

4 Programação Matemática Aplicada à Contratação de Energia

4.1. Introdução

De acordo com as regras de funcionamento do setor elétrico, a demanda de energia deve ser suprida integralmente, sendo o não suprimento da mesma penalizada severamente, existindo então uma forte penalidade sobre o déficit de energia. Ainda segundo o modelo proposto, os distribuidores devem contratar sua demanda através dos leilões de energia, porém sem excederem a curva de demanda, já que apenas parte do valor da energia contratado em excesso (3%) pode ser repassado à tarifa de energia, sendo a sobre-contratação uma importante perda de receita.

Neste Capítulo desenvolve-se um exemplo fictício do problema de contratação de energia através de leilões. Na Figura 2 pode ser visto um exemplo fictício de curva de demanda a ser atendida.

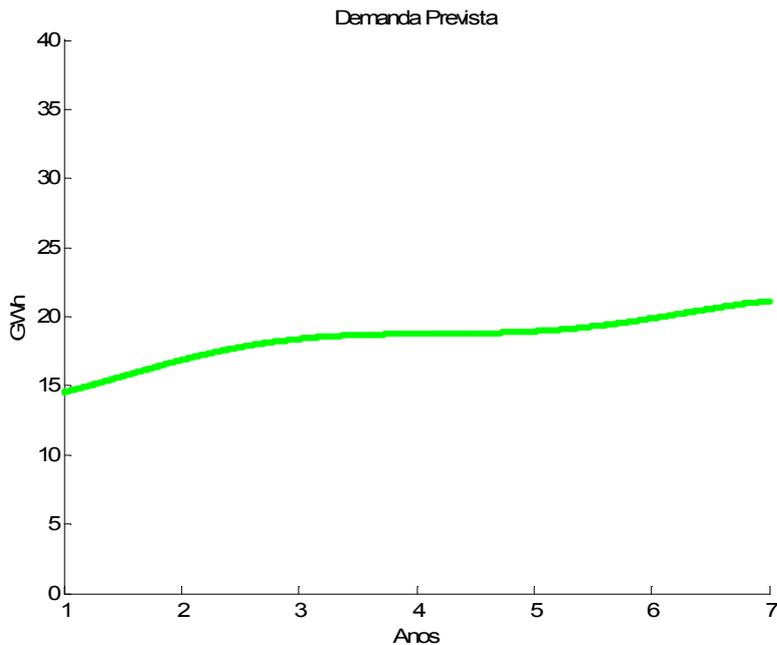


Figura 1: Curva de Demanda ao Longo de 7 Anos.

Esta curva é, em geral, analisada de forma discretizada ao longo dos anos, formando uma curva que pode ser visualizada no exemplo a seguir, dado pela Figura 3:

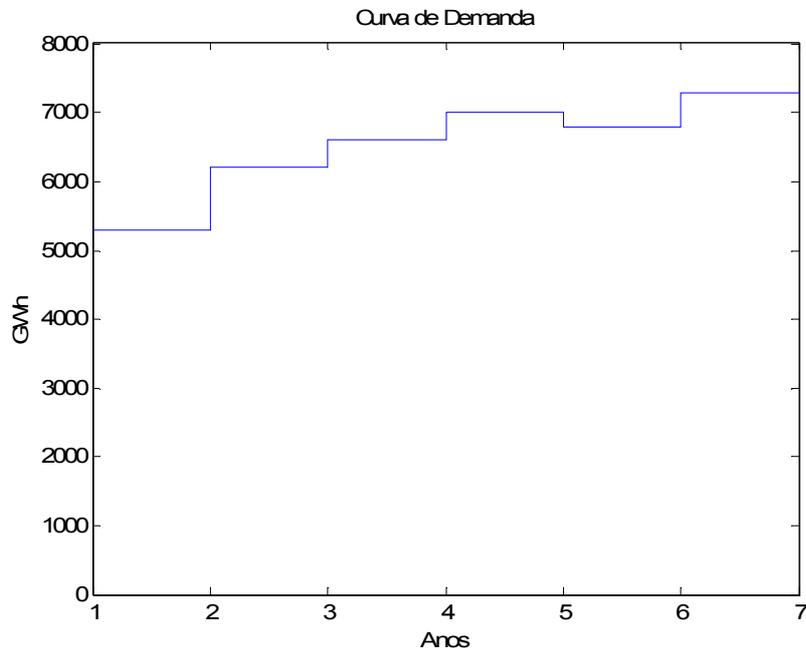


Figura 2: Curva de Demanda para 6 Anos.

O problema de contratação de energia consiste, então, em se adequar o montante de contratos à curva de demanda. Na Figura 4 mostra-se um exemplo de 15 opções de contratos pré-fixados disponíveis.

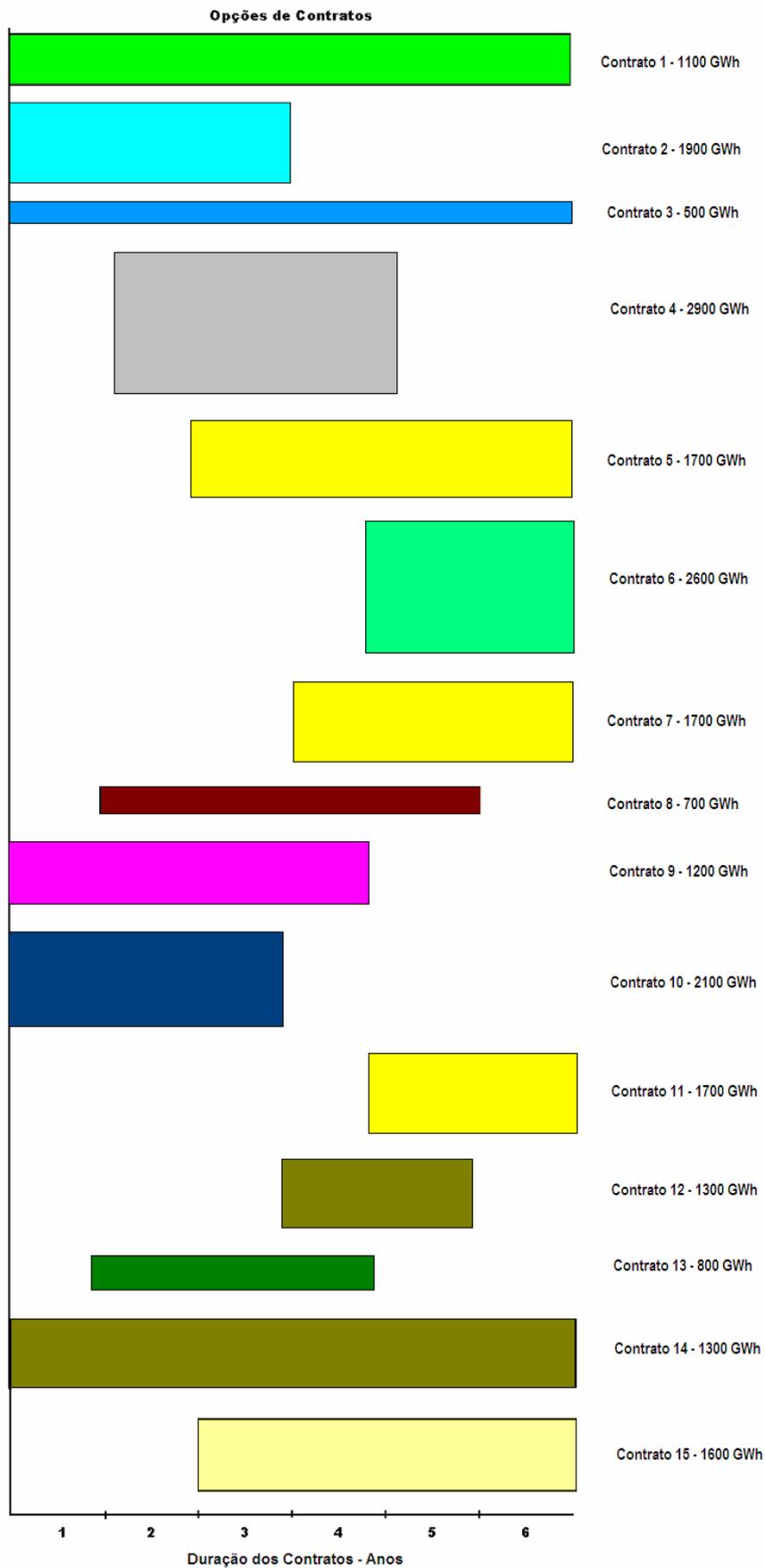


Figura 3: Representação Visual das Opções de Contratos

De forma geral, a contratação ótima é vista como aquela que apresenta a combinação de contratos que melhor se aproxime da curva de demanda, para o conjunto de anos em estudo, representado graficamente na Figura 5.

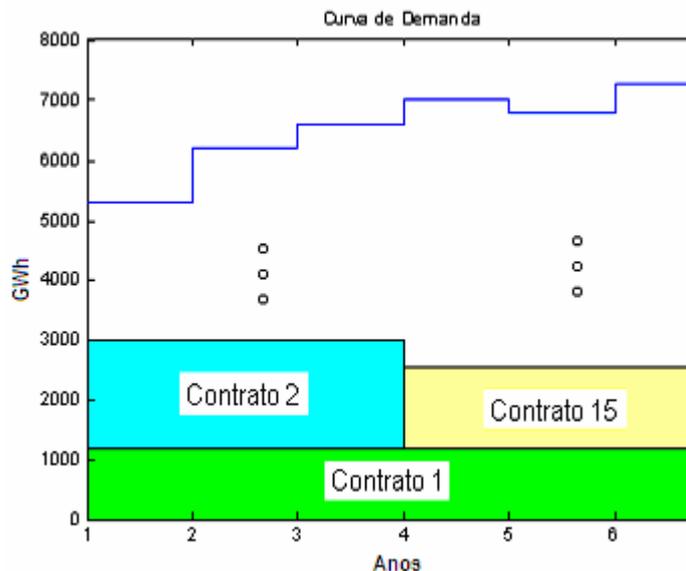


Figura 4: Preenchimento da Curva de Demanda com as Opções de Contratos

Inicialmente, para uma análise simplificada do problema, determinou-se um valor de penalidade que incide sobre qualquer valor de sobre-contratação e não apenas acima de 3% da curva de demanda declarada.

4.2. Análise do Problema de Contratação por Programação Linear

O propósito da Programação Linear (PL) é otimizar (maximizar ou minimizar) a função objetivo (linear), que está sujeita a uma série de restrições, sendo representadas por equações ou inequações lineares. Exemplos de otimização estão na maximização dos lucros, minimização dos custos, minimização do tempo operacional.

Um problema geral de PL é dado pela seguinte formulação [11]:

Otimizar (maximizar ou minimizar)

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (4-1)$$

Sujeito a:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \quad (4-2)$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (4-3)$$

$$x_1, \dots, x_n \geq 0 \quad (4-4)$$

Para o problema de contratação de energia, temos um problema de minimização de custos, onde:

c_i – é o custo da energia no contrato j .

x_j - é a parcela contratada do contrato j .

a_{ij} – é o valor do contrato j no ano i .

b_m – é o valor da demanda no ano m .

Desta Forma, a função objetivo (3-1) é dada pelo custo de cada contrato (c_i), neste caso tomado como sendo igual a 1, multiplicado pela quantidade de energia celebrada em cada contrato (x_i). Considera-se como restrição inicial a obrigação do suprimento da demanda, e o fato de que o valor máximo de cada contrato é a celebração do contrato por inteiro, não podendo ser obtidos valores maiores que 1.

Para a solução do problema otimização, utilizou-se o software What's Best! ® (WB) - versão Demo, que roda sobre o software Excel ®.

Desta forma, o problema desenvolvido consta de 2 planilhas, sendo que a primeira contém a interface de entrada de dados, observada na Figura 6 e a segunda planilha, denominada Solução, contém a apresentação das restrições e dos resultados calculados pelo WB, mostrados na Figura 7.

O resultado obtido mostra que a contratação que minimiza o custo celebra 100% do contrato 1, 63,2% do contrato 2 e assim por diante. Na

célula Custo, pode-se observar o valor do custo total dos contratos realizados.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		Valores de Demanda:								
3										
4										
5										
6										
7										
8		Valores de Contratos:								
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										

Figura 5: Planilha de Entrada de Dados do Problema de Contratação

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1																		
2		SOLUÇÃO DE CONTRATOS - PROGRAMAÇÃO LINEAR																
3																		
4		Porcentagem do Contrato a ser utilizado:																
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		

Figura 6: Planilha de Restrições e Valores Calculados pelo WB para o Problema Proposto.

Na Figura 8 é mostrada a contratação realizada em comparação com a curva de demanda. Observa-se que a contratação é feita exatamente igual à demanda, a menos do quinto ano, onde a contratação excede um pouco a demanda.

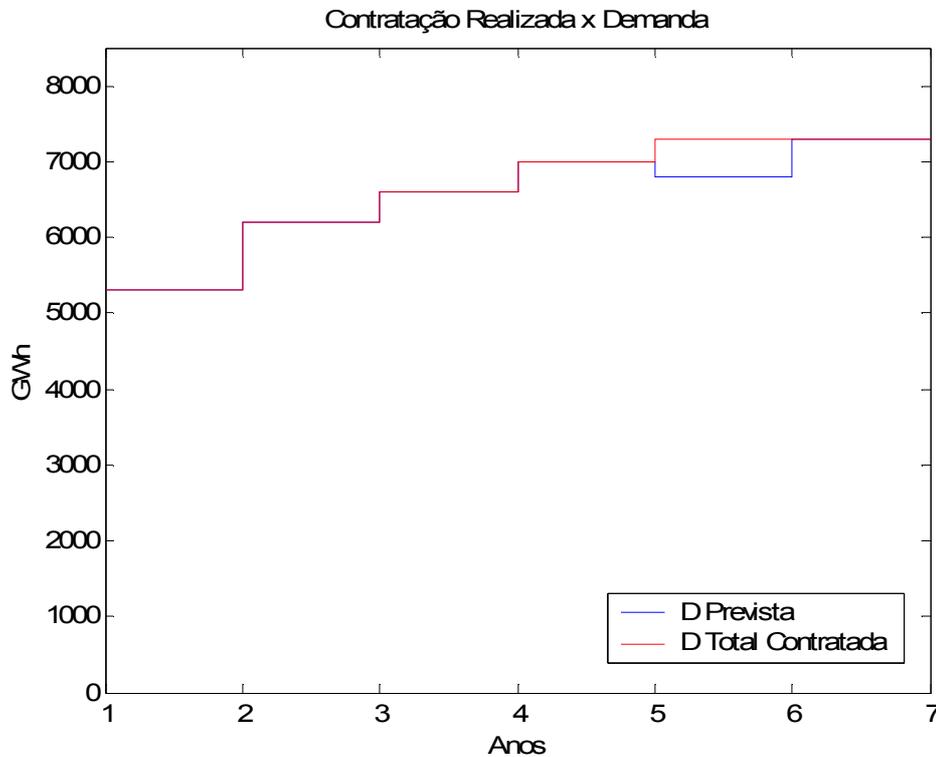


Figura 7: Gráfico de Demanda Prevista em Comparação com o Valor Contratado pelo PPL.

No caso real de comercialização de energia, o distribuidor tem a opção de contratar abaixo da curva de demanda, porém com sujeição de altas penalidades na sub-contratação. Tal opção é considerada adicionando-se variáveis de folga às equações de restrição de suprimento da demanda. As inequações passam a ser equações de igualdade, da seguinte forma:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + FFalta_1 - FExc_1 = b_1 \tag{4-5}$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + FFalta_m - FExc_m = b_m \tag{4-6}$$

Onde:

Observa-se na Figura 10, a curva de contratação junto à curva de demanda. Com esta configuração, o custo mínimo considera a possibilidade de déficit de 500 GWh de energia no último ano em análise. Inicialmente observa-se que apesar do custo de déficit ser maior que o valor do custo de excedente, ocorre déficit na contratação ótima. Isto se deve ao fato de não existirem contratos que supram apenas o último ano, o que pode ser observado na Figura 4, o que obriga a uma sobre contratação alta no ano 5. Analisando as duas opções, verifica-se que a opção de menor custo é realmente aquela que apresenta o déficit no ano 6.

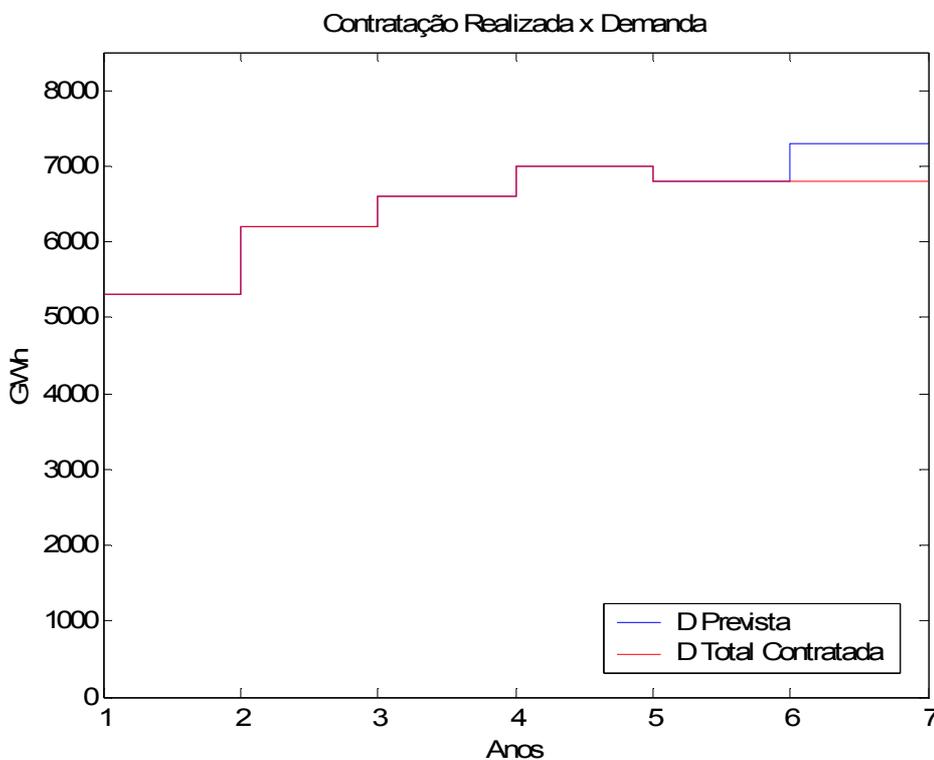


Figura 9: Demanda Prevista em Comparação com o Valor Contratado pelo Novo PPL.

Ressalta-se que no problema real, diferentemente do exemplo apresentado, os agentes distribuidores são fortemente penalizados pela sub-contratação.

Alterando-se o custo da penalização para 10 vezes o valor do GWh, obtemos o gráfico apresentado na Figura 11, onde pode ser

observado que a estratégia de menor custo passa a ser a sobre-contratação.

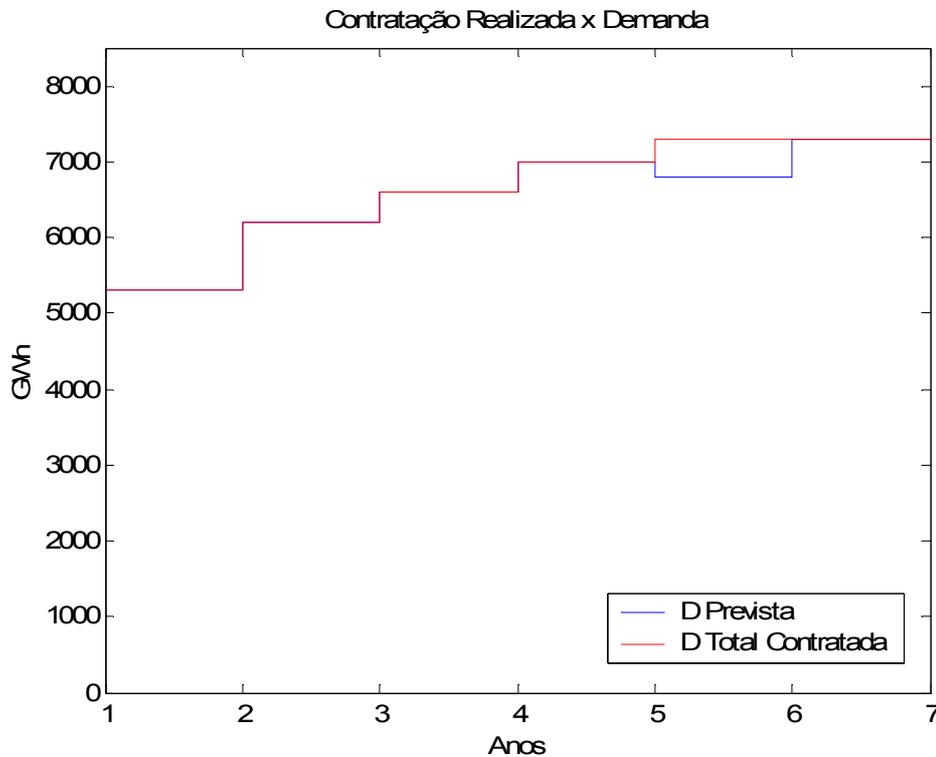


Figura 10: Demanda Prevista Versus Valor Contratado para Penalidade Igual a 10 Vezes o Custo do GWh.

Outro fator importante do problema real a ser considerado, é que existem diversas incertezas referentes à demanda, aos preços e à oferta de energia, o que implica em não ter uma única curva para essas variáveis, ao longo dos anos. Uma forma de lidar com essas incertezas na programação linear é através da programação estocástica, onde projetam-se cenários diversos de demanda.

4.3. A Construção de Cenários para a Programação Estocástica

Um dos maiores desafios para o setor elétrico, que se tornou ainda mais importante a partir do novo modelo, está na estimativa da demanda de energia elétrica. A demanda, na prática, está atrelada a uma série de fatores, como por exemplo, crescimento econômico, variação de temperatura, custo do kWh. Desta forma, a previsão da demanda torna-se uma tarefa complicada tendo em vista a quantidade de fatores

extrínsecos da qual depende uma boa previsão. Um aumento não esperado na demanda seria suficiente para ocasionar grandes prejuízos, já que a distribuidora arcaria com um alto valor de penalidade sobre o valor não atendido.

Além da incerteza da carga a ser atendida, temos também incertezas quanto ao preço futuro da energia, já que depende de uma série de fatores, na maioria das vezes de dimensões macroeconômicas, ou mesmo geopolíticas, já que uma guerra no Oriente Médio pode ocasionar um aumento no preço da energia, ou mesmo instabilidades políticas, como a transição de governos ocorrida na Bolívia, refletem significativamente no preço do gás natural, e com isso alteram-se os preços da energia elétrica.

Desta forma, demanda, oferta e preço, constituem variáveis significativas que se inter-relacionam, e por isso são de extrema importância para a determinação de uma contratação ótima de energia elétrica.

Para uma solução mais realista do problema de contratação de energia, torna-se indispensável a construção de diferentes cenários para as variáveis mais significativas do problema de suprimento da demanda de energia elétrica. Em geral, considera-se desde casos mais otimistas, com aumento elevado da demanda, a situações mais drásticas, onde o aumento elevado no preço do insumo ocasiona o aumento no custo do kWh, provocando uma retração do crescimento da demanda.

De toda forma, a resolução do problema de contratação ótima, utilizando cenários diferentes, transforma o problema em um problema de programação estocástica, que obtém a melhor solução levando em consideração todas as possíveis ocorrências de cenários.

4.4. Abordagem do Problema por Programação Estocástica

Uma transformação possível do problema estudado para programação estocástica seria a utilização de 3 cenários de demanda de energia elétrica. O primeiro cenário, representa a mesma curva estudada

nos exemplos anteriores. No segundo cenário, consideramos que haja uma retração na demanda energética, representando uma queda de 5% em relação à curva estimada. Por fim, no terceiro cenários adota-se uma previsão otimista, onde os valores apresentam um aumento de 5% em relação ao cenário inicial.

Na tabela 2 são mostrados os valores dos três cenários utilizados como exemplo, utilizados no problema de programação estocástica (PPE). Observa-se que a última coluna é representada por um fator λ , que representa a probabilidade de ocorrência de cada um dos cenários.

Cenários de Demanda:							
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	λ (%)
Cenário 1	5300	6200	6600	7000	6800	7300	0,6
Cenário 2	5035	5890	6270	6650	6460	6935	0,1 5% queda
Cenário 3	5565	6510	6930	7350	7140	7665	0,3 5% aumento

Tabela 1: Valores Esperados de Demanda para 3 Cenários

O problema de programação estocástica, buscando minimizar o gasto em contratos e penalidades, passa a ser representado pela seguinte função objetivo:

$$\text{Min} \rightarrow \sum_{\substack{i=1:m \\ j=1:n}} a_{ij} \cdot x_i + CPen \cdot \sum_{k=1:p} \lambda_k \cdot \sum_{i=1:m} FFalta_{i,k} \quad (4-8)$$

Onde:

a_{ij} – são os valores de energia do contrato j disponíveis no ano i ;

x_i – representa a quantidade do contrato a ser celebrado;

$CPen$ – custo de penalização que incide na sub-contratação;

$FFalta$ – déficit no ano i , cenário k ;

λ_k – probabilidade de ocorrência do cenário k ;

p – número total de cenários.

As restrições passam a ser:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + FFalta_{11} - FExc_{11} = b_{11} \quad (4-9)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + FFalta_{12} - FExc_{12} = b_{12} \quad (4-10)$$

...

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + FFalta_{1k} - FExc_{1k} = b_{1k} \quad (4-11)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n + FFalta_{21} - FExc_{21} = b_{21} \quad (4-12)$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n + FFalta_{mk} - FExc_{mk} = b_{mk} \quad (4-13)$$

Onde temos:

b_{mk} – é o valor da demanda no ano m, para o cenário k;

$FFalta_{mk}$ – são as variáveis de folga de falta de energia do ano m, para o cenário k;

$FExc_{mk}$ – variáveis de folgas de sobre de energia, do ano m, cenário k.

Com a abordagem por programação estocástica, obtemos então uma única solução, que representa a solução ótima, dados todos os cenários possíveis e suas respectivas probabilidades.

Na Figura 12 é mostrado o resultado obtido no WB para o problema de programação estocástica, onde o custo de penalidade é igual a 10 vezes o valor do custo de cada GWh.

SOLUÇÃO DE CONTRATOS - PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA

Contrato	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
parte a utilizar	1,000	0,771	1,000	0,326	0,356	0,946	1,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000

Custo: 41870

Restrições:
Demanda a ser suprida:

Cenário 1:			
ano 1	5300	=	5300
ano 2	6200	=	6200
ano 3	6600	=	6600
ano 4	7000	=	7000
ano 5	6800	=	6800
ano 6	7300	=	7300

Cenário 2:			
ano 1	5035	=	5035
ano 2	5890	=	5890
ano 3	6270	=	6270
ano 4	6650	=	6650
ano 5	6460	=	6460
ano 6	6935	=	6935

Cenário 3:			
ano 1	5565	=	5565
ano 2	6510	=	6510
ano 3	6930	=	6930
ano 4	7350	=	7350
ano 5	7140	=	7140
ano 6	7665	=	7665

Folgas:

Cenário 1			
Falta 1	0	Excesso 1	265
Falta 2	0	Excesso 2	310
Falta 3	0	Excesso 3	515
Falta 4	0	Excesso 4	350
Falta 5	0	Excesso 5	865
Falta 6	0	Excesso 6	365

Cenário 2			
Falta 1	0	Excesso 1	530
Falta 2	0	Excesso 2	620
Falta 3	0	Excesso 3	845
Falta 4	0	Excesso 4	700
Falta 5	0	Excesso 5	1205
Falta 6	0	Excesso 6	730

Cenário 3			
Falta 1	0	Excesso 1	0
Falta 2	0	Excesso 2	0
Falta 3	0	Excesso 3	185
Falta 4	0	Excesso 4	0
Falta 5	0	Excesso 5	525
Falta 6	0	Excesso 6	0

Figura 11: Solução do Problema de Programação Estocástica, com Custo de Penalidade Igual a 10 Vezes o Valor do GWh.

Verifica-se, na Figura 13, o gráfico dos 3 cenários de demanda e da contratação realizada. Observa-se que, devido ao alto custo de penalização, o problema é resolvido utilizando somente as folgas de excesso, que equivalem à sobre-contratação de energia. Assim sendo, a opção de contratação escolhida encontra-se acima da curva de demanda mais alta.

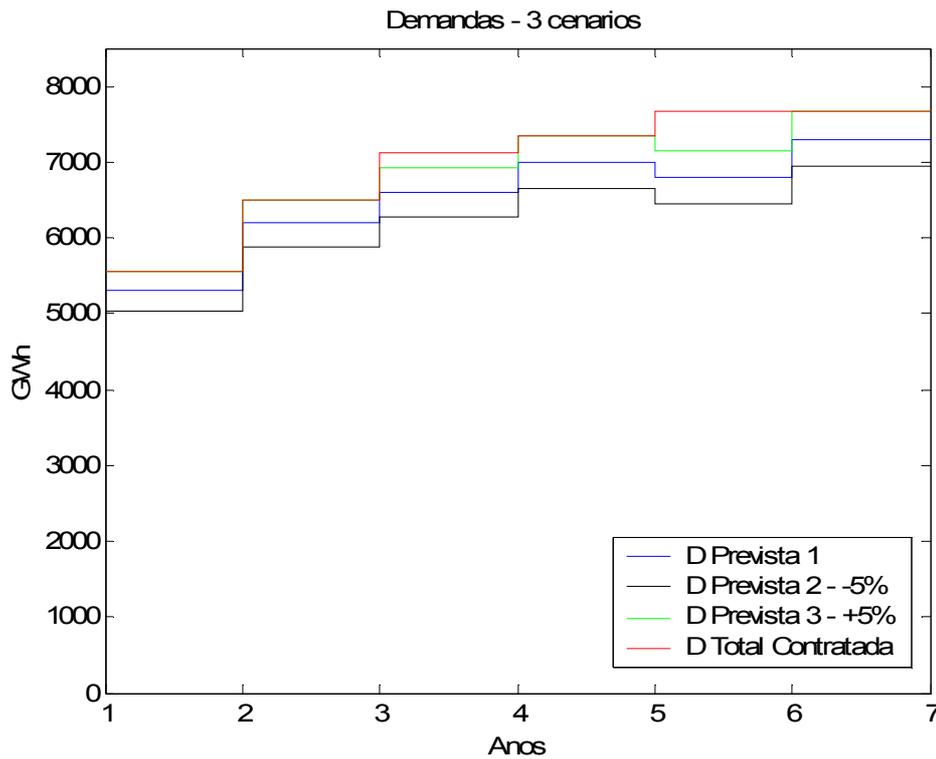


Figura 12: Solução Obtida para o PPE, com 3 Cenários e Custo de Penalização Igual a 10 vezes o Valor do GWh.

Para fins de comparação, reduziu-se o valor da penalidade para 1,5 vezes o valor do custo do GWh, obtendo-se a seguinte solução, mostrada na Figura 14. Observa-se que o custo total de celebração dos contratos é reduzido, e que a estratégia de contratação prioriza o déficit de energia em alguns casos, principalmente no terceiro cenário (otimista), onde todos os anos apresentam déficit. Isto se deve ao fato de ser o valor de penalização muito baixo, compensando a ocorrência de falta de energia em detrimento à sobre-contratação.

SOLUÇÃO DE CONTRATOS - PROGRAMAÇÃO ESTOCÁSTICA

Contrato	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
parte a utilizar	1,000	0,632	1,000	0,310	0,235	0,731	0,941	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000

Custo: 40277

Restrições:
Demanda a ser suprida:

Cenário 1:			
ano 1	5300	=	5300
ano 2	6200	=	6200
ano 3	6600	=	6600
ano 4	7000	=	7000
ano 5	6800	=	6800
ano 6	7300	=	7300
Cenário 2:			
ano 1	5035	=	5035
ano 2	5890	=	5890
ano 3	6270	=	6270
ano 4	6650	=	6650
ano 5	6460	=	6460
ano 6	6935	=	6935
Cenário 3:			
ano 1	5565	=	5565
ano 2	6510	=	6510
ano 3	6930	=	6930
ano 4	7350	=	7350
ano 5	7140	=	7140
ano 6	7665	=	7665

Folgas:

Cenário 1			
Falta 1	0	Excesso 1	0
Falta 2	0	Excesso 2	0
Falta 3	0	Excesso 3	0
Falta 4	0	Excesso 4	0
Falta 5	0	Excesso 5	0
Falta 6	500	Excesso 6	0
Cenário 2			
Falta 1	0	Excesso 1	265
Falta 2	0	Excesso 2	310
Falta 3	0	Excesso 3	330
Falta 4	0	Excesso 4	350
Falta 5	0	Excesso 5	340
Falta 6	135	Excesso 6	0
Cenário 3			
Falta 1	265	Excesso 1	0
Falta 2	310	Excesso 2	0
Falta 3	330	Excesso 3	0
Falta 4	350	Excesso 4	0
Falta 5	340	Excesso 5	0
Falta 6	865	Excesso 6	0

Figura 13: Solução Obtida para um Custo de Penalidade 1,5 Vezes Maior que o Custo do GWh, para o Mesmo PPE com 3 Cenários.

A estratégia ótima pode ser melhor observada na Figura 15, onde vê-se que a contratação se encontra praticamente sobre a demanda intermediária, já que o custo de déficit se aproxima do custo de sobra de energia.

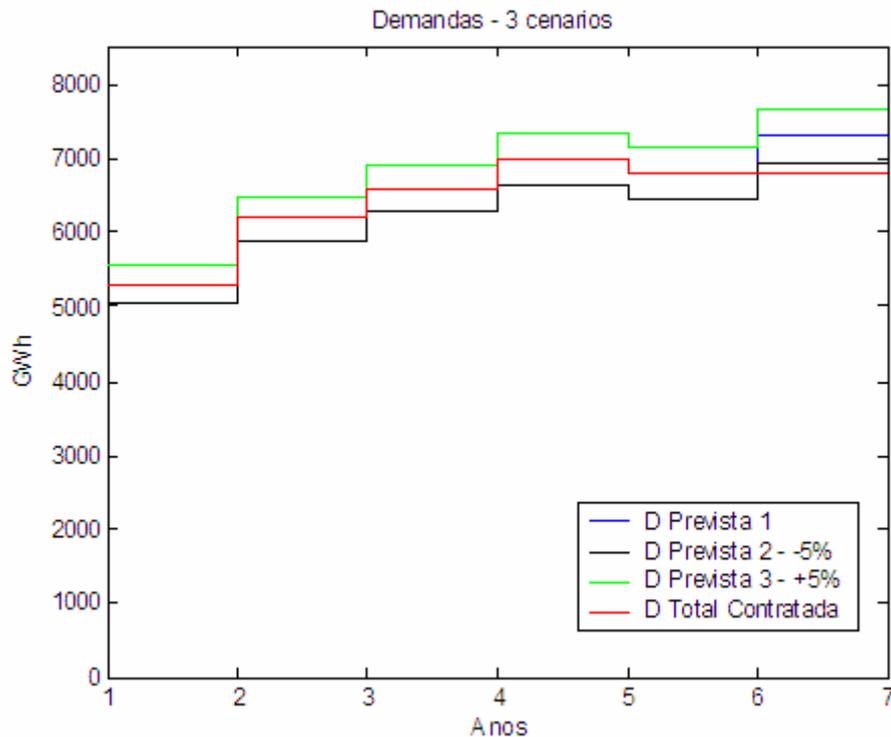


Figura 14: Solução Obtida no PPE com Três Cenários de Demanda, para um Custo de Penalidade 1,5 Vezes Maior que o Custo do GWh.

4.5. O Problema Real de Contratação de Energia no Setor Elétrico

O suprimento da demanda pode ser realizado através de contratos celebrados no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), onde os distribuidores contratam energia através dos leilões. Outra forma de contratação se encontra no Ambiente de Contratação Livre (ACL), composto por contratos livremente negociados, ou Contratos Bilaterais, sendo apenas registrados os volumes de negociação na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um otimizador de portfólio de contratos de energia a ser utilizado para a contratação no ACR, ou seja, contratações através de leilões.

4.5.1. Contratos de Compra e Venda em Leilões de Energia Elétrica

A energia ofertada é classificada de acordo com sua origem e início de suprimento. Inicialmente temos a energia proveniente de fontes existentes, ou seja, empreendimentos consolidados que já operam no

Sistema Elétrico. Compõem os contratos de empreendimentos de energia existentes:

- Contratos A-1: Contratos de energia com início de suprimento no ano seguinte ao de contratação em leilão e duração de 3 a 15 anos.
- Contratos de Ajuste: Contratos com entrada no ano de contratação, podendo apresentar duração de até 2 anos.

Os contratos de novos empreendimentos de geração são divididos em duas categorias, de acordo com sua origem e início de suprimento:

- A-3: Contratos provenientes predominantemente de geração térmica, com início de suprimento 3 anos seguintes ao ano de contratação em leilão e duração de 15 a 35 anos.
- A-5: Contratos provenientes predominantemente de geração hidráulica, com início de suprimento 5 anos seguintes ao ano de contratação em leilão e duração de 15 a 35 anos.

Por fim, considera-se que as contratações efetuadas através do Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficits (MCSD), que visa compensar pequenos desvios, ofertando energia comprada em excesso por agentes a outros que apresentam pequenos déficits. Desta forma temos:

MCSDC: Contratos de compra de energia efetuados no MCSD.

MCSDV: Contratos de venda de energia efetuados no MCSD.

Os Limites de todas estas modalidades de contratos são determinados pelo decreto 5163/2004 e são considerados como restrição do problema de contratação.

4.5.2. A Carteira de Contratos Celebrados

Os contratos celebrados pelo distribuidor no ACL compõem a Carteira Atual de Contratos, sendo o valor a ser celebrado no ACL a diferença entre a demanda de energia e a Carteira de Contratos referentes ao respectivo ano.

Esta carteira é composta pela soma dos Contratos Bilaterais, contratos celebrados com a Itaipu Binacional e contratos realizados através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA.

4.5.3. Os Consumidores Livres e as Reduções

Consumidores com determinadas características mínimas, mostradas na Tabela 3, podem escolher participarem do ACL, através de celebração de contratos com qualquer distribuidor do Sistema Interligado, passando a serem denominados por Consumidores Livres. O não exercício deste direito o mantém como Consumidor Cativo. Podem também ser considerados livres aqueles consumidores com demanda superior a 500 kW, que adquiram sua energia através de fonte alternativa.

Demanda Mínima	Tensão Mínima de Fornecimento	Data da Ligação do Consumidor
10 MW	69 kV	-
3 MW	69 kV -	antes 08/07/1995 após 08/07/1995

Tabela 2: Requisitos para a Opção de Consumo em Ambiente Livre por Parte do Consumidor.

Outro fator importante é que um distribuidor pode ou não declarar a saída de um Consumidor Cativo para a opção de Consumidor Livre, reduzindo assim a sua carga a ser contratada. A não declaração pode ser feita para compensar eventuais alterações de carga não contempladas nos cenários de previsão, sendo mais um mecanismo para se evitar o déficit. Esta opção é a Redução de Clientes Livres.

O Distribuidor tem ainda a possibilidade de reduzir, até certo limite, o valor do seu mercado de energia declarado. Tal processo é conhecido como Redução de Mercado.

4.5.4. Programação Estocástica no problema de Contratação de Energia Através de Leilões

Considerando-se todas as variáveis apresentadas anteriormente, constrói-se a Função Objetivo da modelagem do problema de programação estocástica. Inicialmente, como são avaliados anos diferentes, a representação dos custos referentes a cada ano, na Função Objetivo, deve ser feita considerando um fator de desconto, transformando todos os valores para o Valor Presente. Esta transformação é considerada a seguir:

$$Min \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{t-1}} \quad \forall t \tag{4-14}$$

Onde:

α – Fator de desconto, para transformação em valor presente.

As Distribuidoras de Energia devem decidir sobre o montante de energia a ser adquirido nos leilões de A-1, A-3 e A-5. Desta forma, a Função Objetivo deve considerar estas variáveis de decisão, com seus respectivos preços estimados em cada cenário:

$$Min \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{t-1}} \sum_k \lambda_k \left[\underbrace{\sum_{j=1:t-1} PA1_{j,k} A1_j + \sum_{j=1:t-3} PA3_{j,k} A3_j + \sum_{j=1:t-5} PA5_{j,k} A5_j}_{\text{Portfolio de Contratos}} \right] \tag{4-15}$$

$\forall t, k$

Onde temos que:

λ_k – probabilidade de ocorrência do cenário k.

$PA1_{j,k}$ – preço do Contrato A-1 no ano j, cenário k;

$A1_j$ – Contratos A-1 com início de suprimento no ano j;

- PA3_{j,k} – preço do Contrato A-3 no ano j, cenário k;
- A3_j – Contratos A-3 com início de suprimento no ano j;
- PA5_{j,k} – preço do Contrato A-5 no ano j, cenário k;
- A5_j – Contratos A-5 com início de suprimento no ano j;

Além disso, deve-se também considerar os leilões de Contratos de Ajustes:

$$Min \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{t-1}} \sum_k \lambda_k \left[\underbrace{\sum_{j=1:t-1} PA1_{j,k} A1_j + \sum_{j=1:t-3} PA3_{j,k} A3_j + \sum_{j=1:t-5} PA5_{j,k} A5_j}_{\text{Portfolio de Contratos}} + \underbrace{PAJ_{t,k} AJ_{t,k}}_{\text{Ajuste}} \right] \quad (4-16)$$

∀t,k

Onde:

- PAJ_{t,k} – preço do Contrato de Ajuste no ano t, cenário k;
- AJ_j – Contratos de Ajuste com início de suprimento no ano j;

As opções de Reduções de Mercado e de Clientes Livres são consideradas, com os respectivos preços estimados, como um fator negativo na Função Objetivo, pois representam uma redução no valor da energia declarada anteriormente. Desta forma tem-se:

$$Min \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{t-1}} \sum_k \lambda_k \left[\underbrace{\sum_{j=1:t-1} PA1_{j,k} A1_j + \sum_{j=1:t-3} PA3_{j,k} A3_j + \sum_{j=1:t-5} PA5_{j,k} A5_j}_{\text{Portfolio de Contratos}} + \underbrace{PAJ_{t,k} AJ_{t,k}}_{\text{Ajuste}} - \underbrace{PRED_{t,k} * (RCLIV_{t,k} + RM_{t,k})}_{\text{Reducao de Carga}} \right] \quad (4-17)$$

∀t,k

Onde:

- PRED_{t,k} – preço da Redução no ano t, cenário k;

RCLIV_{t,k} – redução de clientes livres no ano t, cenário k;
 RM_{t,k} – redução de mercado no ano t, cenário k;

Deve-se considerar ainda que as Distribuidoras podem realizar uma contratação inferior à sua demanda. Da mesma forma, pode-se realizar uma contratação acima da curva da demanda estimada, visando uma garantia maior do suprimento, no caso de ocorrer um cenário com demanda maior. Considera-se então, na função objetivo, os preços estimados para a falta de energia, ou sub-contratação, além dos preços de contratação acima do limite de 3%, ou sobre-contratação.

$$\text{Min} \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{t-1}} \sum_k \lambda_k \left[\underbrace{\sum_{j=1,t-1} PA1_{j,k} A1_j + \sum_{j=1,t-3} PA3_{j,k} A3_j + \sum_{j=1,t-5} PA5_{j,k} A5_j}_{\text{Portfolio de Contratos}} + \underbrace{PAJ_{t,k} AJ_{t,k} - PRED_{t,k} * (RCLIV_{t,k} + RM_{t,k})}_{\text{Ajuste Reducao de Carga}} + \underbrace{PDEF_{t,k} * DEF_{t,k} + PEXCNR_{t,k} * EXCNR_{t,k}}_{\text{Deficit Excesso}} \right] \quad (4-18)$$

∀t,k

Onde tem-se:

PDEF_{t,k} – preço pago pelo Déficit no ano t, cenário k;

DEF_{t,k} – Déficit no ano t, cenário k;

PEXCNR_{t,k} – preço da Energia não repassável à tarifa no ano t, cenário k;

EXCNR_{t,k} – Excedente de energia não repassável à tarifa no ano t, cenário k;

Por fim, deve-se considerar os valores de compra e venda no Mecanismo de Compensação de Sobras e Déficits, com seus respectivos preços. Desta forma, o problema real de contratação em leilões de energia, utilizando programação estocástica, passa a ter a seguinte função objetivo:

$$\text{Min} \sum_t \frac{1}{(1+\alpha)^{t-1}} \sum_k \lambda_k \left[\begin{array}{l} \underbrace{\sum_{j=1,t-1} PA1_{j,k} A1_j + \sum_{j=1,t-3} PA3_{j,k} A3_j + \sum_{j=1,t-5} PA5_{j,k} A5_j}_{\text{Portfólio de Contratos}} + \\ \underbrace{PAJ_{t,k} AJ_{t,k}}_{\text{Ajuste}} - \underbrace{PRED_{t,k} * (RCLIV_{t,k} + RM_{t,k})}_{\text{Redução de Carga}} + \\ \underbrace{PDEF_{t,k} * DEF_{t,k}}_{\text{Deficit}} + \underbrace{PEXCNR_{t,k} * EXCNR_{t,k}}_{\text{Excesso}} + \\ \underbrace{PMCSDC_{t,k} * MCSDC_{t,k} - PMCSDV_{t,k} * MCSDV_{t,k}}_{\text{Mecanismo de Compensação}} \end{array} \right] \quad (4-19)$$

$\forall t, k$

Onde:

$PMCSDC_{t,k}$ – preço do contrato de compra no Mecanismo de Compensação no ano t, cenário k;

$MCSDC_{t,k}$ – energia comprada no MCSDC no ano t, cenário k;

$PMCSDV_{t,k}$ – preço do contrato de venda no Mecanismo de Compensação no ano t, cenário k;

$MCSDV_{t,k}$ – energia vendida no MCSDC no ano t, cenário k;

Fator importante a ser considerado está no fato de que a energia adquirida pode ser repassada à tarifa dos consumidores, desde que até no limite de 3% do valor da carga total, o que pode ser dado pela seguinte equação:

$$EXCR_{t,k} \leq 0.03 * \left(\underbrace{\text{Carga}_{t,k}}_{\text{Carga Prevista}} - \underbrace{SLIV_t}_{\text{Reduções efetivas de Carga}} \right) \quad (4-20)$$

Onde temos:

$EXCR_{t,k}$ – excedente de energia repassável à tarifa, no ano t, cenário k;

$\text{Carga}_{t,k}$ – Carga total prevista no ano t, cenário k;

$SLIV_{t,k}$ – saída efetiva de clientes cativos para a condição de clientes livres no ano t , cenário k ;

Toda energia excedente acima deste limite será integralmente custeada pelo distribuidor. Outra restrição importante é a que leva em consideração a carga a ser atendida.

No exemplo de modelagem do caso real de leilão de energia mostrado a seguir, considerou-se 2 cenários e um horizonte de previsão de 5 anos. Na Figura 16 observa-se a tela de entrada de dados, onde são fornecidos os dados referentes às cargas previstas para ambos os cenários, acompanhados de suas respectivas probabilidades, saída de clientes da modalidade de cativos para livres, o valor de energia já contratada para os respectivos anos, que compõem a carteira atual, os contratos efetuados em leilões anteriores, compondo os contratos de energia nova e os contratos de energia existente, e os limites de contratação e venda no MCSD. Observa-se que a compra no MCSD depende de disponibilidade de energia, sendo a oferta neste mecanismo incerta. Na Figura 17 mostra-se a continuação da planilha de entrada de dados, onde são fornecidos os dados de custos de cada modalidade de contrato. Além disso, observa-se a inserção de um fator de desconto, responsável pela transposição dos valores monetários referentes a cada ano ao valor presente, considerado no ano inicial.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1											
2			Dados de Entrada								
3											
4			Carga Prevista Total:								
5											
6			Carga	2006	2007	2008	2009	2010		Probabilidade	
7			Cenário 1	34,900	38,100	45,900	51,820	54,798		0,6	
8			Cenário 2	35,947	39,243	47,277	53,375	56,442		0,4	
9											
10			Saída de Clientes Livres								
11											
12			Carga	2006	2007	2008	2009	2010			
13			SLIV	1,000	1,500	1,700	1,900	2,100			
14											
15											
16											
17			Carteira Atual								
18											
19				2006	2007	2008	2009	2010			
20			GV	33,133	35,590	34,862	34,528	35,428			
21											
22											
23			Contratos de Energia Existente e Nova								
24											
25				2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
26			CCEARE								
27				1,461	1,700	1,900	2,100	2,700	3,200	4,100	
28			CCEARN								
29				1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	
30											
31											
32											
33			Limites de MCS D								
34											
35				2006	2007	2008	2009	2010			
36			MCSDC								
37			cenário 1	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500			
38			cenário 2	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500			
39			MCSDY								
40			cenário 1	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400			
41			cenário 2	0,500	0,400	0,400	0,400	0,400			
42											
43											
44											

Figura 15: Primeira Parte da Planilha de Entrada de Dados para o Problema Real de Contratação de Energia.

	Custos					
	2005	2006	2007	2008	2009	2010
CA1						
cenário 1	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
cenário 2	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00
CA3						
cenário 1	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00
cenário 2	115,00	115,00	115,00	115,00	115,00	115,00
CA5						
cenário 1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
cenário 2	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00
CAJ						
cenário 1	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
cenário 2	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00
CRED						
cenário 1	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
cenário 2	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00
CDEF						
cenário 1	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
cenário 2	550,00	550,00	550,00	550,00	550,00	550,00
CEXCNR						
cenário 1	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
cenário 2	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00	210,00
CMSCDC						
cenário 1	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
cenário 2	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00
CMSCDV						
cenário 1	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00
cenário 2	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00	75,00
Fator de Desconto						
	α					
Redução (%)	0,05					

Figura 16: Segunda Parte da Planilha de Entrada de Dados do Problema de Contratação de Energia.

Por questão de arredondamento numérico, os valores apresentados na entrada são divididos por 1000 para serem utilizados na planilha de solução, que é mostrada nas Figura 18 e 19. Na Figura 18 observa-se as opções de contratos A-1, sendo *a15* a representação de um contrato A-1 celebrado no ano de 2005 e com início de suprimento no ano seguinte. Por sua vez, *a55* representa um contrato A-5 contratado em 2005, com início de fornecimento 5 anos seguintes, ou seja, 2010. As modalidades de contratos de Ajuste são designadas por *aj* seguido por um número representando o ano e outro referente ao cenário. Desta forma temos *aj61* como sendo contratos de ajuste do ano de 2006 referente ao cenário 1.

Ainda no que concerne aos dados da planilha de solução, observa-se a implementação das restrições de carga, bem como a

restrição que determina a parte de energia contratada em excesso que pode ser repassada à tarifa. Observa-se ainda restrições referentes à reduções de mercado e de saídas de clientes para a modalidade livre, sendo estas reduções restritas ao valor total da carga dos clientes optantes pela modalidade livre. Por fim nota-se algumas restrições de contratação, que devem ser utilizadas de forma a garantir a diversificação do portfólio, bem como visando atender as determinações de limites estipuladas no decreto 5163/2004.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	SOLUÇÃO DE CONTRATOS - Modelo Elétrico																			
2																				
3																				
4																				
5	Contrato																			
6		a15	a16	a17	a18	a19	a35	a36	a37	a55										
7	quantidade	0,120	0,122	0,333	0,358	2,474	9,188	5,819	0,000	0,000										
8																				
9																				
10	Ajustes																			
11		aj61	aj71	aj81	aj91	aj101					aj62	aj72	aj82	aj92	aj102					
12	Cenário 1:	0,122	0,268	0,000	0,000	0,000					0,123	0,333	0,453	0,507	0,000					
13	quantidade																			
14																				
15																				
16	Custo Esperado: 4647,99																			
17	(Função Objetivo)																			
18	Restrições:																			
19	Atendimento à carga:																			
20	Cenário 1:																			
21	2006	0,767	=	0,767																
22	2007	1,010	=	1,010																
23	2008	9,338	=	9,338																
24	2009	15,392	=	15,392																
25	2010	17,270	=	17,270																
26	Cenário 2:																			
27	2006	1,814	=	1,814																
28	2007	2,153	=	2,153																
29	2008	10,715	=	10,715																
30	2009	16,947	=	16,947																
31	2010	18,914	=	18,914																
32																				
33	Cont. Excedente Repassável: EXR																			
34	Cenário 1:																			
35	2006	0,000	<=	1,017																
36	2007	0,000	<=	1,098																
37	2008	0,000	<=	1,326																
38	2009	0,000	<=	1,498																
39	2010	0,000	<=	1,581																
40	Cenário 2:																			
41	2006	0,000	<=	1,048																
42	2007	0,000	<=	1,132																
43	2008	0,000	<=	1,367																
44	2009	0,000	<=	1,544																
45	2010	0,000	<=	1,630																
46																				
47	Restrições de Contratos:																			
48	a15	0,120	<=	0,120																
49	a16	0,122	<=	0,122																
50	a17	0,333	<=	0,333																
51	a18	0,358	<=	0,358																
52	a19	0,000	<=	0,446																
53	a35	9,188	<=																	
54	a36	5,819	<=																	
55	a37	0,000	<=																	
56	a55	0,000	<=																	
57																				
58	Reduções de livres e de mercado:																			
59	Cenário 1:																			
60	RLIV61	0,000	<=	1																
61	RLIV71	0,000	<=	1,5																
62	RLIV81	0,324	<=	1,7																
63	RLIV91	0,148	<=	1,9																
64	RLIV101	0,744	<=	2,1																
65	Cenário 2:																			
66	RLIV62	0,000	<=	1																
67	RLIV72	0,000	<=	1,5																
68	RLIV82	0,000	<=	1,7																
69	RLIV92	0,000	<=	1,9																
70	RLIV102	0,000	<=	2,1																
71																				
72	Cenário 1:																			
73	RM61	0,000	<=	0,076																
74	RM71	0,000	<=	0,084																
75	RM81	0,000	<=	0,108																
76	RM91	0,000	<=	0,128																
77	RM101	0,000	<=	0,164																
78	Cenário 2:																			
79	RM62	0,000	<=	0,076																
80	RM72	0,000	<=	0,084																
81	RM82	0,000	<=	0,108																
82	RM92	0,000	<=	0,128																
83	RM102	0,000	<=	0,164																

Figura 17: Planilha de Solução do Problema de Contratação Ótima de Energia, Utilizada pelo Software WB.

Na Figura 19 pode-se observar o restante da planilha de solução, onde constam as variáveis de folga referentes ao déficit de energia (DEF), compra de excedente repassável (EXr) e compra de excedente não repassável (Exnr). As restrições de limites de MCSD impostas na planilha de entrada de dados podem também ser vistas nesta figura.

46	Folgas: Cenário 1							
47	DEF61	0,025	EXr61	0,000	EXnr61	0,000		
48	DEF71	0,000	EXr71	0,000	EXnr71	0,000		
49	DEF81	0,000	EXr81	0,000	EXnr81	0,000		
50	DEF91	0,000	EXr91	0,000	EXnr91	0,000		
51	DEF101	0,000	EXr101	0,000	EXnr101	0,000		
52	Folgas: Cenário 2							
53	DEF62	1,071	EXr62	0,000	EXnr62	0,000		
54	DEF72	1,079	EXr72	0,000	EXnr72	0,000		
55	DEF82	0,000	EXr82	0,000	EXnr82	0,000		
56	DEF92	0,000	EXr92	0,000	EXnr92	0,000		
57	DEF102	0,000	EXr102	0,000	EXnr102	0,000		
58								
59								
60	Mecanismo de Compensação							
61	Cenário 1							
62	MCSDA61	0,500	<=	0,500	MCSDR61	0,000	<=	0,400
63	MCSDA71	0,500	<=	0,500	MCSDR71	0,000	<=	0,400
64	MCSDA81	0,500	<=	0,500	MCSDR81	0,000	<=	0,400
65	MCSDA91	0,000	<=	0,500	MCSDR91	0,400	<=	0,400
66	MCSDA101	0,000	<=	0,500	MCSDR101	0,400	<=	0,400
67	Cenário 2							
68	MCSDA62	0,500	<=	0,500	MCSDR62	0,000	<=	0,500
69	MCSDA72	0,500	<=	0,500	MCSDR72	0,000	<=	0,400
70	MCSDA82	0,500	<=	0,500	MCSDR82	0,000	<=	0,400
71	MCSDA92	0,500	<=	0,500	MCSDR92	0,000	<=	0,400
72	MCSDA102	0,500	<=	0,500	MCSDR102	0,000	<=	0,400
73								

Figura 18: Segunda Parte da Planilha de Solução do Problema de Contratação Ótima de Energia.

Para o problema proposto, a contratação ótima para os dois cenários é apresentada através dos gráficos das Figuras 20 e 21, que mostram, respectivamente, o efeito da contratação nos cenários 1 e 2. No cenário 1 observa-se ainda que a contratação, na maioria dos anos, obedece aos limites de déficit e 103% do valor de carga (limite de contrato repassável à tarifa), com exceção do ano 2008, onde existe uma sobre-contratação, que é corrigida através das reduções efetuadas.

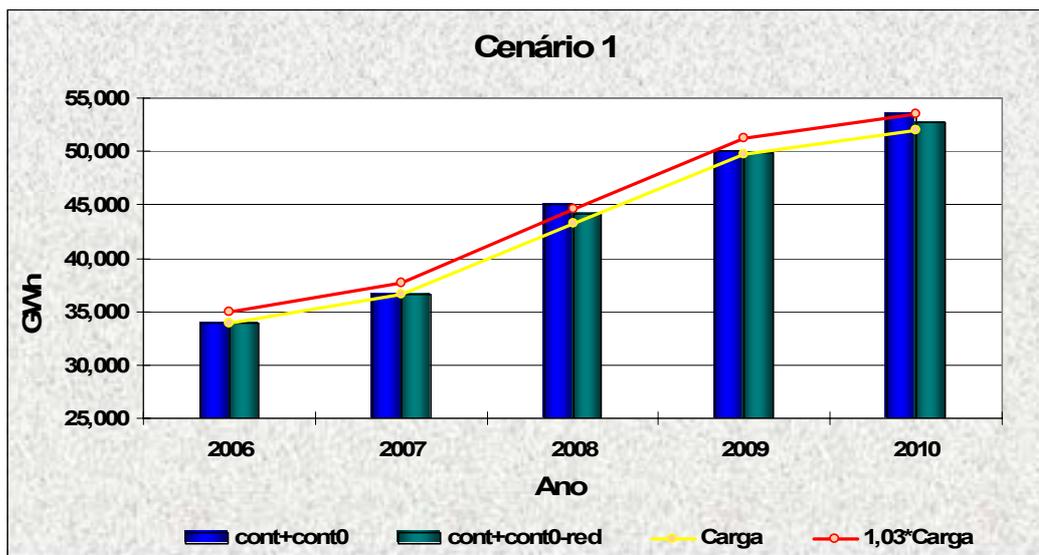


Figura 19: Gráfico da Contratação Ótima e Reduções Efetuadas para o Cenário 1 do Problema Proposto.

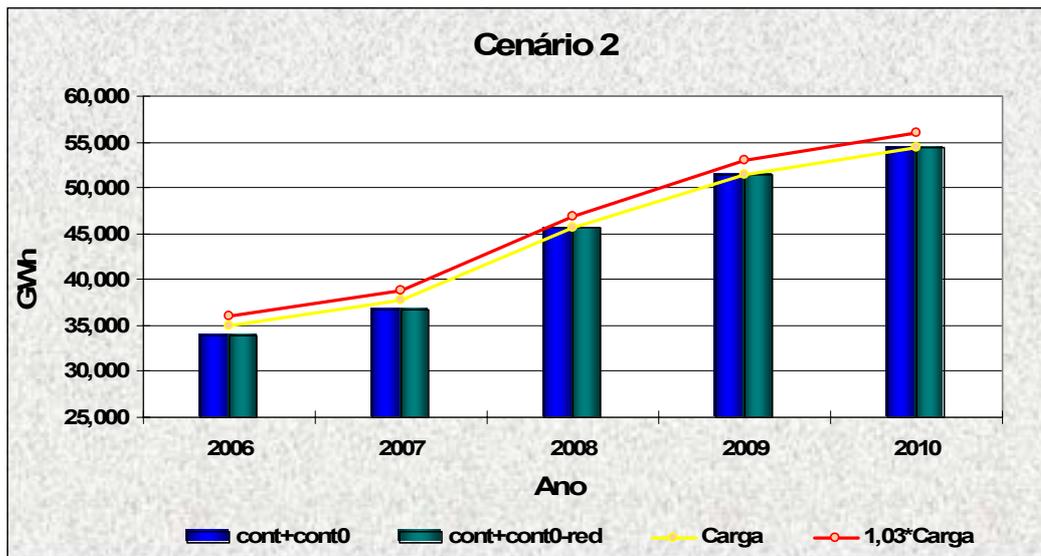


Figura 20: Gráfico da Contratação Ótima e Reduções Efetuadas para o Cenário 2 do Problema Proposto.

No Gráfico do cenário 2, mostrado na Figura 21, observa-se que a sub-contratação faz parte da contratação ótima para os anos de 2006 e 2007. Isto se deve a um conjunto de fatores, a começar pela probabilidade do cenário 2 ser inferior a do cenário 1, o que privilegia a sub-contratação neste cenário. Os outros fatores estão no conjunto de custos de cada contratação ou redução e nos limites impostos.