

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS EDUARDO LAURINDO DE SOUZA

**GESTÃO DE COMPRA DE ENERGIA VIA MÉTODO DOS PONTOS
INTERIORES**

CURITIBA

2010

CARLOS EDUARDO LAURINDO DE SOUZA

**GESTÃO DE COMPRA DE ENERGIA VIA MÉTODO DOS PONTOS
INTERIORES**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Thelma Solange Piazza Fernandes

Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre R. Aoki

CURITIBA

2010

S729g

Souza, Carlos Eduardo Laurindo de

Gestão de compra de energia via métodos dos pontos interiores / Carlos Eduardo Laurindo de Souza. – 2010.

113 f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Impresso.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2010.

“Orientadora: Prof. Dr. Thelma Solange Piazza Fernandes”.

“Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre R. Aoki”

1. Energia elétrica - Comercio. 2. Energia elétrica - Leilão.
I. Universidade Federal do Paraná. II. Fernandes, Thelma Solange Piazza. III. Aoki, Alexandre R. IV. Título.

CDD: 621.3106381

TERMO DE APROVAÇÃO

CARLOS EDUARDO LAURINDO DE SOUZA

GESTÃO DE COMPRA DE ENERGIA VIA MÉTODO DOS PONTOS INTERIORES

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: _____

Prof.^a Dr.^a Thelma Solange Piazza Fernandes (UFPR)

Co-orientador: _____

Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki (UFPR)

Prof. Dr. Evelio Fernandes (UFPR)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Jean Viane Leite (UFPR)

Prof.^a Dr.^a Myriam Regattieri Delgado (UTFPR)

Prof. Dr. Gustavo Henrique Costa Oliveira (UFPR)

Curitiba, 09 de agosto de 2010.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais João Laurindo de Souza Netto (*in memorian*) e Dora Herdérico de Souza pelo apoio e pela oportunidade em chegar até aqui e poder realizar este trabalho.

Agradeço à minha namorada Andrea e às minhas filhas Raissa, Victória e Isadora pela força, apoio e paciência dedicada em todo o período de estudo.

Ao professor Dr. Alexandre R. Aoki e especialmente à Prof.^a Dr.^a Thelma Solange Piazza Fernandes pelo zelo, dedicação e paciência conduzida na orientação deste trabalho sem a qual não seria possível concluí-lo.

Aos professores Dr. Alexandre R. Aoki, Gustavo Henrique Costa Oliveira e Jean Viane Leite pelas sugestões e contribuições realizadas no processo de qualificação para a finalização do trabalho.

Aos colegas e amigos de trabalho que puderam contribuir com as particularidades e informações necessárias especialmente à Patrícia Dalzoto pela colaboração e ajuda nas revisões do trabalho.

.

RESUMO

Em 2004, foi implantado um modelo de comercialização de energia elétrica baseado em leilões públicos e em contratação de energia por licitação conjunta do montante necessário para todas as distribuidoras participantes dos leilões. O modelo estabeleceu novas regras de comercialização de energia com a obrigatoriedade para as distribuidoras de energia, de contratar 100% do seu mercado cativo com antecedência de até 5 (cinco) anos. Estipulou penalidades financeiras se as distribuidoras ficarem sub ou sobrecontratadas, impõe limites de repasse do valor da energia às tarifas dos consumidores finais e estabelece mecanismos de descontração e reposição da energia contratada para minimizar os riscos na compra da energia. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que dêem suporte para o estabelecimento de estratégias de compra de energia em leilões públicos e que minimizem os riscos da distribuidora. Assim, o objetivo desse trabalho é apresentar uma formulação matemática do problema de otimização envolvido na compra de energia, descrevendo-se seus critérios de otimização e restrições impostas pela legislação. A solução deste problema de otimização fornece, para cada tipo de contrato existente no mercado de energia, os valores que devem ser contratados ao longo de 5 anos a frente do ano de referência. Esses valores são limitados pelas regras de mercado e otimizados de modo a se minimizar os custos de aquisição e de penalidades por sub ou sobrecontratação. O problema é resolvido pelo Método dos Pontos Interiores, cuja aplicação neste contexto é inovadora, pois desde a implantação desse modelo de comercialização de energia, técnicas de Inteligência Artificial (IA) vêm sendo utilizadas prioritariamente. Os resultados, obtidos através de simulação de diversos cenários de mercado de empresas padrão, apresentam respostas adequadas e compatíveis com as estratégias adotadas e um excelente desempenho computacional, que pode ser um ótimo recurso para as distribuidoras, da mesma forma que outras ferramentas de otimização utilizadas, tais como IA, servindo como opção para certificar as estratégias de exposição nos respectivos leilões de energia.

Palavras-Chaves: Modelo do Setor Elétrico Brasileiro, Gestão de Compra de Energia, Leilões, Método dos Pontos Interiores.

ABSTRACT

In 2004, it was implanted a commercialization model of electric energy based on public auctions and joint licitation of the necessary amount for all the deliverers of energy that participate of the auctions. The model established new rules of energy commercialization, with the obligatoriness for the deliverers, to contract 100% of its captive market with antecedence of up to 5 (five) years. Moreover, it stipulates financial penalties if the deliverers stayed sub or super-contracted, imposes limits to repass the value of the energy to the tariff of the final consumers and establishes mechanisms to cancel the contract and replace the contracted energy in a way to minimize the risks of the purchase. Of this form, it becomes necessary to develop tools that gives support for definitions of strategies of purchase of energy in public auctions and that minimizes the risks of the deliverers. Thus, the objective of this work is to present a mathematical formulation of the optimization problem involved, with the description of the optimizations criteria and restrictions imposed for the legislation. The solution of this optimization problem supplies, for each type of existing contract inside the energy market, the values that must be contracted throughout 5 years ahead from a reference year. These values are limited by the rules of market and are optimized in order to minimize the costs of acquisition and penalties due to sub or sobrecontract. The optimization problem is solved by the Interior Points Method, whose application is innovative, because since the implantation of this energy commercialization model, techniques of Artificial Intelligence (AI) are been used. The results, obtained through the simulation of an usual delivery, present compatible responds with the strategies and excellent computation development which can be a great option for distribution companies when compared with other techniques, as Artificial Intelligent.

Keywords: Brazilian Electric Sector, Energy Market, Public Auctions; Interior Point Method

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1.1 Vantagens das Técnicas de Otimização	17
Quadro 2.1: Mecanismo de Repasse e seus Limites	39
Quadro 2.2: Características dos Diversos Modelos desde a Reforma do Setor	41
Tabela 5.1 Preços de Energia no Mercado spot e VR	64
Tabela 5.2 Montantes de Energia e de Reposição no Cenário de Referência.....	65
Tabela 5.3 Preços de Energia nos Leilões A-1,A-3,A-5 e Ajuste	65
Tabela 5.4 Energia Existente já contratadas até o ano (-1)	67
Tabela 5.5 Energia Nova a serem contratadas a partir do ano(1).....	69
Tabela 5.6 Redução e Reposição da Energia inicialmente contratada	70
Tabela 6.1 Energia Existente e contratada em 2009(caso1).....	84
Tabela 6.2 Energia Existente e contratada em 2009(caso 2).....	84
Tabela 6.3 Montante de Reposição (caso 1)	85
Tabela 6.4 Montante de Reposição (caso 2)	85
Tabela 6.5 Valores de Energia no Mercado de Referência(caso 1)	85
Tabela 6.6 Valores de Energia no Mercado de Referência(caso 2)	85
Tabela 6.7 Preços de Energia nos Diversos Leilões (caso 1)	86
Tabela 6.8 Preços de Energia nos Diversos Leilões (caso 2)	86
Tabela 6.9 Preços de Energia no Mercado de Curto Prazo(caso 1)	86
Tabela 6.10 Preço de Energia no Mercado de Curto Prazo(caso 2).....	86
Tabela 6.11 Valor de Referência - VR (caso 1)	87
Tabela 6.12 Valor de Referência - VR (caso 2).....	87
Tabela 6.13 Energia Nova a ser contratada a partir de 2010(caso 1).....	88
Tabela 6.14 Energia Nova a ser contratada a partir de 2010(caso 2).....	88
Tabela 6.15 Valor Inicial de sub (caso 1).	89
Tabela 6.16 Valor Inicial de sub (caso 2)	89
Tabela 6.17 Valor de Redução de Energia inicialmente contratada (caso 1).....	89
Tabela 6.18 Valor de Redução de Energia inicialmente contratada (caso 2).....	89
Tabela 6.19 Montante de Reposição no horizonte estudado (caso 1).	89
Tabela 6.20 Montante de Reposição no horizonte estudado(caso 2)	90
Tabela 6.21 Dados de Entrada(caso 1)	90
Tabela 6.22 Dados de Inicialização (caso 1).....	90
Tabela 6.23 Dados de Entrada(caso 2).....	91

Tabela 6.24 Dados de Inicialização (caso 2).....	91
Tabela 6.25 Resultado Simulação 1 (caso 1).....	93
Tabela 6.26 Resultado Simulação 2 (caso 1).....	94
Tabela 6.27 Resultado Simulação 3 (caso 1).....	95
Tabela 6.28 Resultado Simulação 4 (caso 1).....	96
Tabela 6.29 Resultado Simulação 5 (caso 1).....	97
Tabela 6.30 Resultado Simulação 6 (caso 1).....	98
Tabela 6.31 Resultados Obtidos para o caso 2.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura do Setor Elétrico Modelo Antigo .	26
Figura 2.2: Estrutura do Setor Elétrico Modelo Novo.	30
Figura 2.3: Formas de Contratação no Novo Modelo.	33
Figura 2.4: Margens de Contratação no ACR	33
Figura 2.5: Representação esquemática dos Leilões ACR	36
Figura 2.6: Representação do MI	38
Figura 5.1: Linha do Tempo dos Leilões de Energia no ACR.	61
Figura 6.1: Resultados encontrados na Simulação 1 .	94
Figura 6.2: Resultados encontrados na Simulação 2 .	95
Figura 6.3: Resultados encontrados na Simulação 3.	96
Figura 6.4: Resultados encontrados na Simulação 4.	97
Figura 6.5: Resultados encontrados na Simulação 5.	98
Figura 6.6: Resultados encontrados na Simulação 6	99
Figura 6.7: Resultados encontrados para o caso 2.	101

LISTA DE SIGLAS

ACL - Ambiente de Contratação Livre
ACR- Ambiente de Contratação Regulada
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ASMAE - Associação Empresa de Pesquisa Energética
CCAR-Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado
CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCPE - Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão do Setor Elétrico
CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE - Conselho Nacional de Política Energética
DNAEE - Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
EDF - Electricité de France
FPO - Fluxo de Potência Ótimo
GWh/ano - Giga Watt hora por ano
IA - Inteligência Artificial
MCSD - Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficits
MAE - Mercado Atacadista de Energia
MME - Ministério de Minas e Energia
MPI - Método dos Pontos Interiores
MRE - Mecanismo de Realocação de Energia
MW - Mega Watt
MWh - Mega Watt hora
ONS - Operador Nacional do Sistema
PIE - Produtor Independente de Energia
PLD - Preço de Liquidação de Diferenças
PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
VL3 - Valor de Energia do Leilão A-3
VL5 - Valor de Energia do Leilão A-5
VL1 - Valor de Energia do Leilão A-1
VR - Valor de Energia de Referência

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO	15
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
CAPÍTULO 2.REFORMA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	20
2.1 INTRODUÇÃO.....	20
2.2 MODELO DE 1995	22
2.3 MODELO DE 2004 (EM VIGOR).....	31
2.4 DESCRIÇÃO DAS REGRAS DE COMPRA E VENDA DE ENERGIA	31
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	39
CAPÍTULO 3.REVISÃO DE LITERATURA	42
3.1 INTRODUÇÃO.....	42
3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	48
CAPÍTULO 4.FORMULAÇÃO DO PROBLEMA VIA MPI	50
4.1. MÉTODO DOS PONTOS INTERIORES	50
4.2. FORMULAÇÃO DO MPI.....	50
4.3 CONDIÇÕES DE OTIMALIDADE.....	53
4.4 ALGORITMOS PRIMAL DUAL DE PONTOS INTERIORES	54
4.5 OBTENÇÃO DOS PONTOS ESTACIONÁRIOS	54
4.6 ALGORITMO DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA	59
CAPÍTULO 5.FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	60
5.1 INTRODUÇÃO.....	60
5.2 MODELAGEM DO PROBLEMA.....	60
5.3 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS	62
5.4 FUNÇÃO OBJETIVO.....	72
5.5 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA.....	74
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	81
CAPÍTULO 6.RESULTADOS	82
6.1 INTRODUÇÃO.....	82
6.2 DADOS DE ENTRADA.....	82
6.2.1 Energia Existente.....	84
6.2.2 Reposição.....	84
6.2.3 Projeção do Mercado.....	85

6.2.4 Preço de Energia	85
6.2.5 Preços do Mercado de Curto Prazo	86
6.2.6 Valores de Referência - VR	87
6.3 INICIALIZAÇÃO DOS DADOS DE SAÍDA	87
6.3.1 Energia Nova	87
6.3.2 Subcontratação.....	88
6.3.3 Redução	89
6.3.4 Reposição.....	89
6.4 CONFIGURAÇÃO INICIAL DO ALGORITMO	91
6.4.1 Valores dos Pesos.....	91
6.4.2 Critérios de Parada.....	92
6.4.3 Critérios de Convergência.....	92
6.4.4 Parâmetros de Atualização.....	92
6.5 RESULTADOS	93
6.5.1 Análise dos Resultados	99
6.5.2 Considerações Finais	103
CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES.....	104
REFERÊNCIAS	107

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor elétrico brasileiro vem passando por grandes transformações desde a década de noventa, quando a reestruturação do modelo foi implantada com o objetivo de incentivar a expansão do mercado de geração de energia, impor eficiência e competição nos segmentos de geração e comercialização da energia elétrica através do capital privado.

Antes da reestruturação, o modelo vigente era caracterizado pela centralização do planejamento e operação do sistema, verticalização das empresas estatais nos diversos segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia, bem como pela dependência do Estado para as definições estruturais de investimento no setor.

A falta de políticas de incentivo e investimentos no setor para garantir a sustentação da expansão do sistema elétrico fez com que o Estado optasse pela privatização das empresas públicas estaduais e federais. Dessa forma, o período inicial de reforma caracterizou-se por um acúmulo de processos de privatizações de empresas do setor com a intenção de incentivar o capital estrangeiro no setor elétrico. Paralelamente a energia elétrica passou a ter um conceito de mercadoria no mundo e passou a ser comercializada livremente e quando diversos países se reestruturaram, surgiram vários tipos de mercado de energia.

A característica principal de todos eles é que a tomada de decisões se dá através de mecanismos de mercado futuro quando se faz a necessidade de se estabelecer diversos tipos de contratos bilaterais, nas diversas formas para minimizar os riscos envolvidos na compra de energia, principalmente nas regiões onde a volatilidade de preços é alta em função das condições climáticas e sazonais que ocorrem principalmente em sistemas hidrelétricos. Dessa forma as negociações contratuais podem ser fundamentais para que não se tenham prejuízos financeiros de grande porte. Por outro, lado, conforme

Gjelsvik e Mo (2002) e Vale e Azevedo (2003), contratos derivativos (*hedging*), de opções e de futuros podem ser utilizados, para minimizar o risco da volatilidade, impondo, entretanto, custos adicionais de manutenção.

Todas as reformas tiveram seus aspectos peculiares conforme a região, regime de monopólio e o sistema de abertura de capitais. No entanto, a grande maioria das reestruturações se estabeleceu através de leilões, analogamente ao caso brasileiro.

Almeida (2006) identifica grandes heterogeneidades nos processos, tais como na França onde as reformas se fizeram através de leilões de energia da empresa monopolista EDF e no Reino Unido onde praticamente não existem mais consumidores cativos. O autor cita também que diferentes formatos de leilões foram adotados na comercialização e nos diversos mercados de energia.

O *NordPool*, formado pela Noruega, Dinamarca, Finlândia e Suécia, onde o mercado varejista é livre, possui um mercado *spot* que utiliza um leilão duplo fechado de preço uniforme. O *European Energy Exchange - EEX* utiliza dois formatos de leilões. O primeiro é um leilão fechado para contratos horários e de blocos e o segundo, um leilão aberto para negociação de contratos para cargas de base e pico. Já o Reino Unido comercializa seus lotes de energia utilizando um leilão com o preço de fechamento discriminatório. Na Austrália é usado um leilão de oferta fechado de preço uniforme.

As bases da reestruturação brasileira foram o estabelecimento de competição na geração e comercialização e o livre acesso à rede de transmissão e distribuição por qualquer agente do sistema elétrico brasileiro, além de consumidores industriais, o que suscitou a criação de novas formas de comercialização de energia entre as concessionárias e colocou novas questões na regulamentação e na organização de uma indústria tradicionalmente voltada para a provisão de serviços públicos (ROSA, TOLMASQUIM e PIRES, 1998).

As propostas básicas do modelo culminaram na implantação de várias instituições, tais como o Mercado Atacadista de Energia (MAE) onde era negociada livremente toda a energia do sistema interligado, o Operador Nacional do Sistema (ONS) responsável pelo planejamento, operação e despacho do Sistema Interligado e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão regulador e fiscalizador do serviço público de energia elétrica.

A Lei 9074/1995 iniciou o processo de reforma, estabelecendo a definição do consumidor livre que poderia optar pelo seu fornecedor de energia elétrica e do produtor independente de energia elétrica, caracterizando assim a comercialização no ambiente livre, além do ambiente regulado, que já normalmente era imposto antes do processo de reforma.

Entretanto, a falta de uma regulamentação clara que transmitisse confiança no modelo implantado, não incentivou o investimento privado. Além disso, o modelo não considerou qualquer mecanismo redutor de tarifas que pudesse repassar parte dos ganhos de produtividade das distribuidoras aos consumidores finais para não desestimular o processo de privatização e não contemplou qualquer obrigação de realização de investimentos definidos no planejamento indicativo (TOLMASQUIM, OLIVEIRA e CAMPOS, 2002).

Dessa forma, em 2001 o modelo entrou em colapso em virtude da falta de investimentos durante longos anos de gestão estatal bem como das empresas privatizadas desde o início da reestruturação inicializada em 1995, havendo necessidade de adequações e reestruturações, as quais foram impostas em 2004 com a mudança de governo federal ocorrida na época.

As bases do novo modelo foram solidificadas para garantir a confiabilidade no suprimento através da expansão da oferta, a modicidade tarifária e a universalização do atendimento. Para assegurar a modicidade tarifária e o fornecimento de energia com menor preço ao consumidor final, garantindo a competitividade no setor, foi introduzido em 2002 o mecanismo obrigatório de compra e venda de energia através de leilões públicos, os quais obedecem à modalidade dos preços descendentes ou menor preço.

Através das Leis 10.847/2004 e 10.848/2004, alterações significativas na comercialização de energia foram impostas, constituindo-se dois ambientes paralelos: Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL). O ambiente regulado caracteriza a compra de energia em leilões pelas distribuidoras para atender o seu mercado cativo e o ambiente livre contempla a compra de energia através de contratos bilaterais com demais agentes, tais como consumidores livres e comercializadoras, por exemplo.

Da mesma forma, as propostas básicas do novo modelo criaram várias instituições em substituição às anteriormente vigentes, tais como a Câmara de

Comercialização de Energia (CCEE) em substituição ao MAE, a qual ficou responsável dentre outras atividades pela contabilização mensal dos contratos no mercado de curto prazo e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável pelo planejamento nacional do sistema elétrico. A operação do sistema interligado e a coordenação do despacho centralizado de geração continuaram sendo feitas pelo ONS.

1.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

Uma das características principais do novo modelo foi incentivar a eficiência e, portanto a modicidade tarifária para o consumidor cativo, através da realização de compra de energia por leilões públicos na modalidade de menor preço e pela contratação de energia por licitação conjunta do montante necessário a todas as distribuidoras, estimando-se, assim, obter economia de escala na compra da energia nova e repartir os riscos e benefícios dos contratos entre geradores e distribuidoras.

O novo modelo estipulou, como obrigação para todas as concessionárias de distribuição, a contratação de 100% de seu mercado cativo com 1, 3 ou 5 anos de antecedência e com comprovação de “lastro” físico. Dessa forma, todas as concessionárias devem atender 100% de seu mercado cativo, mediante Contratos de Comercialização de Energia no Ambiente Regulado (CCAR), através de leilões de energia pelo critério de menor preço (CORREIA *et al.* , 2003).

Os contratos devem ser celebrados entre as distribuidoras e as concessionárias autorizadas de geração, sob a intermediação da CCEE (CASTRO, 2004).

Além disso, as distribuidoras estão sujeitas a penalidades e prejuízos financeiros se ficarem sub ou sobrecontratadas considerando as devidas flexibilidades e tolerâncias até o valor de 3% do excesso de contratação (sobrecontratação) em relação à demanda inicialmente contratada e uma multa correspondente ao máximo valor entre o valor de referência e o preço de mercado de curto prazo em caso de subcontratação.

Assim, deve-se gerir adequadamente as compras de energia nos leilões vigentes de modo a se evitar prejuízos à distribuidora, ter uma boa previsão de carga que dê subsídios às decisões de quanto e quando se deve

comprar a energia necessária para suprimento de sua demanda. Ou seja, os problemas a serem enfrentados pelas distribuidoras são:

- quais são os montantes de energia a serem contratados nos próximos 5 anos subsequentes;

- quando contratar os respectivos valores de energia e quais são as estratégias das distribuidoras de tal forma que a aversão ao risco em relação às penalidades financeiras impostas seja mínima ou nula.

Assim, fica clara a importância de se desenvolver metodologias que auxiliem na definição das estratégias de compra.

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos nesse sentido, tais como: Correia, Bajav e Correia (2004) que analisam a Teoria dos Leilões para o setor elétrico brasileiro, Azevedo (2004) que estuda a competição entre os agentes que atuam no mercado, Guimarães (2006) que montou uma árvore de decisão que utiliza probabilidades de contratação e cenários de preços de energia; Susteras (2006), Dias (2007) e Buratti (2008) cujo problema da contratação de energia nos leilões foi resolvido através de estratégias para minimizar o risco de sub e sobrecontratações via Algoritmos Genéticos e técnicas híbridas de inteligência artificial (IA).

Devido à escassez de metodologias que permitam e/ou auxiliem essa tomada de decisão e à falta de uma base de dados confiável para projeção do preço da energia elétrica, as distribuidoras estão comprando a energia elétrica através de tentativas empíricas (sujeitas a sensibilidade e experiência dos especialistas) ou técnicas de inteligência artificial (conforme literatura), que demandam horas para obtenção da solução, dependendo da complexidade da modelagem do problema .

Dentre as técnicas de otimização propostas na literatura para a solução do problema destacam-se as técnicas de otimização clássicas ou técnicas de programação matemática e as metaheurísticas. As técnicas de programação matemática, tais como a programação linear, programação não linear são técnicas determinísticas que normalmente fazem uso de cálculo de derivadas da função objetivo para determinar a direção de busca do ponto de solução. Já as metaheurísticas, tais como as técnicas de IA são métodos estocásticos que buscam o ponto de solução através de regras probabilísticas.

A escolha do método de otimização mais adequado para o problema mencionado é um compromisso entre as vantagens relativas de cada técnica de otimização existente. O desempenho de cada técnica pode ser influenciado pelo tipo, tamanho e detalhes de modelagem do problema a ser resolvido.

Dentre as diversas técnicas usualmente mencionadas na pesquisa bibliográfica salientam-se as técnicas de IA, entretanto nada foi constatado a respeito do Método dos Pontos Interiores.

Com o objetivo de se preencher essa lacuna na evolução dos métodos de solução para problemas relacionados à gestão de compra de energia e ofertar uma ferramenta adicional às distribuidoras, resolveu-se esse problema utilizando-se o Método dos Pontos Interiores- MPI. Devido à rapidez dessa formulação proposta, vislumbra-se a utilização da mesma como treinamento para analisar rapidamente diferentes estratégias de exposições nos leilões de energia. Como ilustração, a tabela 1.1 apresenta respectivamente um resumo das principais características das técnicas de otimização clássicas de programação matemática(determinísticas) e as metaheurísticas(estocásticas).

TABELA 1.1 CARACTERÍSTICAS DAS TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Características	
Programação Matemática	Metaheurística
Necessidade do cálculo de derivadas	Não utiliza cálculo de derivadas
Pouco tempo de processamento	Maior esforço computacional e tempo de processamento
Busca do ponto de solução por um único caminho	Busca o ponto de solução através de múltiplos caminhos
Ótimos locais para problemas não convexos	Não garante solução ótima
Necessidade de calibração de problemas de controle ou inicialização das variáveis	Fácil implementação
Adequado para variáveis reais	Adequado para variáveis reais e discretas

Assim, este trabalho busca, dentro das regras vigentes, desenvolver uma modelagem, via Método dos Pontos Interiores, que possa auxiliar a Distribuidora na tomada de decisão quanto a comercialização da energia necessária para o abastecimento confiável e seguro dos seus consumidores.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é descrever uma estratégia para auxiliar as distribuidoras na gestão de compra de energia, minimizando os custos em relação à compra dos montantes necessários em leilões públicos promovidos em ambientes de contratação regulada (ACR) em virtude das incertezas na previsão de seu respectivo mercado de consumo.

Para isto, tem-se como objetivo específico, o desenvolvimento de uma metodologia para apoio de decisão, baseada na técnica tradicional de otimização denominada Método dos Pontos Interiores que contemple as regras impostas pela legislação e que avalie os custos a serem geridos sob os aspectos das novas regras do atual modelo de tal forma a ocasionar menores impactos financeiros.

Essa metodologia estabelece os montantes ideais de energia a serem contratados pelas distribuidoras em diferentes modalidades de leilão com a menor alocação de custo.

Os resultados são ilustrados e avaliados considerando dados gerados aleatoriamente e dados reais de uma Distribuidora utilizados no trabalho de Buratti (2008). Este trabalho de Buratti (2008) avalia o mesmo problema utilizando técnicas de IA e também estabelece a modelagem através da minimização dos custos de contratação da energia, no entanto considera a função objetivo e as regras de repasse com modelagem distinta daquela apresentada neste trabalho, fato pelo qual os dois trabalhos não podem ser comparados numericamente. A avaliação simulada neste trabalho, utilizando o MPI e considerando os principais dados utilizados no trabalho de Buratti (2008) tem como objetivo a certificação da coerência na resposta do algoritmo referente à contratação de energia nos 5 anos subsequentes, considerando o comportamento das estratégias semelhantes em alguns aspectos adotadas nos dois trabalhos. Dessa forma, o objetivo principal é a validação da modelagem adotada com o Método dos Pontos Interiores também como alternativa de utilização em relação a outras técnicas de otimização.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em sete (7) capítulos, iniciando-se pela introdução, que apresenta brevemente a caracterização do problema, motivação pelo assunto e seus objetivos principais.

No capítulo 2 é feita uma explanação detalhada do setor elétrico brasileiro desde a sua reforma em 1995 até a implantação do novo modelo em 2004.

No capítulo 3 é feita uma revisão da literatura existente, abordando o tema em questão sob os diversos aspectos referentes às estratégias e técnicas específicas de estudos probabilísticos adotadas para a previsão ótima de preço de curto prazo, projeção do mercado nos cenários de referência, otimista e pessimista associado às técnicas de IA para a contratação dos montantes ótimos minimizando os riscos a serem considerados na compra da energia em leilões.

No Capítulo 4 é apresentado o algoritmo do Método dos Pontos Interiores versão Primal-Dual.

No Capítulo 5, apresenta-se a formulação matemática proposta, descrevendo-se critérios de otimização, restrições de desigualdades e variáveis de entrada e saída do problema.

Os resultados são apresentados no Capítulo 6, analisando-se a metodologia proposta através de casos presentes na literatura.

Finalmente, no capítulo 7, apresentam-se conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REFORMA DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

2.1 INTRODUÇÃO

Desde 1980, o setor elétrico teve dificuldades para gerar recursos necessários para a expansão do sistema elétrico de potência. Apesar do setor elétrico ser, naquela época, técnica e operacionalmente bem sucedido, não conseguiu evitar os efeitos econômicos e as limitações gerenciais que acompanharam a gestão de investimentos públicos, tais como interesses políticos, opções errôneas de investimento, manipulação tarifária, subsídios cruzados, dentre outros.

O momento da reforma do setor elétrico em 1995 foi com elevado risco de déficit de energia, caracterizado pela falta de investimento pelo governo durante vários anos o que acarretou em necessidade de reestruturações do setor para garantir a expansão do sistema elétrico e a oferta de energia ao menor custo do serviço.

Nessa época, o setor era considerado um monopólio por natureza e estritamente estatal e verticalizado, onde a maioria das empresas de energia elétrica que atuavam no segmento de geração, transmissão e distribuição era de propriedade e gestão dos governos federais e estaduais.

Um monopólio natural é tipicamente eficiente quando apresenta economia de escala avassaladora, ou seja, somente uma empresa é capaz de produzir mais a custo menor do que várias empresas, o que não era o caso brasileiro naquele momento.

Para o caso da energia elétrica, o monopólio natural está presente nos casos de rede de transmissão e distribuição, pois é totalmente redundante e inviável técnica e economicamente a existência de duas ou mais redes elétricas de propriedades distintas em um mesmo sistema elétrico.

Além disso, tanto o produto energia elétrica quanto os serviços associados a ela são essenciais à sociedade e desta forma a demanda não

sofre grandes variações com a variação do preço, caracterizando a inelasticidade da demanda.

Dessa forma, o consumidor é incapaz de disciplinar o monopolista, cabendo esta função ao órgão regulador. A regulamentação se fez necessária para que os consumidores não fiquem sujeitos a abusos e para salvaguardar a concorrência e o bom funcionamento do sistema.

A reforma do setor elétrico veio com o pretexto de garantir a abertura e competição no setor para que investimentos fossem retomados e foi estruturada para permitir uma rápida retomada da expansão da oferta e assegurar o fornecimento a longo prazo, tendo como premissa a qualidade satisfatória com preço justo.

Paralelamente à reforma, o governo iniciou o processo de privatização o que gerou grande expectativa e interesse pelos capitais privados em virtude do porte do setor elétrico nacional com faturamento da ordem de dezenas de bilhões de reais.

A necessidade de capitalizar o governo rapidamente sem a definição clara das regras e obrigações dos novos agentes trouxe reflexos negativos para a eficiência da reforma, que se iniciou com a publicação das seguintes leis e decretos:

- **Lei nº 8.631/1993** promoveu a desqualificação tarifária, extinguiu o regime de remuneração garantida das concessionárias, estabeleceu a obrigatoriedade de celebração de contrato de suprimento entre empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica, e promoveu encontro de contas entre os devedores e credores;
- **Lei nº 8.987/95** estipulou que as concessões e prestações de serviços públicos federais passassem a ser outorgadas por meio de licitação pública e definiu que os critérios para a realização da licitação seriam determinados pelo menor valor da tarifa do serviço público a ser prestado e pela maior oferta de outorga da concessão, no caso de ser paga ao poder concedente;
- **Lei nº 9.074/95** estabeleceu normas para outorgas e prorrogações de concessões e permissões de serviços públicos, criou a figura do produtor Independente de Energia (PIE) e dos consumidores livres que podiam ter a opção de escolher os seus fornecedores;

- **Lei nº 9.427/96** criou a ANEEL com a responsabilidade de regular e fiscalizar o serviço público de energia elétrica em conformidade com as diretrizes do governo federal.
- **Decreto nº 2.003/96** regulamentou a produção de energia por Produtor Independente de Energia e por Autoprodutor, garantindo a esses agentes o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição das concessionárias, mediante pagamento de encargos de uso da rede;
- **Portaria nº 459/97** estabeleceu as condições gerais de acesso ao sistema de transmissão e distribuição definindo zonas geo-elétricas do território nacional de acordo com a estrutura física dos sistemas;
- **Lei nº 9.648/98** definiu os prazos dos contratos iniciais mantendo os contratos vigentes na época até 2002 e a partir de 2003 impôs a redução de 25% ao ano, instituiu o MAE - Mercado Atacadista de Energia e criou o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS);
- **Resolução nº 290/2000** homologou as regras do MAE e fixou as diretrizes para sua implantação.

2.2 MODELO DE 1995

O processo de reformulação das regras setoriais foi iniciado em 1995 com a contratação da consultoria internacional Coopers & Lybrand que idealizou uma modelagem que pudesse estabelecer o livre acesso à rede de transmissão e distribuição de qualquer agente do sistema elétrico brasileiro além de grandes consumidores industriais e estipular novas formas de comercialização entre as concessionárias, inserindo novas questões na regulamentação e na organização de uma indústria tradicionalmente voltada para a provisão de serviços públicos (ROSA, TOLMASQUIM e PIRES, 1998).

O relatório emitido não recomendou a livre negociação no mercado de curto prazo. Em virtude das características do sistema brasileiro, os consultores indicaram o regime denominado “tight pool”, onde a energia podia ser comprada pelo mercado de curto prazo ou por contratos bilaterais e o despacho feito de forma centralizada e independente de transações realizadas no mercado.

A venda de energia até o início da reestruturação era regulamentada pelo DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) e

destinava-se somente a consumidores cativos, ou seja, aqueles que são obrigatoriamente supridos por uma concessionária local.

A primeira reforma do setor elétrico brasileiro iniciou com a publicação da Lei nº 9.074/95, que criou o conceito de consumidores livres determinados dentro de certos critérios de carga e de tensão e também dos produtores independentes de energia elétrica (PIE) agentes que podem comercializar a energia elétrica por sua conta e risco, produzida após a autorização ou concessão do poder concedente.

Com a reestruturação, a energia elétrica passou a ser vista como uma “*commodity*” passível de negociação em um ambiente competitivo. Para viabilizar a competição no setor foi necessário separar a “*commodity*” dos serviços a ela associados. No Brasil esta separação foi feita através da desverticalização das empresas de energia elétrica, ou seja, da separação dos ativos de geração, transmissão e distribuição que eram detidos pela mesma empresa e também pela separação da tarifa de fornecimento em tarifas de uso do sistema elétrico, tarifas de energias para consumidores cativos, tarifas de uso do sistema e preço de energia para o caso de consumidores livres.

Dessa forma, iniciou-se o processo desestatização de todo o sistema elétrico brasileiro com o pretexto de que esta era a única maneira para garantir a competição no setor elétrico.

Assim um dos primeiros passos no processo de reestruturação foi a desverticalização com a separação das atividades de geração e comercialização, potencialmente competitivas e as atividades de transmissão e distribuição, monopólios naturais que devem ser de livre acesso e não podiam desempenhar atividades de compra e venda de energia.

Também a operação e o planejamento do sistema elétrico tiveram modificações com a reestruturação em virtude da necessidade de maior confiabilidade e eficiência para a obtenção de uma energia mais barata.

Assim sendo outros agentes foram criados para determinadas atividades específicas tais como:

- **ONS - Operador Nacional do Sistema:** criado com a função de executar as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia nos sistema interligados, assegurando a qualidade e

economia no suprimento ao menor custo operacional, ou seja, definindo o despacho ótimo centralizado.

Nesse modelo, o planejamento da operação e o despacho eram centralizados e impositivos devido às características hidrológicas do sistema elétrico brasileiro. Independente das tratativas comerciais de cada central geradora, o ONS decidia quais unidades deveriam despachar em um dado momento.

- **CCPE - Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos:** criado como agente planejador do sistema responsável pelos estudos de planejamento da expansão do sistema, adequando oferta e geração aos requisitos de demanda futura e confiabilidade do sistema.

Nesse modelo, o planejamento de longo prazo para a expansão do sistema de geração e transmissão deixou de ser determinativo e passou a ser indicativo na geração com horizontes de 12 anos e foram implantados com fins orientativos para identificar os programas de investimentos do sistema a custo marginal. Não existia qualquer instrumento legal que obrigasse qualquer agente a realizar os investimentos, fato esse que colaborou como uma das causas para o insucesso desse modelo.

O planejamento de curto prazo (cinco anos) era elaborado em paralelo com o ONS em conformidade com os pedidos de acesso e projetos em andamento.

- **ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica:** criada como agente regulador e fiscalizador com as atribuições de controlar preços de serviço da natureza monopolista, evitar abusos na estrutura de custos, definir padrões de qualidade e critérios operacionais e estabelecer condições gerais de contratação do acesso e uso dos sistemas de transmissão e distribuição.

- **ASMAE - Administradora do Mercado Atacadista de Energia:** criada como agente regulador de mercado com as atribuições de definir o preço do Mercado Atacadista de Energia – MAE para a energia elétrica de tal forma que refletisse o custo marginal do sistema, criasse um ambiente onde os comercializadores pudessem escolher livremente de quem comprar e para quem vender a energia, oferecesse condições para que a energia não contratada pudesse ser comercializada ao preço MAE, realizasse medições comerciais, contabilizasse e liquidasse as transações de energia.

- **MAE – Mercado Atacadista de Energia ou Mercado Spot:** criado em setembro de 2000 para o processamento das atividades comerciais de compra e venda de energia elétrica por meio de contratos bilaterais e de negociações de curto prazo.

Os agentes participantes do MAE eram centrais geradoras com capacidade instalada maior ou igual a 50MW, agentes de comercialização com carga igual ou superior a 1999 GWh/ano, consumidores livres que exerciam a opção de compra direta de geração e titulares de autorização para comercialização de energia produzida em aproveitamentos binacionais, importada ou exportada através de interligações internacionais.

A tendência era negociar a maior parte da energia em contratos bilaterais, evitando a volatilidade do mercado de curto prazo (preço *spot*), em função dos níveis dos reservatórios e a restrição de geração disponível em um determinado momento. Os preços contratuais de energia eram desregulamentados e acordados entre as partes, a não ser os Contratos Iniciais que se referiam aos contratos de suprimento existentes antes do processo de reestruturação.

Segundo Úmbria (1999), as premissas básicas do MAE eram:

- a comercialização de energia seria feita em bases livremente ajustadas entre as partes;
- o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição era garantido mediante pagamento de encargos e nas condições estabelecidas pela ANEEL;
- os preços de energia no mercado de curto prazo deviam considerar critérios de otimização, requisitos de carga, custo do *déficit*, restrições de transmissão, redução voluntária de demanda e interligações internacionais.

A Figura 2.1 apresenta a participação de todos os agentes do modelo naquela época, conforme a CCEE.

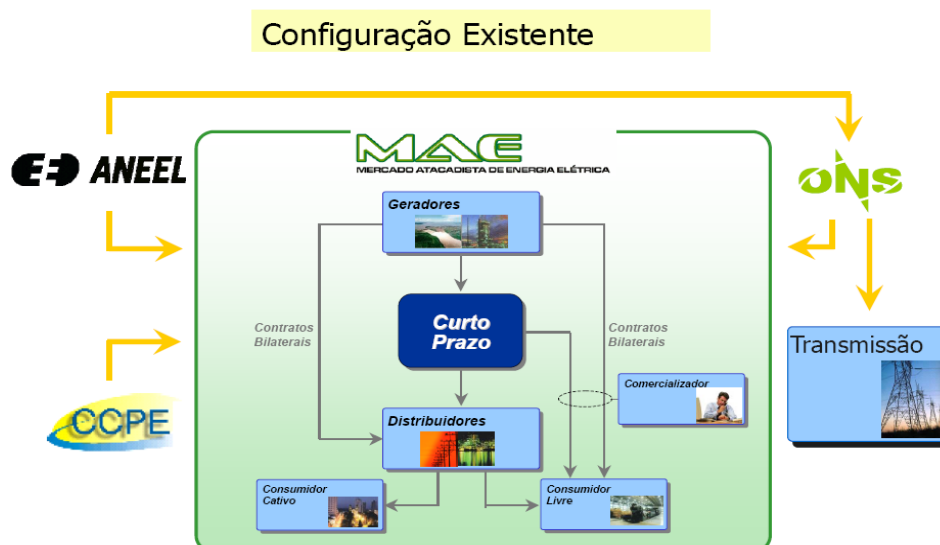


FIGURA 2.1: ESTRUTURA DO SETOR ELÉTRICO MODELO ANTIGO
 FONTE: CCEE (2009)

A fim de compartilhar riscos hidrológicos, foi criado também, o Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) do qual participavam as usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema.

Nesse mecanismo (ainda em vigor), as usinas com excedentes de geração, em relação às suas correspondentes energias asseguradas transferem créditos para aquelas deficitárias, até que todas as usinas participantes do MRE atinjam os níveis de energia assegurada (SILVA, SCHUCH e BOFF, 2006). Se a produção total do MRE for inferior ao total de energia assegurada, a energia efetivamente gerada é realocada entre os participantes proporcionalmente às energias asseguradas destes. Ao contrário, se a produção total das usinas participantes é superior ao total de energia assegurada, a diferença é definida como energia secundária do MRE.

Dessa forma, o MRE permite a transferência de energia das usinas superavitárias para as deficitárias quando o volume total produzido pela usinas do MAE for suficiente para atender a energia garantida global. Esta contabilização é feita considerando uma tarifa suficiente para cobrir os custos de operação das usinas.

Já o processo de contabilização da energia era realizado em base mensal, através da coleta dos dados de medição, calculando-se as alocações do MRE e considerando os contratos registrados. A fim de determinar os

pagamentos líquidos aos agentes, apenas os montantes de energia não contratados eram liquidados no MAE. A liquidação dos contratos era tratada diretamente pelas partes envolvidas.

A formação do preço de energia negociada no MAE se fazia pela inter-relação dos dados utilizados pelo ONS para otimização do sistema e dos dados informados pelos agentes.

O dados eram processados através de modelos de otimização para obtenção do custo marginal de operação para cada um dos sub-mercados do sistema.

As diferenças entre as energias alocadas no MRE ou do consumo líquido de cada agente (já abatidas as perdas) e seu volumes contratuais registrados no MAE eram contabilizadas e valoradas ao preço do MAE.

Vários fatores contribuíram para o fracasso deste modelo, dentre outras podem-se destacar a falta de regulamentação específica que ocasionou a desconfiança dos novos agentes e a falta de investimentos no setor, bem como a falta de dispositivos legais que obrigassem as distribuidoras a repassarem os ganhos de produtividade às tarifas de energia dos consumidores cativos.

Com isto não houve expansão do sistema de geração suficiente para atender a expansão da oferta e em 2001 aconteceu o racionamento nas regiões Sudeste, Nordeste, Centro-Oeste e Norte, fazendo com que o preço no atacado ficasse além do nível geral dos preços praticados pelo mercado, provocando inadimplência dos fluxos financeiros e prejudicando a capacidade de geração dos recursos das empresas para a manutenção adequada da prestação do serviço.

Além disso, a operação do sistema elétrico deveria determinar o despacho de energia de forma a garantir as restrições de segurança e o controle em tempo-real da geração e consumo dos grandes blocos de energia, que deveria ser extremamente eficiente para garantir a confiabilidade operacional do sistema. Entretanto, isto não ocorreu em virtude das ferramentas e instrumentos para a modelagem necessitarem de desenvolvimentos complementares.

Aliado a este fato, a falta de investimentos na expansão do sistema de transmissão fez com que o funcionamento do sistema operasse com restrições

impedindo o despacho de geradores de forma mais eficiente, ocasionando assim acréscimos no custo de operação.

Também não houve a definição de reembolso pelos custos dos serviços ancilares necessários para assegurar uma operação confiável e de qualidade em virtude das dificuldades em identificar os usuários e os agentes provedores dos serviços.

2.3 MODELO DE 2004 (EM VIGOR)

A proposição de um novo modelo veio com a mudança de governo em 2004, em virtude dos fatos anteriormente mencionados e com o propósito de garantir a expansão da oferta, a modicidade tarifária e a universalização do atendimento.

Na mesma época, surgiram as primeiras centrais termoeletricas a ciclo combinado operando no sistema elétrico brasileiro. Assim, a incerteza no crescimento da demanda ficou menos relevante, pois sua construção passou a ter um prazo em torno de dois a três anos. Além disto, as unidades deste tipo de usina eram de médio porte, desaparecendo a economia de escala. Este avanço tecnológico possibilitou a abertura do setor e deixou a expansão do sistema a cargo dos investidores privados (RESENDE, 2006).

Para evitar efeitos especulativos na contratação de energia, principalmente no que se referem aos preços no mercado de curto prazo as novas regras estabelecem que todos os contratos de suprimento de energia devem estar 100% respaldados por um lastro de geração.

Em dezembro de 2003, o Ministério de Minas e Energia (MME) publicou o Modelo Institucional do Setor Elétrico, formalizando a proposta do governo para a reformulação do setor elétrico.

A Lei 10.848, de 15 de março de 2004 estabeleceu diretrizes para a comercialização de energia elétrica, mantendo algumas instituições já estabelecidas no setor elétrico e alterando a função de outras.

Os principais aspectos dessa lei são descritos a seguir:

- implantação de dois ambientes de comercialização de energia elétrica: Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL);

- operação centralizada, coordenada pelo Operador Nacional do Sistema;

- planejamento da expansão da oferta de energia e definição da energia a ser contratada elaborada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE);

- comercialização das diferenças contratuais na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) a preço definidos para o mercado de curto prazo, com base no custo marginal de Operação (CMO), chamado de preço de liquidação de diferenças (PLD).

Os agentes Institucionais passaram a ser:

- **Empresa de Pesquisa Energética – EPE:** instituição técnica especializada de direito privado criada pela Lei 10.847 de 15 de março de 2004, responsável pela prestação serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento energético de médio e longo prazo para o setor elétrico.

As seguintes atribuições são de responsabilidade da EPE: realizar estudos e projeções da matriz energética nacional; elaborar e publicar o balanço energético nacional; promover estudos e pesquisa de mercado para a determinação dos aproveitamentos energéticos; obter a licença prévia ambiental e a declaração de disponibilidade hídrica necessárias às licitações envolvendo empreendimentos de geração hidrelétrica e de transmissão de energia elétrica, selecionados pela própria EPE; desenvolver estudos de impacto social, viabilidade técnico-econômica e sócio-ambiental para os empreendimentos de energia elétrica e de fontes renováveis.

- **Câmara de Comercialização de Energia – CCEE:** instituição criada pela Lei 10.848/04 que sucedeu o MAE, tendo como principais atribuições a contabilização e a liquidação dos contratos de compra e venda de energia no mercado de curto prazo, além de funcionar como um “*pool*”, que gerencia todos os contratos a serem firmados por cada um dos geradores com as distribuidoras.

- **Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE:** instituição que atua no Âmbito do MME – Ministério de Minas e Energia e sob sua coordenação direta, acompanha e avalia a continuidade e a segurança do abastecimento eletro-energético no país, sendo presidido pelo Ministro do

os preços eram abertos e ascendentes. O vencedor da licitação ganhava o empreendimento que oferecesse o maior preço pelo empreendimento.

A partir de 2004, a concessão passou a ser outorgada ao licitante que oferecesse menor tarifa de geração de energia.

As geradoras estatais passaram a comercializar sua energia obrigatoriamente por meio de licitação, tanto no ambiente regulado como no livre e a comprovar garantias físicas de energia e potência para constituir lastro nos contratos de compra e venda de energia firmados na CCEE (CASTRO e FILHO, 2005).

O segmento de transmissão não sofreu alterações significativas em relação ao modelo antigo, pois sempre foi regulado e não competitivo. Nesse caso, as transmissoras são ressarcidas pelo investimento de expansão do sistema de transmissão e a concessão das obras de expansão do sistema é feita através de licitações promovidas pela ANEEL.

Já, o setor das distribuidoras sofreu grandes modificações no processo de compra e venda de sua energia, como a seguir descrito em detalhes.

2.4 DESCRIÇÃO DAS REGRAS DE COMPRA E VENDA DE ENERGIA PARA AS DISTRIBUIDORAS

As principais modificações para as distribuidoras é que elas devem atender 100% do seu mercado, mediante contratação de energia em leilões públicos, além de prever com antecedência de 5 anos o seu mercado de consumo.

A garantia de repasses integrais do valor da energia adquirida em leilões à tarifa dos consumidores é limitada a 3% de sobrecontratação. Nos casos de subcontratação é admitido o repasse do menor valor entre o Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) e o Valor de Referência (VR). Dessa forma, a distribuidora pode ficar exposta por sobre ou subcontratação assumindo o risco de adquirir ou vender energia no mercado de curto prazo, além de penalidades impostas pela legislação.

As distribuidoras também podem reduzir os contratos de energia com os geradores existentes na mesma proporção que tiverem reduzido o seu mercado livre, em virtude da perda de consumidores livres. Também são

permitidas reduções anuais nos contratos com as geradoras até o limite de 4% do total inicialmente contratado em virtude de oscilações no mercado cativo.

Também pequenas distribuidoras com mercado inferior a 500 GWh/ano podem adquirir energia através de leilões do ACR, licitação pública, geração distribuída e tarifa regulada de seu atual supridor.

A contratação de energia proveniente de empreendimentos de geração distribuída deve ser precedida de chamada pública promovida diretamente pelo agente de distribuição de forma a garantir publicidade, transparência e igualdade de acesso aos interessados e é limitada a 10% da carga da distribuidora.

Como já mencionado, o novo modelo criou dois modelos de contratação:

- ambiente de contratação regulada (ACR), onde a contratação de energia é feita para o atendimento aos consumidores de tarifas reguladas por meio de contratos regulados com o objetivo de assegurar a modicidade tarifária;

- ambiente de contratação livre (ACL), onde a contratação de energia é feita para atendimento a consumidores livres por intermédio de contratos livremente negociados.

No ambiente de contratação regulada a operação de compra e venda de energia é realizada por meio de leilões de licitação envolvendo as distribuidoras de energia elétrica, onde os agentes vendedores são os titulares da concessão, permissão ou autorização para gerar, importar e comercializar energia elétrica.

No ambiente de contratação livre, a operação de compra e venda de energia é realizada por meio de contratos bilaterais envolvendo agentes de geração, comercialização, importação e exportação e consumidores livres, não sendo permitida a distribuidora a aquisição de energia neste segmento.

A Figura 2.3 ilustra as formas de contratação de energia nos ambiente de contratação regulada e livre.



FIGURA 2.3: REPRESENTAÇÃO DAS FORMAS DE CONTRATAÇÃO NO NOVO MODELO
 FONTE: CCEE (2009)

Como já comentado, os agentes de distribuição estão sujeitos a exposições provocadas por sobrecontratações e subcontratações. Assim, estão previstos alguns modos adicionais para diminuir esses riscos:

- Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficits – MCSD no qual a sobra da energia contratada pelas distribuidoras deve ser repassada às distribuidoras que não tiveram 100% do seu mercado contratado;
- devolução de 4% do montante contratado pela distribuidora para fins de ajuste do mercado em função de erros na previsão de carga. Essa devolução é feita através da energia existente;
- Leilões de ajustes, A-1 e A-3 que serão discutidos na sequência.

A Figura 2.4 descreve as margens de contratação e exposição de cada distribuidora.

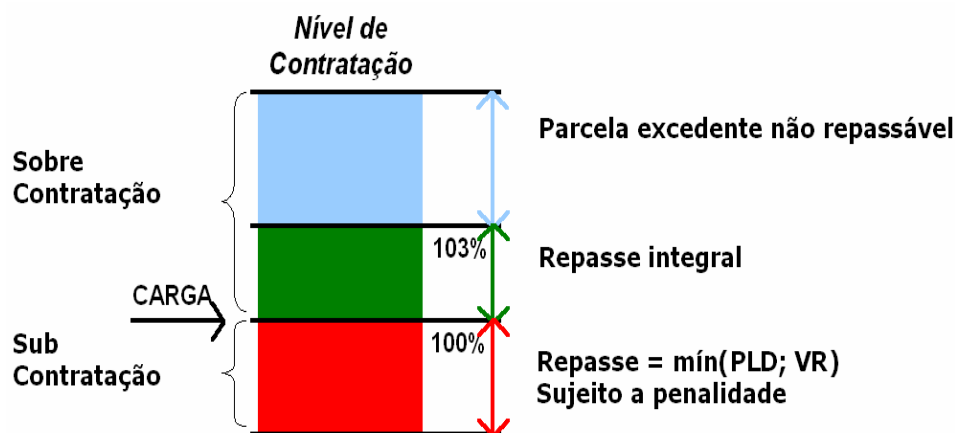


FIGURA 2.4: MARGENS DE CONTRATAÇÃO NO ACR
 FONTE: DIAS (2007)

Um dos pilares da nova regulamentação do setor elétrico é a contratação de energia para os consumidores cativos através de leilões de mínimo custo, realizando-se leilões separados para compra de energia nova (expansão) e existente (atendimento ao mercado atual). Para isto, prevê-se a realização de dois tipos de leilão a cada ano, de energia nova e energia existente (AZEVEDO, 2004).

O objetivo de se ter leilões separados para energia existente e nova é viabilizar a expansão através de contratos de longa duração com nova capacidade e permitir que as distribuidoras gerenciem incerteza na demanda e saída de consumidores livres através de um “portfólio” de contratos de menor duração e com regras de descontração com geradores existentes.

De outra forma, a contratação por meio de um leilão que não separe a energia existente da energia nova poderia resultar em expansão insuficiente, ou ainda, alocar todo o risco da eventual expansão excessiva e da movimentação dos consumidores livres exclusivamente aos distribuidores e consumidores regulados, isentando completamente os geradores (AZEVEDO, 2004).

Existem 3 tipos de leilões, estipulados pelo novo modelo, através do Decreto 5163/2004 :

- leilões de energia gerada por usinas existentes “A -1”;
- leilões de energia gerada por novos empreendimentos de geração “A-3 e A-5”;
- leilões de ajuste “A”.

O Decreto 5163/2004 também estabelece os seguintes conceitos:

- Ano base “A” - ano de previsão para o início de fornecimento de energia elétrica adquirido por agentes de distribuição por meio de leilões que trata o Decreto 5163/2004

- Ano base “A-1” - ano anterior ao ano - base “A” em que se realizam os leilões de compra de energia elétrica;

- Ano base “A-3” - terceiro ano anterior ao ano base “A” em que se realizam os leilões de compra de energia elétrica;

- Ano base “A-5” - quinto ano anterior ao ano base “A” em que se realizam os leilões de compra de energia elétrica.

Os Leilões “A-1” são leilões com oferta de energia produzida por empreendimentos existentes.

Para este tipo de leilão o MME define o preço máximo de aquisição da energia, que não pode superar a média dos valores obtidos nos leilões A-5, cujo início de suprimento coincida com o ano do leilão de energia existente A-1.

Cada agente de distribuição pode contratar energia referente ao seu montante de reposição, definida como a quantidade de energia dos contratos que se extinguem no ano da realização dos respectivos leilões em questão, subtraídas as reduções dos montantes já contratados. O limite de contratação foi estipulado em 5 % acima do valor do montante de reposição contratado, se houver disponibilidade.

Também pode haver a redução de 4% do montante contratado pela distribuidora para fins de ajuste do mercado em função de erros na previsão de carga.

Os contratos celebrados têm vigência de 5 a 15 anos.

Os Leilões A-3 são leilões com oferta de energia produzida por novos empreendimentos licitados e com a obrigação de entrarem em operação em um prazo de 3 anos.

Em virtude do prazo estipulado para a construção dos empreendimentos a prioridade de participação desse tipo de leilão é de geração térmica. Em virtude do custo da energia térmica ser maior que a energia hidráulica é importante que a Distribuidora participe desse tipo de leilão para casos de ajuste de seu mercado contratado.

É garantido o repasse total dos custos da energia adquirida até o limite de 2% do mercado do agente de distribuição.

Os Leilões A-5 são leilões realizados anualmente, destinados a oferta da energia produzida por novos empreendimentos licitados e com a obrigação de entrarem em operação em um prazo de 5 anos.

Em virtude do prazo estipulado para a construção dos empreendimentos a prioridade de participação desse tipo de leilão é de geração hidráulica, entretanto não se descarta a participação de térmicas, o que pode levar a distorções no custo da energia adquirida.

Em ambos os leilões, A-3 e A-5, os contratos celebrados têm vigência de 15 a 35 anos, com início do suprimento no ano “A”.

Os contratos de Leilões de Ajuste têm prazo de suprimento de até 2 anos, com o fornecimento da energia no prazo máximo de 4 meses para fins de possibilitar a complementação pelos referidos agentes do montante de energia elétrica necessário para atendimento às suas cargas.

O montante de energia contratado não pode exceder a 1% da carga total contratada de cada agente de distribuição.

A Figura 2.5 ilustra as formas de contratação de energia no ambiente de contratação regulada.

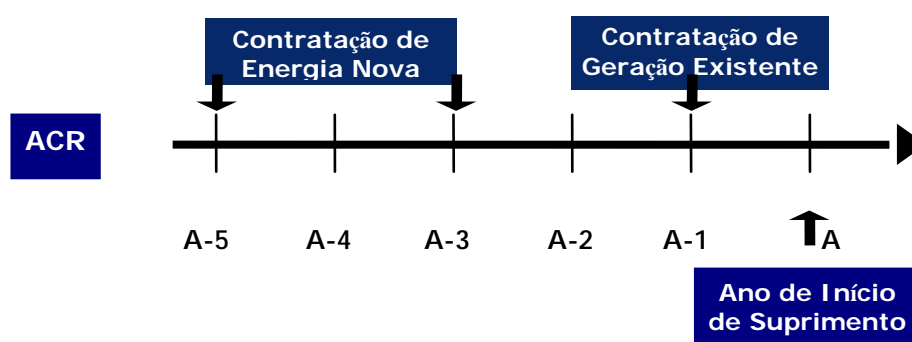


FIGURA 2.5: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS LEILÕES NO ACR

Para regularizar o repasse da energia adquirida nos leilões às tarifas dos consumidores finais, a ANEEL calcula a Valor Anual de Referência (VR) de acordo com a seguinte equação:

$$VR = (VL5 \times Q5 + VL3 \times Q3) / Q5 + Q3 \quad (2.1)$$

onde

VL5: valor da energia adquirida no ano A-5, em R\$/MWh;

VL3: valor da energia adquirida no ano A-3, em R\$/MWh;

Q5: montante de energia adquirida no ano A-5, em MWh;

Q3: montante de energia adquirida no ano A-3, em MWh;

VR: valor de referência a ser publicado pela ANEEL, em R\$/MWh.

Para os leilões A-5 o repasse nos três primeiros anos é feito pelo VR determinado pela equação (2.1), mas a partir do quarto ano há o repasse integral do valor da compra.

Para os leilões A-3 o repasse nos três primeiros anos é feito pelo VR determinado pela equação (2.1), limitado ao montante de 2% do mercado da distribuidora no ano A-5. A partir do quarto ano, há o repasse integral do valor da compra limitado também ao montante de 2% do mercado da distribuidora no ano A-5. O valor da parcela que exceder esse limite é valorada pelo mínimo valor entre VL5 e VL3.

Para os leilões de energia existente, os custos da energia adquirida são repassados integralmente aos consumidores finais.

Para os leilões de ajuste e de geração distribuída, o repasse é até o limite do VR.

Para os casos de leilão de energia existente, cada agente de distribuição pode contratar energia referente ao seu montante de reposição, definida como a quantidade de energia dos contratos que se extinguem a partir de 2009. O limite máximo de contratação estipulado é de 5 % acima do valor do montante de reposição contratado, se houver disponibilidade. Porém, existe um limite mínimo para este tipo de recontração, definido pela seguinte equação:

$$LI = MR - 4\% MI \quad (2.2)$$

onde

LI: limite inferior de recontração, em MWh;

MR: montante de reposição, em MWh;

MI: montante inicial contratado, considerado para a apuração do MR, em MWh.

A Figura 2.6 demonstra graficamente o cálculo de MI.

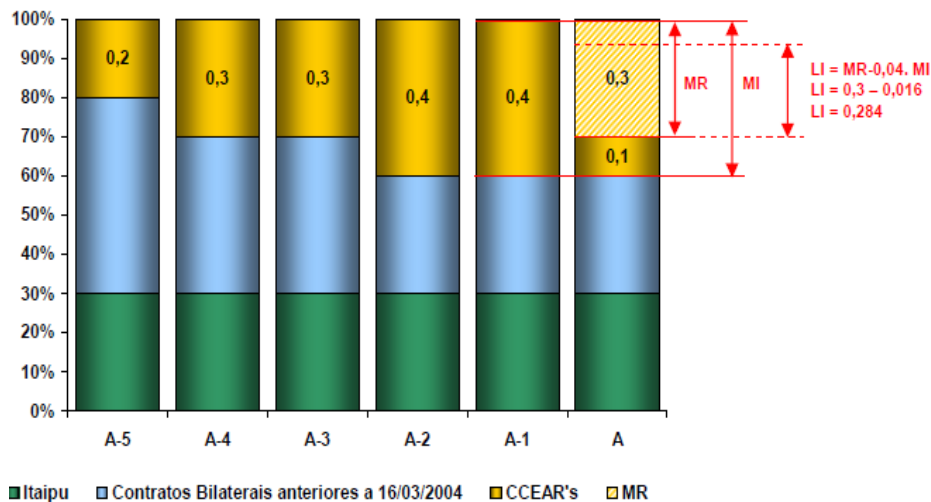


FIGURA 2.6: REPRESENTAÇÃO DO CÁLCULO DE MI
 FONTE: ZANFELICE (2007)

Caso a contratação resultante de leilões de energia existente seja menor que o limite inferior de recontração (LI) os repasses dos custos de aquisição da energia nova A-5 e A-3 são limitados pelo Valor de Referência de Energia Existente (VRE), determinado pela equação:

$$VRE = VR \times VLE / VL5 \quad (2.3)$$

onde

VR: valor de referência determinado pela equação (2.1), em R\$/MWh;

VLE: valor médio ponderado da energia adquirida nos leilões de energia existente A-1, em R\$/MWh;

VL5: valor da energia adquirida no ano A-5, em R\$/MWh.

Nos três primeiros anos, este mecanismo de repasse deve ser aplicado à parcela de energia adquirida nos leilões A-3, equivalente à diferença entre o limite inferior de recontração e a parcela efetivamente contratada. Nos casos em que a energia adquirida nos leilões A-3 for insuficiente para a aplicação do mecanismo de repasse, é considerada a energia adquirida no ano A-5.

O mecanismo de repasse citado não se aplica caso o limite inferior de recontração não seja atingido por insuficiência de energia ofertada nos leilões de energia existentes A-1.

Na hipótese do agente distribuidor não atender a totalidade de sua carga, a energia adquirida no mercado de curto prazo é repassada ao menor valor entre PLD e VR.

O quadro (2.1) apresenta um resumo dos mecanismos de repasse com seus devidos limites.

RISCOS	VALOR	MECANISMOS
Exposição por Sobrecontratação	Até 103% do mercado	Repasse de custos de aquisição para o consumidor final
	Sem limites	MCSD – Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficits (Ex-Ante e Ex-Post)
		Redução do CCEAR pela saída de consumidores potencialmente livres (precedido do MCSD)
Até 4% do CCEAR (energia existente)	Redução do CCEAR, a critério da distribuidora, de até 4% do montante contratado para adaptar-se aos desvios do mercado face às projeções de demanda (precedido do MCSD)	
Exposição por Subcontratação	Até 2% da carga verificada em A-5	Leilão A-3
	Até 1% da carga verificada em A-2	Leilão A-1
	Até 105% do Montante de reposição	Montante de Reposição
	Até 1% da carga da distribuidora	Leilão de Ajuste
	Sem limites	MCSD – Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficits (Ex-Ante e Ex-Post)

QUADRO 2.1: MECANISMOS DE REPASSE E SEUS LIMITES
 FONTE: DIAS (2007)

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo procurou-se descrever o histórico do setor elétrico brasileiro desde a reestruturação iniciada em 1995 até os dias de hoje, considerando as fases de implantação do modelo de livre mercado (1995-2003) e o novo modelo implantado em 2004 e em vigor atualmente. Procurou-se também comparar as características individuais dos dois modelos em seus ambientes específicos. Constatou-se a necessidade de mudanças drásticas no setor elétrico no momento da reestruturação em virtude da presença do

monopólio estatal e do gerenciamento ineficiente. A proposta de abertura do setor para incentivar a competição e a expansão de oferta de energia deu início ao processo de privatização o que serviu somente para capitalizar o governo federal. Apesar de todo o empenho na adequação da legislação vigente ainda faltou regulamentação específica que pudesse assegurar ao capital privado o retorno dos investimentos necessários naquele momento. Dessa forma não houve a expansão da oferta da maneira prevista o que ocasionou o racionamento de energia em 2001. Aliado a este fato, os mecanismos de repasse às tarifas dos consumidores ainda não estavam legalmente implantados, bem como o sistema de leilões implantados pelo preço ascendente somente ocasionou aumento das tarifas o que contribuiu para o fracasso do modelo antigo e a instituição do novo modelo em 2004.

Conclui-se que a implantação do novo modelo corrigiu várias distorções do modelo antigo, reformulando o sistema de comercialização através de leilões com preço descendentes e instituindo legalmente mecanismos de repasse às tarifas, entretanto aumentou os riscos no processo de comercialização de energia, considerando limites de contratação de 100% do mercado a ser atendido pela distribuidora e atribuindo penalidades nos casos específicos de sub e sobrecontratação, fato este que pode gerar prejuízos financeiros de grande porte. Assim sendo, o modelo atual impõe de certa forma que as distribuidoras estabeleçam as suas estratégias de risco para a gestão da compra de energia em ambientes regulados.

As principais diferenças entre os diversos modelos podem ser observadas pelo Quadro 2.2.

Modelo Antigo (até 1995)	Modelo de Livre Mercado (1995 a 2003)	Novo Modelo (2004)
Financiamento através de recursos públicos	Financiamento através de recursos públicos e privados	Financiamento através de recursos públicos e privados
Empresas verticalizadas	Empresas divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição e comercialização	Empresas divididas por atividade: geração, transmissão, distribuição, comercialização, importação e exportação.
Empresas predominantemente Estatais	Abertura e ênfase na privatização das Empresas	Convivência entre Empresas Estatais e Privadas
Monopólios - Competição inexistente	Competição na geração e comercialização	Competição na geração e comercialização
Consumidores Cativos	Consumidores Livres e Cativos	Consumidores Livres e Cativos
Tarifas reguladas em todos os segmentos	Preços livremente negociados na geração e comercialização	No ambiente livre: Preços livremente negociados na geração e comercialização. No ambiente regulado: leilão e licitação pela menor tarifa
Planejamento Determinativo - Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS)	Planejamento Indicativo pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)	Planejamento pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE)
Contratação: 100% do Mercado	Contratação : 85% do mercado (até agosto/2003) e 95% mercado (até dez./2004)	Contratação: 100% do mercado + reserva
Sobras/déficits do balanço energético rateados entre compradores	Sobras/déficits do balanço energético liquidados no MAE	Sobras/déficits do balanço energético liquidados na CCEE. Mecanismo de Compensação de Sobras e Défis (MCSO) para as Distribuidoras.

QUADRO 2.2: CARACTERÍSTICAS DOS DIVERSOS MODELOS DESDE A REFORMA DO SETOR ELÉTRICO
 FONTE: CCEE (2009)

CAPÍTULO 3

REVISÃO DE LITERATURA

3.1 INTRODUÇÃO

No Brasil semelhantemente aos modelos europeus, a desregulamentação iniciou na década de 90 e também foram adotados leilões públicos no processo de comercialização de energia.

Castro (2004) começou a analisar os riscos na contratação de energia, formulando um método de estimativa do preço de energia no mercado de curto prazo, contribuindo para a estratégia com maior ou menor exposição a este ambiente, seja vendendo ou comprando energia.

O método proposto baseia-se em análise de decisões sob incertezas, aplicando os métodos de otimização multicritério adaptados aos conceitos utilizados em instituições financeiras. Apresenta matematicamente os benefícios financeiros e os riscos expostos dos agentes de consumo e de produção no mercado de curto prazo, através de formulação matemática e análise estocástica da energia afluenta, armazenada e da operação dos agentes de produção, utilizando modelos computacionais com programação dinâmica capazes de otimizar a operação do sistema através da minimização do custo total de operação e do custo marginal. A proposta do seu trabalho consiste em correlacionar o valor do custo marginal de operação levando em conta os aspectos estatísticos dos valores da energia armazenada e afluenta, prevendo dessa forma futuros preços de energia no mercado de curto prazo, através de análise de probabilidades associadas às duas variáveis.

O método suporte para a tomada de decisão ao menor risco é baseado na densidade de probabilidade dos resultados econômicos determinada pela associação das probabilidades calculadas para cada cenário de preço com resultado econômico esperado. Foi aplicado um método de otimização multiobjetivo utilizando-se pesos como fatores de ponderação das diversas funções objetivos buscando-se maximizar os ganhos e minimizar os prejuízos

simultaneamente. A otimização dos parâmetros de ponderação foi feita através de técnicas de inteligência artificial denominadas conjuntos nebulosos.

Castro (2004) analisa os riscos de contratação da energia, utilizando a análise estocástica prevista em modelos probabilísticos.

Os respectivos modelos se caracterizam pela Distribuição de Frequência de ocorrências de fatores relacionados aos diversos fatores de riscos embutidos na contratação de energia em leilões regulados, tais como a incerteza na definição antecipada em 5 anos do mercado consumidor previsto e o valor do mercado de curto prazo e utilizam critérios analíticos de decisão em situações de incerteza.

O trabalho utiliza o modelo de Monte Carlo que pode ser entendido como uma técnica de simulações para problemas com base probabilística ou estocástica utilizando a função da distribuição de probabilidades para gerar cenários de mercado e preços. Dessa forma, pode-se calcular o valor monetário das perdas a que uma operação está sujeita. As simulações geram diversos cenários para diversos casos de sub e sobrecontratação e estimam as menores situações de risco de exposição no mercado de curto prazo, considerando limites do preço de liquidação das diferenças (PLD) e o VR que é repassado ao consumidor final e diversas limitações impostas pela legislação do modelo atual. O trabalho previu a contratação de energia para 1000 cenários para 7 casos simulados, dentro de uma faixa pré determinada para valores mínimos e máximos. A estimativa dos preços de curto prazo foi feita da mesma forma.

Dias (2007) apresenta uma metodologia de análise de riscos determinando valores de montante a ser contratado nos leilões A-1, A-3 e A-5 utilizando a técnica de Algoritmos Genéticos. A modelagem do algoritmo estabelece os riscos de sobrecontratação e subcontratação obtidos através da relação entre os montantes determinados pelo modelo nos cenários otimista e pessimista em relação aos montantes projetados nos respectivos cenários pelas distribuidoras. Dessa forma, consegue-se determinar os menores riscos de exposição em relação ao mercado projetado. A curva dos montantes determinados por esta metodologia considera as diversas limitações de contratação impostas pelo modelo para os diversos leilões

Algumas considerações foram recomendadas para trabalho futuros, tais como a possibilidade de saída de consumidores livres, a inclusão da geração distribuída, a influência do MCSD e a verificação do risco por outras técnicas de otimização.

Buratti (2008), mais recentemente, aborda o mesmo tema considerando algumas complementações não abordadas por Dias (2007) na modelagem e na formulação matemática do problema. Aborda a análise de riscos para determinação dos montantes de energia nos leilões A-1, A-3, A-5, Ajuste, MCSD e dos limites de recontratação e descontratação em cada ano do horizonte de 5 anos projetados, considerando os custos da energia total adquirida em cada ano, incluindo as penalidades impostas pelo modelo, inclusive o limite de recontratação, caracterizando dessa forma a modicidade tarifária.

Buratti (2008) descreve uma formulação matemática mais detalhada, considerando os diversos limites percentuais de recontratação no leilão A-1 e descontratação nos leilões de energia existente, considerando a minimização do risco através da minimização dos custos totais da energia adquirida, da mesma forma que se deseja formular neste trabalho. Este trabalho foi avaliado através das técnicas de otimização baseadas em Inteligência Artificial denominadas Algoritmos Genéticos e Evolução diferencial e recomenda para trabalhos futuros a avaliação do risco através de outras técnicas.

Resende (2006) prevê estratégias de contratação de energia desenvolvendo uma metodologia associada à árvore de nós ou árvore de cenários de demandas projetadas através de uma matriz de probabilidades pré-estimadas. O respectivo trabalho enfatiza que a contratação é dinâmica e totalmente estocástica multi-estágio e que dessa forma pode-se atribuir probabilidades de ocorrência de diversos cenários de projeção de demanda de tal forma que o risco na comercialização de energia seja minimizado.

Da mesma forma que Dias (2007) e Buratti (2008) a ferramenta desenvolvida por Resende (2006) fornece os valores a serem contratados nos diversos leilões considerando as penalidades impostas pelo modelo e as diversas restrições e flexibilidades para não ocorrer sub e nem sobrecontratação com o objetivo de minimizar o custo total da energia

adquirida, associada a cada nó. A ferramenta de otimização é baseada em técnicas de programação matemática linear.

Azevedo (2004) estabelece um modelo computacional aplicado à teoria dos jogos não cooperativos com informação incompleta, utilizando as técnicas de Bayes e de equilíbrio de Nash visando à minimização dos riscos de gestão de compra de energia, informando as melhores estratégias correspondentes aquilo que cada agente sabe e acredita. O modelo torna possível trabalhar com a expectativa do comportamento dos agentes participantes considerando a falta de informação de preço de oportunidade e estratégia de cada agente em um primeiro estágio. A regra de Bayes funciona preenchendo a ausência de informações através de probabilidades condicionais e o equilíbrio de Nash pode ser encontrado ao final através de matrizes de esperança matemática para o "pay-off" de cada agente. O leilão considerado no trabalho de Azevedo (2004) é duplo do tipo fechado, no qual os agentes efetuam seus lances em função da quantidade comercializada. Utilizou o modelo de programação matemática linear através do *software* Lingo 7.0 como otimizador dos lances.

Munhoz (2004) prevê a utilização de um software para aplicação de diversos cenários considerando as diversas estratégias necessárias para a realização de lances em leilões, aplicando a teoria dos jogos, teoria dos leilões e teoria dos portfólios como ferramentas de análise estratégica para o negócio tanto do lado do comprador como do vendedor para modelar conflitos, interesse e comportamento estratégico dos diversos agentes envolvidos. O objetivo principal de seu trabalho é propor uma ferramenta adequada para a tomada de decisões no momento de execução de lances em leilões de comercialização de energia e para isto utiliza também a ferramenta de otimização através da programação matemática quadrática, sendo que o foco de seu trabalho é voltado para os agentes de geração e comercialização de energia. Desenvolveu um software específico como um simulador de estratégias e utilizou o *software* Lingo 8.0 para a otimização dos lances. O modelo é baseado em lances otimizados através de uma função objetivo que maximiza os benefícios para os geradores e minimiza os riscos de lances projetados e emprega o modelo de mínima variância de Markowitz. Considera as seguintes variáveis a serem projetadas em diversos cenários: variação da oferta e da demanda do sistema interligado e de cada submercado, preço

“spot”, aversão ao risco dos diversos agentes do mercado, risco regulatório e o uso do poder de mercado de alguns agentes vigentes. Os parâmetros a serem inseridos no modelo são probabilísticos que medem o retorno de cada produto em relação à probabilidade do cenário acontecer. Dessa forma a precisão e confiabilidade do modelo se dão principalmente pelo índice de acertos nas informações estratégicas inseridas.

Susteras (2006) estabelece uma metodologia para prever o comportamento das Distribuidoras relativo aos montantes declarados antes dos leilões, utilizando o processo de otimização baseado em Algoritmos Genéticos visando uma preparação adequada para leilões de energia e sendo uma boa ferramenta de apoio à definição de estratégias para comercialização de energia, principalmente para geradores, onde a projeção do preço de curto prazo é uma informação essencial para a estratégia de comercialização. Dessa forma, o modelo estipulado por Susteras tende a prever com determinada incerteza uma faixa de preços esperados tanto no Ambiente regulado como no ambiente livre.

Masili (2004) desenvolve um software simulador de leilões “*on-line*” para comercialização de energia elétrica podendo-se dessa forma prever diversos cenários e obter diversos resultados que possam auxiliar na formulação das diversas estratégias de participação, entretanto não considera modelos matemáticos que possibilitariam trazer resultados mais precisos como Munhoz (2004) considerou. A otimização dos lances dos leilões é feita através do *software* Lingo 8.0 , baseado em programação matemática linear.

Almeida (2006) aborda a gestão de riscos associados à previsão de demanda. Para isto explicita as diversas técnicas e modelos de previsão envolvendo a integração das diversas áreas da ciência, tais como estatística, finanças, economia, pesquisa operacional, mercado de energia e regulação setorial, considerando as diversas condições climáticas, sazonais e geográficas, sociais de cada ambiente. Avalia os riscos na precisão de demanda comparando com o retorno do produto e considera os intervalos de confiança através de modelos estatísticos de regressão dinâmica. O problema formulado é de otimização linear, utilizando o modelo computacional ESTD.

O trabalho de Guimarães (2006) apresenta uma ferramenta computacional para auxiliar na compra de energia em cada leilão baseada na

metodologia de árvores de cenários com contratação e otimização estocástica multi-estágio, visando minimizar a ponderação entre a tarifa para o consumidor e os custos para a distribuidora.

A análise de projeção de demanda considerando a migração de consumidores livres ou potencialmente livres foi estudada no trabalho de Silva, Schuch e Boff (2006). O trabalho apresenta uma ferramenta para a projeção de demanda que se baseia no risco de projeção dos valores de preço de energia no mercado de curto prazo (*spot*). A referência mostra que os consumidores potencialmente livres encontram no ambiente livre melhoria na qualidade de atendimento e maior interação entre fornecedor e cliente e estão propensos ao menor no preço da energia adquirida. A técnica, baseada em Markowitz e Wiley (1959), está relacionada ao valor em risco (VAR) que sintetiza a perda esperada em um intervalo de confiança demonstrada em uma curva normal de distribuição de probabilidades do risco de variação de preço em relação ao retorno esperado dos investimentos. Os resultados foram avaliados comparando o retorno ou não dos consumidores para o ambiente cativo. As simulações projetaram uma diferença de 80% no mercado migrado considerando que os consumidores não retornariam ao mercado cativo em função do PLD e 50% considerando o retorno. O trabalho enfatiza que o prazo de retorno (3 ou 5 anos) conforme acordo com a distribuidora é fundamental na análise para os montantes declarados para a contratação da distribuidora.

Em seu trabalho, Correia, Melo e Costa (2006) mostra que a implantação do novo modelo de comercialização de energia se concretiza através de contratos bilaterais e que a manutenção dos mesmos pode gerar custos financeiros adicionais para garantir menores riscos relacionados à incerteza do mercado futuro e garantir maior segurança nas transações comerciais. Este mecanismo de segurança (*hedge*) toma a forma no mercado de derivativos, ou seja, um ativo que deriva do comportamento de outro bem. O valor de preço no mercado de curto prazo (*spot*) pode ser muito volátil em determinados períodos do ano e pode-se evitar os riscos dessa oscilação através de contratos de derivativos. Menciona em seu trabalho os diversos tipos de contrato de derivativos (a termo, *swap*, futuro, opções) que projetam negociações baseadas em preços futuros e entrega do produto com forma pré

determinada, e enfatiza que o contrato de opções pode reduzir o risco às exposições do mercado de curto prazo (*spot*).

Nesse trabalho, o autor analisa ainda o conceito de mensuração de risco *Value at Risk* (VAR), definido por Mollica (1999), como sendo a perda monetária por um determinado espaço de tempo com uma determinada possibilidade de ocorrer, ou seja, mede o retorno de um investimento para um determinado nível de confiança. Pode-se mensurá-lo através da distribuição de probabilidade de retorno, utilizando as técnicas tradicionais de Markowitz e Wiley (1959). Dessa forma, utilizando o contrato derivativo de opções, o objetivo do autor é analisar o risco na estratégia de compra de energia elétrica através de contratos bilaterais futuros de uma distribuidora para atender parte de seu mercado e na compra de energia no ambiente de curto prazo através de contratos spots para atender o restante da demanda, visto que na época a legislação ainda permitia a contratação pelas distribuidoras de 95% de seu mercado.

Zanfelicce (2007) desenvolveu um modelo de otimização estocástica baseado na técnica de programação mista e na construção de uma árvore de cenários onde procurou mitigar o risco de comercialização de energia considerando as flexibilidades contratuais permitidas pelo modelo através da sazonalização e modulação da demanda a ser contratada e o conhecimento dos processos de formação dos preços do mercado de curto prazo.

Considerou a otimização da alocação das quantidades mensais a serem contratadas observando os limites negociáveis com o supridor em contratos derivativos e o perfil de carga do comprador. A modelagem adotada considera a minimização dos custos da energia total adquirida bem como o ponto ótimo de comercialização de empresas do mesmo grupo explorando as flexibilidades contratuais e os ganhos possíveis através da alocação de sobras de energia em patamares de maior preço e déficits naqueles de menor preço, observando as restrições contratuais, operativas e legais estabelecidas.

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, procurou-se descrever os principais trabalhos encontrados na pesquisa da literatura relacionados com o tema em questão.

Percebe-se que diversas metodologias foram estudadas para gerenciar o risco de contratação dos referidos montantes de energia em virtude das características intrínsecas de incertezas estabelecidas pelo modelo.

Conclui-se que existe a necessidade de desenvolvimento de ferramentas e instrumentos capazes de ajudar no planejamento das diversas estratégias e cenários embutido no momento da contratação e tomada de decisão por parte da Distribuidora. Modelos de otimização, utilizando a teoria de inteligência artificial associadas a modelos financeiros com avaliação e gerenciamento de riscos, bem como teorias de estratégias estocásticas de cenários, técnicas de previsão de demanda considerando a utilização de redes neurais, dentre outras e de jogos dinâmicos também foram verificados como ferramentas de tomadas de decisão pela Distribuidora para estipular melhores estratégias de contratações em leilões de energia.

Entretanto, nada ainda se testou em relação às técnicas tradicionais de modelagem matemática envolvendo equações lineares ou não que possam definir a solução ótima global de contratação, tal qual se propõe analisar neste trabalho, através da aplicação do Método dos Pontos Interiores.

Esse método, apesar de requerer uma formulação matemática mais apurada, com modelagem do algoritmo mais complexa é conhecido e bem utilizado em estudos de fluxo de potência ótimo, entretanto pode ser adaptado para solução ótima de sistemas de equações restritivas lineares adotados neste trabalho.

CAPÍTULO 4

FORMULAÇÃO DO PROBLEMA VIA MPI

4.1 MÉTODO DOS PONTOS INTERIORES

Inicialmente, o método dos pontos interiores foi indicado para problemas de programação linear, entretanto, devido ao seu bom desempenho, este método passou a ser aplicado também em problemas de programação quadrática, convexa e problemas gerais de otimização não-linear como os FPO.

Segundo Farhat e El-Hawary (2009) este método tem sido considerado como uma das técnicas de otimização mais importantes e revolucionárias, utilizadas para solução de problemas de otimização em sistemas elétricos de potência e tem sido uma área de pesquisa cada vez mais estudada desde a implantação do mesmo por Karmarkar (1984).

Essa metodologia consiste em transformar as restrições de desigualdade de um problema de otimização em restrições de igualdade através da introdução de variáveis de folga e associar uma penalização denominada barreira logarítmica à função objetivo.

Com isso, pode-se construir uma função Lagrangeana para o problema modificado considerando-se tanto as restrições de igualdade originais quanto as restrições de desigualdade modificadas e aplicar as condições de Karush Kuhn Tucker ou condições de otimalidade de primeira ordem a esta função. As condições de otimalidade formam um sistema de equações não-lineares, que é resolvido pelo Método de Newton, a fim de se encontrar a solução do problema de otimização.

4.2. FORMULAÇÃO DO MPI

Um problema de otimização pode ser representado de forma genérica como:

$$\min f(u) \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$g(u) = 0 \quad (4.2)$$

$$h^{\min} \leq h(u) \leq h^{\max} \quad (4.3)$$

onde

u – vetor de variáveis do sistema;

$f(u)$ – função objetivo a ser otimizada;

$g(u)$ – vetor de restrições de igualdade;

$h(u)$ – vetor de restrições de desigualdade.

Para utilizar os métodos de Pontos Interiores aplicam-se ao problema (4.1) à (4.3) os seguintes procedimentos:

a. Transformação das restrições de desigualdade em restrições de igualdade pela introdução de variáveis de folga.

Desta forma, as restrições passam a ser representadas da seguinte maneira:

$$h(u) - h^{\min} - s^{\min} = 0 \quad (4.4)$$

$$h(u) - h^{\max} + s^{\max} = 0 \quad (4.5)$$

onde

s^{\min} – vetor de variáveis de folga mínimas estritamente positivas;

s^{\max} – vetor de variáveis de folga máximas estritamente positivas.

b. Introdução da função barreira logarítmica na sua função objetivo.

A fim de se representar as restrições de não negatividade das variáveis de folga, o problema é modificado com a introdução da função barreira logarítmica na sua função objetivo. A função barreira penaliza as estimativas de solução que se encontram próximas aos limites das desigualdades, ou ainda, associadas às variáveis de folga próximas de zero.

O problema modificado passa a ser assim representado:

$$\min f(u) - \mu \sum_i^{ndes} [\ln(s_i^{\min}) + \ln(s_i^{\max})] \quad (4.6)$$

Sujeito a:

$$g(u) = 0 \quad (4.7)$$

$$h(u) - h^{\min} - s^{\min} = 0 \quad (4.8)$$

$$h(u) - h^{\max} + s^{\max} = 0 \quad (4.9)$$

onde

$ndes$ – número de restrições de desigualdade;

μ – parâmetro barreira ($\mu \geq 0$).

Logo, a função Lagrangeana associada a este problema é:

$$\begin{aligned} L(u, \lambda, \pi^{\min}, \pi^{\max}, s^{\min}, s^{\max}) = & f(u) - \mu \sum_i^{ndes} [\ln(s_i^{\min}) + \ln(s_i^{\max})] + \lambda^T \cdot g(u) + \\ & + (\pi^{\min})^T \cdot [h(u) + h^{\min} - s^{\min}] + (\pi^{\max})^T \cdot [h(u) - h^{\max} + s^{\max}] \end{aligned} \quad (4.10)$$

onde

λ – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade com dimensão ($nig \times 1$);

π^{\min} – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites mínimos com dimensão ($ndes \times 1$);

π^{\max} – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados aos limites máximos com dimensão ($ndes \times 1$);

nig – número de restrições de igualdade.

Portanto, o novo problema de otimização passa a ser:

$$\min L(u, \lambda, \pi^{\min}, \pi^{\max}, s^{\min}, s^{\max}) \quad (4.11)$$

Sujeito a:

$$s^{\min} \geq 0, s^{\max} \geq 0, \pi^{\min} \geq 0, \pi^{\max} \geq 0 \quad (4.12)$$

Sendo as restrições (4.12) impostas para que a equivalência com o problema (4.1) a (4.3) seja mantida.

4.3 CONDIÇÕES DE OTIMALIDADE

Um ponto $z = [u^T \lambda^T (\pi^{\min})^T (\pi^{\max})^T (s^{\min})^T (s^{\max})^T]$ é solução do problema (4.11) e (4.12) somente se (LUENBERGER, 1989):

a. Satisfaz as condições necessárias de otimalidade de primeira ordem, ou condições de Karush-Kuhn-Tucker – KKT.

Para que as expressões matemáticas presentes nas condições de KKT e nos algoritmos descritos sejam compactas foi usado o operador ∇ para representar derivadas parciais de funções, desta forma tem-se:

$$\nabla_u z = 0 \Rightarrow \nabla_u f(u) + [\nabla_u g(u)]^T \cdot \lambda + [\nabla_u h(u)]^T \cdot (\pi^{\min} + \pi^{\max}) = 0 \quad (4.13)$$

$$\nabla_u L(z) = 0 \Rightarrow g(u) = 0 \quad (4.14)$$

$$\nabla_{\pi^{\min}} L(z) = 0 \Rightarrow h(u) - h^{\min} - s^{\min} = 0 \quad (4.15)$$

$$\nabla_{\pi^{\max}} L(z) = 0 \Rightarrow h(u) - h^{\max} - s^{\max} = 0 \quad (4.16)$$

$$\nabla_{s^{\min}} L(z) = 0 \Rightarrow -\mu \cdot e - S^{\min} \cdot \pi^{\min} = 0 \quad (4.17)$$

$$\nabla_{s^{\max}} L(z) = 0 \Rightarrow -\mu \cdot e - S^{\max} \cdot \pi^{\max} = 0 \quad (4.18)$$

$$s^{\min} \geq 0, s^{\max} \geq 0, \pi^{\min} \geq 0, \pi^{\max} \geq 0 \quad (4.19)$$

sendo

$e = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$, com dimensão ($ndes \times 1$);

S^{\min} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\min} ;

S^{\max} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\max} .

b. Se a Hessiana do Lagrangeano L:

$$L'(u, \lambda, \pi^{\min}, \pi^{\max}) = f(u) + \lambda^T \cdot g(u) + \pi_A^T \cdot h_A(u) \quad (4.20)$$

onde

$h_A(u)$ – vetor das restrições de desigualdade ativas;

π_A^T – vetor dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade ativas;

S^{\min} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\min} ;

S^{\max} – matriz diagonal composta pelos elementos de s^{\max} .

O Método de Pontos Interiores se concentra em obter um ponto estacionário, isto é, que satisfaça as condições necessárias de otimalidade do item (a). Para se garantir que o ponto obtido seja um mínimo global de (4.1) a (4.3) as condições suficientes do item (b) devem ser testadas após a convergência do método.

No procedimento usado, entretanto, considera-se como ótimo o ponto solução das condições de KKT.

4.4 ALGORITMOS PRIMAL DUAL DE PONTOS INTERIORES

Após a transformação das restrições de desigualdade em igualdades, por meio da introdução de variáveis de folga e adição da função barreira logarítmica à função objetivo como forma de garantir a não negatividade dessas variáveis. Os passos seguintes consistem em se obter os pontos estacionários da função Lagrangeana, utilizando-se o Método de Newton, e estabelecer critérios para atualização do parâmetro barreira, para inicialização das variáveis e teste de convergência.

4.5 OBTENÇÃO DOS PONTOS ESTACIONÁRIOS

O primeiro passo na obtenção dos pontos que satisfazem a função Lagrangeana consiste em se fazer uma estimativa desta solução pela linearização das Equações (4.13) a (4.18) utilizando-se o Método de Newton. Os incrementos obtidos em cada iteração deste método não podem ser usados diretamente no vetor z , pois os mesmos podem violar as restrições de

desigualdade. Assim, esses incrementos devem ser testados e, se necessário, modificados a fim de sempre se manter o vetor z dentro da região de factibilidade do problema.

As etapas que devem ser seguidas a fim de se obter os pontos estacionários são as seguintes:

a. Inicialização das Variáveis

A fim de se começar o processo de otimização, é necessário a obtenção de uma estimativa inicial para as variáveis do problema. A escolha é feita de tal modo que as variáveis sejam estritamente internas aos limites impostos pelas restrições de desigualdade do problema. Para tanto, as variáveis μ são inicializadas pela metade da soma de seus valores máximos e mínimos; posteriormente, as variáveis de folga são calculadas a partir das Equações (4.15) e (4.16) e, arbitrando um valor inicial para o parâmetro barreira μ os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade são calculados a partir das Equações (4.17) e (4.18). Para os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade estimam-se valores quaisquer, como por exemplo, o vetor unitário.

b. Método de Newton

O sistema de Equações (4.13) a (4.18) pode ser representado de forma como:

$$\rho(z) = 0 \quad (4.21)$$

Tomando uma aproximação linear do sistema (4.21) no ponto z^* tem-se:

$$\rho(z^* + \Delta z) = \rho(z^*) + \nabla_z \cdot \rho(z) \Big|_{z^*} \Delta z \quad (4.22)$$

Como Δz deve ser tal que $\rho(z^* + \Delta z) = 0$, da Equação (4.22) tem-se que:

$$\nabla_z \cdot \rho(z) \Big|_{z^*} \Delta z = -\rho(z^*) \quad (4.23)$$

Em termos das variáveis do problema: u , λ , π^{\min} , π^{\max} , s^{\min} e s^{\max} a Equação (4.23) pode ser escrita como:

$$W \cdot \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta \lambda \\ \Delta \pi^{\min} \\ \Delta \pi^{\max} \\ \Delta s^{\min} \\ \Delta s^{\max} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_u f(u) + [\nabla_u g(u)]^T \cdot \lambda + [\nabla_u h(u)]^T \cdot (\pi^{\min} + \pi^{\max}) \\ g(u) \\ h(u) - h^{\min} - s^{\min} \\ h(u) - h^{\max} - s^{\max} \\ -\mu \cdot e - S^{\min} \cdot \pi^{\min} \\ -\mu \cdot e - S^{\max} \cdot \pi^{\max} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \nabla_u L \\ \nabla_\lambda L \\ \nabla_{\pi^{\min}} L \\ \nabla_{\pi^{\max}} L \\ \nabla_{s^{\min}} L \\ \nabla_{s^{\max}} L \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

onde

W – matriz Hessiana de dimensão $(nz \times nz)$;

nz – número total de variáveis em z .

Ou seja:

$$W = \begin{bmatrix} L_{uu} & L_{u\lambda} & L_{u\pi^{\min}} & L_{u\pi^{\max}} & 0 & 0 \\ [L_{u\lambda}]^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [L_{u\pi^{\min}}]^T & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ [L_{u\pi^{\max}}]^T & 0 & 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & -S^{\min} & 0 & -\Pi^{\min} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S^{\max} & 0 & \Pi^{\max} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Sendo:

$$L_{uu} = \nabla_{uu}^2 L = \nabla_{uu}^2 f(u) + \sum_{i=1}^{nig} \lambda_i \cdot \nabla_{uu}^2 g_i(u) + \sum_{j=1}^{ndes} (\pi_j^{\max} + \pi_j^{\min}) \cdot \nabla_{uu}^2 h_j(u) \quad (4.26)$$

$$L_{u\lambda} = [L_{\lambda u}]^T = \nabla_{u\lambda}^2 L = [\nabla_u g(u)]^T \quad (4.27)$$

$$L_{u\pi^{\min}} = [L_{\pi^{\min} u}]^T = \nabla_{u\pi^{\min}}^2 L = [\nabla_u h(u)]^T \quad (4.28)$$

$$L_{u\pi^{\max}} = [L_{\pi^{\max} u}]^T = \nabla_{u\pi^{\max}}^2 L = [\nabla_u h(u)]^T \quad (4.29)$$

$$L_{s^{\min}\pi^{\min}} = \nabla_{s^{\min}\pi^{\min}}^2 L = -S^{\min} \quad (4.30)$$

$$L_{s^{\max}\pi^{\max}} = \nabla_{s^{\max}\pi^{\max}}^2 L = S^{\max} \quad (4.31)$$

$$L_{s^{\min}s^{\min}} = \nabla_{s^{\min}s^{\min}}^2 L = -\Pi^{\min} \quad (4.32)$$

$$L_{s^{\max}s^{\max}} = \nabla_{s^{\max}s^{\max}}^2 L = \Pi^{\max} \quad (4.33)$$

onde

Π^{\min} – matriz diagonal composta pelos elementos de π^{\min} ;

Π^{\max} – matriz diagonal composta pelos elementos de π^{\max} ;

I – matriz identidade.

c. Atualização das Variáveis Primais e Duais

A determinação do ponto ótimo se faz através de um processo iterativo. A cada iteração, o sistema linear representado em (4.24) é resolvido, e, logo após, é determinado o comprimento do passo nos espaços primal (α_p) e dual (α_d), de modo que as variáveis de folga sejam todas positivas e os multiplicadores de Lagrange sejam tais que: $\pi^{\min} \leq 0$ e $\pi^{\max} \geq 0$. Desta forma, α_p e α_d são expressos como:

$$\alpha_p = \min \left[\min_{\Delta s_i^{\max} < 0} \frac{-s_i^{\max}}{\Delta s_i^{\max}}, \min_{\Delta s_i^{\min} < 0} \frac{-s_i^{\min}}{\Delta s_i^{\min}}, 1 \right] \quad (4.34)$$

$$\alpha_d = \min \left[\min_{\Delta \pi_i^{\max} < 0} \frac{-\pi_i^{\max}}{\Delta \pi_i^{\max}}, \min_{\Delta \pi_i^{\min} < 0} \frac{-\pi_i^{\min}}{\Delta \pi_i^{\min}}, 1 \right] \quad (4.35)$$

Após o cálculo dos passos primal e dual, a nova aproximação para a solução ótima pode ser obtida pela seguinte atualização:

$$u^{i+1} = u^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta u \quad (4.36)$$

$$(s^{\min})^{i+1} = (s^{\min})^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta s^{\min} \quad (4.37)$$

$$(s^{\max})^{i+1} = (s^{\max})^i + \sigma \cdot \alpha_p \cdot \Delta s^{\max} \quad (4.38)$$

$$\lambda^{i+1} = \lambda^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \lambda \quad (4.39)$$

$$(\pi^{\min})^{i+1} = (\pi^{\min})^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \pi^{\min} \quad (4.40)$$

$$(\pi^{\max})^{i+1} = (\pi^{\max})^i + \sigma \cdot \alpha_d \cdot \Delta \pi^{\max} \quad (4.41)$$

onde

σ – constante para garantir a interioridade da nova estimativa de solução, sendo fixada em 0,9995.

d. Atualização do Parâmetro Barreira

O último passo dentro de cada iteração é recalcular o valor do parâmetro barreira μ . Com os valores de π^{\min} , π^{\max} , s^{\min} e s^{\max} , o cálculo do parâmetro μ é baseado no decréscimo do *gap* de dualidade:

$$\mu = \frac{(s^{\max})^T \cdot \pi^{\max} - (s^{\min})^T \cdot \pi^{\min}}{2 \cdot n \cdot \beta} \quad (4.42)$$

onde

n – número total de variáveis primais e duais;

β – fator de aceleração ($\beta > 1$).

e. Critérios de Convergência

A solução do problema é encontrada quando as equações que representam as condições de otimalidade (4.13) a (4.18) são satisfeitas e o *gap* de dualidade ou parâmetro de barreira é nulo (menor ou igual a uma tolerância especificada). Portanto, os critérios de convergência são:

$$\mu \leq \varepsilon_{\mu} \quad (4.43)$$

$$\max \|\nabla L\|_{\infty} \leq \varepsilon_L \quad (4.44)$$

Onde

$\|\nabla L\|_{\infty}$ – norma infinita do gradiente da função Lagrangeana;

ε_L – tolerância da norma infinita do gradiente da função Lagrangeana;

ε_{μ} – tolerância do parâmetro barreira.

4.6 ALGORITMO DE SOLUÇÃO DO PROBLEMA

A seguir é descrito o algoritmo para a solução do problema de otimização via Método Primal-Dual de Pontos Interiores:

Passo 0 : Inicializar as variáveis.

Passo 1: Calcular o gradiente da função Lagrangeana através das equações (4.14) - (4.18).

Passo 2: Testar critérios de convergência:

- Caso os critérios estejam satisfeitos, FIM. A solução ótima foi encontrada.

- Caso contrário, prosseguir ao **Passo 3**.

Passo 3: Resolver a equação matricial (4.24).

Passo 4: Determinar o comprimento dos passos nos espaço primal e dual, α_p e α_d , usando as equações (4.34) e (4.35).

Passo 5 : Atualizar todas as variáveis de acordo com equações (4.36) a (4.41).

Passo 6: Atualizar o parâmetro barreira μ de acordo com (4.42) e retornar ao **Passo 1**.

CAPÍTULO 5

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

5.1 INTRODUÇÃO

Após a descrição detalhada do novo modelo, considerando todos os mecanismos de contratação e reposição, mecanismos de repasse à tarifa dos consumidores finais, riscos envolvidos e descritos, restrições e penalidades impostas pela legislação, aliadas ao fato das distribuidoras serem obrigadas a contratar 100% de seu mercado, torna-se vital que a metodologia represente essas condições e que forneça uma resposta com menor risco às incertezas de montantes contratados.

A questão fundamental na formulação do problema é como adequar tantas variáveis envolvidas no processo de comercialização de energia em leilões regulados em um método capaz de encontrar uma solução ótima para o problema. No caso em questão, considerou-se o Método dos Pontos Interiores como instrumento para otimizar as diversas variáveis inseridas no equacionamento do problema, conforme apresentado no capítulo 4.

Tendo em vista a experiência relatada em DIAS (2007) para solucionar esse tipo de problema, verificou-se que as soluções tendem a se ajustar à carga de referência. Isso facilita o tratamento das várias previsões disponíveis (otimista, pessimista e referência), pois pode-se obter solução satisfatória a partir apenas da análise da previsão de referência, que é a utilizada nesse artigo.

5.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

As seguintes premissas foram adotadas para a formulação matemática do problema:

- A contratação da energia no Leilão A-1 é destinada a comprar o montante de reposição, definida como a quantidade de energia dos contratos

que se extinguem no ano da realização dos respectivos leilões em questão, subtraídas as reduções dos montantes já contratados. Embora a partir de 2009, a limitação de 1% da contratação no leilão A-1 tenha deixado de existir, a mesma foi considerada por ser uma condição mais crítica e que possibilita a simulação em diversos cenários com anos de referência distintos. Logo a limitação de 1% da carga da distribuidora verificada no anterior à declaração foi considerada na modelagem.

- Minimização dos riscos de comercialização pela formulação de restrições que estabelecem todas as limitações impostas pelo novo modelo.

- Minimização dos custos referentes à energia total adquirida, considerando todos os contratos já existentes, incluindo o PROINFA, Geração Distribuída, Itaipú e contratos bilaterais e a energia nova a ser contratada.

- Definição do horizonte de contratação estipulado em 5 anos, conforme estabelecido pela legislação, entretanto a modelagem proposta pode ser facilmente adaptada para qualquer horizonte diferente. O ano de referência adotado foi de 2010, sendo que a Figura 4.1 ilustra as formas de contratação de energia no ambiente de contratação regulada dentro desse horizonte e referência:

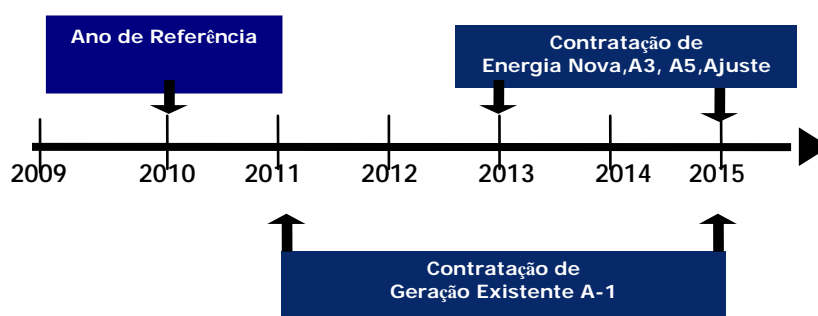


FIGURA 5.1: LINHA DE TEMPO DOS LEILÕES DE ENERGIA NO ACR

- Separação da energia velha, aquela proveniente de contratos já existentes no ano de referência adotado, tais como o PROINFA, Geração Distribuída, Itaipú e contratos bilaterais e também a energia nova, considerada aqui como sendo a energia proveniente dos leilões regulados A-1 A-3 e A-5 contratada anteriormente ao ano de referência em questão (2010) e que já

estão sendo consumidas nesse período e também a energia a ser contratada nos respectivos, leilões regulados nos próximos 5 anos.

-Embora o mecanismo de compensação de sobras e déficits (MCSD) seja uma alternativa estabelecida pela legislação para minimizar os riscos de sub ou sobrecontratação o mesmo não foi considerado neste trabalho em virtude das tratativas de uso no mercado estarem ainda sujeitas a diversas certificações. Além disso, a modelagem matemática deste mecanismo é complexa, o que pode gerar maiores incertezas no processo.

- A saída de consumidores potencialmente livres do mercado da Distribuidora não implica em grandes riscos em virtude das flexibilizações do modelo, tais como a devolução do montante contratado a qualquer tempo, embora esteja limitada a 4%.

- Embora existam diversos métodos de projeção de demanda para atender o mercado futuro, considerou-se neste trabalho um cenário de referência como um cenário ótimo a ser seguido e verificado como dado conhecido. Não foi abordado neste trabalho o método de projeção de demanda, entretanto este fato é válido como complementação de futuros trabalhos.

5.3 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

Os resultados que se desejam obter são os valores anuais de energia a serem encontrados nos diversos leilões de ambiente regulado A-1, A-3, A-5 e Ajuste, limitados às restrições impostas e aos valores de sub e sobrecontratação.

Para a modelagem do problema, consideram-se os respectivos valores a serem contratados em MW, valores de sub e sobrecontratação representados em porcentagem (%) a que a distribuidora possa estar exposta, valores dos montantes de redução e reposição necessárias e os custos referentes à energia adquirida e repassada.

O número de anos, na , do horizonte de estudo é de 5 anos, entretanto consideraram-se 7 anos para dimensão de todas as variáveis em virtude das limitação das variáveis **redQ1** e **Q3**, ou seja o montante de devolução está limitado até 4% do valor inicialmente contratado dois anos antes e o montante

contratado no leilão A-3 está limitado a 2% do valor inicialmente contratado dois anos antes.

Assim, os dados de entrada são:

- **PD**: vetor de dimensão $(na+2 \times 1)$, sendo que as duas primeiras posições são referentes às cargas realizadas (2009 e 2010) e as cinco restantes às previsão de mercado de referência da distribuidora (2011 a 2015);

$$PD = \begin{bmatrix} PD_{-2} \\ PD_{-1} \\ PD_1 \\ PD_2 \\ PD_3 \\ PD_4 \\ PD_5 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

- **PLD**: vetor de dimensão $(na+2 \times 1)$ com valores de custos marginais realizados (2009 e 2010) e previstos (2011 a 2015);

$$PLD = \begin{bmatrix} PLD_{-2} \\ PLD_{-1} \\ PLD_1 \\ PLD_2 \\ PLD_3 \\ PLD_4 \\ PLD_5 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

- **VR**: vetor de dimensão $(na+2 \times 1)$ com valores realizados (2009 e 2010) e previstos (2011 a 2015)

$$VR = \begin{bmatrix} VR_{-2} \\ VR_{-1} \\ VR_1 \\ VR_2 \\ VR_3 \\ VR_4 \\ VR_5 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

- **Rep**: vetor de dimensão $(na+2 \times 1)$ com total de energia a ser recontratada em virtude do encerramento, rescisão de contratos ou da diminuição dos valores contratados para o período de 2011 a 2015.

Em virtude dos contratos de energia existente já estarem assinados e com o prazo de vigência já previamente estipulado, é de conhecimento antecipado da distribuidora o período em que haverá descontratação ou encerramento do contrato. Dessa forma, essa energia velha, armazenada no vetor **Rep**, serve como referência para definir os momentos em que haverá descontratação e por sua vez a necessidade dos montantes de reposição da respectiva energia a ser contratada no leilão A- 1, a ser definida neste trabalho, como variável de otimização **contRep** em (%).

$$Rep = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Rep_1 \\ Rep_2 \\ Rep_3 \\ Rep_4 \\ Rep_5 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Tabela 5.1 apresenta a distribuição dos custos marginais (**PLD**) e o valor de referência (**VR**) para o horizonte estudado.

TABELA 5.1 - VALORES DO PREÇO DA ENERGIA NO MERCADO SPOT E VALOR DE REFERÊNCIA

		R\$/MWh					
Ano	(-2)	(-1)	1	2	3	4	5
PLD	PLD_{-2}	PLD_{-1}	PLD_1	PLD_2	PLD_3	PLD_4	PLD_5
VR	VR_{-2}	VR_{-1}	VR_1	VR_2	VR_3	VR_4	VR_5

Tabela 5.2 apresenta a distribuição da demanda (**PD**) no cenário de referência e a energia a ser recontratada (**Rep**) para o horizonte estudado.

- $Q5^{disp}; Q3^{disp}; Q1^{disp}; QAJ^{disp}$: montantes de energia disponíveis para os diversos leilões;
- *submax*: limite máximo de subcontratação admissível;
- **EV**: vetor de dimensão $(na+2 \times 1)$, com contratos existentes referentes à energia velha que já estão em vigor no ano 2010;

$$EV = \begin{bmatrix} EV_{-2} \\ EV_{-1} \\ EV_1 \\ EV_2 \\ EV_3 \\ EV_4 \\ EV_5 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Essa energia velha já contratada é proveniente de contratos PROINFA, Itaipu, contratos bilaterais associada às energias já contratadas antes do ano (1).

- **Q10, QAJ0, Q30, Q50**: vetores de dimensão $(na+2 \times 1)$ com contratos existentes referentes à energia nova já contratadas e que devem ser entregues no horizonte de 5 anos:

$$Q10 = \begin{bmatrix} Q10_{-2} \\ Q10_{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad QAJ0 = \begin{bmatrix} QAJ0_{-2} \\ QAJ0_{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad Q30 = \begin{bmatrix} Q30_{-2} \\ Q30_{-1} \\ Q30_1 \\ Q30_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad Q50 = \begin{bmatrix} Q50_{-2} \\ Q50_{-1} \\ Q50_1 \\ Q50_2 \\ Q50_3 \\ Q50_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

A Tabela 5.4 apresenta esquematicamente os valores de energias existentes já contratadas no ano (-1).

TABELA 5.4 - REPRESENTAÇÃO DAS ENERGIAS EXISTENTES JÁ CONTRATADAS NO ANO (-1)

Montantes de Energia Velha (MW)							
Ano	(-2)	(-1)	1	2	3	4	5
EV	EV_{-2}	EV_{-1}	EV_1	EV_2	EV_3	EV_4	EV_5
Q10	$Q10_{-2}$	$Q10_{-1}$					
QAj0	$QAj0_{-2}$	$QAj0_{-1}$					
Q30	$Q30_{-2}$	$Q30_{-1}$	$Q30_1$	$Q30_2$			
Q50	$Q50_{-2}$	$Q50_{-1}$	$Q50_1$	$Q50_2$	$Q50_3$	$Q50_4$	

A fim de se obter o valor total de energia nova a cada ano, utilizam-se matrizes que auxiliam a contabilização dos contratos existentes ano a ano.

A matriz **M1** permite somar os contratos A-5, A-3 e A-1 ao longo de todo o período de interesse ($QT_{1,3,5}$):

$$M1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Assim,

$$QT_{1,3,5} = M1 \cdot (Q10 + Q30 + Q50) \quad (5.9)$$

Já que os contratos de Ajuste são de apenas dois anos, montou-se a matriz **M2** que permite somar os contratos de Ajuste ao longo de todo o período de interesse (QT_{Aj}):

$$M2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Assim,

$$QT_{Aj} = M2 \cdot QAj0 \quad (5.11)$$

A seguir, apresentam-se as variáveis de otimização que devem ser calculadas:

- **Q5, Q3, Q1, QAj**: vetores de dimensão $(na+2 \times 1)$, com valores ótimos de energia a serem contratados para leilões A-1, Ajuste, A-3 e A-5 para os 5 anos futuros, se $na=5$, respectivamente:

$$Q1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Q1_1 \\ Q1_2 \\ Q1_3 \\ Q1_4 \\ Q1_5 \end{bmatrix} \quad QAj = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ QAj_1 \\ QAj_2 \\ QAj_3 \\ QAj_4 \\ QAj_5 \end{bmatrix} \quad Q5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ Q5_5 \end{bmatrix}$$

$$Q3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ Q3_3 \\ Q3_4 \\ Q3_5 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Salienta-se aqui, que as variáveis a serem otimizadas de **Q1** compreendem os valores do vetor **Q1** entre as posições 3 a 7, ou seja, são os valores **Q1(3:7,1)**, para **QAj** os valores são **QAj(3:7,1)**, para **Q3** os valores são **Q3(5:7,1)** e para **Q5** os valores são **Q5(7,1)**.

A Tabela 5.5 apresenta esquematicamente os valores de energias novas a serem contratadas a partir do ano 1.

TABELA 5.5 - REPRESENTAÇÃO DAS ENERGIAS NOVAS A SEREM CONTRATADAS A PARTIR DO ANO 1

Energia	Montantes de Energia Nova (MW)						
	(-2)	(-1)	1	2	3	4	5
Q1			$Q1_1$	$Q1_2$	$Q1_3$	$Q1_4$	$Q1_5$
QAj			QAj_1	QAj_2	QAj_3	QAj_4	QAj_5
Q3					$Q3_3$	$Q3_4$	$Q3_5$
Q5							$Q5_5$

- **redQ1**: vetor de dimensão $(na+2 \times 1)$, com montante de redução de energia necessário para suprir possíveis desvios de mercado entre os anos 2011 a 2015. Essa variável, **redQ1**, é o montante de devolução ou descontratação com limite até 4% do valor contratado de dois anos anteriores, proveniente de variações de mercado, sendo realizada no leilão A1.

$$redQ1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ redQ1_1 \\ redQ1_2 \\ redQ1_3 \\ redQ1_4 \\ redQ1_5 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

- **contRep**: vetor de dimensão $(na+2 \times 1)$, com percentual de reposição necessário para suprir as descontratações no período de 2011 a 2015;

$$contRep = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ contRep_1 \\ contRep_2 \\ contRep_3 \\ contRep_4 \\ contRep_5 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Esses valores percentuais dos montantes de reposição correspondem ao total de energia a ser recontratada em virtude do encerramento ou rescisão dos contratos já vigentes ou da diminuição dos valores de energia contratados. Esses percentuais podem ser limitados ao valor máximo de 105% em relação ao montante inicial contratado ($contRep_{max} = 105$), conforme estipula o Decreto 5163/2004.

A Tabela 5.6 apresenta a distribuição dos montantes de redução nos leilões A-1 (**redQ1**), e o percentual do montante de reposição (**contRep**) durante o horizonte estudado.

TABELA 5.6 - VALORES DE REDUÇÃO E REPOSIÇÃO DA ENERGIA INICIALMENTE CONTRATADA

Ano	(-2)	(-1)	1	2	3	4	5
redQ1			$redQ1_1$	$redQ1_2$	$redQ1_3$	$redQ1_4$	$redQ1_5$
contRep			$contRep_1$	$contRep_2$	$contRep_3$	$contRep_4$	$contRep_5$

- **sub**: vetor de dimensão $(na+2 \times 1)$, com percentual de subcontratação que a distribuidora pode ficar exposta entre os anos 2011 a 2015:

$$sub = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ sub_1 \\ sub_2 \\ sub_3 \\ sub_4 \\ sub_5 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Novamente, salienta-se que as variáveis a serem otimizadas de **redQ1** são os valores **redQ1(3:7,1)**, para **contRep** os valores são **contRep (3:7,1)** e

para **sub** os valores são **sub** (3:7,1), onde a notação (3:7,1) representa as posições 3 a 7 dos respectivos vetores.

Os valores totais das energias a serem contabilizadas nos leilões A-1, A-3, A-5 e Ajuste são correspondentes a soma dos valores dos montantes de energia já contratadas e entregues (**Q10, Q30, Q50 e QAj0**) com a energia total a ser declarada nos anos subsequentes do horizonte estipulado (**Q1, Q3, Q5, Aj**) e os valores correspondentes aos montantes de reposição (**Rep**) subtraídos dos montantes de descontração (**redQ1**) no período considerado.

Assim, a energia total a ser contratada, ano a ano, é calculada pela expressão:

$$\text{Contratado} = EV + Q5T + Q3T + QAjT + Q1T \quad (5.16)$$

onde

Q5T - valor total de Leilão A-5, calculado pela expressão:

$$Q5T = M1 \cdot (Q50 + Q5) \quad (5.17)$$

Q3T - valor total de Leilão A-3, calculado pela expressão:

$$Q3T = M1 \cdot (Q30 + Q3) \quad (5.18)$$

QAjT - valor total de Leilão de Ajuste, calculado pela expressão:

$$QAjT = M2 \cdot (QAj0 + QAj) \quad (5.19)$$

Q1T - valor total de Leilão A-1, calculado pela expressão:

$$Q1T = M1 \cdot [Q10 + Q1 + \text{diag}(\text{Rep}) \cdot \text{contRep} - M3 \cdot \text{redQ1}] \quad (5.20)$$

Como a redução obtida em **redQ1** se refere a leilões de 2 anos antes, montou-se a matriz **M3**, a fim de contabilizar esse efeito:

$$M3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

5.4 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo problema é a soma do custo da energia total adquirida em cada ano com as penalizações impostas por subcontratações e sobrecontratações, considerando as diversas restrições do problema. Em função da energia contratada já descrita no item 5.2, pode-se calcular o custo total da mesma a partir dos valores de preços das energias adquiridas nos respectivos leilões.

As penalizações foram modeladas através de pesos inseridos na parcela de subcontratação, podendo-se simular vários cenários que podem ser apresentados. Dessa forma, a minimização da função objetivo representa a menor aversão ao risco financeiro que a distribuidora estaria exposta e pode ser representada pela soma de duas funções:

$$fo = f_1 + f_2 \quad (5.22)$$

onde

f_1 : parcela referente aos custos da energia total adquirida;

f_2 : parcela referente aos custos financeiros e as penalidades impostas por subcontratação.

Assim sendo, o menor custo na compra de energia é:

$$\text{Min } fo$$

Sendo que a função referente aos custos da energia adquirida é:

$$f_1 = wc \cdot [u^t \cdot \text{Custo}] \quad (5.23)$$

onde

wc : peso para ponderação de f_1 ;

u : vetor unitário de dimensão $(na+2)$.

O custo total ao longo do horizonte de estudo é calculado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Custo} = & \text{diag}(Q1)VL1 + \text{diag}(QAj)VLAj + \text{diag}(Q3)VL3 + \\ & \text{diag}(Q5)VL5 + \text{diag}(Rep)\text{diag}(contrep)VL1 \end{aligned} \quad (5.24)$$

E, a função referente às penalidades é:

$$f_2 = wpen \cdot \text{diag}(sub) \cdot \text{diag}(PD) \cdot (PLD - \min(PLD, VR) + \max(PLD, VR)) \quad (5.25)$$

onde

$wpen$: peso que permite a ponderação de f_2 .

Limitou-se o valor de sobrecontratação em 3% que é o limite máximo de custo repassável aos consumidores, de acordo com as regras vigentes e dessa forma a modelagem considerada não atribui penalidade por sobrecontratação.

Para o caso de subcontratação, considerou-se a exposição da distribuidora no mercado de curto prazo, ou seja, se o valor do **PLD** for maior que o valor **VR** a ser repassado aos consumidores finais a compra acarretará prejuízos à distribuidora. Porém na situação inversa, se o valor do **PLD** estiver abaixo do valor **VR** a mesma terá lucro. O valor da penalidade adicional por MWh subcontratado, é estabelecido pelo Art. 3º do Decreto 5163/2004, calculado conforme as regras de comercialização da CCEE na seção Penalidades..

Os valores dos montantes de energia otimizados estão representados em MWmédios e os valores da energia adquirida em R\$/MWh. A unidade

MWmédio é usualmente utilizada no setor elétrico para reduzir o tamanho dos números relativos da energia, que de outra forma teriam que ser expressos em milhões de MWh, principalmente quando se tratam de valores anuais. A unidade MWmédio representa a energia média linear acumulada nas 24 horas do dia, em 30,41 dias médios dos meses do ano, nos 12 meses do ano civil ($24 \times 30,41 \times 12 = 8760$).

Logo para ter-se o custo da energia adquirida em R\$ deve-se multiplicar o valor MWmédios pela constante 8760.

5.5 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA

Esse problema de otimização está sujeito às seguintes restrições: montante total por contrato, restrição de disponibilidade de oferta, restrições nas reduções de contrato, restrições de contratação máxima e restrições nas reposições de contrato:

Ou seja, as variáveis envolvidas na modelagem devem estar sujeitas às diversas restrições impostas pelas regras do modelo para que a distribuidora não sofra penalizações, tais como:

- (i) Limites máximo e mínimo de contratação:

$$\text{diag}(u - \text{sub}).PD \leq \text{Contratado} \leq 1,03 \cdot PD \quad (5.26)$$

Para cada ano, o total da energia contratada, conforme 5.16 é:

$$\text{Contratado} = EV + Q1T + QAjT + Q5T + Q3T \quad (5.27)$$

ou

$$\begin{aligned} \text{Contratado} = & EV + M1 \cdot [Q10 + Q1 + \text{diag}(\text{Rep}) \cdot \text{contRep} - M3 \cdot \{\text{redQ1}\}] + \\ & M2 \cdot (QAj0 + QAj) + M1 \cdot (Q30 + Q3) + M1 \cdot (Q50 + Q5) \end{aligned} \quad (5.28)$$

A equação (5.26) representa a restrição referente à contratação total de energia, considerando a margem de sobrecontratação de 3% em relação aos

valores do mercado de referência da distribuidora (**PD**). Considerou-se o cenário de referência como o cenário ótimo a ser seguido com risco de média intensidade.

(ii) Limites máximo e mínimo de subcontratação:

O limite de subcontratação não pode assumir valores negativos:

$$0 \leq sub \leq diag(u) \cdot submax \quad (5.29)$$

O ideal é que os valores de subcontratação e sobrecontratação sejam zero ou próximos a zero.

(ii) Limites máximo e mínimo de recontração:

$$0 \leq contRep \leq contRepmax \cdot u \quad (5.30)$$

Esta restrição se refere ao limite máximo de reposição em casos que há descontração, rescisão de contratos existentes ou redução dos valores contratados. Considerou-se a limitação de 105% do montante inicial contratado pelo agente distribuidor, conforme estabelece o Art.24 do Decreto 5163/2004, sendo que o valor a ser repostado sempre deverá ser positivo. Assim, $contrepmax=1,05$.

(iv) Limite para montante de devolução:

$$0 \leq redQ1 \leq 0,04 \cdot M4 \cdot Contratado \quad (5.31)$$

Como **redQ1** é limitada até 4% do valor contratado de dois anos anteriores, criou-se a matriz **M4** a fim de contabilizar esse valor contratado dois anos antes:

$$M4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

Esta restrição se refere ao limite de redução dos valores declarados nos leilões de energia existente. Considerou-se a limitação de 4% da carga registrada pelo agente distribuidor no segundo ano anterior ao declarado, conforme estabelece o Art.29 do Decreto 5163/2004, sendo que o valor contratado sempre deverá ser positivo.

(v) Limites nos Leilões de Ajuste:

$$0 \leq Q_{Aj} \leq 0,01 \cdot \text{Contratado} \quad (5.33)$$

(vi) Limites nos leilões A-1:

$$0 \leq Q1 \leq 0,01 \cdot M5 \cdot PD \quad (5.34)$$

Como **Q1** é limitado até 1% do valor da carga 1 ano antes para obter repasse total, criou-se a matriz **M5** a fim de contabilizar esse valor de carga a um ano atrás:

$$M5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

Essa limitação de 1% do valor da carga do agente distribuidor verificada no ano anterior ao da declaração da necessidade do respectivo

agente, estabelecido no Art.41 do Decreto 5163/2004, foi considerada, apesar desta limitação estar imposta até 2008.

(vii) Limites nos leilões A-3:

$$0 \leq Q3 \leq 0,02 \cdot M4 \cdot PD \quad (5.36)$$

Esta restrição representa a contratação máxima no leilão A-3, limitada a 2% do valor do mercado da distribuidora, realizado 2 anos anteriores, conforme estabelece o Art, 36 do Decreto 5163/2004.

(viii) Limites nos leilões A-5:

$$0 \leq Q5 \quad (5.37)$$

(ix) Limites disponíveis no primeiro ano para leilões A-1, Aj, A-3 e A-5:

Essas restrições se referem à obrigação dos valores contratados nos leilões não serem maiores que os valores disponíveis nos respectivos leilões.

$$M6 \cdot Q1 \leq Q1^{disp} \quad (5.38)$$

$$M6 \cdot QAj \leq QAj^{disp} \quad (5.39)$$

$$M6 \cdot Q3 \leq Q3^{disp} \quad (5.40)$$

$$M6 \cdot Q5 \leq Q5^{disp} \quad (5.41)$$

Para se contabilizar apenas os leilões que ocorrem no ano 1, montou-se o vetor linha **M6**:

$$M6 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (5.42)$$

(x) Limite inferior de recontração:

Esta restrição se refere ao limite inferior de recontração (**LI**), cujo valor é o montante de reposição necessário (**Rep**) reduzido de 4% do montante

inicialmente contratado pelo agente distribuidor, conforme estabelece o Art.40 do Decreto 5163/2004:

$$LI = \text{diag}(\text{Rep}) - 0,04 \cdot EV \quad (5.43)$$

Assim o montante a ser resposto deve ser maior do que o limite inferior de recontratação:

$$LI = \text{diag}(\text{Rep}) - 0,04 \cdot EV \leq \text{diag}(\text{Rep}) \cdot \text{contRep} \quad (5.44)$$

Resumindo, pode-se escrever o problema de otimização completo como:

$$\begin{aligned} \min \quad & wc \cdot u^t \cdot \{ \text{diag}\{M1 \cdot [Q10 + Q1 + \text{diag}(\text{Rep}) \cdot \text{contRep} - M3 \cdot \text{redQ1}]\} \cdot VL1 + \\ & \text{diag}[M2 \cdot (QAj0 + QAj)] \cdot VLAj + \text{diag}[M1 \cdot (Q30 + Q3)] \cdot VL3 + \text{diag}[M1 \cdot (Q50 + Q5)] \cdot VL5\} + \\ & wpen \cdot \text{diag}(\text{sub}) \cdot \text{diag}(PD) \cdot (PLD - \min(PLD, VR) + \max(PLD, VR)) \end{aligned} \quad (5.45)$$

s.a

$$\begin{aligned} \text{diag}(u - \text{sub}) \cdot PD \leq EV + M1 \cdot [Q10 + Q1 + \text{diag}(\text{Rep}) \cdot \text{contRep}] - M3 \cdot \{\text{redQ1}\} + \\ M2 \cdot (QAj0 + QAj) + M1 \cdot (Q30 + Q3) + M1 \cdot (Q50 + Q5) \leq 1.03 \cdot PD \end{aligned} \quad (5.46)$$

$$0 \leq \text{sub} \leq \text{diag}(u) \cdot \text{submax} \quad (5.47)$$

$$0 \leq \text{contRep} \leq \text{contRepmax} \cdot u \quad (5.48)$$

$$0 \leq \text{redQ1} \leq 0,04 \cdot M4 \cdot \text{Contratado} \quad (5.49)$$

$$0 \leq QAj \leq 0,01 \cdot \text{Contratado} \quad (5.50)$$

$$0 \leq Q1 \leq 0,01 \cdot M5 \cdot PD \quad (5.51)$$

$$0 \leq Q3 \leq 0,02 \cdot M4 \cdot PD \quad (5.52)$$

$$0 \leq Q5 \quad (5.53)$$

$$M6 \cdot Q1 \leq Q1^{disp} \quad (5.54)$$

$$M6 \cdot QAj \leq QAj^{disp} \quad (5.55)$$

$$M6 \cdot Q3 \leq Q3^{disp} \quad (5.56)$$

$$M6 \cdot Q5 \leq Q5^{disp} \quad (5.57)$$

$$LI = \text{diag}(\text{Rep}) - 0,04 \cdot EV \leq \text{diag}(\text{Rep}) \cdot \text{contRep} \quad (5.58)$$

Este problema de otimização foi resolvido pelo Método dos Pontos Interiores Primal-Dual (KARMARKAR, 1984), que consiste em transformar as restrições de desigualdade em restrições de igualdade pela incorporação de variáveis de folga, tal qual equações (4.8) e (4.9):

$$\begin{aligned}
 & \text{diag}(u - \text{sub}) \cdot PD - \{EV + M1 \cdot \{Q10 + Q1 + \text{diag}(\text{Rep}) \cdot \text{contRep} \\
 & - M3 \cdot \text{redQ1}\} + M2 \cdot (QAj0 + QAj) + M1 \cdot (Q30 + Q3) + M1 \cdot (Q50 + Q5)\} \quad (\pi\text{contmin}) \\
 & + \text{scontmin} = 0 \\
 & EV + M1 \cdot \{Q10 + Q1 + \text{diag}(\text{Rep}) \cdot \text{contRep} - M3 \cdot \text{redQ1}\} + \\
 & M2 \cdot (QAj0 + QAj) + M1 \cdot (Q30 + Q3) + M1 \cdot (Q50 + Q5) \quad (\pi\text{contmax}) \\
 & - \text{diag}(1.03 \cdot \text{ones}(7,1)) \cdot PD + \text{scontmax} = 0 \\
 & \text{sub} - \text{ssub} = 0 \quad (\pi\text{submin}) \\
 & \text{sub} - \text{submax} + \text{ssubmax} = 0 \quad (\pi\text{submax}) \\
 & \text{contRep} - \text{scontRepmin} = 0 \quad (\pi\text{contrepmin}) \\
 & \text{contRep} - u \cdot \text{contRepmax} + \text{scontRepmax} = 0 \quad (\pi\text{contrepmax}) \\
 & \text{redQ1} - \text{sredQ1min} = 0 \quad (\pi\text{redQ1min}) \\
 & \text{redQ1} - 0,04 \cdot M4 \cdot \text{Contratado} + \text{sredQ1max} = 0 \quad (\pi\text{redQ1max}) \\
 & QAj - \text{sQAjmin} = 0 \quad (\pi QAjmin) \\
 & QAj - 0,01 \cdot \text{Contratado} + \text{sQAjmax} = 0 \quad (\pi QAjmax) \\
 & Q1 - \text{sQ1min} = 0 \quad (\pi Q1min) \\
 & Q3 - \text{sQ3min} = 0 \quad (\pi Q3min) \\
 & Q5 - \text{sQ5min} = 0 \quad (\pi Q5min) \\
 & Q3 - 0,02 \cdot M4 \cdot PD + \text{sQ3max} = 0 \quad (\pi Q3max) \\
 & Q1 - 0,01 \cdot M5 \cdot PD + \text{sQ1max} = 0 \quad (\pi Q1max) \\
 & M6 \cdot Q1 - Q1_3^{\text{disp}} + \text{sQ1disp} = 0 \quad (\pi Q1disp) \\
 & M6 \cdot Q5 - Q5_3^{\text{disp}} + \text{sQ5disp} = 0 \quad (\pi Q5disp) \\
 & M6 \cdot Q3 - Q3_3^{\text{disp}} + \text{sQ3disp} = 0 \quad (\pi Q3disp) \\
 & M6 \cdot QAj - QAj_3^{\text{disp}} + \text{sQAjdisp} = 0 \quad (\pi QAjdisp) \\
 & \text{diag}(\text{Reposição}) \cdot \text{contRep} - \text{diag}(\text{Reposição}) + 0.04 \cdot EV - \text{srep} = 0 \quad (\pi\text{rep})
 \end{aligned}$$

onde

$-\pi_{contmin}$, $\pi_{contmax}$, $\pi_{contrepmin}$, $\pi_{contrepmax}$, $\pi_{redQ1min}$, $\pi_{redQ1max}$, π_{QAjmin} , π_{QAjmax} , π_{Q1min} , π_{Q1max} , π_{Q3min} , π_{Q3max} , π_{Q5min} , π_{submin} , π_{submax} , π_{Q1disp} , π_{Q3disp} , π_{Q5disp} , $\pi_{QAjdisp}$, π_{rep} representam os multiplicadores de Lagrange associados às restrições de desigualdade que limitam os valores totais máximos e mínimos a serem contratados;

$-ssub$, $ssubmax$, $scontmin$, $scontmax$, $scontRepmin$, $scontRepmax$, $sQ1min$, $sQ1max$, $sQ3min$, $sQ3max$, $sQ5min$, $sredQ1min$, $sredQ1max$, $sQAjmin$, $sQAjmax$, $sQ1disp$, $sQ3disp$, $sQ5disp$, $sQAjdisp$, $srep$ representam as variáveis de folga associadas às restrições de desigualdade que limitam os valores totais máximos e mínimos a serem contratados.

Ao se associar uma função barreira logarítmica e as restrições de igualdade através de multiplicadores de Lagrange à função objetivo, tal qual (4.10), constrói-se uma função Lagrangeana (L) estendida somente com restrições de igualdade:

$$\begin{aligned}
 L = & \{wc \cdot u^t \cdot [\text{diag}(Q1) \cdot VL1 + \text{diag}(REPOSIÇÃO) \cdot contRep \cdot VL1 + \text{diag}(QAj) \cdot VLAj + \text{diag}(Q3) \cdot \\
 & VL3 + \text{diag}(Q5) \cdot VL5] + wpen \cdot [(sub \cdot PD) \cdot (PLD - \min(PLD, VR) + \max(PLD, VR))] + \pi_{contmin}^t \cdot \\
 & \{\text{diag}(u) - sub\} \cdot PD - \{EV + M1 \cdot \{Q10 + Q1 + \text{diag}(REPOSIÇÃO) \cdot contRep - M3 \cdot redQ1\} + \\
 & M2 \cdot (QAj0 + QAj) + M1 \cdot (Q30 + Q3) + M1 \cdot (Q50 + Q5)\} + scontmin\} + \pi_{contmax}^t \cdot \\
 & \{EV + M1 \cdot \{Q10 + Q1 + \text{diag}(REPOSIÇÃO) \cdot contRep - M3 \cdot redQ1\} + M2 \cdot (QAj0 + QAj) + M1 \cdot \\
 & (Q30 + Q3) + M1 \cdot (Q50 + Q5) - [\text{diag}(1.03 \cdot u) \cdot PD + scontmax\} + \pi_{submin}^t \cdot (sub - ssub) + \\
 & \pi_{submax}^t \cdot (sub - submax + ssubmax) + \pi_{contRepmin}^t \cdot (contRep - scontRepmin) + \\
 & \pi_{contRepmax}^t \cdot (contRep - u \cdot contRepmax + scontRepmax) + \pi_{redQ1min}^t \cdot (redQ1 - \\
 & sredQ1min) + \pi_{redQ1max}^t \cdot \{redQ1 - 0.04 \cdot M2 \cdot \{EV + M1 \cdot (Q10 + Q1 + \text{diag}(REPOSIÇÃO) \cdot \\
 & contrep) - M3 \cdot redQ1 + M2 \cdot (QAj0 + QAj) + M1 \cdot (Q30 + Q3) + M1 \cdot (Q50 + Q5)\} + sredQ1max\} + \\
 & \pi_{QAjmin} \cdot (QAj - sQAjmin) + \pi_{QAjmax}^t \cdot \{QAj - 0.01 \cdot \{EV + M1 \cdot (Q10 + Q1 + \text{diag}(REPOSIÇÃO) \cdot \\
 & contrep) - M3 \cdot redQ1 + M2 \cdot (QAj0 + QAj) + M1 \cdot (Q30 + Q3) + M1 \cdot (Q50 + Q5)\} + sQAjmax\} + \\
 & \pi_{Q1min}^t \cdot (Q1 - sQ1min) + \pi_{Q3min}^t \cdot (Q3 - sQ3min) + \pi_{Q5min}^t \cdot (Q5 - sQ5min) + \pi_{Q3max}^t \cdot \\
 & (Q3 - 0.02 \cdot M4 \cdot PD + sQ3max) + \pi_{Q1max}^t \cdot (Q1 - 0.01 \cdot M5 \cdot PD + sQ1max) + \pi_{Q1disp}^t \cdot \\
 & (M6 \cdot Q1 - Q1_3^{disp} + sQ1disp) + \pi_{Q3disp}^t \cdot (M6 \cdot Q3 - Q3_3^{disp} + sQ3disp) + \pi_{Q5disp}^t \cdot \\
 & (M6 \cdot Q5 - Q5_3^{disp} + sQ5disp) + \pi_{QAjdisp}^t \cdot (M6 \cdot QAj - QAj_3^{disp} + sQAjdisp) + \pi_{rep}^t \cdot \\
 & (\text{diag}(Reposição) \cdot contRep - \text{diag}(Reposição) + 0.04 \cdot EV - srep) - mi \left\{ \sum_i [\ln(scontmin_i) + \right. \\
 & \ln(scontmax_i) + \ln(ssubmin_i) + \ln(ssubmax_i) + \ln(scontRepmin_i) + \ln(scontRepmax_i) + \\
 & \ln(sredQ1min_i) + \ln(sredQ1max_i) + \ln(sQAjmin_i) + \ln(sQAjmax_i) + \ln(sQ1min_i) + \ln(sQ3min_i) + \\
 & \ln(sQ5min_i) + \ln(sQ3max_i) + \ln(sQ1max_i) + \ln(sQ1disp_i) + \ln(sQ3disp_i) + \ln(sQ5disp_i) + \\
 & \left. \ln(sQAjdisp) + \ln(srep_i) \right\}
 \end{aligned}$$

Ao Lagrangeano, aplicam-se as condições de Karush-Kuhn-Tucker (condições de otimalidade), resolvendo-as pelo Método de Newton.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo procurou-se descrever a modelagem adotada para a solução do problema de otimização da compra de energia em leilões regulados, através de uma formulação matemática, considerando as diversas premissas já mencionadas e as restrições e limitações impostas pelo novo modelo adaptadas para utilização no Método dos Pontos Interiores – MPI.

O objetivo da modelagem adotada é minimizar os riscos da distribuidora na compra de energia em leilões através da minimização dos custos da energia total adquirida, considerando as penalidades que possam ser impostas por subcontratação, conforme estabelece a função objetivo adotada.

Através da restrição representada pela equação 5.26 procurou-se limitar a subcontratação em valores muito baixos ou próximos a zero e a sobrecontratação até o limite imposto pela legislação de 3%. Dessa forma, não se considerou a penalidade por sobrecontratação, pois sempre os valores resultantes estarão dentro do limite imposto. A expectativa é que os resultados dos respectivos valores sejam muito baixos ou próximos a zero.

A multa referente à penalização adicional por subcontratação foi considerada indiretamente através do peso atribuído à segunda parcela da função objetivo. Dessa forma pode-se simular diversas situações de impactos por subcontratação. Considerou-se também somente o cenário de referência de mercado das distribuidoras em virtude a tendência dos resultados de contratação seguirem esta projeção, conforme estabelece o trabalho de Dias (2007).

Resumindo, conclui-se que este capítulo descreveu a modelagem adotada no trabalho e que representa as condições essenciais para a gestão do risco na comercialização de energia pelas distribuidoras.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta no Capítulo 5.

Para fins de validação da metodologia proposta, consideraram-se dois casos: um primeiro caso utilizando-se dados gerados aleatoriamente, mas representando situações próximas à realidade constatada em leilões já realizados e um segundo caso utilizando os dados reais de uma distribuidora de grande porte considerada no trabalho de Buratti (2008).

O objetivo da utilização dos mesmos dados do trabalho de Buratti (2008) é ilustrativo e não comparativo e busca verificar a coerência nas respostas do método utilizado (MPI) e em conjunto com o primeiro caso estabelecer a validação da metodologia aqui proposta. Logo, enfatiza-se que apesar da modelagem do problema adotado neste trabalho ser muito próxima da modelagem adotada por Buratti (2008), as duas diferem em vários aspectos e não podem ser comparadas numericamente. Dessa forma, a apresentação do caso 2 é para fins ilustrativos com o objetivo de verificação da coerência da resposta de contratação do algoritmo em relação às estratégias e cenários adotados. Por outro lado, os resultados obtidos considerando os dados gerados aleatoriamente ilustram a validação da metodologia através de análises específicas, mencionadas na sequência deste capítulo.

O trabalho foi desenvolvido em MATLAB[®], versão 7.0.1 simulado em computador com processador INTEL PENTIUM T3400, 2,16 GHz, 3 GB de memória RAM com Sistema Operacional Windows Vista.

6.2 DADOS DE ENTRADA

O estudo contempla a análise de 5 períodos a frente, considerando o ano 2010 como ano de referência.

Dados de carga e contratação do ano 2009 são também integrados ao problema a fim de se estabelecer os limites impostos para o montante de redução no leilão A-1, ou seja, 4% da carga registrada pelo agente distribuidor no segundo ano anterior ao declarado.

Conforme já mencionado no Capítulo 5, os dados referentes à energia existente e já contratadas até o ano de referência 2010, energia nova proveniente dos leilões regulados, preços de energia, previsão do mercado de referência projetado, dentre outros são essenciais para as simulações do modelo. Os respectivos dados são apresentados a seguir, considerando os dois casos simulados.

Além disso, para inicializar o processo de otimização utilizando o Método dos Pontos Interiores é necessário atribuir valores iniciais para as variáveis a serem otimizadas.

Caso 1

Para este caso as simulações foram executadas considerando os dados gerados aleatoriamente, considerando as situações reais que se defrontam uma distribuidora. Esta situação ilustra os resultados e a coerência na resposta da ferramenta de otimização utilizada.

Caso 2

Conforme já comentado no item 6.1, para este caso adotaram-se os dados utilizados por Buratti (2008) para fins ilustrativos com o objetivo de verificação da coerência na resposta do algoritmo referente à contratação da energia nos diversos leilões até o ano 2015, utilizando o Método dos Pontos Interiores.

A modelagem adotada em Buratti (2008), apesar de ser semelhante aquela aqui adotada não pode ser factível de comparação, pois simplificações e análises de diferentes cenários são apresentadas de maneira distintas nos dois trabalhos. Dessa forma, os dados do trabalho de Buratti (2008) foram utilizados apenas para se dar uma visão mais realista.

6.2.1 Energia Existente

Conforme já mencionado no Capítulo 5, os dados são representados por vetores projetados nos horizontes 2009- 2015.

As Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam os valores das energias existentes contratadas antes de 2010 que estão sendo consumidas, bem como aquela ainda não entregue para os casos 1 e 2, respectivamente.

TABELA 6.1 ENERGIA EXISTENTE E CONTRATADA EM 2009(CASO1)

(MW)							
Energia	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EV	2010	2010	2015	2180	2312	2312	2330
Q10	150	100					
QAj0	100	100					
Q30	85	85	120	200			
Q50	0	0	0	0	0	0	

TABELA 6.2 ENERGIA EXISTENTE E CONTRATADA EM 2009(CASO 2)

(MW)							
Energia	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EV	2560	2560	2470	2330	2260	2080	2010
Q10	60	0					
QAj0	0	0					
Q30	0	0	50	120			
Q50	0	0	60	110	190	180	

6.2.2 Reposição

As Tabelas 6.3 e 6.4 apresentam os valores a serem repostos em virtude de descontrações para os casos 1 e 2, respectivamente.

TABELA 6.3 – REPRESENTAÇÃO DOS MONTANTES DE REPOSIÇÃO (CASO 1)

		(MW)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Rep			20	50	20	10	15

TABELA 6.4 – MONTANTES DE REPOSIÇÃO (CASO2)

		(MW)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Rep			90	140	70	180	70

6.2.3. Projeção do Mercado

As Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam os valores de energia projetados no cenário de referência para os casos 1 e 2, respectivamente.

TABELA 6.5 – VALORES DE ENERGIA NO CENÁRIO DE REFERÊNCIA (CASO1)

		(MWmédios)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
PD	2542	2620	2727	3005	3264	3350	3500

TABELA 6.6 – VALORES DE ENERGIA NO CENÁRIO DE REFERÊNCIA (CASO 2)

		(MWmédios)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
PD	2550	2620	2800	3120	3280	3490	3660

6.2.4. Preços de Energia

As Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os valores dos preços das energias existente e nova projetadas para os futuros leilões A-1, A-3, A-5 e A para os casos 1 e 2, respectivamente. Os valores previstos de energia foram estipulados como preços médios obtidos junto a uma distribuidora de grande porte.

TABELA 6.7 – VALORES DOS PREÇOS DE ENERGIA NOS DIVERSOS LEILÕES (CASO 1)

		(R\$/MWh)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
VL1	95	93	108	115	120	125	130
VL3	100	110	115	120	125	128	130
VL5	80	80	80	80	80	80	70
VAj	95	93	108	115	120	125	130

TABELA 6.8 – VALORES DOS PREÇOS DE ENERGIA NOS DIVERSOS LEILÕES (CASO 2)

		(R\$/MWh)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
VL1	115	115	115	118	119	118	118
VL3			128	130	120	150	155
VL5			80	90	100	105	110
VAj			110	115	160	170	175

6.2.5 Preços do Mercado de Curto Prazo

As Tabelas 6.9 e 6.10 apresentam os valores dos preços do mercado de curto prazo projetados para os anos subsequentes para os casos 1 e 2, respectivamente. Como não se trata de uma variável a ser otimizada e somente foi utilizada para simular a penalização da subcontratação, os valores foram estimados baseados em históricos de períodos anteriores ao horizonte estipulado e podem servir como dado referencial para diversas simulações e análise rápida da gestão do risco pela distribuidora.

TABELA 6.9 – VALORES DE PREÇOS DO MERCADO DE CURTO PRAZO (PLD) (CASO1)

		(R\$/MWh)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
PLD	34	36	45	48	50	52	54

TABELA 6.10 – VALORES DE PREÇOS DO MERCADO DE CURTO PRAZO (PLD) (CASO 2)

		(R\$/MWh)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
PLD			30	20	30	30	52

6.2.6 Valores de Referência - VR

As Tabelas 6.11 e 6.12 apresentam os valores dos preços de referência projetados para os casos 1 e 2, respectivamente. Da mesma forma que o **PLD**, o **VR** não se trata de uma variável a ser otimizada e somente foi utilizada para simular a penalização da subcontratação. Dessa forma, os valores também foram estimados baseados em históricos de períodos anteriores ao horizonte estipulado e podem servir como dado referencial para diversas simulações e análise rápida da gestão do risco pela distribuidora. Como o valor calculado do **VR** é a média ponderada dos valores do leilão A-3 e A-5, considerou-se a previsão do **VR** na proporção de 40% para o leilão A-3 e 60% para o leilão A-5 da mesma forma que Buratti (2008).

TABELA 6.11 – VALORES DE PREÇOS DE REFERÊNCIA (VR) (CASO1)

		(R\$/MWh)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
VR	78	129	130	130	131	132	130

TABELA 6.12 – VALORES DE PREÇOS DE REFERÊNCIA (VR) (CASO2)

		(R\$/MWh)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
VR	78	99	99	106	108	123	128

6.3 INICIALIZAÇÃO DOS DADOS DE SAÍDA

6.3.1 Energia Nova

As Tabelas 6.13 e 6.14 apresentam os valores iniciais das energias novas declaradas no período 2010 e que serão entregues nos anos subsequentes para os casos 1 e 2, respectivamente. Pelas características próprias de solução dos problemas de otimização pelo MPI, as variáveis a serem otimizadas devem ser inicializadas. Assim, os valores das variáveis **Q1**, **QAj**, **Q3** e **Q5**, destas tabelas, representam os valores iniciais estimados dentro dos limites impostos pelas respectivas restrições.

TABELA 6.13 - VALORES DAS ENERGIAS NOVAS A SEREM CONTRATADAS A PARTIR DO ANO 2010 (CASO1)

Montantes de Energia Nova (MW)							
Energia	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Q1			20	26	28	29	31
QAj			20	24	24	24	24
Q3					50	50	50
Q5							100

TABELA 6.14 - VALORES DAS ENERGIAS NOVAS A SEREM CONTRATADAS A PARTIR DO ANO 2010 (CASO2)

Montantes de Energia Nova (MW)							
Energia	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Q1			0	0	0	0	0
QAj			0	0	0	0	0
Q3					55	103	103
Q5							105

6.3.2 Subcontratação

Os valores de subcontratação foram estimados dentro da faixa estipulada da restrição, conforme as equações 5.26 e 5.29, ou seja, maior que zero até um valor de subcontratação máxima adotado de 3%.

O valor máximo de subcontratação foi adotado de tal forma que exista uma margem razoável para que as variáveis de folga atinjam valores positivos e consigam atingir a solução ótima de contratação, bem como um valor máximo que se possa admitir sem prejuízos extremos para a distribuidora. As Tabelas 6.15 e 6.16 apresentam os valores iniciais adotados para os casos 1 e 2, respectivamente. Em virtude do alto valor do peso adotado para penalizar a subcontratação os valores iniciais adotados foram bem baixos. Da mesma forma que **PLD** e **VR**, este dado pode servir de referência para diversas simulações de risco.

TABELA 6.15 – VALORES DE SUBCONTRATAÇÃO (CASO1)

		Subcontratação(%)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sub			0,039	0,039	0,039	0,039	0,039

TABELA 6.16 – VALORES DE SUBCONTRATAÇÃO (CASO2)

		Subcontratação(%)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sub			0,029	0,029	0,029	0,029	0,029

6.3.3 Redução

As Tabelas 6.17 e 6.18 apresentam os valores iniciais de redução dos montantes de energia, **RedQ1**, para os casos 1 e 2, respectivamente.

TABELA 6.17 – VALORES DE REDUÇÃO DA ENERGIA INICIALMENTE CONTRATADA (CASO1)

		Redução (MW)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
RedQ1			10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-5}

TABELA 6.18 – VALORES DE REDUÇÃO DA ENERGIA INICIALMENTE CONTRATADA (CASO2)

		Redução (MW)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
RedQ1			10^{-5}	10^{-5}	1	1	1

6.3.4 Reposição

As Tabelas 6.19 e 6.20 apresentam os valores iniciais de percentagem do montante de reposição da energia, **contrep** necessária no horizonte considerado para os casos 1 e 2, respectivamente.

TABELA 6.19 – MONTANTES DE REPOSIÇÃO NO HORIZONTE ESTUDADO (CASO1)

		(%)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Contrep			10^{-3}	0,5	0,5	1,04	0,5

TABELA 6.20 – MONTANTES DE REPOSIÇÃO NO HORIZONTE ESTUDADO (CASO2)

		(%)					
Ano	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Contrep			1	1	1	1	1

Resumindo, os dados iniciais e de entrada para os dois casos podem ser representados pelas Tabelas 6.21 a 6.24.

TABELA 6.21 – DADOS DE ENTRADA (CASO1)

		Dados de Entrada					
Tipo	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EV	2010	2010	2015	2180	2312	2312	2330
Q10	150	100	0	0	0	0	0
Q30	85	85	120	200	0	0	0
Q50	0	0	0	0	0	0	0
QAj0	100	100	0	0	0	0	0
PD	2542	2620	2727	3005	3264	3350	3500
VL1	95	93	108	115	120	125	130
VL3	100	110	115	120	125	128	130
VL5	80	80	80	80	80	80	70
VLAj	95	93	108	115	120	125	130
VR	78	129	130	130	131	132	130
PLD	34	36	45	48	50	52	54
Rep	0	0	20	50	20	10	15

TABELA 6.22 – DADOS DE INICIALIZAÇÃO (CASO1)

		Dados de inicialização					
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Q1	0	0	20	26	28	29	31
Q3	0	0	0	0	50	50	50
Q5	0	0	0	0	0	0	100
QAj	0	0	20	24	24	24	24
RedQ1	0	0	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
Contrep	0	0	0,001	0,5	0,5	1,04	0,5
Sub	0	0	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039

TABELA 6.23 – DADOS DE ENTRADA (CASO2)

Dados de Entrada							
Tipo	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EV	2560	2560	2470	2330	2260	2080	2010
Q10	60	0					
Q30	0	0					
Q50	0	0	60	110	190	180	
QAj0	0	0					
PD	2550	2620	2800	3120	3280	3490	3660
VL1	115	115	115	118	119	118	118
VL3			128	130	120	150	155
VL5			80	90	100	105	110
VLAj			110	115	160	170	175
VR	78	99	99	106	108	123	128
PLD			30	20	30	30	52
Rep			90	140	70	180	70

TABELA 6.24 – DADOS DE INICIALIZAÇÃO (CASO2)

Dados de Inicialização							
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Q1	0	0	0	0	0	0	0
Q3					55	10^{-3}	10^{-3}
Q5							105
QAj	0	0	0	0	0	0	0
RedQ1			10^{-5}	10^{-5}	1	1	1
Contrep			1	1	1	1	1
Sub			0,029	0,029	0,029	0,029	0,029

6.4. CONFIGURAÇÃO INICIAL DO ALGORITMO

Para iniciar o processo de otimização, algumas condições iniciais devem ser estabelecidas e são descritas a seguir.

6.4.1 Valores dos pesos

Para se escolher dos pesos w_c e w_{pen} atribuídos, levou-se em consideração a ordem de grandeza de cada função objetivo. Como o valor f_1 contabiliza todo o custo ao longo dos 5 anos, há uma tendência dessa função dominar a solução, levando à subcontratação a fim de minimizar o custo total. Assim, para contornar esse tipo de solução, foi dado um valor elevado para

w_{pen} a fim de se obter soluções pouco subcontratadas, ou seja, w_c igual a 1 e w_{pen} igual a 100.000.

6.4.2 Critério de parada

O critério de parada estabelece o número máximo de iterações no processo de resolução. Estabeleceu-se o número máximo de 100 iterações como critério de parada do programa se o mesmo não convergir.

6.4.3 Critério de convergência

Pelo fato do método ser iterativo é necessário estabelecer o limite máximo de variação entre as variáveis a serem otimizadas em cada iteração.

A tolerância admitida para o programa convergir foi estipulada em 0,0001, ou seja, para cada iteração o valor da norma infinita das condições de otimalidade de primeira ordem deve ser menor que a tolerância estipulada.

6.4.4 Parâmetros de atualização

A atualização dos valores calculados em cada iteração é feita através do parâmetro de barreira μ , calculado através dos multiplicadores de Langrange associados às restrições de desigualdade, do número de variáveis a serem otimizadas e do fator de aceleração do processo.

Utilizaram-se diferentes valores iniciais do parâmetro de barreira (equação 4.42 do capítulo 4), tais como 0,001; 0,01 e 0,1, assim como diferentes valores de fator de aceleração β (equação 4.42 do capítulo 4), tais como 1, 5 e 12,5. Para várias combinações desses parâmetros, obtiveram-se sempre os mesmo resultados e semelhantes números de iterações para o processo convergir (em torno de 70 iterações em 17 s).

Para as simulações apresentadas, considerou-se o valor inicial do parâmetro de barreira μ igual a 0,1.

Para acelerar o processo de resolução considerou-se o fator de aceleração β igual a 12,5.

6.5 Resultados

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos nos dois casos simulados.

Caso 1:

Para validar a metodologia utilizada, várias simulações foram realizadas com distintos cenários de mercado projetados aleatoriamente. Constatou-se que em todas as simulações o algoritmo tende a responder com uma leve subcontratação e sobrecontratações dentro dos limites impostos, chegando também a atingir os valores ideais, ou seja sem sub ou sobrecontratações. Em todos os casos, o algoritmo responde adequadamente às estratégias de contratação.

A Tabela 6.25 representa a simulação dos resultados obtidos considerando o mercado de referência estipulado. Em conformidade com o modelo existe uma tendência a uma leve sobrecontratação de 1,9% dentro do limite estipulado de 3%.

TABELA 6.25 – SIMULAÇÃO 1 - RESULTADOS OBTIDOS (CASO1)

Tipo	2011	2012	2013	2014	2015
Q1[MW]	26,20	26,1	28,2	27,6	29
Q3[MW]			50,9	34,7	0
Q5[MW]					101,83
QAj[MW]	27,3	0,03	3,5	13,8	0
RedQ1[MW]	0	0	0	0	0
Contrep[%]	92,6	92,6	67,2	104	19,2
Sub[%]	0	0	0	0	0
Sobre[%]	0	1,9	0	0	0
Contratado[MW]	2727	3064	3265	3352	3500
PD [MW]	2727	3005	3264	3350	3500
Custo(mil.R\$)	5676,50	6084,00	8387,00	7737,6	8231,4
fo(mil.R\$)	5676,50	6084,00	8387,00	7737,6	8231,4

A Figura 6.1 ilustra os valores ótimos referentes à contratação de energia nos leilões A-1, A-3, A-5 e Ajuste, bem como os valores de reposição e exposição à sobrecontratação quando referidos ao cenário de referência.

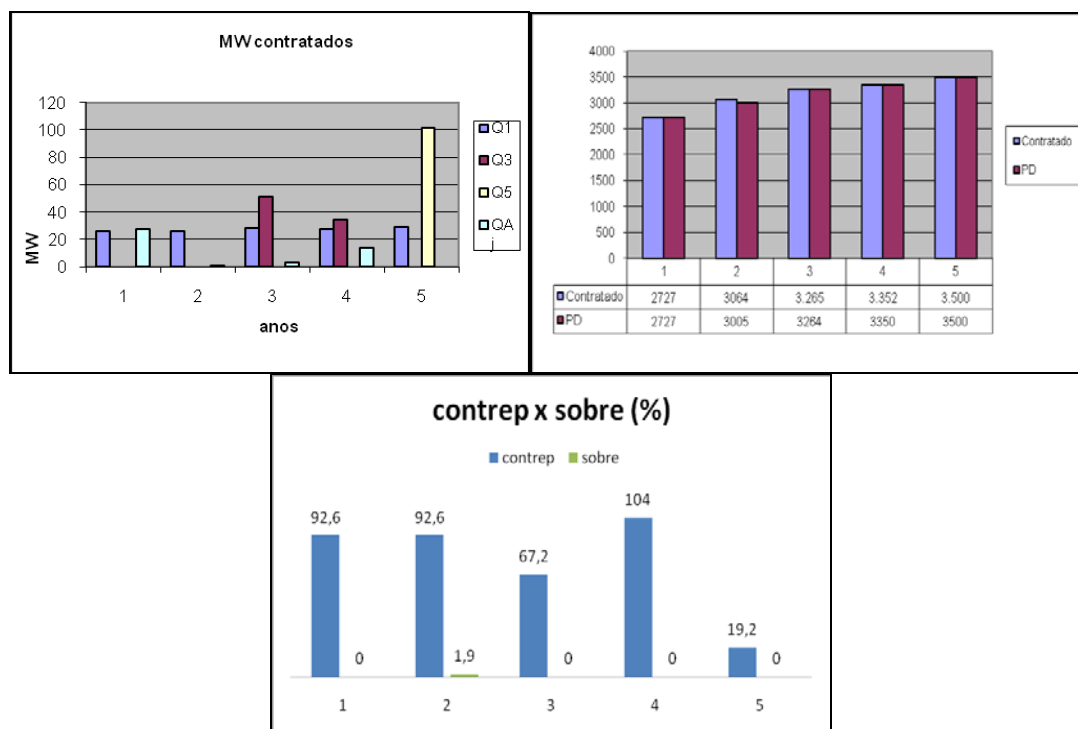


FIGURA 6.1. RESULTADOS ÓTIMOS ENCONTRADOS PARA A SIMULAÇÃO 1

A Tabela 6.26 representa os resultados obtidos simulando-se desvios acima do mercado de referência em todo o horizonte projetado produzindo-se uma visão otimista.

TABELA 6.26 – SIMULAÇÃO 2 - RESULTADOS OBTIDOS (CASO1)

Tipo	2011	2012	2013	2014	2015
Q1[MW]	26,2	27,7	31,25	28,5	30,9
Q3[MW]	0	0	55,4	46,4	0,07
Q5[MW]	0	0	0	0	103,7
QAj[MW]	27,29	31,05	33,5	21,4	16,4
RedQ1[MW]	0	0	0	0	0
Contrep[%]	105	105	97,9	104	47,6
Sub[%]	1,47	0,62	0	0	0
Sobre[%]	0	0	0	1,03	0,3
Contratado[MW]	2729	3105	3350	3425	3552
PD[MW]	2770	3125	3350	3390	3540
Custo(mil.R\$)	5857,00	9340,00	12444,00	9703,00	12569,00
fo(mil.R\$)	9717,00	11191,00	12444,00	9703,00	12569,00

A Figura 6.2 ilustra os valores ótimos referentes à contratação de energia nos leilões A-1, A-3, A-5 e Ajuste, bem como os valores de reposição e exposição à sub e sobrecontratação quando referidos ao cenário com desvio acima do mercado de referência.

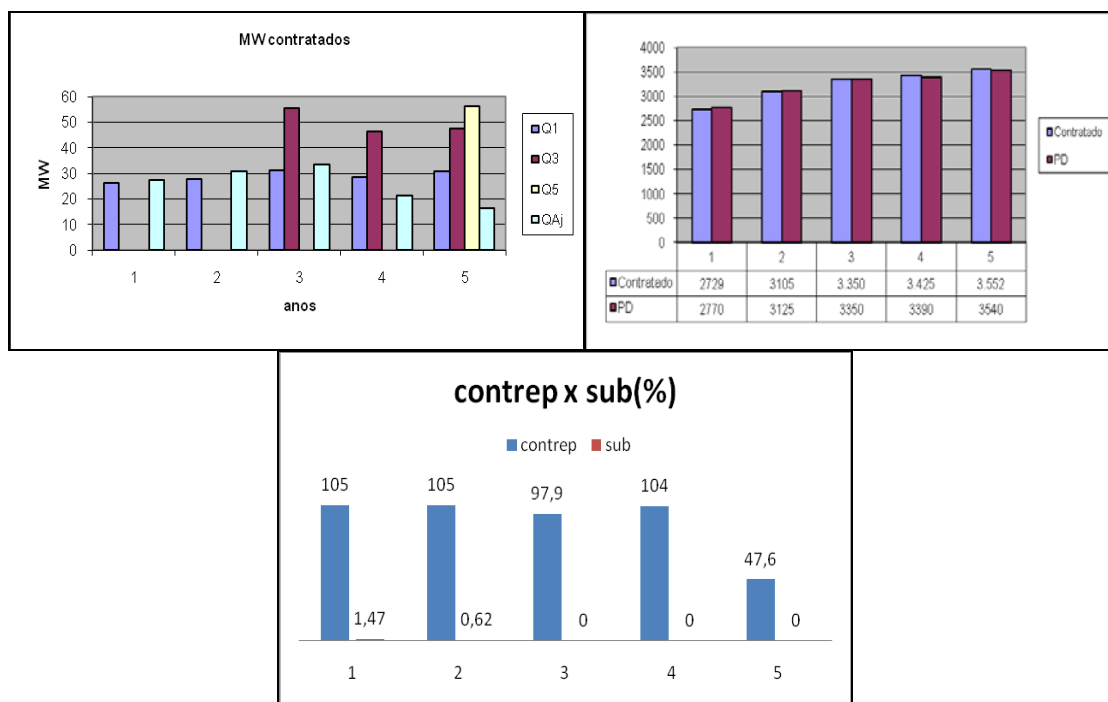


FIGURA 6.2 - RESULTADOS ÓTIMOS ENCONTRADOS PARA A SIMULAÇÃO 2

A Tabela 6.27 representa os resultados obtidos simulando-se desvios abaixo do mercado de referência em todo o horizonte projetado produzindo-se uma visão pessimista.

TABELA 6.27 – SIMULAÇÃO 3 - RESULTADOS OBTIDOS (CASO1)

Tipo	2011	2012	2013	2014	2015
Q1[MW]	25,4	26,08	27,8	26,2	20,1
Q3[MW]			45,9	0,24	0
Q5[MW]					120,84
QAj[MW]	14,6	0,1	0	4,35	0
RedQ1[MW]	0	0	0	0	0
Contrep[%]	0,1	92,3	27,06	104	7,2
Sub[%]	0	0	0	0	0
Sobre[%]	0	2,85	0,8	0	0
Contratado[MW]	2695	3032	3228	3270	3430
PD [MW]	2695	2950	3200	3270	3430
Custo(mil.R\$)	3157,00	6074,00	7096,00	3759,5	8183,5
fo(mil.R\$)	3157,00	6074,00	7096,00	3759,5	8183,5

A Figura 6.3 ilustra os valores ótimos referentes à contratação de energia nos leilões A-1, A-3, A-5 e Ajuste, bem como os valores de reposição e exposição à sub e sobrecontratação quando referidos ao cenário com desvio abaixo do mercado de referência.

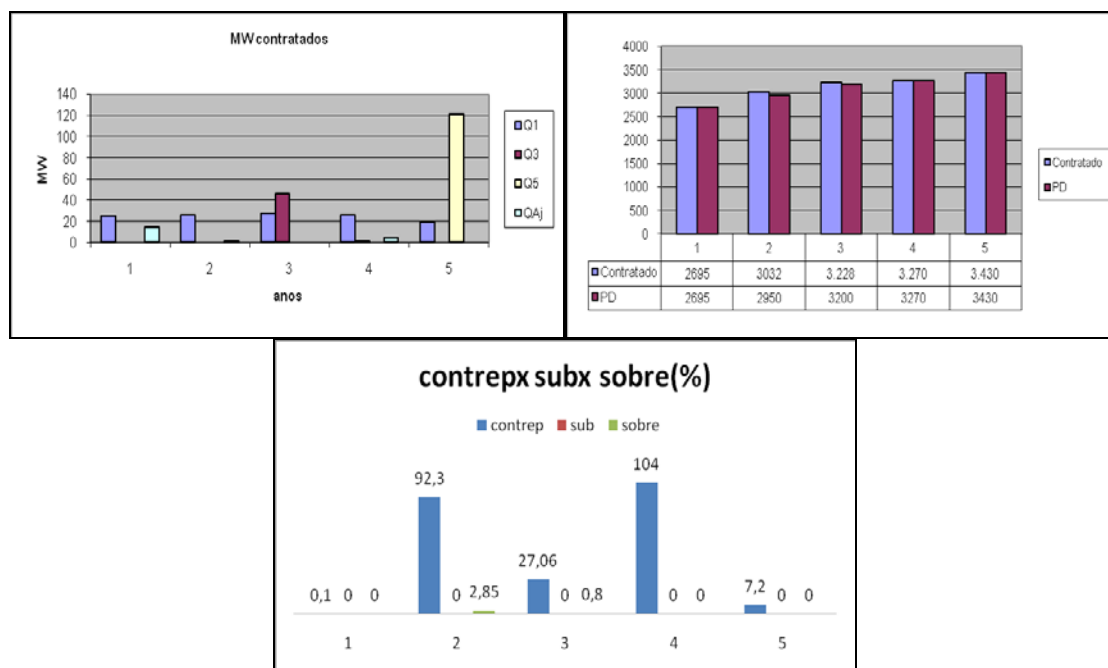


FIGURA 6.3 - RESULTADOS ÓTIMOS ENCONTRADOS PARA A SIMULAÇÃO 3

A Tabela 6.28 apresenta os resultados ideais obtidos considerando desvios acima do mercado de referência projetado no ano 2012 e 2013, ou seja, sem sub e sobrecontratações.

TABELA 6.28 – SIMULAÇÃO 4 - RESULTADOS OBTIDOS (CASO1)

Tipo	2011	2012	2013	2014	2015
Q1[MW]	26,20	26,03	28,15	27,74	29,6
Q3[MW]			50,2	32,6	1,4
Q5[MW]					97,6
QAj[MW]	27,3	2,8	5,08	14,86	0,02
RedQ1[MW]	0	0	0	0	0
Contrep[%]	94	105	56	104	24,4
Sub[%]	0	0	0	0	0
Sobre[%]	0	0	0	0	0
Contratado[MW]	2727	3073	3272	3353	3500
PD [MW]	2727	3072	3270	3350	3500
Custo(mil.R\$)	5676,50	6824,30	8465,50	7739,10	8281,10
fo(mil.R\$)	5676,50	6824,30	8465,50	7739,10	8281,10

A Figura 6.4 ilustra os valores ótimos referentes à contratação de energia nos leilões A-1, A-3, A-5 e Ajuste, bem como os valores de reposição e exposição à sub e sobrecontratação quando referidos ao cenário com desvios acima do mercado de referência nos anos 2012 e 2013.

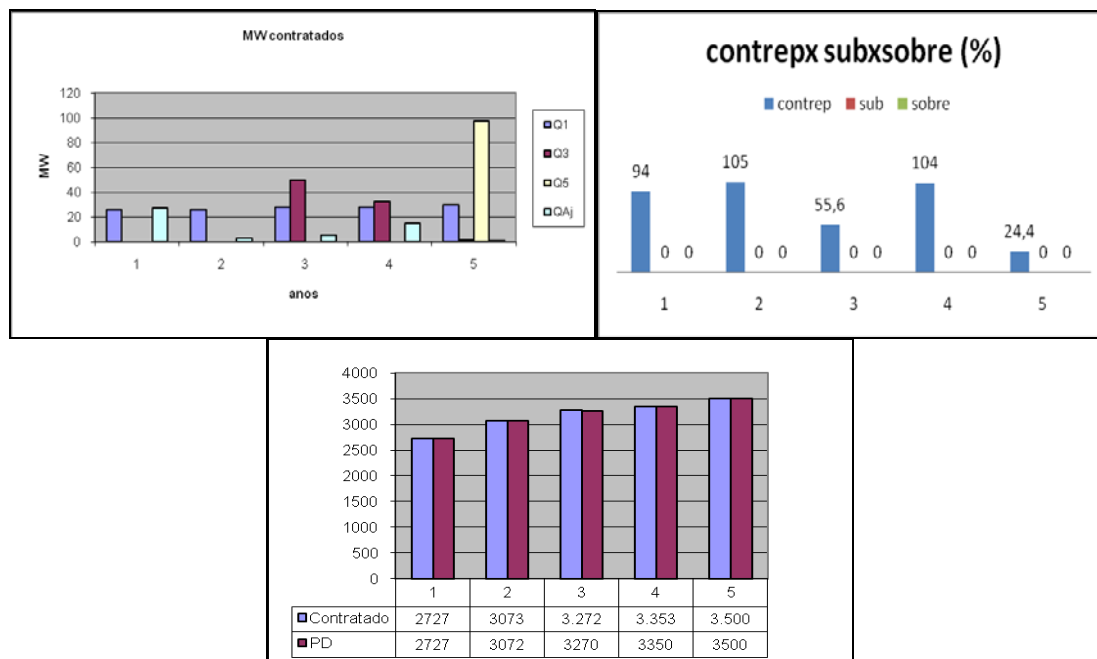


FIGURA 6.4 - RESULTADOS ÓTIMOS ENCONTRADOS PARA A SIMULAÇÃO 4

A Tabela 6.29 apresenta os resultados obtidos considerando desvios nos anos 2012 e 2013 abaixo do mercado de referência projetado.

TABELA 6.29 – SIMULAÇÃO 5 - RESULTADOS OBTIDOS

Tipo	2011	2012	2013	2014	2015
Q1[MW]	26	26,04	28,15	29,18	26,97
Q3[MW]			50,86	51,97	0
Q5[MW]					102,75
QAj[MW]	27,3	0,08	0,02	25,35	0
RedQ1[MW]	0	0	0	0	0
Contrep[%]	93,65	35,7	69,57	104	12,27
Sub[%]	0	0	0	0	0
Sobre[%]	0	2,95	1,1	0	1,02
Contratado[MW]	2727	3036	3234	3350	3594
PD[MW]	2727	2950	3200	3350	3530
Custo(mil.R\$)	5676,00	3692,00	8328,00	10630,00	7985,00
fo(mil.R\$)	5676,00	3692,00	8328,00	10630,00	7985,00

A Figura 6.5 ilustra os valores ótimos referentes à contratação de energia nos leilões A-1, A-3, A-5 e Ajuste, bem como os valores de reposição e

exposição à sub e sobrecontratação quando referidos ao cenário com desvios abaixo do mercado de referência nos anos 2012 e 2013.

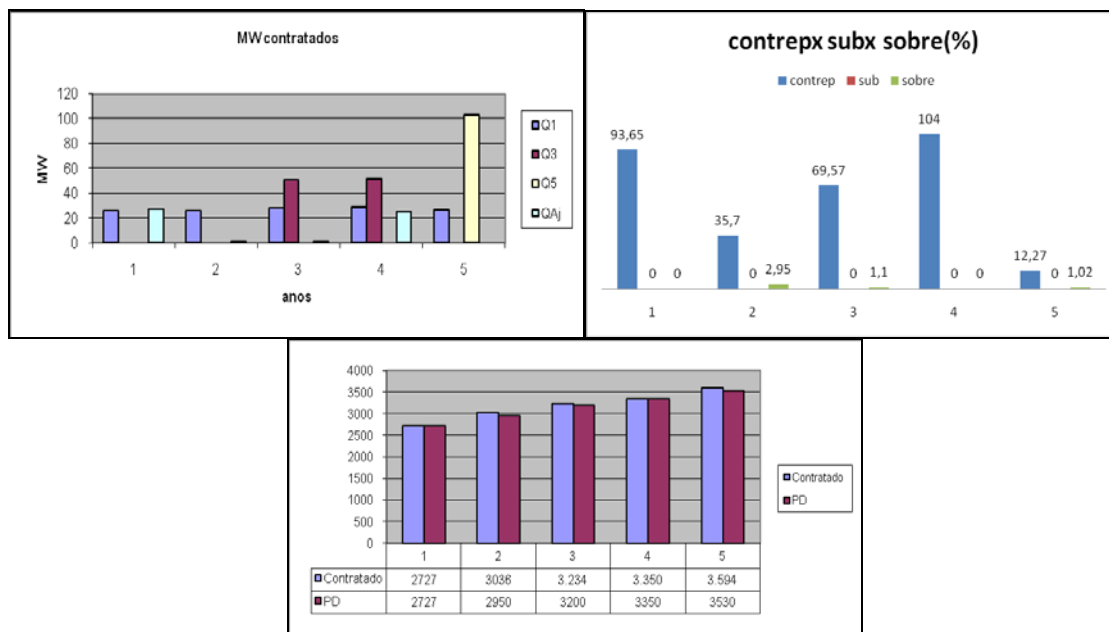


FIGURA 6.5 - RESULTADOS ÓTIMOS ENCONTRADOS PARA A SIMULAÇÃO 5

A Tabela 6.30 apresenta os resultados obtidos simulando-se desvios acima do mercado de referência nos anos 2011 e 2012 e abaixo no ano 2013 e 2015. Percebe-se a tendência do método em seguir a curva de referência, pois houve subcontratação para os anos 2011 e 2012 e sobrecontratação para o ano 2013.

TABELA 6.30 – SIMULAÇÃO 6 - RESULTADOS OBTIDOS

Tipo	2011	2012	2013	2014	2015
Q1[MW]	26,2	27,3	23,28	28,51	27,89
Q3[MW]			26,13	37,77	0,0003
Q5[MW]					209,54
QAj[MW]	27,29	31,05	13,86	28,73	4,39
RedQ1[MW]	0	0	0	0	0
Contrep[%]	105	105	15,3	104	14,47
Sub[%]	0,02	0,63	0	0	0
Sobre[%]	0	0	2,8	0	1,8
Contratado[MW]	2729	3105	3276	3350	3494
PD[MW]	2730	3125	3184	3350	3430
Custo(mil.R\$)	5873,00	9306,00	5905,00	9592,00	13977,00
fo(mil.R\$)	5921,00	11176,00	5905,00	9592,00	13977,00

A Figura 6.6 ilustra os valores ótimos referentes à contratação de energia nos leilões A-1, A-3, A-5 e Ajuste, bem como os valores de reposição e exposição à sub e sobrecontratação quando referidos ao cenário com desvios acima do mercado de referência nos anos 2011 e 2012 e abaixo nos anos 2013 e 2015.

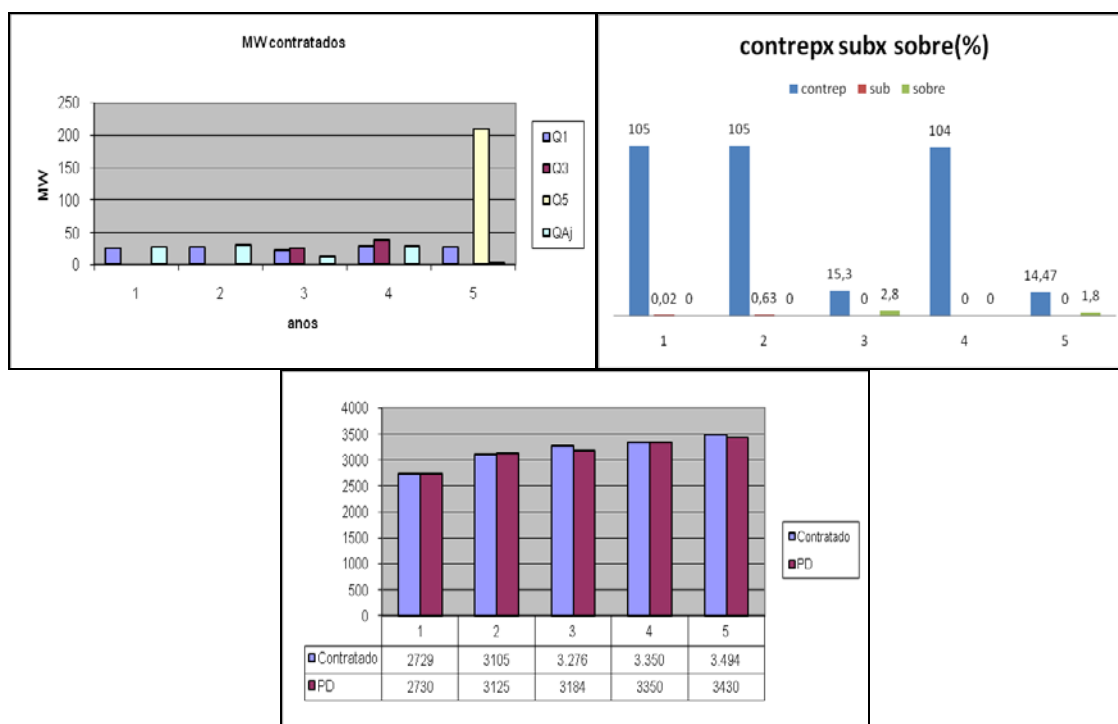


FIGURA 6.6 - RESULTADOS ÓTIMOS ENCONTRADOS PARA A SIMULAÇÃO 6

6.5.1 Análise dos resultados

Analisando os resultados verificados no caso 1, percebe-se que o programa respondeu adequadamente em relação às estratégias de contratação e em relação às limitações impostas. Pode-se concluir que:

- Para as simulações 2 e 6 os valores de **Q1** referentes a 2011 a 2013 foram ajustados de acordo com seus limites máximos de repasse que é de 1% do valor da carga 1 ano antes;
- Para as simulações 2 e 6 os valores de **Q3** referente a 2013 e 2014 foram ajustados nos seus limites máximos de repasse que é de 2% da carga verificada 2 anos antes da realização da mesma;
- Para todas as simulações, o valor de **Q5** que não tem limite máximo de repasse, foi ajustado, em 2015, de modo a cobrir toda a carga excedente

desse ano não coberta por contratos anteriores. Além disso, preferiu corretamente contratar o máximo necessário neste leilão A-5 ao invés dos leilões A-3 ou A -1 pois os preços da energia nos leilões A-5 são menores que no leilão A-3 em virtude de serem direcionados principalmente para empreendimentos hidráulicos;

- Para as simulações 2 e 6 os valores de **QAj** referentes a 2011 e 2012 ficaram ajustados no seu limite máximo de repasse que é de 1% da carga total contratada;

- Não se realizou nenhuma redução dos leilões A-1, pois houve aumento de carga ao longo dos anos que não justifica redução de contratos A-1;

- Para todas as simulações, os valores de **contrep** indicaram uma reposição mínima em 2015. Essa atitude se justifica, pois foi considerado como valor do montante de energia recontratada o mesmo de VL1, que é quase o dobro do valor de leilão A-5 nesse ano. Assim, o algoritmo optou por comprar o máximo na categoria A-5 repor o mínimo em 2015;

- Pelas Tabelas 6.26 e 6.30 percebe-se que as mesmas observações feitas anteriormente permanecem válidas, entretanto há uma tendência de uma leve subcontratação em virtude dos valores contratados em **Q1** atingirem seu limite máximo;

- Para a simulação 4 não ocorreu sobrecontratação e nem subcontratação o que é considerado a situação ideal, ou seja, com a concessionária sempre 100% contratada.

- Os resultados apresentam uma tendência a sobrecontratação dentro dos limites estipulados pelo modelo.

- O processo estabelece que os valores ótimos ou eficientes encontrados seguem a projeção de demanda de referência da concessionária, conforme pode ser verificado pelas tabelas 6.26, 6.27 e 6.30.

Caso 2:

O resultado obtido para o caso 2 está representado na Tabela 6.31. Da mesma forma que o Caso 1 o algoritmo respondeu adequadamente às estratégias de contratação.

TABELA 6.31 – RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 2

Tipo	2011	2012	2013	2014	2015
Q1[MW]	26,2	28,0	25,6	0,001	0,001
Q3[MW]			40,4	0,001	0,001
Q5[MW]					170
QAj[MW]	28,1	31,1	0,0009	0,001	0,0009
RedQ1[MW]	0,0012	0,0012	0	0	0
Contrep[%]	100	100	100	100	100
Sub[%]	0	0,27	0	0	0
Sobre[%]	0,32	0	1,76	0	0
Contratado[MW]	2809	3110	3338	3487	3657
PD[MW]	2800	3120	3280	3490	3660
Custo(mil.R\$)	14247,00	18221,00	11838,00	15506,00	19681,00
fo(mil.R\$)	14247,00	22602,00	11838,00	15506,00	19681,00

A Figura 6.7 ilustra os valores ótimos referentes à contratação de energia nos leilões A-1, A-3, A-5 e Ajuste, bem como os valores de reposição e exposição à sub e sobrecontratação encontrados para o caso 2.

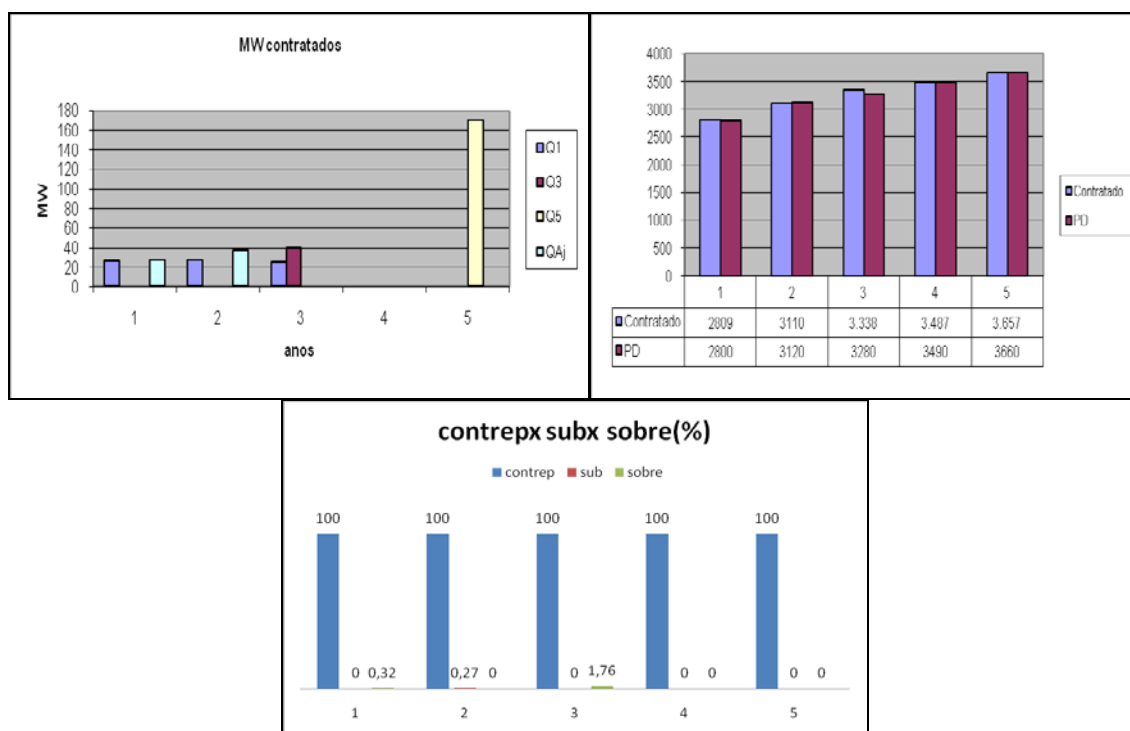


FIGURA 6.7 - RESULTADOS ÓTIMOS ENCONTRADOS PARA O CASO 2

Analisando os resultados para o caso 2, percebe-se que praticamente as mesmas conclusões podem ser verificadas, certificando a coerência na resposta de contratação de energia nos resultados apresentados pelo método MPI.

Em ambos os trabalhos houve a necessidade de reposição semelhante e próxima ao máximo valor estipulado. Percebe-se que o algoritmo adotado responde adequadamente às limitações dos valores máximos de 100% estipulados por Buratti (2008). Percebe-se também que o programa responde com reposição em 2014 e 2015 ao invés de contratar no leilão de Ajuste ou no leilão A-3. Esta ação se justifica, pois os valores nos leilões A-3 e Ajuste foram considerados bem mais altos que os valores dos leilões A-1.

O trabalho de Buratti (2008) foi modelado com a estratégia de suprir descontrações prioritariamente pela reposição, depois pelos leilões A-3, A-5 e por último pelo MCSD e pelo Ajuste como última alternativa para evitar sub ou sobrecontrações. Também analisa sob os cenários projetados para o mercado otimista e pessimista.

Já na modelagem utilizando o MPI, adotou-se a estratégia de repor as descontrações com **contrep**, A-1, A-3, A5 e Ajuste. Não foi considerado o MCSD e somente o cenário de referência foi adotado. Neste caso não houve necessidade de descontrações, pois a carga aumentou no decorrer do período, diferente da situação verificada por Buratti (2008), onde a devolução foi necessária para aliviar os níveis de sobrecontração.

Como era previsto para ambos os trabalhos, a contratação da energia no leilão de ajuste é utilizada como última alternativa, pois foi configurada com valores mais altos. Dessa forma, a resposta do algoritmo para este leilão foi baixa e próxima a zero no período. Para os anos 2011 e 2012 ainda foi necessária a sua contratação em virtude dos limites de contratação do A-1 serem atingidos.

Houve sub e sobrecontrações dentro dos limites estipulados para ambos os trabalhos, entretanto a magnitude desses valores foi mais intensa no trabalho de Buratti (2008) em virtude da estratégia de contratação considerar o cenário pessimista e otimista para a previsão do mercado. A estratégia deste trabalho foi de considerar o cenário de referência como ótimo.

Não houve contratação dos montantes de energia no leilão A-3 nos dois casos, entretanto na formulação deste trabalho a contratação seria priorizada para o leilão A5 tal como ocorreu. No caso de Buratti (2008) esta contratação não foi priorizada, pois foi analisada a possibilidade de utilização do MCSD e devoluções.

6.5.2 Considerações Finais

Neste capítulo se apresentaram os resultados obtidos em diversas simulações, considerando um caso gerado aleatoriamente e um caso real.

Para ambos os casos, as simulações validaram a metodologia proposta baseada no Método dos Pontos Interiores.

Os resultados de (7) sete simulações, considerando diversos cenários de referência projetados no horizonte estudado foram apresentados para verificação da consistência das respostas. O algoritmo apresentou respostas adequadas e coerentes com as estratégias de contratação modeladas.

Utilizaram-se os dados descritos no trabalho de Buratti (2008), que utiliza técnicas de IA, para verificar a tendência das respostas na modelagem adotada pelo MPI. Apesar das modelagens dos dois trabalhos serem distintas, os resultados das mesmas se aproximaram muito.

Assim, pode-se concluir que a modelagem aqui apresentada fornece resultados adequados e respostas de contratação compatíveis com as estratégias obtidas por técnicas de IA.

Dessa forma a metodologia proposta é uma alternativa adicional às técnicas normalmente utilizadas para a compra de energia em leilões regulados.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O novo modelo do setor elétrico, implantado através do Decreto 5163/2004 trouxe uma nova visão estratégica em relação ao processo de comercialização da energia elétrica, tanto para o ambiente livre como para o ambiente regulado. Com o objetivo de garantir a expansão da oferta de energia, o atendimento e a modicidade tarifária, fatores essenciais para o desenvolvimento do país, o novo modelo impôs riscos adicionais às Distribuidoras com a obrigatoriedade de contratação de 100% de seu mercado em leilões regulados com preços descendentes por um período de 5 anos antecipados.

Assim sendo, ficou extremamente importante para as Distribuidoras desenvolver ferramentas de apoio que pudessem prever com precisão o mercado a ser atendido nos 5 anos subsequentes e propor estratégias de contratação para não sofrer as penalidades impostas pelo novo modelo e dessa forma minimizar os riscos de exposição no momento da compra de energia elétrica em leilões regulados.

Este trabalho mostrou o histórico do desenvolvimento do setor elétrico desde a reestruturação implantada em 1995 com a desverticalização e desestatização das empresas e a implantação dos consumidores livres até os dias atuais, considerando a implantação do novo modelo em 2004 com regras e limites de repasse bem especificados no ambiente de comercialização atualmente vigente.

Procurou-se descrever a legislação vigente e todas as regras e penalidades que as Distribuidoras estariam expostas no processo de comercialização de energia.

O trabalho propôs uma ferramenta adicional de apoio desenvolvida para a gestão de compra de energia em leilões, baseada nas técnicas tradicionais de otimização pelo método dos pontos interiores com o objetivo de minimizar os riscos para a Distribuidora.

A modelagem do problema foi estabelecida através de uma formulação matemática detalhada, considerando os montantes de energia existentes provenientes de contratos do PROINFA, bilaterais, Itaipu e de contratos já vigentes referentes à energia contratada em leilões A-1, A-3, A-5 anteriores ao ano de referência estipulado como 2010 e ainda não entregues neste respectivo ano, bem como o mercado projetado para o cenário de referência das Distribuidoras. O objetivo estipulado para minimizar os riscos associados à comercialização foi de minimizar os custos totais da energia a ser adquirida nos futuros leilões A-1, A-3, A-5 Ajuste, considerando as penalidades por sub ou sobrecontratação, os mecanismos de desconstrução e reposição, bem como os limites de repasse impostos pela legislação específica. Apesar do trabalho abranger todas as regras e flexibilidades impostas pelo Decreto 5163/2004 para minimizar os riscos associados à gestão da comercialização, alguns mecanismos de flexibilidade não foram consideradas tais como o MCSD e a penalidade por sobrecontratação, como já foi comentado e justificado no decorrer do trabalho.

O horizonte de estudo projetado foi para os 5 anos subsequentes ao ano de referência e considerou dados referentes a dois anos anteriores em virtude das limitações de repasse à tarifa dos consumidores estipuladas para os leilões A-1 , A-3 e Ajuste.

As técnicas usuais de otimização normalmente estudadas e pesquisadas neste tema estão relacionadas à Inteligência Artificial envolvendo algoritmos genéticos. A proposta deste trabalho foi desenvolver uma formulação matemática do problema resolvida pelo Método dos Pontos Interiores, para que a Distribuidora possa também definir as suas estratégias de contratação de maneira alternativa.

Para validar a metodologia, várias simulações foram feitas com diferentes cenários de demanda projetados aleatoriamente. E, para complementar essa validação, um segundo caso também foi simulado com dados reais de uma distribuidora de grande porte.

Pode-se concluir que a resposta obtida pelo Método dos Pontos Interiores foi adequada e compatível com as estratégias de contratação formuladas para ambos os casos, apresentando bom desempenho computacional (na ordem de 6 segundos).

Esse bom desempenho computacional viabiliza, por exemplo, a utilização desta metodologia como instrumento de treinamento das estratégias envolvendo o processo de gestão de compra de energia em leilões regulados.

Acredita-se que a associação de técnicas bem formatadas para a projeção de mercado com a ferramenta aqui proposta possa minimizar bastante os riscos de exposição da Distribuidora.

Não coube neste trabalho a discussão referente ao cenário de referência não estar em conformidade com o cenário ótimo de contratação, entretanto trabalhos futuros podem abordar um cenário comparativo ou com outras técnicas abordando uma formulação matemática mais detalhada, incluindo o mecanismo de MCSD não previsto neste trabalho e que possam trazer resultados melhores ou compatíveis com aqueles aqui apresentados.

Pode-se também avaliar a exposição ao risco considerando os cenários pessimista e otimista sem as limitações impostas apenas pelo cenário de referência, otimizando zonas de exposição em relação ao mercado de referência previsto, contemplando assim uma solução global. Dessa forma poderia-se comparar os custos referentes ao mercado verificado com os custos referentes ao mercado otimizado e constatar se as diferenças são admissíveis para assumir o risco. Para tanto, pode-se usar uma formulação de minimização do máximo da função objetivo em torno de uma faixa de previsão.

Além disso, como a resposta do MPI é rápida, cabe também o estabelecimento de uma formulação mais detalhada para a inicialização das variáveis do problema compatibilizada com os limites impostos pelas diversas restrições com o objetivo de otimizar o tempo de inicialização do algoritmo

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. D. **Gestão de Riscos Associados às Previsões de Demanda das Distribuidoras de Energia Elétrica no Novo Contexto Regulatório Brasileiro**. 189 f. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria da Energia), Universidade Salvador, UNIFACS, Salvador, 2006.

AZEVEDO, E. M. **Modelo Computacional de Teoria dos Jogos aplicados aos Leilões Brasileiros de Energia Elétrica**. 234f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos), Universidade de Campinas, Unicamp, Campinas, 2004.

BRASIL. Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004 Regulamenta comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de Energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm.
Acesso em: 10/03/2008.

BRASIL. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília DF, 16 mar. 2004. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Lei/L10.848.htm>
acesso em 10/03/2008.

BURATTI, R. **Estratégia de Contratação de Energia Elétrica para uma Distribuidora**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Produção e Sistemas), PUC - PR , Curitiba, 2008.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA - CCEE. **Ambientes de Contratação 2009**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br/cceeinterdsm>>. Acesso em: 15/04/2009.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA - CCEE. **Processo de comercialização 2009**. Disponível em: <<http://www.ccee.org.br/cceeinterdsm>>. Acesso em: 15/04/2009.

CASTRO, M. A. L. **Análise de Risco de uma Distribuidora Associada à Compra e Venda de Energia no novo Modelo do Setor Elétrico**. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), UNB, Brasília- DF, 2004.

CASTRO, R. **Análise de Decisões sob Incertezas para investimentos e Comercialização de Energia Elétrica no Brasil**. 184f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, UEC, Campinas, 2004.

CASTRO, R.; FILHO, L. C. Um Método de Suporte a Decisões sobre Investimento e Comercialização de Energia Elétrica no Brasil. **Revista Controle e Automação**, Campinas, v. 16, n. 4, p. 478-494, out./dez. 2005.

CORREIA, T. B.; MUNHOZ, F. C.; AZEVEDO, E. M.; CORREIA, P. B. Contratos de Opções no Mercado Brasileiro de Energia Elétrica. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 5. , 2003, Águas de São Pedro. **Anais...** Águas de São Pedro, 2003.

CORREIA, T. B.; MELO, E.; COSTA, A. M. Análise e Avaliação Teórica dos Leilões de Compra de Energia Elétrica Proveniente de Empreendimentos Existentes no Brasil. **Economia**, Brasília - DF, v. 7, n. 3, p.509–529, set./dez. 2006.

CORREIA, T. B.; BAJAV, S. V.; CORREIA, P. B. Teoria dos Leilões e Planejamento do Setor Elétrico Brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 4., 2004, Itajubá, **Anais...** Itajubá, 2004.

DIAS, I. V. **Estratégias de Gestão de Compra de Energia Elétrica para Distribuidoras no Brasil**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba-PR, 2008.

FARHAT, I.A.; EL-HAWARY, M.E. Interior point methods application in optimum operational scheduling of electric power systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, New York. v. 3, n. 11, p.1020-1029, May. 2009.

GJELSVIK, A.; MO, B. Simultaneous Optimisation of Withdrawal from a flexible contract and financial hedging. In: PSCC, 14., 2002, Sevilla. **Anais...** Sevilla. 2002. p.24-28. Disponível em: http://www.psc-central.org/uploads/tx_ethpublications/s04p06.pdf. Acesso em: 15/04/2009.

GUIMARÃES, A. **Estratégia de Contratação das Distribuidoras sob Incertezas de Demanda em Leilões de Energia**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2006.

KARMARKAR, N. A New Polynomial Time Algorithm for Linear Programming. **Combinatorica** v. 4, n. 4, p. 373-395, 1984.

LUENBERGER, David. **Linear and Nonlinear Programming**. 2. ed. California: Stanford University: Addison-Wesley, 1989

MARKOWITZ, H.; WILEY, J. **Portfolio Selection: Efficient Diversification of Investments**, New York: John Wiley & Sons, 1959.

MASILI, S. G. **Metodologia e Software para Simulações de Leilões de Energia Elétrica no Mercado Brasileiro**. 133 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade Estadual de Campinas - UEC, Campinas, 2004.

MOLLICA, M. A. **Uma Avaliação de Modelos Value-at-Risk: Comparação entre Métodos Tradicionais e Modelos de Variância condicional**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Economia), Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1999.

MUNHOZ, F. C. **Metodologia e Software para Fixação de Lances em Leilões de Energia Elétrica**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade). Universidade Estadual de Campinas - UEC, Campinas, 2004.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS. **Procedimentos de Rede: módulo 18: modelos computacionais**. Disponível em: <http://www.ons.org.br>. Acesso em: 15/04/2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA - ONS. **Histórico de Informações**, 2004. Disponível em: <http://energia.ons.org.br/ons/energia/historico.html>. Acesso em: 15/04/2009.

RESENDE, A. G. **Estratégia de Contratação das Distribuidoras em Leilões de Energia sob Incerteza na Demanda**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ , Rio de Janeiro, 2006

ROSA, L. P.; TOLMASQUIM, M. T.; PIRES, J. C. L (1998). **A Reforma do Setor Elétrico no Brasil e no Mundo: Uma Visão Crítica**. Rio de Janeiro: Relume Dumara, 1998.

SILVA, M. F. A.; SCHUCH, B. G.;BOFF, B. D. Considerações de Estratégias na Modelagem de Projeção de Demanda de Empresas de Distribuição no Mercado Brasileiro de Energia Elétrica. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DISTRIBUICION ELECTRICA – CIEL, 1. , 2006, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires - Argentina, 2006. Disponível em: [http://sg.cier.org.uy/cdi/cier-zeus.nsf/0/C96B2EE7138CE46C83257401005C19FA/\\$FILE/527.pdf](http://sg.cier.org.uy/cdi/cier-zeus.nsf/0/C96B2EE7138CE46C83257401005C19FA/$FILE/527.pdf). Acesso em: 15/04/2009

SUSTERAS, G. L. **Aplicação de Algoritmos Genéticos para Previsão do Comportamento das Distribuidoras como apoio à Estratégia de Comercialização de Energia de Agentes Geradores**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2006.

TOLMASQUIM, M. T.; OLIVEIRA, R.; CAMPOS, A. **As Empresas do Setor Elétrico Brasileiro – Estratégias e Performance**. Rio de Janeiro: Cenergia., 2002.

ÚMBRIA, F. C. **Modelo de Previsão de Preços de Suprimento de Energia Elétrica no Contexto do Novo Ambiente Competitivo do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Hidrologia) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba,1999.

VALE, Z. A.; AZEVEDO, F. Decision-Support Tool for the Establishment of Contracts in the Electricity Market. Proceedings of IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, 6 p., Jun., 2003.

ZANFELICE, F. R. **Estratégia de Contratação Ótima na Comercialização da Energia Elétrica**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia-Mecânica) Universidade de Campinas - Unicamp, Campinas, 2007.