

5 Abordagens Propostas para Otimização de Portfólio de Contratos de Energia

5.1. Introdução

Foi visto no capítulo 4 que a receita da geradora decorrente da comercialização de energia exclusivamente no mercado a vista é muito incerta. Foi visto também que a comercialização de energia via contratos bilaterais reduz esta incerteza através da garantia de um fluxo determinístico de receita, embora não a elimine totalmente. Entretanto, a estratégia de vender energia através de um único contrato bilateral de longo prazo pode não ser a mais eficiente, pois neste caso a geradora não se beneficiaria quando da ocorrência de períodos de preços no mercado a vista bastante altos, nos quais poderia obter lucros elevados. Além disso, seu prejuízo seria grande no caso de o único comprador da energia não honrar seus compromissos, não pagando pela energia consumida.

Uma estratégia melhor está associada à venda da energia através de uma carteira diversificada de contratos, onde os diversos contratos teriam características distintas (período de vigência, volume de energia, preço etc.) [60,61,62]. Além da carteira de contratos, a empresa geradora pode deixar parte da energia para ser comercializada no mercado a vista. Entretanto, a definição dos volumes a serem comercializados através de cada contrato bilateral candidato e no mercado a vista não é uma tarefa simples, e no caso de existirem vários contratos candidatos com períodos de vigências diferentes esta tarefa se torna ainda mais complexa.

Neste capítulo são propostas três abordagens para o problema de otimização de portfólio de contratos de energia quando visto pela ótica de uma geradora. Estas abordagens têm como objetivo subsidiar a definição da estratégia de comercialização de energia de uma geradora, isto é, os volumes de energia a

serem comercializados através de cada contrato bilateral candidato e no mercado a vista, de modo que a estratégia resultante seja aquela que maximiza o valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora ao longo de todo o horizonte de estudo, associado a um dado nível de risco por ela aceitável. O horizonte de estudo considerado é de médio a longo prazo.

No item 5.2 são apresentadas algumas características relacionadas ao problema de otimização de portfólio de contratos de energia. No item 5.3 são descritos os principais dados necessários para a resolução do problema pelas abordagens propostas nesta tese. No item 5.4 é proposta uma abordagem que se baseia na relação média-variância da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora. No item 5.5 é proposta uma segunda abordagem para otimização de portfólio de contratos de energia, na qual o risco é mensurado pelo mínimo da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas. Finalmente no item 5.6 é proposta a terceira abordagem, onde a medida de risco adotada é o CVaR (Conditional Value-at-Risk).

5.2. Características Relacionadas ao Problema de Otimização de Portfólio de Contratos de Energia

Considere um gerador cujo custo de operação seja 15 \$/MWh, e capacidade de geração de 500 MW. Suponha que este gerador tenha assinado um contrato de venda de energia com uma empresa distribuidora por dois estágios (2 meses, por exemplo), cujo preço estabelecido no contrato é 25 \$/MWh, e volume de energia contratada de 500 MWh. Assumindo que no primeiro mês o preço da energia no mercado a vista seja 20 \$/MWh, a remuneração da geradora no primeiro mês seria (vide expressão (4.7)):

$$R_1 = (25 - 20) 500 + (20 - 15) 500 = 5000 \$/h$$

Obs.: por simplicidade, nos cálculos deste exemplo não foram considerados o número de horas de um mês.

Observe que devido ao preço da energia no mercado a vista ser maior que o custo de operação da usina, o gerador foi despachado em sua capacidade máxima.

Suponha então que no segundo mês o preço da energia no mercado a vista tenha passado para 40 \$/MWh. O gerador continua sendo despachado em sua capacidade máxima, pois o preço da energia no mercado a vista é maior que seu custo de operação. Sua remuneração no segundo mês seria:

$$R_2 = (25 - 40)500 + (40 - 15)500 = 5000 \text{ \$/h}$$

Note que como o gerador se comprometeu a vender toda a energia gerada à empresa distribuidora por 25 \$/MWh, ele não se beneficiou da alta do preço da energia no mercado a vista.

Assumindo que o custo de oportunidade de capital da geradora seja nulo, o valor presente de suas remunerações líquidas é de 10000 \$/h.

Considere agora uma estratégia de comercialização de energia alternativa, onde o volume de energia definido no contrato com a empresa distribuidora é de 300 MWh. Assumindo que o preço de comercialização e os preços da energia no mercado a vista do primeiro e segundo mês não se alteraram, a remuneração do gerador em cada mês seria:

$$R_1 = (25 - 20)300 + (20 - 15)500 = 4000 \text{ \$/h}$$

$$R_2 = (25 - 40)300 + (40 - 15)500 = 8000 \text{ \$/h}$$

A remuneração líquida da geradora no primeiro mês foi menor que a obtida na estratégia original. Entretanto, no segundo mês, devido à parcela de energia comercializada no mercado a vista, ela pode se beneficiar da alta do preço da energia neste mercado. Note que esta estratégia alternativa foi mais vantajosa para a geradora do que a estratégia inicial, pois seu ganho ao longo dos dois meses foi maior.

O exemplo apresentado mostra que às vezes pode ser vantajoso para uma geradora deixar parte da energia para ser comercializada no mercado a vista. O exemplo também mostra que o problema de otimização de portfólio de contratos é acoplado no tempo. Uma estratégia de comercialização de energia adotada hoje tem impacto sobre a remuneração futura da geradora. Se a geradora decide vender toda a energia através de contratos bilaterais de longo prazo e um longo período de altos preços da energia no mercado a vista ocorre, a geradora tem uma perda financeira que é função da oportunidade perdida de lucrar com a venda da energia neste mercado. Mas se um longo período de baixos preços no mercado a vista ocorre, a decisão de vender energia através de contratos bilaterais de longo prazo se mostra apropriada. Por outro lado, se a geradora decide vender energia no mercado a vista, sua remuneração seria baixa na ocorrência de um longo período de baixos preços neste mercado, ou alta no caso de um longo período de preços elevados [61,62]. Tais situações são ilustradas na Figura 5.1.

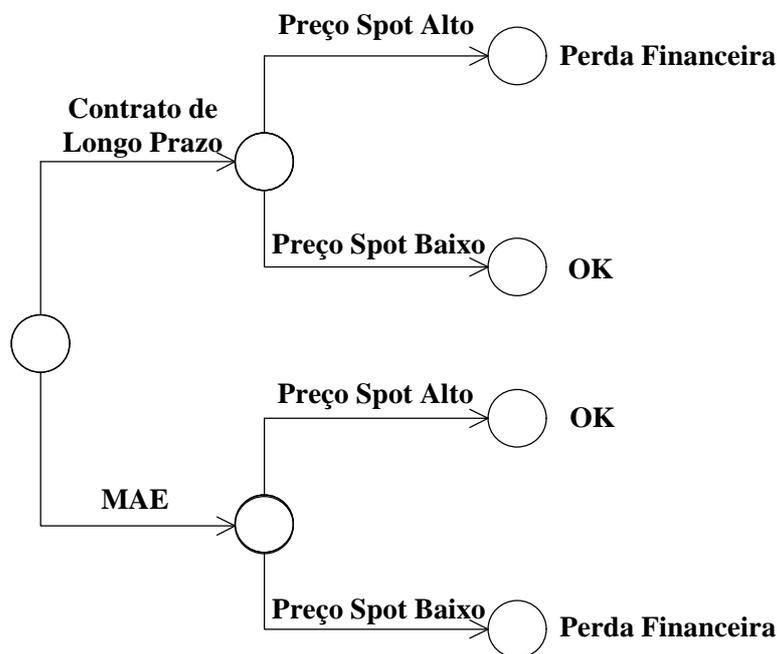


Figura 5.1 – Conseqüências da Estratégia de Comercialização de Energia

Uma outra característica de um problema de otimização de portfólio de contratos de energia que deve ser levada em conta na formulação do problema, diz

respeito a estocasticidade dos valores futuros dos preços da energia no mercado a vista e dos despachos de geração, cujos valores não são conhecidos a priori [61,62].

5.3.

Principais Dados para Resolver o Problema de Otimização de Portfólio de Contratos de Energia

Os principais dados necessários para se resolver o problema de otimização de portfólio de contratos de energia através das abordagens propostas nesta tese são: valores futuros dos preços da energia no mercado a vista; valores futuros dos despachos da geradora em questão; capacidade de contratação, custo de operação e custo de oportunidade de capital da geradora em questão; e a lista de contratos bilaterais candidatos.

Os valores futuros dos preços da energia no mercado a vista e dos despachos da geradora em questão são utilizados na expressão que modela a remuneração líquida da geradora, conforme visto anteriormente. A estocasticidade relativa a estas variáveis é representada através de cenários (séries) gerados pelo modelo computacional NEWAVE [51,52], utilizado no planejamento da operação energética de longo prazo no Brasil. A partir das afluências históricas, o modelo NEWAVE determina, utilizando um modelo de geração de séries sintéticas, um grande número de cenários futuros de afluências. Para cada um destes prováveis cenários futuros de afluências, pode-se determinar estratégias futuras de operação do sistema (despachos de geração), e conseqüentemente os cenários futuros de preços da energia no mercado a vista associados. Tal procedimento é ilustrado na Figura 5.2.

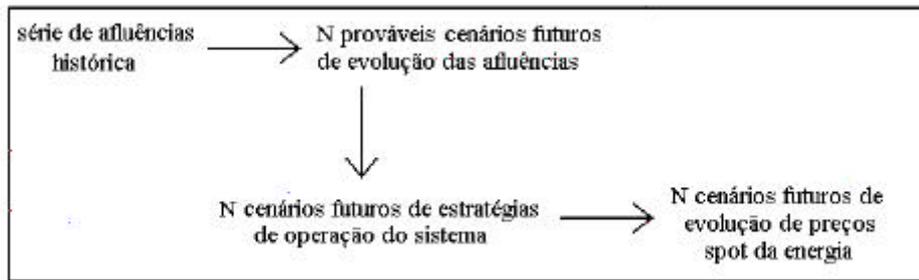


Figura 5.2 – Determinação de Cenários Futuros de Despachos de Geração e de Preços da Energia no Mercado a Vista

A capacidade de contratação da geradora é utilizada para limitar o volume de energia que ela pode vender através de contratos bilaterais em cada mês. Este limite pode estar associado, por exemplo, a uma exigência por parte do órgão regulador de um lastro físico que garanta que a usina possui condição de honrar os contratos assumidos. O custo de operação da geradora é utilizado nas expressões que modelam sua remuneração líquida, conforme visto anteriormente. O custo de oportunidade de capital é utilizado no cálculo dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora.

Com relação à lista de contratos bilaterais candidatos, para cada um deles deve ser fornecido as seguintes características: submercado no qual a energia deve ser entregue caso o contrato bilateral candidato seja firmado; instante de tempo no qual se inicia a vigência; instante de tempo no qual termina a vigência; preço da energia; volume máximo de energia que pode ser negociado através do contrato bilateral candidato¹. Os volumes de energia a serem comercializados através dos contratos bilaterais candidatos são as variáveis de decisão do problema.

Na Figura 5.3 é apresentado o fluxo de informação relacionado às principais entradas e saídas das abordagens propostas nesta tese.

¹ Este limite máximo pode estar associado, por exemplo, ao volume de energia que uma distribuidora ou um grande consumidor esteja disposto a comprar.

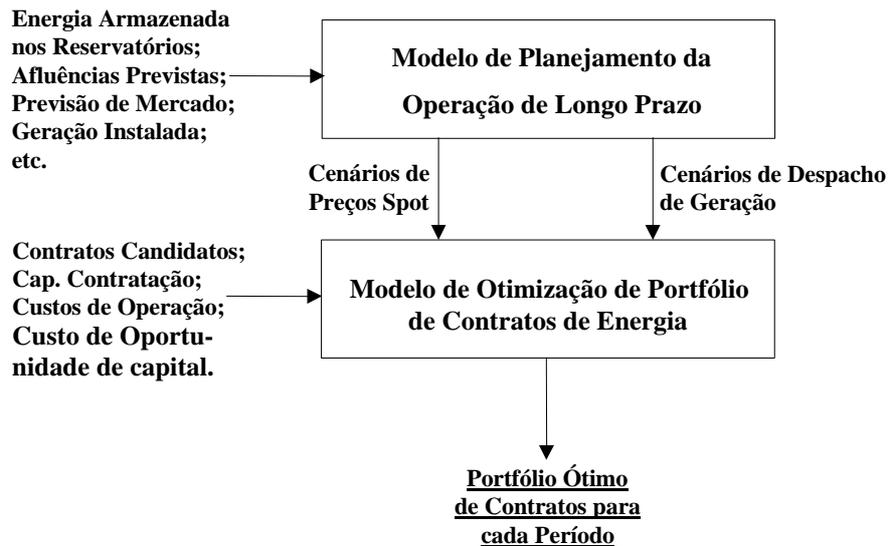


Figura 5.3 – Principais Entradas e Saídas

As abordagens propostas nesta tese trabalham com periodicidade mensal, ou seja, o valor presente das remunerações líquidas da geradora é calculado a partir de suas remunerações líquidas mensais.

Vale ressaltar que os cenários futuros de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração fornecidos ao modelo de otimização de portfólio de contratos de energia são função da configuração adotada como dado de entrada para o modelo de planejamento da operação energética de longo prazo. Como visto no capítulo 4, geralmente os modelos de planejamento da operação energética de longo prazo levam em conta apenas as incertezas relacionadas às afluências, embora existam outras incertezas tais como carga a ser atendida, cronograma de entrada em operação de novas unidades geradoras, disponibilidade das usinas etc. Estas outras incertezas podem ter um impacto considerável nos cenários futuros de preços de energia no mercado a vista e de despachos de geração, e conseqüentemente, nos resultados do modelo de otimização de portfólio de contratos de energia, e deveriam ser representadas. Entretanto, por simplicidade, estas não serão consideradas de forma explícita, embora seus impactos sobre os resultados do modelo possam ser avaliados, por exemplo, através de uma análise de sensibilidade com relação a tais variáveis.

5.4. Primeira Abordagem: Modelo Média-Variância para Otimização de Portfólio de Contratos de Energia

A primeira abordagem para otimização de portfólio de contratos de energia pode ser vista como uma adaptação do modelo média-variância desenvolvido por Harry Markowitz. Deseja-se decidir os níveis de contratação associados aos diversos contratos bilaterais candidatos, de modo a obter-se o ponto de mínimo risco associado a um dado nível de retorno esperado. O risco e o retorno esperado são medidos pelo desvio padrão e valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora, respectivamente.

Suponha então que existam N contratos bilaterais candidatos a compor o portfólio da geradora de energia. Seja o n -ésimo contrato bilateral candidato, cujas características são:

h_n - submercado no qual a energia deve ser entregue caso o n -ésimo contrato bilateral candidato seja firmado

j_n - instante de tempo no qual se inicia a vigência do n -ésimo contrato bilateral candidato

k_n - instante de tempo no qual termina a vigência do n -ésimo contrato bilateral candidato

p_n - preço da energia associado ao n -ésimo contrato bilateral candidato

\bar{x}_n - volume máximo de energia que pode ser negociado através do contrato bilateral candidato

x_n - volume de energia a ser comercializada através do n -ésimo contrato bilateral candidato (variável de decisão do problema)

Suponha também que existam S séries de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração, e que exista a possibilidade da geradora comercializar energia em I submercados. Seja $R_t^{i,s}$ a remuneração líquida da geradora no instante de tempo t devido a comercialização de energia no

i-ésimo submercado, associada à s-ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração. $R_t^{i,s}$ é dada por:

$$R_t^{i,s} = \sum_{\substack{n=1 \\ h_n=i \\ j_n \leq t \\ k_n \geq t}}^N (p_n - \pi_t^{i,s}) x_n + (\pi_t^{i,s} - \text{cop}) G_t^{i,s} \quad (5.1)$$

onde:

$\pi_t^{i,s}$ - preço da energia no mercado a vista do submercado i no instante de tempo t, associado à s-ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração

cop - custo de operação da usina

$G_t^{i,s}$ - despacho de geração alocada à geradora no submercado i no instante de tempo t, associado à s-ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração

Note que (5.1) é uma generalização de (4.7) para o caso onde existem vários contratos bilaterais candidatos.

Nas parcelas internas ao somatório de (5.1) só devem ser computados os contratos bilaterais candidatos cujo volume de energia é para ser entregue no i-ésimo submercado (condição de que $h_n = i$), e que sejam válidos no instante de tempo t. Os contratos válidos no instante de tempo t são aqueles com início de vigência até o instante de tempo t (condição de que $j_n \leq t$), e término de vigência posterior ou no próprio instante de tempo t (condição de que $k_n \geq t$).

Supondo horizonte de estudo igual a T, o valor presente das remunerações líquidas da geradora devido à comercialização de energia em todos os I submercados, associado à s-ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração, é dado por:

$$VP_s = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} R_t^{i,s} \quad (5.2)$$

onde tx é o custo de oportunidade de capital da geradora.

Substituindo (5.1) em (5.2), obtém-se:

$$VP_s = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \left\{ \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} \left[\sum_{\substack{n=1 \\ h_n=i \\ j_n \leq t \\ k_n \geq t}}^N (p_n - \pi_t^{i,s}) x_n + (\pi_t^{i,s} - \text{cop}) G_t^{i,s} \right] \right\} \quad (5.3)$$

Considere então o c -ésimo contrato bilateral candidato, para comercialização de energia no submercado h_c , com vigência que se inicia e termina nos instantes de tempo j_c e k_c , respectivamente. Com a explicitação deste contrato, a expressão (5.3) pode ser rescrita da seguinte forma:

$$VP_s = \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} \left[\sum_{\substack{n=1 \\ h_n=i \\ j_n \leq t \\ k_n \geq t}}^{c-1} (p_n - \pi_t^{i,s}) x_n \right] \right\} +$$

$$+ \left\{ \sum_{t=j_c}^{k_c} \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} (p_c - \pi_t^{h_c,s}) x_c \right\} +$$

$$+ \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} \left[\sum_{\substack{n=c+1 \\ h_n=i \\ j_n \leq t \\ k_n \geq t}}^N (p_n - \pi_t^{i,s}) x_n \right] \right\} + \gamma_s \quad (5.4)$$

onde:

$$\gamma_s = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} (\pi_t^{i,s} - \text{cop}) G_t^{i,s} \quad (5.5)$$

Definindo:

$$\varphi_c^s = \sum_{t=j_c}^{k_c} \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} (p_c - \pi_t^{h_c, s}) \quad (5.6)$$

Generalizando para qualquer contrato candidato:

$$\varphi_n^s = \sum_{t=j_n}^{k_n} \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} (p_n - \pi_t^{h_n, s}) \quad (5.7)$$

Logo, o valor presente das remunerações líquidas da geradora, associado à s-ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração, pode ser escrito como:

$$VP_s = \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n + \gamma_s \quad (5.8)$$

onde φ_n^s e γ_s são dados pelas expressões (5.7) e (5.5), respectivamente.

O valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora é calculado da seguinte forma:

$$E[VP_s] = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S VP_s = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \left(\sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n + \gamma_s \right) \quad (5.9)$$

Fazendo:

$$\varphi_n = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \varphi_n^s \quad (5.10)$$

$$\gamma = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \gamma_s \quad (5.11)$$

Obtém-se:

$$E[VP_s] = \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n + \gamma \quad (5.12)$$

A variância dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora é calculada da seguinte forma:

$$\text{Var}[\text{VP}_s] = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (\text{VP}_s - E[\text{VP}_s])^2 \quad (5.13)$$

com VP_s e $E[\text{VP}_s]$ dados pelas expressões (5.8) e (5.12), respectivamente.

Apresentadas as expressões que modelam o valor esperado e a variância dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora, pode-se apresentar o modelo média-variância para otimização de portfólio de contratos de energia proposto nesta tese. Tal modelo é apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} & \underset{x_n}{\text{Minimizar}} \quad \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (\text{VP}_s - E[\text{VP}_s])^2 \\ & \text{s.a.} \\ & \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n \geq \mu_{\min} - \gamma \\ & \sum_{n=1}^N x_n \leq \text{CapC} \quad t = 1, \dots, T \\ & \begin{matrix} j_n \leq t \\ k_n \geq t \end{matrix} \\ & 0 \leq x_n \leq \overline{x_n} \quad n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (5.14)$$

onde VP_s , $E[\text{VP}_s]$, φ_n e γ são dados pelas expressões (5.8), (5.12), (5.10) e (5.11), respectivamente, μ_{\min} representa o valor esperado mínimo requerido pela geradora, e CapC é a capacidade de contratação da geradora.

As variáveis de decisão do problema acima são os volumes de energia a serem comercializados através de cada contrato bilateral candidato, representadas por x_n , $n = 1, \dots, N$. Os valores que estas variáveis assumem na solução ótima de (5.14) são tais que, dentre todas as possíveis distribuições dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora que apresentem valor esperado maior ou

igual a um valor preestabelecido (dado por μ_{\min}), a distribuição resultante seja a de mínima variância.

A função objetivo de (5.14) representa a variância dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora, a qual deve ser minimizada. A primeira restrição está associada à garantia de que na solução do problema a distribuição resultante possua valor esperado maior ou igual ao valor esperado mínimo requerido pela geradora. Note que o termo γ aparece no lado direito da restrição, pois pode ser calculado a priori já que não depende dos valores assumidos pelas variáveis x_n . O segundo conjunto de restrições está associado à exigência de que o volume de energia comercializado em cada instante de tempo t através de contratos bilaterais seja limitado pela capacidade de contratação da geradora. Em um dado instante de tempo t , os contratos bilaterais válidos são aqueles com início de vigência até o instante de tempo t (condição de que $j_n \leq t$), e término de vigência posterior ou no próprio instante de tempo t (condição de que $k_n \geq t$). Finalmente, o terceiro conjunto de restrições está associado à limites nas variáveis do problema. O volume de energia negociado através de cada contrato bilateral candidato não pode ultrapassar um limite máximo preestabelecido. Este limite máximo pode estar associado, por exemplo, ao volume de energia que uma distribuidora ou um grande consumidor esteja disposto a comprar.

Note que os volumes a serem comercializados no mercado a vista não são modelados de forma explícita na formulação do problema, e sim de forma implícita. Entretanto, a partir da diferença entre o despacho da geradora e o volume total negociado através de contratos bilaterais, obtém-se os volumes a serem comercializados por ela no mercado a vista em cada instante de tempo t .

O algoritmo utilizado para se obter a fronteira eficiente de contratação de energia pode ser resumido da seguinte forma:

Algoritmo para Obtenção da Fronteira Eficiente – Modelo Média-Variância

1. Inicialize a variável que define o número de pontos a serem utilizados para formar a fronteira eficiente (variável np).
2. Obtenha a solução que, independente de seu valor esperado, apresente a menor variância, resolvendo o seguinte problema:

$$\text{Minimizar}_{x_n} \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (VP_s - E[VP_s])^2$$

s.a.

$$\sum_{n=1}^N x_n \leq \text{CapC} \quad t = 1, \dots, T$$

$$\begin{matrix} j_n \leq t \\ k_n \geq t \end{matrix}$$

$$0 \leq x_n \leq \bar{x}_n \quad n = 1, \dots, N$$

Calcule o valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas associada à solução ótima do problema acima e a armazene na variável μ_0 .

3. Obtenha a solução que, independente de sua variância, apresente o maior valor esperado, resolvendo o seguinte problema:

$$\text{Maximizar}_{x_n} E[VP_s]$$

s.a.

$$\sum_{n=1}^N x_n \leq \text{CapC} \quad t = 1, \dots, T$$

$$\begin{matrix} j_n \leq t \\ k_n \geq t \end{matrix}$$

$$0 \leq x_n \leq \bar{x}_n \quad n = 1, \dots, N$$

Armazene o valor ótimo do problema acima na variável μ_{np} .

4. Faça $\mu_{\min} = \mu_{np}$.

5. Obtenha a solução de menor variância, dentre todas as possíveis soluções que apresentem valor esperado maior ou igual a μ_{\min} , resolvendo o seguinte problema:

$$\begin{aligned} & \underset{x_n}{\text{Minimizar}} \quad \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (VP_s - E[VP_s])^2 \\ & \text{s.a.} \\ & \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n \geq \mu_{\min} - \gamma \\ & \sum_{n=1}^N x_n \leq \text{CapC} \quad t = 1, \dots, T \\ & \begin{matrix} j_n \leq t \\ k_n \geq t \end{matrix} \\ & 0 \leq x_n \leq \overline{x_n} \quad n = 1, \dots, N \end{aligned}$$

6. Se $\mu_{\min} \leq \mu_0$ pare, caso contrário faça $\mu_{\min} = \mu_{\min} - \frac{(\mu_{np} - \mu_0)}{np}$ e volte ao passo (5).

Vale ressaltar que a função que representa a fronteira eficiente de contratação de energia é bem comportada, isto é, resolvendo-se o problema associado ao passo (5) do algoritmo para dois μ_{\min} (μ_{\min}^a e μ_{\min}^b) tal que $\mu_{\min}^a \geq \mu_{\min}^b$, garante-se que a variância associada ao ponto de valor esperado μ_{\min}^a é maior ou igual a variância associada ao ponto cujo valor esperado seja μ_{\min}^b . Tal característica é comprovada no Apêndice F.

5.5.

Segunda Abordagem: Modelo Média-Mínimo da Distribuição para Otimização de Portfólio de Contratos de Energia

A primeira abordagem proposta nesta tese utiliza a variância como medida de risco. Entretanto, conforme visto no capítulo 2, a variância de uma variável aleatória se caracteriza como uma medida de desvio, e não de risco, pois leva em conta tanto os desvios negativos quanto os positivos em relação ao seu valor

esperado. Uma medida de risco deve levar em conta apenas a possibilidade de realização de valores localizados na calda esquerda da distribuição, isto é, valores extremos menores que o valor esperado.

Para distribuições simétricas em relação ao valor esperado, pode-se caracterizar os valores extremos a partir do valor esperado e da variância da distribuição. Por exemplo, para uma Normal sabe-se que 95% das realizações da variável aleatória estão no intervalo $\mu \pm 1,96 \cdot \sigma$, onde μ e σ são o valor esperado e desvio padrão da distribuição, respectivamente. Entretanto, para distribuições assimétricas, o valor esperado e a variância não são suficientes para caracterizar a possibilidade de realização de valores extremos localizados em sua calda esquerda.

Como não se pode garantir a priori que a distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora seja simétrica em relação ao valor esperado, a variância pode não ser uma medida adequada para mensurar o risco. Tal fato motivou a proposição de uma segunda abordagem para otimização de portfólio de contratos de energia, na qual o risco é medido pelo mínimo da distribuição. Desta forma, procura-se obter uma solução na qual o valor presente das remunerações líquidas associado a todos os cenários de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração seja maior ou igual a um valor mínimo requerido pela geradora [62].

Além disso, assume-se que existem duas classes de contratos bilaterais candidatos: aqueles que devem ser firmados imediatamente, e aqueles que representam possibilidades futuras de contratação. Assume-se que a primeira classe é composta pelos contratos com início de vigência no primeiro mês de estudo, e a segunda classe pelos demais contratos bilaterais candidatos¹.

Com isso, na segunda abordagem o problema é formulado com o objetivo de se maximizar o valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas

¹ O que se caracteriza como uma simplificação, pois na prática podem existir contratos cuja vigência não se inicia imediatamente, porém são de decisão imediata.

da geradora, condicionado ao atendimento de um valor presente mínimo preestabelecido. As variáveis de decisão do problema são os volumes de energia a serem comercializados através de cada contrato bilateral candidato, sendo que para os contratos candidatos com início de vigência posterior ao primeiro mês existe a flexibilidade de espera para a tomada de decisão. Para modelar esta flexibilidade de espera, na formulação do problema existirá uma variável associada a cada cenário de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração.

Vale ressaltar que esta segunda abordagem pode ser vista como uma adaptação do modelo MiniMax de Young¹ para a área de comercialização de energia.

Suponha então que existam N contratos bilaterais candidatos com início de vigência no primeiro mês e M contratos bilaterais candidatos com início de vigência nos meses subsequentes. Matematicamente, as variáveis de decisão do problema são x_n , $n = 1, \dots, N$ e y_m^s , $m = 1, \dots, M$; $s = 1, \dots, S$, onde:

x_n – variável que representa o volume de energia a ser comercializado através do n -ésimo contrato bilateral candidato com início de vigência no primeiro mês

y_m^s – variável que representa o volume de energia a ser comercializado através do m -ésimo contrato bilateral candidato com início de vigência posterior ao primeiro mês, associado à s -ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração

Note que devido à flexibilidade imposta pela representação de possibilidades futuras de contratação, o número de variáveis do problema nesta segunda abordagem é muito maior do que na primeira. Por exemplo, supondo que existem apenas dois contratos bilaterais candidatos, o primeiro de decisão imediata e o segundo representando uma possibilidade futura de contratação, e

¹ Vide formulação (2.5), capítulo 2.

que a incerteza quanto à evolução dos preços da energia no mercado a vista e dos despachos de geração seja representada através de 2000 cenários, o problema quando formulado por esta segunda abordagem terá 2001 variáveis de decisão (1 variável associada ao primeiro contrato bilateral candidato e 2000 variáveis associada ao segundo contrato bilateral candidato).

Para esta segunda abordagem, a expressão referente à remuneração líquida da geradora no instante de tempo t devido à comercialização de energia no i -ésimo submercado, associada à s -ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração é escrita como:

$$R_t^{i,s} = \sum_{\substack{n=1 \\ h_n=i \\ k_n \geq t}}^N (p_n - \pi_t^{i,s}) x_n + \sum_{\substack{m=1 \\ h_m=i \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M (p_m - \pi_t^{i,s}) y_m^s + (\pi_t^{i,s} - \text{cop}) G_t^{i,s} \quad (5.15)$$

Cabe ressaltar que para $t = 1$ o somatório em y_m^s não aparece, pois estas variáveis se referem aos contratos bilaterais com início de vigência posterior ao primeiro mês.

Seguindo o mesmo raciocínio apresentado para a primeira abordagem, verifica-se que o valor presente das remunerações líquidas da geradora devido à comercialização de energia em todos os I submercados, associado à s -ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração é dada por:

$$VP_s = \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s + \gamma_s \quad (5.16)$$

onde:

$$\varphi_n^s = \sum_{t=1}^{k_n} \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} (p_n - \pi_t^{h_n,s}) \quad (5.17)$$

$$\delta_m^s = \sum_{t=j_m}^{k_m} \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} (p_m - \pi_t^{h_m,s}) \quad (5.18)$$

$$\gamma_s = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{1}{(1+tx)^{t-1}} (\pi_t^{i,s} - \text{cop}) G_t^{i,s} \quad (5.19)$$

A partir dos valores presentes das remunerações líquidas associadas a todas as séries de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração, obtém-se seu valor esperado:

$$E[VP_s] = \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s + \gamma \quad (5.20)$$

onde:

$$\varphi_n = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \varphi_n^s \quad (5.21)$$

$$\gamma = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \gamma_s \quad (5.22)$$

Apresentadas as expressões que modelam o valor presente das remunerações líquidas associado a cada série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração, e respectivo valor esperado, pode-se apresentar o modelo média-mínimo da distribuição para otimização de portfólio de contratos de energia proposto nesta tese:

$$\begin{aligned} & \underset{x_n, y_m^s}{\text{Maximizar}} \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s \\ & \text{s.a.} \\ & \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s \geq VP_{\min} - \gamma_s \quad s = 1, \dots, S \\ & \sum_{n=1}^N x_n + \sum_{m=1}^M y_m^s \leq \text{CapC} \quad t = 1, \dots, T ; s = 1, \dots, S \\ & \begin{matrix} n=1 & m=1 \\ k_n \geq t & j_m \leq t \\ & k_m \geq t \end{matrix} \\ & 0 \leq x_n \leq \overline{x_n} \quad n = 1, \dots, N \\ & 0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m^s} \quad m = 1, \dots, M ; s = 1, \dots, S \end{aligned} \quad (5.23)$$

onde φ_n , δ_m^s e φ_n^s são dados pelas expressões (5.21), (5.18) e (5.17), respectivamente.

A função objetivo de (5.23) representa a maximização do valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora ao longo de todo o horizonte de estudo. Note que o termo γ que aparece na expressão (5.20) foi omitido por ser uma constante. O primeiro conjunto de restrições está associado ao atendimento ao valor presente mínimo requerido pela geradora. O valor presente associado a cada cenário de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração deve ser maior ou igual ao valor presente mínimo requerido (dado por VP_{\min}). Note que com relação à expressão (5.16), o termo γ_s aparece no lado direito da restrição, pois é calculado a priori já que não depende dos valores assumidos pelas variáveis de decisão. Existe uma restrição deste tipo associada cada série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração. O segundo conjunto de restrições está associado ao volume máximo de energia que pode ser vendido pela geradora através de contratos bilaterais em cada instante de tempo (sua capacidade de contratação). Devido à flexibilidade imposta pela representação de possibilidades futuras de contratação, existirá uma restrição deste tipo associada a cada série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração e a cada instante de tempo. Os demais conjuntos de restrições estão associados à limites nas variáveis do problema. O volume negociado através de cada contrato bilateral candidato não pode ultrapassar um limite máximo preestabelecido, por exemplo, o volume de energia que uma distribuidora ou um grande consumidor esteja disposto a comprar.

Além de o número de variáveis do problema (5.23) ser muito maior do que o do problema referente à primeira abordagem, o número de restrições também é. Por este motivo, optou-se por resolvê-lo via método de programação dinâmica dual, apresentado no capítulo 3. Entretanto, para aplicação de tal método foi adotada uma representação alternativa, porém equivalente, para o primeiro e o segundo conjunto de restrições de (5.23). São elas:

Problema de segundo estágio associado à s-ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração:

$$\begin{aligned}
 v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = & \underset{y_m^s, VP_2^s, \Psi_2^{t,s}}{\text{Maximizar}} \quad \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s \\
 \text{s.a.} & \\
 VP_2^s - \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = & VP_1^s \\
 VP_2^s \geq & VP_{\min} \\
 \Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = & \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T \\
 \Psi_2^{t,s} \leq & \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T \\
 0 \leq y_m^s \leq & \overline{y}_m \quad m = 1, \dots, M
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

No problema de primeiro estágio decidem-se os valores das variáveis associadas aos contratos de decisão imediata (variáveis x_n) e os valores das variáveis de estado VP_1^s , $s = 1, \dots, S$, e Ψ_1^t , $t = 1, \dots, T$. No problema de segundo estágio são decididos os valores das variáveis que representam possibilidades futuras de contratação (variáveis y_m^s), em função dos valores obtidos para as variáveis de estado VP_1^s e Ψ_1^t , $t = 2, \dots, T$ no problema de primeiro estágio. Existe um problema de segundo estágio associado a cada série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração.

É importante salientar que os valores assumidos pelas variáveis de estado no problema de primeiro estágio podem resultar na inviabilidade do problema de segundo estágio associado a uma ou mais séries de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração. Conforme descrito no capítulo 3, considerou-se duas possibilidades para o tratamento destas prováveis inviabilidades: penalização na função objetivo e cortes de viabilidade.

Analisando a formulação (5.27), constata-se que inviabilidades só podem aparecer na restrição $VP_2^s \geq VP_{\min}$. Desta forma, adotando-se o tratamento via penalização na função objetivo, o problema de segundo estágio associado à s -ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração deve ser modificado para:

$$v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) =$$

$$\text{Maximizar}_{y_m^s, \theta_s, VP_2^s, \Psi_2^{t,s}} \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s - \text{Pen } \theta_s$$

s.a.

$$VP_2^s - \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = VP_1^s \quad (\eta_a^s)$$

$$VP_2^s + \theta_s \geq VP_{\min} \quad (\eta_b^s) \quad (5.28)$$

$$\Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T \quad (\eta_{c,t}^s \quad t = 2, \dots, T)$$

$$\Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T \quad (\eta_{d,t}^s \quad t = 2, \dots, T)$$

$$0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m} \quad m = 1, \dots, M \quad (\eta_{e,m}^s, \eta_{f,m}^s \quad m = 1, \dots, M)$$

$$\theta_s \geq 0 \quad (\eta_g^s)$$

onde $\text{Pen} \rightarrow +\infty$.

Sejam $(\eta_a^s, \eta_b^s, \eta_{c,2}^s, \dots, \eta_{c,T}^s, \eta_{d,2}^s, \dots, \eta_{d,T}^s, \eta_{e,1}^s, \dots, \eta_{e,M}^s, \eta_{f,1}^s, \dots, \eta_{f,M}^s, \eta_g^s)$ as variáveis duais associadas às restrições de (5.28). Suponha que na i -ésima iteração do algoritmo de programação dinâmica dual tais variáveis assumam os valores $(\eta_a^{s,i}, \eta_b^{s,i}, \eta_{c,2}^{s,i}, \dots, \eta_{c,T}^{s,i}, \eta_{d,2}^{s,i}, \dots, \eta_{d,T}^{s,i}, \eta_{e,1}^{s,i}, \dots, \eta_{e,M}^{s,i}, \eta_{f,1}^{s,i}, \dots, \eta_{f,M}^{s,i}, \eta_g^{s,i})$. O novo hiperplano a ser inserido no problema de primeiro estágio de modo a aprimorar a representação da função $v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$ é dado por:

$$v_s - \eta_a^{s,i} VP_1^s - \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad (5.29)$$

$$\text{onde } K_d^{s,i} = \eta_b^{s,i} VP_{\min} + \sum_{t=2}^T \eta_{d,t}^{s,i} \text{CapC} + \sum_{m=1}^M \eta_{f,m}^{s,i} \overline{y_m}$$

Com isso, adotando-se o tratamento de inviabilidades no problema de segundo estágio via penalização na função objetivo, o algoritmo para a solução do problema proposto nesta segunda abordagem fica:

Algoritmo do Modelo Média-Mínimo da Distribuição (Penalização na Função Objetivo)

1. Inicialização da variável contadora do número de hiperplanos utilizados na representação das funções $v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$:

$$nh = 0$$

2. Resolva o problema abaixo (*limite superior* do problema original):

$$\bar{z} = \text{Maximizar}_{x_n, VP_1^s, \Psi_1^t, v_s} \sum_{n=1}^N \phi_n x_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s$$

s.a.

$$VP_1^s - \sum_{n=1}^N \phi_n^s x_n = \gamma_s \quad s = 1, \dots, S$$

$$\Psi_1^t - \sum_{n=1}^N x_n = 0 \quad t = 1, \dots, T$$

$$k_n \geq t$$

$$\Psi_1^1 \leq \text{CapC}$$

$$0 \leq x_n \leq \overline{x_n} \quad n = 1, \dots, N$$

$$v_s - \eta_a^{s,i} VP_1^s - \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad s = 1, \dots, S ; i = 1, \dots, nh$$

3. Resolva os problemas abaixo em função de $VP_1^s = \hat{VP}_1^s$ e $\Psi_1^t = \hat{\Psi}_1^t$, $t=2,\dots,T$, obtidos no passo (2):

Para $s = 1,\dots,S$ resolva

$$\begin{aligned}
 & v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = \\
 & \text{Maximizar} \quad \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s - \text{Pen } \theta_s \\
 & y_m^s, \theta_s, VP_2^s, \Psi_2^{t,s} \\
 & \text{s.a.} \\
 & VP_2^s - \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = VP_1^s \\
 & VP_2^s + \theta_s \geq VP_{\min} \\
 & \Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T \\
 & \Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T \\
 & 0 \leq y_m^s \leq \bar{y}_m \quad m = 1, \dots, M \\
 & \theta_s \geq 0
 \end{aligned}$$

4. Faça $\underline{z} = \sum_{n=1}^N \phi_n \hat{x}_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s(\hat{VP}_1^s, \hat{\Psi}_1^2, \dots, \hat{\Psi}_1^T)$, onde \hat{x}_n é o valor assumido pela variável x_n na solução ótima do problema resolvido no passo (2)
5. Faça $nh = nh + 1$. Utilize as variáveis duais associadas às restrições dos problemas resolvidos no passo (3) para atualizar as aproximações de $v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$, $s=1,\dots,S$
6. Se $(\bar{z} - \underline{z} \leq \varepsilon)$ pare, caso contrário volte ao passo (2)

Se for adotado tratamento de inviabilidades no problema de segundo estágio via cortes de viabilidade, o problema auxiliar a ser resolvido caso (5.27) seja inviável é:

$$\begin{aligned}
& U_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = \\
& \text{Minimizar} \quad \theta_s \\
& y_m^s, VP_2^s, \Psi_2^{t,s}, \theta_s \\
& \text{s.a.} \\
& VP_2^s - \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = VP_1^s \quad (\eta_a^s) \\
& VP_2^s + \theta_s \geq VP_{\min} \quad (\eta_b^s) \\
& \Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T \quad (\eta_{c,t}^s \quad t = 2, \dots, T) \\
& \Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T \quad (\eta_{d,t}^s \quad t = 2, \dots, T) \\
& 0 \leq y_m^s \leq \overline{y}_m \quad m = 1, \dots, M \quad (\eta_{e,m}^s, \eta_{f,m}^s \quad m = 1, \dots, M) \\
& \theta_s \geq 0 \quad (\eta_g^s)
\end{aligned} \tag{5.30}$$

O corte de viabilidade a ser adicionado no problema de primeiro estágio é:

$$\eta_a^{s,i} VP_1^s + \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \tag{5.31}$$

$$\text{onde} \quad K_d^{s,i} = -\eta_b^{s,i} VP_{\min} - \sum_{t=2}^T \eta_{d,t}^{s,i} \text{CapC} - \sum_{m=1}^M \eta_{f,m}^{s,i} \overline{y}_m$$

Com isso, adotando-se o tratamento de inviabilidades no problema de segundo estágio via cortes de viabilidade, o algoritmo para solução do problema proposto nesta segunda abordagem fica:

Algoritmo do Modelo Média-Mínimo da Distribuição (Cortes de Viabilidade)

1. Inicialização da variável nh , do conjunto contendo os hiperplanos utilizados na aproximação de $v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$ (conjunto H), e do conjunto contendo os cortes de viabilidade (conjunto I)

$$nh = 0$$

$$H = \{\phi\}$$

$$I = \{\phi\}$$

2. Resolva o problema abaixo (*limite superior* do problema original):

$$\bar{z} = \underset{x_n, VP_1^s, \Psi_1^t, v_s}{\text{Maximizar}} \quad \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s$$

s.a.

$$VP_1^s - \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n = \gamma_s \quad s = 1, \dots, S$$

$$\Psi_1^t - \sum_{\substack{n=1 \\ k_n \geq t}}^N x_n = 0 \quad t = 1, \dots, T$$

$$\Psi_1^1 \leq \text{CapC}$$

$$0 \leq x_n \leq \bar{x}_n \quad n = 1, \dots, N$$

$$v_s - \eta_a^{s,i} VP_1^s - \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad s = 1, \dots, S ; i = 1, \dots, nh ; (s,i) \in H$$

$$\eta_a^{s,i} VP_1^s + \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad s = 1, \dots, S ; i = 1, \dots, nh ; (s,i) \in I$$

3. Resolva os problemas abaixo em função de $VP_1^s = \hat{VP}_1^s$ e $\Psi_1^t = \hat{\Psi}_1^t$, $t=2, \dots, T$, obtidos no passo (2):

Para $s = 1, \dots, S$ resolva

$$\begin{aligned}
 v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = & \underset{y_m^s, VP_2^s, \Psi_2^{t,s}}{\text{Maximizar}} \quad \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s \\
 \text{s.a.} & \\
 & VP_2^s - \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = VP_1^s \\
 & VP_2^s \geq VP_{\min} \\
 & \Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T \\
 & \Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T \\
 & 0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m} \quad m = 1, \dots, M
 \end{aligned}$$

Se viável, faça $H = H \cup \{(s, nh + 1)\}$

Se inviável faça $I = I \cup \{(s, nh + 1)\}$ e resolva:

$$\begin{aligned}
 \underset{y_m^s, VP_2^s, \Psi_2^{t,s}, \theta_s}{\text{Minimizar}} \quad & \theta_s \\
 \text{s.a.} & \\
 & VP_2^s - \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = VP_1^s \\
 & VP_2^s + \theta_s \geq VP_{\min} \\
 & \Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T \\
 & \Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T \\
 & 0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m} \quad m = 1, \dots, M \\
 & \theta_s \geq 0
 \end{aligned}$$

4. Faça $\underline{z} = \sum_{n=1}^N \phi_n \hat{x}_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s(\hat{VP}_1^s, \hat{\Psi}_1^2, \dots, \hat{\Psi}_1^T)$, onde \hat{x}_n é o valor assumido

pela variável x_n na solução ótima do problema resolvido no passo (2)

5. Faça $nh = nh + 1$. Utilize as variáveis duais associadas às restrições dos problemas resolvidos no passo (3) para atualizar as aproximações de $v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$, $s=1, \dots, S$, ou construir cortes de viabilidade, conforme o caso
6. Se $(\bar{z} - \underline{z} \leq \varepsilon)$ pare, caso contrário volte ao passo (2)

No algoritmo anterior utiliza-se a convenção de que quando um dos problemas de segundo estágio é inviável, a função $v_s(VP_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$ correspondente assume valor igual a menos infinito. Assim, é condição necessária para a convergência do algoritmo a viabilidade de todos os problemas de segundo estágio na iteração em curso.

Além disso, se a adição de um corte de viabilidade no problema de primeiro estágio tornar este inviável, pode-se concluir que com o conjunto de contratos candidatos a compor o portfólio é impossível satisfazer em todos os cenários o valor presente mínimo requerido pela geradora.

5.6. Terceira Abordagem: Modelo Média-CVaR para Otimização de Portfólio de Contratos de Energia

Na segunda abordagem proposta a decisão é tomada de modo a maximizar o valor esperado dos valores presentes das remunerações líquidas, condicionado ao atendimento a um valor presente mínimo requerido pela geradora. Entretanto, a exigência de que o valor presente de todos os cenários considerados na análise seja maior ou igual ao valor presente mínimo requerido pela geradora pode ser um critério muito rigoroso, pois os piores resultados podem estar associados à pouquíssimos cenários que sejam altamente improváveis.

Geralmente no processo de tomada de decisão, permite-se desprezar os piores cenários, desde que suas probabilidades de ocorrência sejam pequenas. Tal

procedimento equivale a utilizar o VaR como medida de risco. Entretanto, conforme visto no capítulo 2, o VaR não possui boas propriedades matemáticas, além de não ser uma medida consistente de risco.

Foi visto também no capítulo 2 que o CVaR é uma medida de risco com excelentes propriedades matemáticas para o emprego em um problema de otimização, além de ser uma medida consistente de risco. Com isso, optou-se por adotar o CVaR como medida de risco na terceira abordagem para otimização de portfólio de contratos de energia proposta nesta tese.

Com isso, na terceira abordagem o problema é formulado com o objetivo de se maximizar o valor esperado da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora, condicionado ao atendimento de um limite mínimo para o CVaR desta distribuição, a um dado nível de confiança. De forma similar à segunda abordagem, considera-se a existência de contratos bilaterais candidatos de decisão imediata e possibilidades futuras de contratação.

Vale ressaltar que esta terceira abordagem pode ser vista como uma adaptação para a área de comercialização de energia da formulação proposta por Krokhmal, Palmquist e Uryasev¹.

Conforme visto no capítulo 2, quando trabalha-se com distribuição de retornos, a limitação do risco a um dado valor K , quando este é medido pelo CVaR a nível de confiança $\beta\%$, é dada por²:

$$\begin{aligned} \alpha + \frac{1}{(1-\beta)S} \sum_{s=1}^S u_s &\geq K \\ u_s &\leq 0 & s = 1, \dots, S \\ u_s &\leq g_s - \alpha & s = 1, \dots, S \end{aligned} \quad (5.32)$$

¹ Vide formulação (2.23), capítulo 2.

² Vide formulação (2.26), capítulo 2.

Na terceira abordagem proposta nesta tese, o termo g_s representa o valor presente das remunerações líquidas da geradora associada à s -ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração, isto é:

$$g_s = VP_s = \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s + \gamma_s \quad (5.33)$$

Logo, o CVaR da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora pode ser limitado a um valor K através do seguinte conjunto de restrições:

$$\begin{aligned} \alpha + \frac{1}{(1-\beta)S} \sum_{s=1}^S u_s &\geq K \\ u_s &\leq 0 && s = 1, \dots, S \\ u_s &\leq \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s + \gamma_s - \alpha && s = 1, \dots, S \end{aligned} \quad (5.34)$$

Com isso, o modelo média-CVaR para otimização de portfólio de contratos de energia proposto nesta tese é:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar} \quad & \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s \\ \text{s.a.} \quad & \alpha + \frac{1}{(1-\beta)S} \sum_{s=1}^S u_s \geq K \\ & u_s \leq 0 && s = 1, \dots, S \\ & u_s - \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n - \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s + \alpha \leq \gamma_s && s = 1, \dots, S \\ & \sum_{n=1}^N x_n + \sum_{m=1}^M y_m^s \leq \text{CapC} && t = 1, \dots, T ; s = 1, \dots, S \\ & k_n \geq t && j_m \leq t \\ & && k_m \geq t \\ & 0 \leq x_n \leq \overline{x_n} && n = 1, \dots, N \\ & 0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m^s} && m = 1, \dots, M ; s = 1, \dots, S \end{aligned} \quad (5.35)$$

onde φ_n , δ_m^s e φ_n^s são dados pelas expressões (5.21), (5.18) e (5.17), respectivamente.

Note que a diferença entre o modelo média-CVaR e o modelo média-mínimo da distribuição está na substituição do primeiro conjunto de restrições de (5.23), que garante o atendimento ao valor presente mínimo, por (5.34), que garante o atendimento ao CVaR mínimo.

O problema (5.35) é resolvido via método de programação dinâmica dual. Para tal, além da representação alternativa para seu quarto conjunto de restrições, já apresentada em (5.25), utiliza-se também uma representação alternativa para o seu terceiro conjunto de restrições, dada por:

$$\begin{cases} \Gamma_1^s = u_s - \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n - \gamma_s + \alpha & s = 1, \dots, S \\ \Gamma_2^s = \Gamma_1^s - \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s & s = 1, \dots, S \\ \Gamma_2^s \leq 0 & s = 1, \dots, S \end{cases} \quad (5.36)$$

Substituindo o terceiro e quarto conjunto de restrições de (5.35) por (5.25) e (5.36), obtém-se um problema cuja decomposição em dois estágios resulta nas formulações (5.37) e (5.38).

Problema de primeiro estágio:

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximizar}_{x_n, \alpha, u_s, \Gamma_1^s, \Psi_1^t} \quad \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) \\
 & \text{s.a.} \\
 & \alpha + \frac{1}{(1-\beta)S} \sum_{s=1}^S u_s \geq K \\
 & u_s \leq 0 \quad s = 1, \dots, S \\
 & \Gamma_1^s - u_s + \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n - \alpha = -\gamma_s \quad s = 1, \dots, S \\
 & \Psi_1^t - \sum_{n=1}^N x_n = 0 \quad t = 1, \dots, T \\
 & \quad \quad \quad k_n \geq t \\
 & \Psi_1^1 \leq \text{CapC} \\
 & 0 \leq x_n \leq \overline{x_n} \quad n = 1, \dots, N
 \end{aligned} \tag{5.37}$$

Problema de segundo estágio associado à s-ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração:

$$\begin{aligned}
 v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = & \text{Maximizar}_{y_m^s, \Gamma_2^s, \Psi_2^{t,s}} \quad \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s \\
 & \text{s.a.} \\
 & \Gamma_2^s + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = \Gamma_1^s \\
 & \Gamma_2^s \leq 0 \\
 & \Psi_2^{t,s} - \sum_{m=1}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T \\
 & \quad \quad \quad j_m \leq t \\
 & \quad \quad \quad k_m \geq t \\
 & \Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T \\
 & 0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m} \quad m = 1, \dots, M
 \end{aligned} \tag{5.38}$$

Entre as variáveis de decisão do problema de primeiro estágio estão as associadas aos contratos de decisão imediata (variáveis x_n) e as variáveis de estado Γ_1^s , $s=1, \dots, S$ e Ψ_1^t , $t = 1, \dots, T$. Nos problemas de segundo estágio são decididas as variáveis que representam possibilidades futuras de contratação

(variáveis y_m^s), em função dos valores obtidos para as variáveis de estado Γ_1^s e Ψ_1^t , $t = 2, \dots, T$ no problema de primeiro estágio. Entretanto, em função do valor assumido pela variável Γ_1^s no problema de primeiro estágio, pode ser impossível satisfazer a restrição $\Gamma_2^s \leq 0$ no problema de segundo estágio¹. Da mesma forma que para a segunda abordagem, para tratar tal caso trabalhou-se com penalização na função objetivo ou cortes de viabilidade.

Então, adotando-se o tratamento via penalização na função objetivo, o problema de segundo estágio associado à s -ésima série de evolução de preços da energia no mercado a vista e de despachos de geração deve ser modificado para:

$$\begin{aligned}
 v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = & \underset{y_m^s, \Gamma_2^s, \Psi_2^{t,s}, \theta_s}{\text{Maximizar}} && \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s - \text{Pen } \theta_s \\
 \text{s.a.} & & & \\
 \Gamma_2^s + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = & \Gamma_1^s & & (\eta_a^s) \\
 \Gamma_2^s - \theta_s \leq & 0 & & (\eta_b^s) \\
 \Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = & \Psi_1^t & t = 2, \dots, T & (\eta_{c,t}^s \quad t = 2, \dots, T) \\
 \Psi_2^{t,s} \leq & \text{CapC} & t = 2, \dots, T & (\eta_{d,t}^s \quad t = 2, \dots, T) \\
 0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m} & m = 1, \dots, M & (\eta_{e,m}^s, \eta_{f,m}^s \quad m = 1, \dots, M) \\
 \theta_s \geq & 0 & & (\eta_g^s)
 \end{aligned} \tag{5.39}$$

onde $\text{Pen} \rightarrow +\infty$.

Sejam $(\eta_a^s, \eta_b^s, \eta_{c,2}^s, \dots, \eta_{c,T}^s, \eta_{d,2}^s, \dots, \eta_{d,T}^s, \eta_{e,1}^s, \dots, \eta_{e,M}^s, \eta_{f,1}^s, \dots, \eta_{f,M}^s, \eta_g^s)$ as variáveis duais associadas às restrições de (5.39). Suponha que na

¹ Analisando (5.38), constata-se que a única inviabilidade que pode ocorrer em um dos problemas de segundo estágio está nesta restrição.

i-ésima iteração do algoritmo de programação dinâmica dual tais variáveis assumam os valores $(\eta_a^{s,i}, \eta_b^{s,i}, \eta_{c,2}^{s,i}, \dots, \eta_{c,T}^{s,i}, \eta_{d,2}^{s,i}, \dots, \eta_{d,T}^{s,i}, \eta_{e,1}^{s,i}, \dots, \eta_{e,M}^{s,i}, \eta_{f,1}^{s,i}, \dots, \eta_{f,M}^{s,i}, \eta_g^{s,i})$. O novo hiperplano a ser inserido no problema de primeiro estágio de modo a aprimorar a representação da função $v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$ é dado por:

$$v_s - \eta_a^{s,i} \Gamma_1^s - \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad (5.40)$$

$$\text{onde } K_d^{s,i} = \sum_{t=2}^T \eta_{d,t}^{s,i} \text{CapC} + \sum_{m=1}^M \eta_{f,m}^{s,i} \bar{y}_m$$

Com isso, adotando-se o tratamento de inviabilidades no problema de segundo estágio via penalização na função objetivo, o algoritmo para a solução do problema proposto nesta terceira abordagem é:

Algoritmo do Modelo Média-CVaR (Penalização na Função Objetivo)

1. Inicialização da variável contadora do número de hiperplanos utilizados na representação das funções $v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$

$$nh = 0$$

2. Resolva o problema abaixo (*limite superior* do problema original):

$$\bar{z} = \underset{x_n, \alpha, u_s, \Gamma_1^s, \Psi_1^t, v_s}{\text{Maximizar}} \quad \sum_{n=1}^N \varphi_n x_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s$$

s.a.

$$\alpha + \frac{1}{(1-\beta)S} \sum_{s=1}^S u_s \geq K$$

$$u_s \leq 0 \quad s = 1, \dots, S$$

$$\Gamma_1^s - u_s + \sum_{n=1}^N \varphi_n^s x_n - \alpha = -\gamma_s \quad s = 1, \dots, S$$

$$\Psi_1^t - \sum_{\substack{n=1 \\ k_n \geq t}}^N x_n = 0 \quad t = 1, \dots, T$$

$$\Psi_1^1 \leq \text{CapC}$$

$$0 \leq x_n \leq \bar{x}_n \quad n = 1, \dots, N$$

$$v_s - \eta_a^{s,i} \Gamma_1^s - \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad s = 1, \dots, S ; i = 1, \dots, nh$$

3. Resolva os problemas abaixo em função de $\Gamma_1^s = \hat{\Gamma}_1^s$ e $\Psi_1^t = \hat{\Psi}_1^t$, $t=2, \dots, T$, obtidos no passo (2):

Para $s = 1, \dots, S$ resolva

$$v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = \underset{y_m, \Gamma_2^s, \Psi_2^{t,s}, \theta_s}{\text{Maximizar}} \quad \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s - \text{Pen } \theta_s$$

s.a.

$$\Gamma_2^s + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = \Gamma_1^s$$

$$\Gamma_2^s - \theta_s \leq 0$$

$$\Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T$$

$$\Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T$$

$$0 \leq y_m^s \leq \bar{y}_m \quad m = 1, \dots, M$$

$$\theta_s \geq 0$$

4. Faça $\underline{z} = \sum_{n=1}^N \varphi_n \hat{x}_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s(\hat{\Gamma}_1^s, \hat{\Psi}_1^2, \dots, \hat{\Psi}_1^T)$, onde \hat{x}_n é o valor assumido pela variável x_n na solução ótima do problema resolvido no passo (2)
5. Faça $nh = nh + 1$. Utilize as variáveis duais associadas às restrições dos problemas resolvidos no passo (3) para atualizar as aproximações de $v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$, $s=1, \dots, S$
6. Se $(\bar{z} - \underline{z} \leq \varepsilon)$ pare, caso contrário volte ao passo (2)

Se for adotado tratamento de inviabilidades no problema de segundo estágio via cortes de viabilidade, o problema auxiliar a ser resolvido caso (5.38) seja inviável é:

$$\begin{aligned}
 U_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = & \\
 \text{Minimizar } & \theta_s \\
 y_m^s, \Gamma_2^s, \Psi_2^{t,s}, \theta_s & \\
 \text{s.a.} & \\
 \Gamma_2^s + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = \Gamma_1^s & \quad (\eta_a^s) \\
 \Gamma_2^s - \theta_s \leq 0 & \quad (\eta_b^s) \\
 \Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t & \quad t = 2, \dots, T \quad (\eta_{c,t}^s \quad t = 2, \dots, T) \quad (5.41) \\
 \Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} & \quad t = 2, \dots, T \quad (\eta_{d,t}^s \quad t = 2, \dots, T) \\
 0 \leq y_m^s \leq \overline{y}_m & \quad m = 1, \dots, M \quad (\eta_{e,m}^s, \eta_{f,m}^s \quad m = 1, \dots, M) \\
 \theta_s \geq 0 & \quad (\eta_g^s)
 \end{aligned}$$

O corte de viabilidade a ser adicionado no problema de primeiro estágio é:

$$\eta_a^{s,i} \Gamma_1^s + \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad (5.42)$$

$$\text{onde } K_d^{s,i} = - \sum_{t=2}^T \eta_{d,t}^{s,i} \text{CapC} - \sum_{m=1}^M \eta_{f,m}^{s,i} \overline{y_m}$$

Adotando-se então o tratamento de inviabilidades no problema de segundo estágio via cortes de viabilidade, o algoritmo para solução do problema proposto nesta terceira abordagem fica:

Algoritmo do Modelo Média-CVaR (Cortes de Viabilidade)

1. Inicialização da variável nh , do conjunto contendo os hiperplanos utilizados na aproximação de $v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$ (conjunto H), e do conjunto contendo os cortes de viabilidade (conjunto I)

$$nh = 0 \quad H = \{\phi\} \quad I = \{\phi\}$$

2. Resolva o problema abaixo (*limite superior* do problema original):

$$\bar{z} = \text{Maximizar } \sum_{n=1}^N \phi_n x_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s$$

$$\text{s.a. } x_n, \alpha, u_s, \Gamma_1^s, \Psi_1^t$$

s.a.

$$\alpha + \frac{1}{(1-\beta)S} \sum_{s=1}^S u_s \geq K$$

$$u_s \leq 0 \quad s = 1, \dots, S$$

$$\Gamma_1^s - u_s + \sum_{n=1}^N \phi_n^s x_n - \alpha = -\gamma_s \quad s = 1, \dots, S$$

$$\Psi_1^t - \sum_{\substack{n=1 \\ k_n \geq t}}^N x_n = 0 \quad t = 1, \dots, T$$

$$\Psi_1^1 \leq \text{CapC}$$

$$0 \leq x_n \leq \overline{x_n} \quad n = 1, \dots, N$$

$$v_s - \eta_a^{s,i} \Gamma_1^s - \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad s = 1, \dots, S ; i = 1, \dots, nh ; (s,i) \in H$$

$$\eta_a^{s,i} \Gamma_1^s + \sum_{t=2}^T \eta_{c,t}^{s,i} \Psi_1^t \leq K_d^{s,i} \quad s = 1, \dots, S ; i = 1, \dots, nh ; (s,i) \in I$$

3. Resolva os problemas abaixo em função de $\Gamma_1^s = \hat{\Gamma}_1^s$ e $\Psi_1^t = \hat{\Psi}_1^t$, $t=2, \dots, T$, obtidos no passo (2):

Para $s = 1, \dots, S$ resolva

$$v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T) = \text{Maximizar} \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s$$

s.a.

$$\Gamma_2^s + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = \Gamma_1^s$$

$$\Gamma_2^s \leq 0$$

$$\Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T$$

$$\Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T$$

$$0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m} \quad m = 1, \dots, M$$

Se viável, faça $H = H \cup \{(s, nh + 1)\}$

Se inviável faça $I = I \cup \{(s, nh + 1)\}$ e resolva:

$$\text{Minimizar} \quad \theta_s$$

$$y_m^s, \Gamma_2^s, \Psi_2^{t,s}, \theta_s$$

s.a.

$$\Gamma_2^s + \sum_{m=1}^M \delta_m^s y_m^s = \Gamma_1^s$$

$$\Gamma_2^s - \theta_s \leq 0$$

$$\Psi_2^{t,s} - \sum_{\substack{m=1 \\ j_m \leq t \\ k_m \geq t}}^M y_m^s = \Psi_1^t \quad t = 2, \dots, T$$

$$\Psi_2^{t,s} \leq \text{CapC} \quad t = 2, \dots, T$$

$$0 \leq y_m^s \leq \overline{y_m} \quad m = 1, \dots, M$$

$$\theta_s \geq 0$$

4. Faça $\underline{z} = \sum_{n=1}^N \varphi_n \hat{x}_n + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S v_s(\hat{\Gamma}_1^s, \hat{\Psi}_1^2, \dots, \hat{\Psi}_1^T)$, onde \hat{x}_n é o valor assumido pela variável x_n na solução ótima do problema resolvido no passo (2)
5. Faça $nh = nh + 1$. Utilize as variáveis duais associadas às restrições dos problemas resolvidos no passo (3) para atualizar as aproximações de $v_s(\Gamma_1^s, \Psi_1^2, \dots, \Psi_1^T)$, $s=1, \dots, S$, ou construir cortes de viabilidade, conforme o caso
6. Se $(\bar{z} - \underline{z} \leq \varepsilon)$ pare, caso contrário volte ao passo (2)

5.7. Conclusões

Neste capítulo foram propostas três abordagens para otimização de portfólio de contratos de energia quando vistos pela ótica de uma empresa geradora. Na primeira abordagem o portfólio ótimo de contratos de energia é definido utilizando-se o valor esperado e a variância da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora como medidas de retorno e risco, respectivamente. Na segunda abordagem é adotado o valor presente das remunerações líquidas associado ao pior cenário como medida de risco. Na terceira abordagem a medida de risco é o CVaR da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas. As principais conclusões do capítulo são:

- A estratégia de vender energia através de um único contrato bilateral de longo prazo pode não ser a mais eficiente para uma geradora, pois neste caso ela não se beneficia quando da ocorrência de períodos de preços no mercado a vista bastante altos. Além disso, seu prejuízo seria grande no caso de o único comprador da energia não honrar seus compromissos, não pagando pela energia consumida.
- Uma melhor estratégia está associada à venda da energia através de uma carteira diversificada de contratos, podendo até ser vantajoso para a

geradora deixar uma parcela da capacidade de geração reservada para comercialização exclusivamente no mercado a vista.

- O problema de otimização de portfólio de contratos é acoplado no tempo, pois uma estratégia de comercialização de energia adotada hoje tem impacto sobre a remuneração futura da geradora. É também estocástico, pois os valores futuros dos preços da energia no mercado a vista e dos despachos de geração não são conhecidos a priori.
- A variância da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora, utilizada como medida de risco na primeira abordagem proposta nesta tese, se caracteriza como uma medida de desvio e não de risco, pois leva em conta tanto os desvios negativos quanto os positivos em relação ao valor esperado. Logo, pode não ser adequada para mensurar o risco do portfólio de contratos de energia, pois uma medida de risco deve levar em conta apenas a possibilidade de realização de valores localizados na calda esquerda da distribuição, isto é, valores extremos menores que o valor esperado.
- O mínimo da distribuição e o CVaR se caracterizam como medidas de risco, pois só enxergam a calda esquerda da distribuição dos valores presentes das remunerações líquidas da geradora.
- A flexibilidade imposta pela representação de possibilidades futuras de contratação faz com que o número de variáveis e de restrições do problema aumente consideravelmente.
- A representação de possibilidades futuras de contratação faz com que o problema de otimização de portfólio de contratos de energia seja modelado como um problema de programação estocástica de dois estágios.

- Na segunda abordagem proposta nesta tese exige-se que o valor presente de todos os cenários considerados na análise seja maior ou igual a um valor presente mínimo requerido pela geradora. Tal exigência pode ser muito rigorosa, pois os piores resultados podem estar associados a pouquíssimos cenários que sejam altamente improváveis.
- Geralmente no processo de tomada de decisão permite-se desprezar os piores cenários, desde que suas probabilidades de ocorrência sejam pequenas. Tal procedimento equivale a utilizar o VaR como medida de risco. Entretanto, o VaR não possui boas propriedades matemáticas, além de não ser uma medida consistente de risco. Logo, sua adoção como medida de risco no problema de otimização de portfólio de contratos de energia pode não ser recomendada.
- O CVaR é uma medida de risco com excelentes propriedades matemáticas para o emprego em um problema de otimização, além de ser uma medida consistente de risco. Logo, é recomendada sua adoção como medida de risco no problema de otimização de portfólio de contratos de energia.