999). Electricity tracing and cooperative game theory. *Proceedings 13th Power Systems Computation Conference, Trondheim*, 238–243.
- Klemperer, P. (1999). Auction theory: A guide to the literature. *Journal of economic surveys* 13(3), 227–286.
- Klemperer, P. (2000). *Why Every Economist Should Learn some Auction Theory*. Oxford University.
- Korn, R. (1997). *Optimal Portfolios*. World Scientific.
- Krishna, V. (2002). *Auction Theory*. Academic Press.
- Laffont, J. J. (1997). Game theory and empirical economics: The case of auction data. *European Economic Review* 41, 1–35.
- LINGO (2001a). *LINGO: The Modeling Language and Optimizer*. Lindo Systems Inc.
- LINGO (2001b). *Optimization Modeling with LINGO* (4th ed.). Lindo Systems Inc.
- Loo, K. L. et al. (2000). Game theory application for determining wheeling charges. *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, City University, London*, 308–313.
- Luenberger, D. G. (1984). *Linear and Nonlinear Programming* (2nd ed.). Addison-Wesley.
- MAE (2002). Edital de leilão nº 001/2002: Compra e venda de energia elétrica das concessionárias de serviços públicos: CGTEE, Chesf, Eletronorte e Furnas e outros geradores.
- MAE (2003a). Edital de leilão de excedentes nº 001/2003. Venda exclusiva de excedentes originados dos contratos iniciais e equivalentes de energia elétrica das concessionárias e autorizadas de geração para consumidores finais.
- MAE (2003b). Edital de leilão nº 001/2003: Compra de energia elétrica das concessionárias de serviços públicos de distribuição e comercialização de energia elétrica.
- Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance* 7(1), 77–91.
- Masili, G. S. (2004). Metodologia e software para simulação de leilões de energia elétrica do mercado brasileiro. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - Brasil.



- Mendonça, A. F. e C. Dahl (1999). The Brazilian electrical system reform. *Energy Policy* 27, 73–83.
- MME (2003). Modelo institucional do setor elétrico. Ministério das Minas e Energia.
- Munhoz, F. C. e T. B. Correia (2003). Expansão na geração elétrica no Brasil: Conseqüências da introdução da lógica privada. Em *51º Congresso Internacional de Americanistas*, Santiago - Chile.
- Nash, J. (1951). Non-cooperative games. *The Annals of Mathematics* 54, 286–295.
- Nemhauser, G. L. e L. A. Wolsey (1988). *Integer and Combinatorial Optimization*. New York.
- Osborne, M. J. e A. Rubinstein (1994). *A Course in Game Theory*. MIT Press.
- Perry, M., E. Wolfstetter, e S. Zamir (2000). A sealed-bid auction that matches the English auction. *Games and Economic Behavior* 33, 265–273.
- Silva, A. J. (2003). Leilões de certificado de energia elétrica: Máximo excedente versus máxima quantidade negociada. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas - Brasil.
- Silva, E. L., J. C. Morales, e A. C. G. Melo (2001). Allocating congestion cost using game theory. *IEEE Porto Power Tech Conference*.
- Song, H., C.-C. Liu, e J. Lawarrée (2002). Nash equilibrium bidding strategies in a bilateral electricity market. *IEEE Transactions On Power Systems* 17(1), 73–79.
- Tan, X. H. e T. T. Lie (2001). Allocation of transmission loss cost using cooperative game. *IEEE Transactions On Power Systems*, 1215–1219.
- Vickrey, W. (1961). Counterspeculation, auctions, and competitive sealed-tenders. *Journal of finance* 16, 8–37.
- von Neumann, J. e O. Morgenstern (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press.