

3

Investimento em Termelétricas no Sistema de Despacho Centralizado Brasileiro

Um dos principais objetivos da reforma do setor elétrico implementada pelo Brasil durante os anos noventa era criar incentivos ao investimento privado. Naquela época, esperava-se que um número expressivo de termelétricas entrasse no mercado pois seus custos de produção eram competitivos em relação aos custos de novas hidrelétricas e o crescimento do consumo de eletricidade era bastante expressivo. Com menor tempo de construção, as termelétricas seriam ainda essenciais na redução do risco crescente de déficits futuros de energia.

Em 1999, ficou claro que o investimento em termelétricas não estava ocorrendo às taxas desejadas e racionamentos de energia passaram a fazer parte com maior frequência das previsões para os anos seguintes. Argumentava-se que as principais causas para o baixo nível de investimento observado estavam relacionadas com a incerteza regulatória, a variação excessiva dos custos dos insumos e o risco hidrológico no sistema elétrico brasileiro (SEB).¹ Um programa especial de governo foi lançado de forma a reduzir esses riscos, especialmente a variação cambial embutida no preço do principal insumo das termelétricas: o gás natural.

Modelos de opções reais têm sido comumente usados para avaliar o efeito dos riscos descritos acima na decisão de investimento no SEB.² Nessa abordagem, a flexibilidade associada com a decisão de investimento - chamada de oportunidade de investimento - é considerada um opção sobre um ativo real - ou, em outras palavras, uma opção real - e seu valor (não-negativo) é afetado, entre outros, pelos riscos descritos acima. Esta flexibilidade pode ser resumida da seguinte forma: se o valor esperado das oportunidades futuras de investimento for maior do que o valor presente líquido do projeto, então é melhor adiar o investimento, senão é melhor investir imediatamente. Portanto, pode existir um valor em adiar o investimento mesmo quando o valor presente líquido do projeto é positivo.

¹Pires (2000) e Moreira *et al.* (2001).

²Gomes *et al.* (2001a), Gomes (2002), e Moreira *et al.* (2001), entre outros.

Em outras palavras, o valor da opção de espera é positivo.

A abordagem de opções reais no SEB tem como ponto de partida o modelo de despacho de custo mínimo³ - chamado NEWAVE - usado pelo operador do sistema. O modelo NEWAVE gera, em um horizonte de 5 anos, a trajetória de preços do sistema e as respectivas quantidades despachadas. A partir destas, o método de programação dinâmica é usado para calcular os valores das oportunidades de investimento ao longo do horizonte estudado de trás para frente, isto é, inicia-se o cálculo a partir da data terminal em direção ao período corrente. Enquanto o valor esperado da oportunidade de investimento no futuro for maior do que o valor de investimento imediato, é melhor adiar investimento; de outra forma, investe-se imediatamente.⁴ A abordagem acima, contudo, não incorpora o efeito reverso que o despacho corrente ótimo tem sobre a decisão de investimento. Isso pode ser explicado em parte pelo fato de que o operador do sistema também não o faz. Ao invés disso, a trajetória de oferta futura é determinada pelo plano indicativo de expansão do sistema que não considera o fato de que os investidores podem adiar (ou mesmo cancelar) seus investimentos e que o despacho corrente é na verdade um dos mais importantes determinantes dessa decisão.

Nesse capítulo, a expansão da capacidade é endogeneizada de uma forma bem simples: considera-se o equilíbrio de compromisso pleno (*full-commitment equilibrium*) no qual os investidores implementam planos de investimentos críveis anunciados no início do período. Baseado nesses planos de investimento, o operador do sistema é capaz de calcular um despacho ótimo compatível com os anúncios individuais de investimento. O valor da opção de espera é zero se a estratégia ótima de anúncio de investimento consiste em investimento imediato; de outra forma, seu valor é positivo e igual à diferença entre o *payoff* da estratégia ótima de adiamento e o maior *payoff* envolvendo investimento imediato.

O resultado principal desse capítulo mostra que quando a endogeneidade da capacidade de expansão é considerada, é necessário reavaliar o valor da opção de adiar o investimento porque a abordagem de opção real é baseada na hipótese de uma expansão da capacidade exógena. Usando-se exemplos numéricos simples é possível mostrar que a decisão final de investimento pode ser totalmente distinta sob cada uma das duas hipóteses.

O resto do capítulo está dividido em 4 seções. A próxima seção apresenta uma breve descrição do SEB, em particular do setor de geração.

³Ou em uma simulação deste, uma vez que o modelo NEWAVE não está disponível publicamente.

⁴Uma forma alternativa de expressar este problema é entendê-lo em termos da determinação do momento ótimo de investimento.

O foco do capítulo é a relação entre a expansão de capacidade e o despacho ótimo, mas é útil mostrar antes um modelo simples em que o método de despacho de custo mínimo é apresentado sem considerar expansão de capacidade. Na seção 3.3, considera-se então, o efeito da capacidade de expansão sobre o despacho de custo mínimo. Compara-se ainda a decisão de investimento na abordagem de opções reais com a da abordagem proposta aqui de endogeneização da expansão de capacidade. Finalmente, a seção 3.4 apresenta as conclusões.

3.1

O setor de geração elétrica no Brasil

O setor de geração elétrica no Brasil caracteriza-se por sua predominância de produção de eletricidade através de hidrelétricas: mais de 90% da geração elétrica corrente é fornecida por hidrelétricas, muitas das quais com reservatórios plurianuais.⁵

O aspecto central de sistemas hidrotérmicos é a natureza dinâmica da produção de energia induzida pelas hidrelétricas com reservatórios de água: o despacho corrente ótimo é afetado pelo custo de oportunidade de energia no futuro por causa da capacidade de as hidrelétricas transferirem produção entre os períodos.

Uma característica importante do sistema hidrotérmico no Brasil é a instalação de várias represas em um mesmo rio ou em rios coligados e, portanto, externalidades na utilização da água devem ser levadas em conta. É argumentado, nesse caso, que há mais vantagens na otimização global do sistema através de um despacho coordenado⁶ e, este é, na verdade, o método adotado no Brasil desde os anos setenta através do método de despacho de custo mínimo (MDCM).

Esse método centralizado⁷ é descrito por um operador do sistema que ordena as geradoras de acordo com seus custos marginais de curto prazo (no caso das hidrelétricas, o custo de oportunidade da água armazenada), despachando as firmas de custos menores até o ponto em que a demanda de mercado é atendida. Em geral, os custos das geradoras são auditados e o comportamento estratégico das mesmas não é explicitamente considerado.⁸

Desde a implementação do programa de reforma em 1998, o despacho tem sido coordenado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e o Custo Marginal de Operação (CMO) de curto prazo é obtido através de complexos algoritmos de programação dinâmica estocástica.⁹

O cálculo do CMO apresenta alguns aspectos técnicos importantes: as geradoras são agregadas em um número menor de geradoras representativas,

⁵Energia Brasil - O setor elétrico em <http://www.energiabrasil.gov.br/>

⁶MME (1997).

⁷O sistema de despacho centralizado inclui todas as hidrelétricas e termelétricas que participam do mecanismo de realocação de energia (MRE) - ver nota (11).

⁸Esse despacho por mérito é usado em vários países da América do Sul (Fischer & Serra, 2000). Uma exceção é o sistema hidrotérmico colombiano no qual um processo de licitação por oferta foi introduzido para estabelecer o despacho ótimo.

⁹Na verdade, o ONS planeja a operação do sistema usando períodos cada vez menores sucessivamente. Para prazos maiores, o ONS utiliza o modelo NEWAVE. Os despachos semanais e horários são calculados pelos modelos DECOMP e DESSEM, respectivamente.

além da inclusão de um nível de confiança ¹⁰ e da consideração de restrições de transmissão na determinação do despacho ótimo.¹¹

A partir do valor do CMO calculado, as quantidades ótimas despachadas são determinadas para cada geradora.¹²

Em termos gerais, o cálculo do CMO é tal que uma perspectiva favorável das condições hidrológicas é prevista, a produção das hidrelétricas é despachada imediatamente porque os preços da eletricidade no futuro serão baixos. Por outro lado, se uma seca severa está sendo prevista, as termelétricas serão despachadas no presente mais intensamente do que as hidrelétricas. Em qualquer um dos casos, o CMO calculado representa o custo da geradora mais cara necessária ao atendimento da demanda de mercado.

Além do cálculo do CMO corrente, o modelo do ONS pode calcular estimativas para os CMOs para os próximos 5 anos e, portanto, pode dar sinais econômicos ao investimento e à contratação. Por exemplo, estimativas de CMOs futuros elevados podem estimular as distribuidoras a contratarem mais, o que incentivaria as geradoras a fazerem novos investimentos.

Contudo, há dois importantes problemas no cálculo do CMO:

(1) O CMO é significativamente afetado pelos fluxos hidrológicos mais recentes: se as chuvas foram abundantes no passado recente, haverá mais cenários com condições hidrológicas futuras favoráveis, mesmo que o atual estoque de água não seja muito alto. Nessa situação, se, ao invés dessa previsão ocorrer uma seca severa, um excesso de demanda ocorrerá porque o sistema terá de um lado uma baixa produção de hidrelétricas e de outro lado um baixo nível de nova capacidade de geração. Esse problema era mais severo ainda porque até a crise de racionamento em 2001, o cálculo do CMO era baseado na hipótese de neutralidade ao risco. Após a crise, uma curva de segurança foi introduzida no despacho de custo mínimo pela

¹⁰O critério atual de confiança é um máximo de 5% de probabilidade de racionamento em simulações para o horizonte de planejamento.

¹¹Operacionalmente, o ONS usa o mecanismo de realocação de energia (MRE). O MRE é um mecanismo de compartilhamento de risco hidrológico pelo qual cada gerador é pago de acordo com a energia assegurada (definida como a energia que ele produz em 95% das simulações hidrológicas) que ele provê ao sistema. Conseqüentemente, uma geradora individual é indiferente ao despacho requerido, mas ao mesmo tempo, o benefício de uma provisão adicional de capacidade de geração é baixa porque o mesmo é dividido entre todos os participantes do mecanismo.

¹²Na verdade, o preço no mercado à vista era calculado pelo administrador do Mercado Atacadista de Energia (MAE). O MAE é composto por 4 mercados subregionais definidos pelo regulador. Para cada mercado, existe um preço à vista calculado usando-se as mesmas hipóteses do modelo de despacho do ONS, mas desconsiderando-se restrições internas de transmissão em cada submercado.

qual o CMO é aumentado até o custo marginal da mais cara termelétrica no sistema sempre que o estoque de água cair abaixo dos níveis críticos definidos por essa curva.

(2) Previsões de oferta futura não consideram o fato de que o despacho corrente afeta as decisões futuras de investimento, ou seja, de que a expansão da capacidade é endógena. Ao invés disso, o ONS considera um plano indicativo de expansão do sistema exógeno elaborado pelo Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE) em seu despacho. Sob o procedimento corrente, é possível, por exemplo que o nível de estoque de água compatível com o plano indicativo incentive as firmas a adiarem seus investimentos em relação àquilo que está considerado no plano indicativo e, portanto, o mesmo não refletirá a entrada efetiva de novas geradoras, levando a uma situação sub-ótima.

Nesse capítulo, analisa-se o segundo ponto com mais cuidado. Em particular, considera-se o impacto do estoque atual de água sobre a capacidade de expansão e ainda se os modelos de opção real capturam as decisões de investimento real em um modelo estilizado para o setor de geração elétrica no Brasil. Antes, porém, é ilustrativo descrever um modelo de despacho centralizado sem expansão da capacidade, como feito na próxima seção.

3.2

O Modelo de Despacho Centralizado sem Expansão da Capacidade

Esta seção descreve um modelo simplificado de despacho centralizado de um sistema hidrotérmico sem expansão de capacidade a fim de ilustrar os conceitos de despacho de custo mínimo e a natureza dinâmica do despacho na presença de hidrelétricas com reservatórios. Na próxima seção o modelo apresentado será estendido de forma a incorporar a possibilidade de expansão da capacidade.

Em um modelo de K períodos e fator de desconto β , considere um sistema hidrotérmico simples no qual todas as hidrelétricas são agregadas em uma única hidrelétrica representativa (H) - de tal modo que as externalidades na utilização da água são internalizadas - e com M termelétricas ($T_i, i = 1, 2, \dots, M$).

A hidrelétrica (H) tem um reservatório cujo gerenciamento pode ser descrito por uma restrição dinâmica na qual a utilização atual da água e sua acumulação devem ser compatíveis com o estoque de água existente no início do período:

$$q_s^H + S_{s+1} = S_s + f_s \quad (3-1)$$

$$s = t, \dots, t + K - 1.$$

Cada uma das M termelétricas pode ser descrita por um função custo $c_s^i[q_s^{T_i}]$ crescente ($c_s^{i'}[q_s^{T_i}] > 0$) e estritamente convexa ($c_s^{i''}[q_s^{T_i}] > 0$). Sem perda de generalidade, sejam T_1, \dots, T_M ordenadas por custo marginal de tal modo que a cada nível de produção q_s^T ($s = t, \dots, t + K - 1$): $c_s^{1'}[q_s^T] < \dots < c_s^{M'}[q_s^T], \forall q_s^T \geq 0$.

Suponha ainda uma trajetória exógena de demanda $\{D_s; s = t, \dots, t + K - 1\}$ - a qual independe dos fluxos hidrológicos futuros e do preço - e que não haja restrições de transmissão nem critérios de confiança.

A seqüência do problema no tempo é descrita a seguir: No começo do período s , o valor corrente do fluxo hidrológico (f_s) é revelado. Assim, o estoque total de água ($S_s + f_s$) é completamente conhecido quando a produção da hidrelétrica q_s^H ocorre e o estoque de água para o próximo período S_{s+1} é acumulado. Portanto, $(S_s + f_s)$ é o estado da economia na data s .

O objetivo do operador do sistema é encontrar uma seqüência de produção de cada geradora que minimiza o custo intertemporal esperado

das termelétricas sujeito à restrição dinâmica sobre a utilização da água no reservatório da hidrelétrica, ao equilíbrio entre quantidade produzida e demanda a cada data e que a produção das geradoras seja não-negativa. No mundo real, o operador do sistema inclui ainda custos de racionamento, mas aqui supõe-se que as termelétricas não tem limitação no nível de produção.

Nessa estrutura, um modelo simples de despacho de custo mínimo (DCM) pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} \min_{\{q_s^{T_i}, q_s^H\}} E_t \left[\sum_{s=t}^{t+K-1} \sum_{i=1}^M \beta^{s-t} c_s^i [q_s^{T_i}] \right] \quad (3-2) \\ \text{s.a.} \quad \begin{cases} q_s^H + S_{s+1} = S_s + f_s & (\lambda_s) \\ q_s^H + \sum_{i=1}^M q_s^{T_i} = D_s & (\phi_s) \\ q_s^H \geq 0 & (\mu_s^H) \\ q_s^{T_i} \geq 0 & (\mu_s^{T_i}) \\ S_{s+1} \geq 0 & (\mu_S) \end{cases} \end{aligned}$$

onde o operador de expectativa é tomado com respeito à distribuição de probabilidade das variáveis aleatórias $\{f_s\}$ na data t .

Dois multiplicadores são de especial interesse: ϕ_s que representa o custo-sombra de fornecer uma unidade adicional de demanda (isto é, o CMO ou preço à vista do sistema) e λ_s que representa o custo-sombra do estoque de água. Os outros multiplicadores são relacionados às restrições de não-negatividade da produção das geradoras e do estoque de água acumulado.

Proposição 3.1 *Em um equilíbrio no qual todas as geradoras produzem e um estoque positivo de água é acumulado para o próximo período, o despacho de custo mínimo é caracterizado pelas seguintes condições:*

$$\begin{aligned} c_s^{M'} [q_s^{T_1}] &= \dots = c_s^{M'} [q_s^{T_M}] = \lambda_s = \phi_s \\ c_s^{i'} [q_s^{T_i}] &= \beta E_s [c_{s+1}^{i'} [q_{s+1}^{T_i}]] \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (3-3) \\ q_s^H + S_{s+1} &= S_s + f_s \\ q_s^H + \sum_{i=1}^M q_s^{T_i} &= D_s \end{aligned}$$

para $s = t, t + 1, \dots, t + K - 2$. E na data terminal $t + K - 1$:

$$\begin{aligned}
c_{t+K-1}^{M'} [q_{t+K-1}^{T_1}] &= \dots = c_{t+K-1}^{M'} [q_{t+K-1}^{T_M}] \\
q_{t+K-1}^H &= S_{t+K-1} + f_{t+K-1} \\
q_{t+K-1}^H + \sum_{i=1}^M q_{t+K-1}^{T_i} &= D_{t+K-1}
\end{aligned} \tag{3-4}$$

Prova. Ver apêndice 6.2 □

No método de despacho de custo mínimo no qual as geradoras produzem quantidades positivas e um estoque positivo de água é acumulado para o período seguinte, todas as termelétricas produzem a um mesmo custo marginal - o preço à vista do sistema - e, além disso, cada termelétrica deve ser operada de forma dinâmica, no sentido de que seu custo marginal atual deve ser igual ao custo marginal esperado descontado para $t, \dots, t + K - 1$.

Corolário 3.2 *No equilíbrio acima, $q_s^{T_1} \geq q_s^{T_2} \dots \geq q_s^{T_M}$ ($s = t, \dots, t + K - 1$)*

Prova. Ver apêndice 6.2 □

Em geral, o operador do sistema não aloca menos produção nas geradoras de menor custo do que nas geradoras de maior custo.¹³

¹³Isso não é necessariamente verdadeiro em modelos de despacho da vida real porque o operador do sistema deve levar as restrições de transmissão em consideração na hora do despacho real.

3.3

O Modelo de Despacho Centralizado com Expansão de Capacidade

À época da implementação da reforma no setor elétrico no Brasil, esperava-se que a atratividade aparente do investimento em termelétricas - menor tempo de construção e a possibilidade de localização próxima aos principais centros consumidores - seria suficiente para incentivar novos investimentos e reduzir a pesada dependência do setor de geração brasileiro em relação às hidrelétricas.¹⁴ Em um mercado marcado por altas taxas de crescimento de consumo de eletricidade, novos investimentos seriam fundamentais na redução dos riscos crescentes de racionamento projetados para os próximos anos. De fato, até o racionamento de 2001, as taxas de crescimento do consumo continuaram altas, mas o investimento não aconteceu à taxa desejada.

Modelos de opções reais têm sido usados para capturar a flexibilidade da decisão de investimento em geração no Brasil, particularmente, o efeito de alguns riscos que os investidores em termelétrica vêm enfrentando após a reestruturação do setor e que poderiam ter resultado em adiamento do investimento. Sob essa abordagem, a oportunidade de investimento é vista como uma coleção de opções sobre ativos reais e seu valor corrente é dado pelo maior valor entre o valor presente líquido do projeto e o valor esperado descontado da oportunidade de investimento no próximo período.

Em um problema de horizonte finito, a natureza recursiva do problema pode ser capturada pelo método de programação dinâmica, através do qual o valor da oportunidade de investimento é calculado de trás para frente, iniciando-se na data terminal da seguinte forma:

Defina $\Omega(J_T, I) = \max \{J_T - I, 0\}$ como sendo o *payoff* associado com a decisão de investimento na data terminal T , onde J_T é o valor dos lucros em T e I é o custo do investimento. Logo, se $J_T - I \geq 0$ vale a pena investir, do contrário, é melhor não investir.

Em T , o valor da oportunidade de investimento ($F_T(J_T)$) é dado por:

$$F_T[J_T] = \Omega[J_T, I] \quad (3-5)$$

Se não houver incentivo a investir nesta data, o algoritmo move-se para a data imediatamente anterior. Em qualquer data t ($t < T$), o valor da oportunidade de investimento é dado pelo maior valor entre o valor

¹⁴Um dos principais objetivos do governo no setor elétrico era aumentar a participação da termelétricidade na geração total de 2% para 12% em dez anos (Energia Brasil - Fontes de Energia: Térmica em <http://www.energiabrasil.gov.br>)

presente líquido do projeto e o valor esperado descontado da oportunidade de investimento.

$$F_t[J_t] = \max\{J_t - I, \beta E_t F_{t+1}[J_{t+1}]\} \quad (3-6)$$

onde β é o fator de desconto.

Por exemplo, se $\beta E_t F_{t+1}[J_{t+1}] > J_t - I$, então é melhor esperar até o próximo período. Senão, é melhor investir imediatamente.

O valor da opção (Φ_t) de adiar o investimento em t é dado por:

$$\Phi_t = \max\{\beta E_t F_{t+1}[J_{t+1}] - (J_t - I), 0\} \quad (3-7)$$

Uma outra forma de ver o problema acima é calcular o nível crítico de investimento (J_t^*) a partir do qual o investimento imediato torna-se a melhor estratégia. J_t^* é dado implicitamente pela seguinte relação:

$$J_t^* = F_t[J_t^*] + I \quad (3-8)$$

e, portanto, o valor mínimo do projeto a partir do qual é melhor investir é dado pela soma do valor atual da oportunidade de investir e do custo do investimento.

Basedo na abordagem acima, Castro (2000) descreve os passos envolvidos no cálculo do valor da opção de adiamento do investimento no setor de geração brasileiro:

(1) O modelo NEWAVE gera 2000 seqüências mensais de preços e respectivas quantidades despachadas para os próximos 60 meses.

(2) O método de programação dinâmica é usado para calcular o valor da oportunidade de investimento de trás para frente, iniciando-se na data T (data terminal).

(2.1) Se o valor da opção for zero, invista imediatamente e pare o algoritmo.

(2.2) Se o valor da opção for positivo, então mova-se para a data imediatamente anterior e aplique (2.1).

(2.3) Se o algoritmo atinge a data inicial e nesse ponto o valor da opção ainda é positivo, então é melhor nunca investir.

Como o modelo NEWAVE não está disponível publicamente, simulações do mesmo tem sido usadas para calcular preços do sistema no futuro: Moreira *et al.* (2001) propõem uma simulação na qual o programa NEWAVE é estendido de modo a incluir as incertezas sobre demanda e custos dos insumos e, com isso, possibilitar a análise dos seus efeitos sobre o investimento em termelétricas. Por outro lado, Gomes *et al.* (2001b) estimam diretamente o processo estocástico dos preços do sistema.

Uma hipótese importante embutida na abordagem de opções reais para a decisão de investimento é a de exogeneidade da expansão da capacidade. Em um modelo de despacho ótimo, a entrada futura afeta o despacho corrente e, por conseguinte, todos os preços futuros, afetando em última análise a decisão de investimento. Portanto, o valor da opção de esperar deve considerar simultaneamente o efeito direto que a expansão futura de capacidade tem sobre o despacho corrente, bem como, o efeito reverso do despacho corrente sobre a expansão futura da capacidade, através do impacto sobre as decisões de investimento.

3.3.1 Um Modelo para o Investimento

Considera-se aqui uma versão simples do modelo apresentado na seção passada, na qual há duas geradoras no mercado: uma hidrelétrica e uma termelétrica.

Há 3 períodos com fator de desconto β e cada fluxo hidrológico futuro ($f_s; s = t + 1, t + 2$) pode assumir dois valores: $f + \sigma$ com probabilidade α ou $f - \sigma$ ($f > \sigma > 0$) com probabilidade $(1 - \alpha)$.¹⁵ O estoque inicial de água $S_t + f_t = \bar{S}_t > 0$ é dado.

Considere que o investimento em uma nova termelétrica tem as seguintes características:

1. O momento para o investimento pode ser escolhido, mas sempre que o investimento é feito, ele acontece imediatamente após o estoque de água do próximo período ser determinado e amadurece no início no período seguinte.
2. O investimento é completamente irreversível ao custo I .
3. Há uma incerteza sobre o retorno futuro do investimento e esta incerteza está relacionada com os fluxos hidrológicos futuros.
4. A tecnologia da nova termelétrica é a mesma da termelétrica já instalada.

A seqüência de eventos pode ser descrita pela seguinte figura:

data t		data $t + 1$			data $t + 2$	
Despacho	Investidor	Natureza	Despacho	Investidor	Natureza	Despacho
Ótimo	decide se entra	decide	Ótimo	decide se entra	decide	Ótimo

Figura 3.1: Seqüência de Eventos no Modelo com Investimento

No modelo NEWAVE, os preços e as quantidades despachadas são calculadas para cada fluxo hidrológico simulado. A decisão corrente

¹⁵ $E(f_s) = f - (1 - 2\alpha)\sigma$ e $var(f_s) = 4\alpha(1 - \alpha)\sigma^2; s = t + 1, t + 2$.

sobre o estoque de água a ser acumulado e as quantidades despachadas é tomada considerando-se todos os fluxos hidrológicos simulados com mesma probabilidade.

Optou-se aqui por uma abordagem ligeiramente diferente à usada pelo modelo NEWAVE, isto é, ao invés de calcular para cada fluxo hidrológico simulado o respectivo S_{t+1} e então computar o ótimo S_{t+1} como uma média de todos os S_{t+1} calculados para cada fluxo simulado, procederemos usando a abordagem recursiva do problema descrito em (3-2), isto é, o ótimo S_{t+1} será calculado como o valor esperado em relação à distribuição das possíveis realizações do fluxo hidrológico.¹⁶

Dessa forma:

$$V[S_t + f_t] = \min_{\{q_t^{T_1}, S_{t+1}\}} C_t[q_t^T] + \beta E_t [V[S_{t+1} + f_{t+1}]] \quad (3-9)$$

$$s.a \quad \begin{cases} \bar{S}_t - S_{t+1} + q_t^{T_1} = D_t & (\phi_t) \\ \bar{S}_t \geq S_{t+1} & (\mu_t^H) \\ q_t^{T_1} \geq 0 & (\mu_t^{T_1}) \\ S_{t+1} \geq 0 & (\mu_S) \end{cases}$$

e, no último período $T = t + 2$:

$$V[S_{t+2} + f_{t+2}] = \min_{\{q_{t+2}^{T_i}\}} C_{t+2}[q_{t+2}^T] \quad (3-10)$$

$$s.a \quad \begin{cases} S_{t+2} + f_{t+2} + \sum_{i=1}^M q_{t+2}^{T_i} = D_{t+2} & (\phi_{t+2}) \\ S_{t+2} + f_{t+2} \geq S_{t+3} & (\mu_{t+2}^H) \\ q_{t+2}^{T_i} \geq 0 & (\mu_{t+2}^{T_i}) \\ S_{t+2} \geq 0 & (\mu_{S+2}) \end{cases}$$

onde $C_s[q_s^T]$ é a soma dos custos de produção individual para cada termelétrica na data s , e q_s^T , a produção total das termelétricas. Com M termelétricas no mercado, pode-se escrever:

$$C_s[q_s^T] = \sum_{i=1}^M c_s^i[q_s^{T_i}] \quad (3-11)$$

Para calcular uma solução explícita, supõe-se a mesma função de custo quadrática para as termelétricas já instaladas e a potencial entrante:

¹⁶No apêndice 6.2 mostra-se que os dois procedimentos acima geram o mesmo S_{t+1} dadas as hipóteses do nosso modelo.

$$c_s^i[q_s^{T_i}] = \frac{c_s (q_s^{T_i})^2}{2} \quad (3-12)$$

onde c_s é um parâmetro exógeno.

Pode-se ver que o custo marginal de curto prazo (CMCP) é dado em equilíbrio no qual todas as termelétricas produzem quantidades positivas pela seguinte condição:

$$c_t q_t^{T_i} = \phi_t \quad (3-13)$$

isto é, o custo-sombra de atendimento de uma unidade adicional de demanda será em equilíbrio igual ao custo marginal das termelétricas:

Usando (3-12) e (3-13), o *payoff* da firma T_j ao investir na data t é dado por:

$$J_t - I = E_t \left[\sum_{s=t+1}^{t+2} \beta^{s-t} \frac{c_s (q_s^{T_j})^2}{2} \right] - I \quad (3-14)$$

onde considera-se que o investidor desconta o futuro à mesma taxa em que o operador sistema desconta os custos futuros de produção.

A Abordagem de Opções Reais

Nesta abordagem, o fato de que a entrada futura de uma nova termelétrica que é considerada no plano indicativo pode não ocorrer não afeta o valor atual de equilíbrio do estoque de água.

Suponha que o plano indicativo considere que não haverá entrada e, por conseguinte, a estrutura de mercado consistirá de uma hidrelétrica e uma termelétrica da data t até a data $t + 2$. O valor ótimo de S_{t+1} pode ser obtido de (3-9) e (3-10):

$$S_{t+1} = \frac{\left(\beta^2 c_{t+1} c_{t+2} E_t [D_{t+2} - f_{t+2} + D_{t+1} - f_{t+1}] + c_t (c_{t+1} + \beta c_{t+2}) (\bar{S}_t - D_t) \right)}{c_t c_{t+1} + \beta c_t c_{t+2} + \beta^2 c_{t+1} c_{t+2}} \quad (3-15)$$

Defina $F_{t+1}[f_{t+1}]$ como a oportunidade de investimento e $q_{t+1}^{T_j}[f_{t+1}]$ como a respectiva produção da potencial entrante T_j na data $t + 1$ dada

a realização do fluxo f_{t+1} , e $q_{t+2}^{T_j} [f_{t+1}, f_{t+2}]$ a respectiva produção da termelétrica T_j na data $t + 2$ dados os fluxos f_{t+1} e f_{t+2} .

O valor da opção de esperar ao fim da data t (Φ_t) é dado por (3-7) onde o valor presente líquido do projeto, o valor esperado da oportunidade de investimento futuro e as quantidades futuras correspondentes são dadas por:

$$J_t - I = E_t \left[\beta \frac{c_{t+1} \left(q_{t+1}^{T_j} [f_{t+1}] \right)^2}{2} + \beta^2 \frac{c_{t+2} \left(q_{t+2}^{T_j} [f_{t+1}, f_{t+2}] \right)^2}{2} \right] - I \quad (3-16)$$

$$E_t F_{t+1} [f_{t+1}] = E_t \left[\max \left\{ \beta \frac{c_{t+2} \left(q_{t+2}^{T_j} [f_{t+1}, f_{t+2}] \right)^2}{2} - I, 0 \right\} \right] \quad (3-17)$$

$$q_{t+1}^{T_j} [f_{t+1}] = \frac{\beta c_{t+2} (E_{t+1} [D_{t+2} - f_{t+2}] + D_{t+1} - S_{t+1} - f_{t+1})}{2 (c_{t+1} + \beta c_{t+2})} \quad (3-18)$$

$$q_{t+2}^{T_j} [f_{t+1}, f_{t+2}] = \frac{\left(c_{t+1} (D_{t+2} - f_{t+2} + D_{t+1} - f_{t+1} - S_{t+1}) + \beta c_{t+2} (E_{t+1} [f_{t+2}] - f_{t+2}) \right)}{2 (c_{t+1} + \beta c_{t+2})} \quad (3-19)$$

no qual usa-se o valor de S_{t+1} dado por (3-15).

Pode-se ver que quando a termelétrica espera para entrar a mesma quantidade $q_{t+2} [f_{t+1}, f_{t+2}]$ como em (3-19) é obtida¹⁷.

Portanto, substituindo os valores de equilíbrio da produção nas condições (3-16) e (3-17) e inserindo esses valores em (3-7), obtém-se que a decisão de investimento é tal que se o valor da opção de espera é positivo, então é melhor adiar o investimento, senão é melhor investir ao fim da data t .

A Expansão Endógena de Capacidade - O Caso de Comprometimento Total

O procedimento acima não incorpora o efeito que a entrada potencial pode ter no gerenciamento corrente ótimo do sistema. Em outras palavras, é suposto que a expansão da capacidade é exógena. Contudo, a entrada futura afeta não apenas os CMCPs futuros, mas também o CMCP atual. Quando essa causalidade reversa é considerada, o valor da opção de espera

¹⁷Ver apêndice 6.2.

pode ser diferente do valor computado através de modelos de opção real e, mais importante, gerar decisões de investimento distintas.

Um modelo de expansão de capacidade endógena é desenvolvido nessa seção. Aqui, o plano indicativo é um anúncio crível do plano de investimento das novas geradores, que é usado então pelo operador do sistema para calcular o respectivo despacho ótimo.

Essa abordagem pode ser descrita pela seguinte estrutura temporal:

A termelétrica anuncia seu planejamento de entrada no começo da data t . Então, o operador do sistema escolhe o despacho ótimo e o nível de estoque de água S_{t+1} em t baseado nesse anúncio. No fim da data t , a termelétrica entra ou não baseada no plano indicativo. Em $t + 1$, a natureza “escolhe” entre $f_{t+1} = f + \sigma$ com probabilidade α ou $f_{t+1} = f - \sigma$ com probabilidade $1 - \alpha$. Em seguida, o operador do sistema escolhe o despacho ótimo e o nível de estoque S_{t+2} condicional ao plano indicativo e a contingência. No fim de $t + 1$, a termelétrica age de acordo com o que foi anunciado no início. Na data $t + 2$, a natureza age novamente e finalmente o operador do sistema calcula o despacho ótimo condicional à história.

A figura a seguir resume a seqüência descrita acima:

data t			data t+1			data t+2	
Plano de entrada é anunciado	Despacho Ótimo	Entrada é realizada de acordo com a estratégia anunciada no início de t	Natureza joga	Despacho Ótimo	Entrada é realizada de acordo com a estratégia anunciada no início de t	Natureza joga	Despacho Ótimo

Figura 3.2: Seqüência de Eventos

No estágio de elaboração do plano indicativo, a termelétrica tem uma estratégia a anunciar de 8 possíveis estratégias, na qual ela revela seu “plano de ação” para todo o período de despacho, e que consiste em decisões sobre se entra ou não ao fim data t , ao fim da data $t + 1$ e contingência

$f_{t+1} = f + \sigma$ ou ao fim da data $t + 1$ e contingência $f_{t+1} = f - \sigma$. Às estratégias permissíveis será associada uma tripla (n_1, h_2, l_2) onde cada entrada representa a decisão de entrar (se igual a 1) ou não (se igual a zero), respectivamente ao fim da data t , ao fim da data $t + 1$ e contingência $f_{t+1} = f + \sigma$ e ao fim da data $t + 1$ e contingência $f_{t+1} = f - \sigma$. Por exemplo, $(n_1, h_2, l_2) = (0, 1, 0)$ está associada a estratégia “Não entre em t , entre em $t + 1$ se $f_{t+1} = f + \sigma$ e não entre em $t + 1$ se $f_{t+1} = f - \sigma$ ”.

Dessa forma, suponha que a estrutura de mercado atual é composta de uma hidrelétrica e uma termelétrica. Para cada estratégia anunciada (n_1, h_2, l_2) , a função de reação do operador do sistema é definida pela estratégia de despacho caracterizada por: $\left(\left\{ S_{t+1}, q_t^{T_i} \right\}, \left\{ S_{t+2} [f_{t+1}], q_{t+1}^{T_i} [f_{t+1}] \right\}, \left\{ S_{t+3} [f_{t+1}, f_{t+2}], q_{t+2}^{T_i} [f_{t+1}, f_{t+2}] \right\} \right)$ onde $q_t^{T_i}$ é a quantidade ótima despachada de cada termelétrica e S_{t+1} o respectivo estoque de água acumulado em t para o próximo período, $q_{t+1}^{T_i} [f_{t+1}]$ representa a quantidade ótima despachada de cada termelétrica e $S_{t+2} [f_{t+1}]$ é o estoque de água correspondente se a realização do fluxo hidrológico é f_{t+1} na data $t + 1$ e $q_{t+2}^{T_i} [f_{t+1}, f_{t+2}]$ representa a quantidade ótima de despacho de cada termelétrica no mercado e, por fim, $S_{t+3} [f_{t+1}, f_{t+2}]$ é o estoque de água acumulado ao fim do período $t + 2$ e realizações hidrológicas (f_{t+1}, f_{t+2}) .

A função de reação pode ser calculada usando-se as seguintes condições:

$$c_t q_t^T = \beta E_t [c_{t+1} q_{t+1}^{T_i} [f_{t+1}]] \quad (3-20)$$

$$c_{t+1} q_{t+1}^T [f_{t+1}] = \beta E_{t+1} [c_{t+2} q_{t+2}^{T_i} [f_{t+1}, f_{t+2}]] \quad (3-21)$$

$$q_t^T = D_t + S_{t+1} - \bar{S}_t \quad (3-22)$$

$$q_{t+1}^{T_i} [f_{t+1}] = \frac{D_{t+1} + S_{t+2} [f_{t+1}] - S_{t+1} - f_{t+1}}{1 + n_1} \quad (3-23)$$

$$q_{t+2}^{T_i} [f + \sigma, f_{t+2}] = \frac{D_{t+1} - S_{t+2} [f + \sigma] - f_{t+2}}{1 + n_1 + h_2} \quad (3-24)$$

$$q_{t+2}^{T_i} [f - \sigma, f_{t+2}] = \frac{D_{t+1} - S_{t+2} [f - \sigma] - f_{t+2}}{1 + n_1 + l_2} \quad (3-25)$$

$$S_{t+3} [f_{t+1}, f_{t+2}] = 0 \quad (3-26)$$

Dada a função de reação do operador do sistema, a termelétrica escolhe 1 das 8 possíveis estratégias de acordo com aquela que maximiza seu lucro esperado descontado em t . Seja $\pi_t [n_1, h_2, l_2]$ o *payoff* associado à estratégia

(n_1, h_2, l_2) . $\pi_t[n_1, h_2, l_2]$ é dado por:

$$\pi_t[n_1, h_2, l_2] = E_t \left[\begin{array}{c} \beta n_1 \left(\frac{c_t (q_{t+1}^{T_j})^2}{2} \right) \\ + \beta^2 (n_1 + h_2) \left(\frac{c_{t+1} (q_{t+2}^{T_j} [f + \sigma, f_{t+2}])^2}{2} \right) \\ + \beta^2 (n_1 + l_2) \left(\frac{c_{t+2} (q_{t+2}^{T_j} [f - \sigma, f_{t+2}])^2}{2} \right) \\ - n_1 I - \beta (h_2 + l_2) I \end{array} \right] \quad (3-27)$$

Defina $\pi_t[n_1^*, h_2^*, l_2^*] = \max \pi_t[n_1, h_2, l_2]$.

O equilíbrio do jogo acima é dado pelo perfil de estratégia $((n_1^*, h_2^*, l_2^*); (\{S_{t+1}^*, q_t^{T_i^*}\}, \{S_{t+2}^* [f_{t+1}], q_{t+1}^{T_i^*} [f_{t+1}]\}, \{S_{t+3}^* [f_{t+1}, f_{t+2}], q_{t+2}^{T_i^*} [f_{t+1}, f_{t+2}]\}))$ tal que a estratégia anunciada (n_1^*, h_2^*, l_2^*) gera o maior lucro esperado descontado para a potencial entrante em t .

Na abordagem acima, o valor da opção de esperar depende da estratégia anunciada em equilíbrio: se ela envolve investimento imediato, então seu valor é zero. Se, ao contrário, ela não envolver investimento imediato, seu valor é dado pela diferença entre o *payoff* do investimento adiado e o maior *payoff* das estratégias que envolvem investimento imediato.

Assim:

$$\Phi_t = \begin{cases} \pi_t(n_1^*, h_2^*, l_2^*) - \max\{\pi_t(n_1, h_2, l_2)\} & \text{se } n_1^* = 0, n_1 = 1 \\ 0 & \text{se } n_1^* = 1 \end{cases}$$

Um Exemplo Numérico

Considere os seguintes valores numéricos para as variáveis do modelo:

$$\begin{aligned} D_{t+2} &= D_{t+1} = D_t = 100 \\ \alpha &= 0.5, \beta = 0.9 \\ \bar{S}_t &= 200 \\ f &= 20, \sigma = 8 \\ c_t &= c_{t+1} = c_{t+2} = 1 \\ I &= 160 \end{aligned}$$

Primeiro, apliquemos a abordagem de opções reais. Considera-se que não haja entrada exógena.

Computando os valores de (3-15), (3-16) e (3-17)

$$\begin{aligned} S_{t+1} &= 117.93 \\ J_t - I &= -55.81 \\ E_t F_{t+1} [f_{t+1}] &= 0 \end{aligned}$$

Desta forma, o valor da opção de espera é dado por $\Phi_t = 55.81$ e, portanto, é melhor adiar o investimento.

Agora, voltemo-nos para o caso de comprometimento total.

Para cada estratégia possível (n_1, h_2, l_2) , calcula-se o respectivo despacho e o lucro esperado descontando da entrante usando as condições dadas por (3-20)-(3-26).

Da tabela 1 no apêndice (6.2), pode-se ver que:

$$\pi(0, 0, 0) = 0 > \pi(n_1, h_2, l_2), (n_1, h_2, l_2) \neq (0, 0, 0)$$

Portanto, o plano indicativo anunciado em t não considerará expansão de capacidade da data t até a data $t + 2$.

Pode-se ver que o mesmo valor para S_{t+1} é obtido tanto nessa abordagem quanto na de opções reais. Entretanto, o valor da opção de esperar é dado pela diferença entre o *payoff* de adiar o investimento e o maior *payoff* entre as estratégias que consideram investimento imediato. Este é dado pela estratégia $(n_1, h_2, l_2) = (1, 0, 0)$ ¹⁸ : $\pi_t(1, 0, 0) = -19.76$ e, assim, o valor da opção de esperar é $\Phi_t = \pi_t(0, 0, 0) - \pi_t(1, 0, 0) = 0 - (-19.76) = 19.76$ e, dessa forma, é melhor adiar o investimento.

Por fim, considere os mesmos valores numéricos acima com exceção de $\bar{S}_t = 190$ (o valor do estoque de água inicial).

Usando a abordagem de opções reais, o valor de S_{t+1} é igual a 110.92 e o valor da opção de esperar é igual a 21.76. Mais uma vez, é melhor adiar o investimento.

Contudo, no caso de comprometimento pleno, $(n_1, h_2, l_2) = (0, 0, 0)$ não pode ser um equilíbrio porque $\pi_t(1, 0, 0) = 27.31 > \pi_t(0, 0, 0) = 0$. Assim, o investidor anunciará a estratégia $(n_1, h_2, l_2) = (1, 0, 0)$ que será usada pelo operador do sistema no cálculo do despacho ótimo.

Nesse caso, $S_{t+1} = 102.30$ que é menor do que o valor de S_{t+1} obtido no modelo de opções reais. Mais ainda, o valor da opção de espera é $\tilde{\Phi} = 0$ porque $n_1^* = 1$. Ou seja, é melhor investir imediatamente e não postergar o investimento.

¹⁸Em palavras: investe em t , não investe em $t + 1$ se $f_{t+1} = f - \sigma$, e não investe em $t + 1$ se $f_{t+1} = f + \sigma$.

3.4 Conclusões

Quando não apenas o efeito da expansão futura de capacidade sobre o despacho ótimo atual é considerado, mas também o efeito reverso (isto é, o efeito do despacho sobre a expansão da capacidade), a abordagem de opções reais pode não ser a mais apropriada para descrever as decisões de investimento porque está baseada, em geral, na hipótese de expansão exógena de capacidade.

Deve-se notar, entretanto, que nem o operador do sistema brasileiro (ONS) considera o fato de que os investidores podem mudar suas decisões de investimento por causa do despacho corrente. Como resultado, a entrada de nova capacidade pode ser bem diferente daquela usada no plano indicativo e, por conseguinte, o despacho atual pode ser sub-ótimo.

Pode-se argumentar que pelo fato de o ONS considerar exógeno a expansão futura de capacidade (no sentido de que o despacho corrente não a afeta), a abordagem de opções reais continuaria válida para analisar as decisões de investimento, porque o despacho atual nos dois casos seria o mesmo. Contudo, como notado acima, o plano indicativo pode ser uma descrição bastante pobre da entrada futura efetiva, e os potenciais entrantes perceberão que o despacho atual é sub-ótimo e, portanto, os preços e as quantidades futuras estarão distorcidos.

A omissão em desconsiderar o efeito reverso do despacho ótimo na expansão futura da capacidade pode gerar conseqüências bastante sérias quando argumenta-se que a principal causa do racionamento de 2001 foi o fato de a capacidade esperada não ter entrado no tempo previsto pelos planos indicativos passados.¹⁹

O principal resultado do capítulo deve ser visto com cautela. Aqui, analisamos a decisão de entrada sob a hipótese de comprometimento pleno de um agente apenas em um horizonte de despacho ótimo de três períodos.

Quando mais agentes são considerados e o despacho têm muitos períodos, o equilíbrio de comprometimento pleno pode perder seu apelo, ao levantar questões como consistência intertemporal das estratégias dos agentes. Não é preciso dizer que isso envolveria conceitos de equilíbrio dinâmico muito mais complexos e imensa dificuldade no cálculo dos valores de equilíbrio.

¹⁹Ver Comissão de Análise do Setor Hidrotérmico de Energia Elétrica (2001).