

5

MERCADO FUTURO DE ENERGIA ELÉTRICA

O mercado futuro permite fixar / limitar o preço futuro dos produtos através de contratos e dessa forma permite aos agentes de produção e consumo gerenciar a incerteza sobre o valor dos seus recursos e requisitos futuros.

Nesta seção discutiremos a formação do preço futuro, em especial de produtos naturais (*commodities*) em geral e da energia elétrica em particular e também a valoração de contratos de opção de compra e venda de energia elétrica.

5.1 INTRODUÇÃO

O mercado futuro permite aos agentes econômicos (produtores e consumidores) alocar os seus recursos e requisitos de forma intertemporal, isto é, comprar e vender no futuro.

Um mercado é dito “completo” se permitir²⁷ a livre alocação intertemporal de recursos e requisitos e também permitir o estabelecimento do preço de cada recurso em cada possível cenário futuro. Dessa forma, um “mercado completo” permite aos agentes econômicos operar no nível de incerteza (risco) que maximize o equivalente certo da sua renda.

A negociação sobre resultados incertos sempre foi uma necessidade da vida econômica e a evolução do mercado futuro acompanhou a do comércio de bens de consumo. Numa breve cronologia da evolução do mercado futuro de bens de consumo, os principais marcos são a criação do “arroz escritural” no mercado de Dojima (Japão) no século XVIII, como primeiro instrumento formal de negociação no mercado futuro, e a fundação da “*Chicago Board of Trade*” (CBOT) em 1848, cujo funcionamento serviu de modelo para os mercados futuros, inclusive para a “Bolsa de Mercadorias de São Paulo” (BMSP), criada em 1917, e posteriormente absorvida pela “Bolsa de Mercadorias e Futuros” (BM&F), criada em 1986 (TEIXEIRA 1992).

No mercado futuro, os instrumentos financeiros mais simples de negociação são os contratos a termo (“*forward contracts*”), que fixam o preço do bem negociado.

No entanto, os contratos a termo não permitem o condicionamento do preço futuro aos possíveis cenários. O instrumento financeiro teórico básico para negociação no mercado futuro é o contrato de opção de “Arrow-Debreu”, que só tem valor num determinado cenário.

²⁷ A permissão de livre negociação implica não só na existência de um mercado futuro, mas também de um mercado líquido e, idealmente, sem fricção, isto é, sem custos de transação.

O mercado financeiro real opera com contratos de opção de compra (“*call option*”) e de venda (“*put option*”) que têm valor (renda líquida) acima ou abaixo de um determinado preço (“*strike price*”). Contudo a composição de contratos de opção de compra (“*call option*”) e de venda (“*put option*”) permite obter qualquer perfil de renda líquida (“*payoff*”) como, por exemplo, aproximar o perfil da opção de “Arrow-Debreu” através da composição conhecida como “*butterfly spread*”, como ilustrado na figura abaixo.

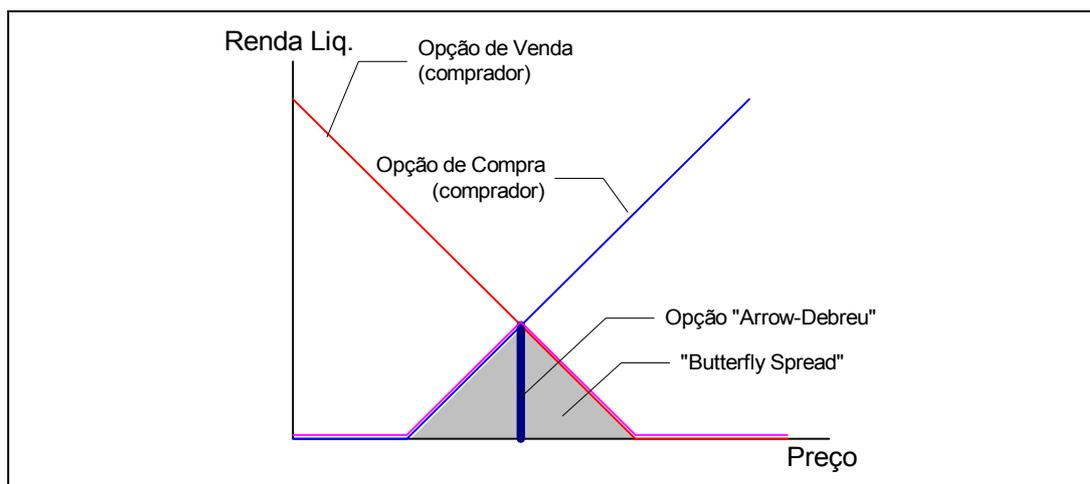


Figura 44– Reprodução de um Contrato Futuro através de Contratos de Opção

5.2 MERCADO FUTURO DE *COMMODITIES*

Commodities são produtos primários, isto é, obtidos por extração ou cultivo, tal como os minérios, o petróleo e os produtos agro-pecuários. Do ponto de vista econômico, as *commodities* podem ser classificadas em dois grandes grupos de acordo com a sua aplicação: investimento ou consumo. O exemplo mais notável do primeiro grupo (investimento) é o ouro. No segundo grupo temos os produtos energéticos, como petróleo e gás; e os produtos agropecuários, como café, cereais, gado, etc., que estão na origem do próprio mercado futuro.

A relação entre o preço futuro (*forward price*) “ F_T ” das *commodities* e o preço à vista (*spot*) atual depende da sua natureza econômica (investimento ou consumo), como analisado a seguir.

5.2.1 PREÇO FUTURO DE BENS DE INVESTIMENTO

O valor dos bens de investimento advém de possuírem valor real estável e não serem consumíveis²⁸. A inconsuntibilidade desses bens faz com que o seu preço futuro “ F_T ” seja igual ao valor futuro do seu preço atual “ S_t ”, ou seja, o preço futuro é igual ao preço atual capitalizado à taxa básica de juros “ ρ ” acrescido do custo (taxa) de armazenamento “ w ”:

$$F_T = S_t \cdot e^{(\rho+w) \cdot (T-t)} \dots \dots \dots \text{eq.(56)}$$

Esta igualdade entre o preço futuro e o preço à vista capitalizado à taxa básica de juros é assegurada pela impossibilidade de arbitragem econômica, ou seja, de ganho sem risco acima da taxa básica de juros, que poderia em tese ser obtido comprando o bem/contrato que valorizar menos e vendendo o contrato/bem que valorizar mais:

- Se $F_T < S_t \cdot e^{(\rho+c) \cdot (T-t)}$ a estratégia de arbitragem é comprar o contrato e vender no mercado à vista

$$\text{Lucro} = S_t \cdot e^{(\rho+c) \cdot (T-t)} - F_T$$

²⁸ Embora o ouro seja utilizado em alguns equipamentos e próteses médicas, o grande atrativo do ouro é a estabilidade do seu alto valor.

- Se $F_T > S_t \cdot e^{(\rho+c) \cdot (T-t)}$ a estratégia de arbitragem é vender o contrato e comprar no mercado à vista

$$\text{Lucro} = F_T - S_t \cdot e^{(\rho+c) \cdot (T-t)}$$

5.2.2

PREÇO FUTURO DE BENS DE CONSUMO

Como visto acima [eq.(57)], no caso de bens de investimento (ouro) o agente obtém o mesmo resultado se comprar ouro e estocar ou se comprar um contrato futuro, ou seja, o agente é indiferente entre uma estratégia ou outra.

No caso dos bens de consumo, a disponibilidade do bem em estoque produz um benefício (proteção contra desabastecimento) que o contrato futuro não proporciona. Portanto, a princípio, o estoque vale mais que o contrato futuro (PYNDICK 2001a,b).

A taxa do retorno econômico produzido pela disponibilidade do bem em estoque é conhecida como “*convenience yield*” (y) e pode ser comparada ao dividendo pago por uma ação que é recebido pelo agente que possui a ação, mas não pelo agente que possua um contrato futuro de compra daquela ação.

Contudo, se por um lado, o estoque proporciona o *convenience yield* (y), por outro, a manutenção do estoque implica na imobilização do capital e num custo de armazenagem “ w ”, que usualmente é alto. Assim o valor líquido proporcionado pelo estoque pode ser positivo ou negativo.

Se considerarmos o “*convenience yield*” e o custo do estoque, podemos definir a relação entre o preço futuro de um bem de consumo e o valor atual do seu preço à vista:

$$F_T \cdot e^{y \cdot (T-t)} = S_t \cdot e^{r \cdot (T-t)} \dots \dots \dots \text{eq.(57)}$$

Contudo, a valoração dos contratos futuros de bens de consumo diretamente pela expressão acima é difícil, quando não impossível, pois não só o *convenience yield* não é diretamente observável, como também o custo do estoque é função de diversas variáveis, tais como o tipo de produto, a área / volume requerido para armazenagem, custo de oportunidade do capital imobilizado na formação do estoque, etc. O preço futuro dos bens de consumo é determinado pela oferta e procura por contratos futuros desses produtos.

A relação entre o preço à vista e o preço futuro depende de quem são os vendedores do contrato futuro, uma vez que a transferência do risco requer um pagamento. Se quem busca proteção for o vendedor do contrato, ele tende a aceitar um preço menor que o valor esperado do preço à vista e vice-versa, ou seja, o preço futuro tende a ser maior que o valor esperado do preço à vista, se for o comprador do contrato quem estiver buscando proteção. (HULL 1997, cap.3)

O conhecimento da dinâmica do preço futuro é essencial para valoração dos derivativos financeiros (contratos futuros, contratos de opção, etc.) utilizados para redução do risco financeiro.

Em mercados líquidos, como os de petróleo e gás, é possível aproximar um modelo econométrico (equação diferencial estocástica) do preço futuro (SCHWARTZ 1997). Em mercados ilíquidos, como de energia elétrica, existem alguns modelos preliminares baseados na relação (“*spark spread*”) entre o preço do combustível (gás natural) e o preço da energia elétrica (PILIPOVIC 1997). Contudo estes modelos não se aplicam a mercados de sistemas predominantemente hidrelétricos.

Alternativamente, pode-se tentar construir modelos da oferta e demanda por contratos futuros de energia elétrica, em função da aversão ao risco dos agentes vendedores (produtores) e compradores (consumidores) de energia elétrica.

Esta abordagem foi utilizada por (BESSEMBINDER 2002) que desenvolveu um modelo de equilíbrio para o preço da energia elétrica em mercados competitivos de sistemas puramente térmicos, supondo que os compradores e vendedores no mercado futuro de energia elétrica são somente os próprios agentes produtores e consumidores e modelando a preferência (aversão ao risco) dos agentes através de uma função de utilidade “média - variância”.

5.3 OFERTA E PROCURA POR CONTRATOS DE ENERGIA

A oferta e a demanda por um determinado produto / serviço, em cada nível de preço, é a quantidade que maximiza a “utilidade” do uso do capital do agente de produção e do de consumo, respectivamente:

$$U^*(q^*,p) = \max U(q,p) \rightarrow \partial U(q^*,p)/\partial q = 0 \dots\dots\dots \text{eq.(58)}$$

Assim, só há oferta por um determinado produto ou serviço enquanto a venda daquele produto / serviço incrementar a riqueza (benefício) do vendedor. Complementarmente, só há demanda por um determinado produto ou serviço enquanto a compra daquele produto / serviço incrementar a riqueza (benefício) do comprador.

Desta forma, um agente produtor só investe capital (compra capacidade) na produção com renda incerta se o equivalente certo da renda obtida com a venda da energia aumentar sua renda em relação à que ele obteria aplicando seu capital em títulos em risco e só compra / vende contratos de energia se esta operação aumentar o equivalente certo da sua renda em relação ao equivalente certo da renda que ele teria no mercado à vista.

De forma dual, o consumidor só adquire energia se esta aquisição agregar benefício em relação à situação anterior, ou seja, se o equivalente certo do custo da energia for menor que o custo da falta (déficit) de energia e só compra / vende contratos de energia se esta compra / venda reduzir o equivalente certo do seu custo em relação ao equivalente certo do custo que ele teria adquirindo toda a energia no mercado à vista.

É importante notar, que toda essa argumentação abstrai de imposições regulatórias.

**5.3.1
FUNÇÃO DE OFERTA E DEMANDA DO PRODUTOR**

A renda líquida instantânea (num determinado período) de um agente produtor no mercado à vista é formada pela venda da produção da geração hidrelétrica e da termelétrica, descontada do respectivo custo de produção:

$$\tilde{R}_t^0 = [\alpha \tilde{s}_t \tilde{h}_t + (1 - \alpha)(\tilde{s}_t - c) \tilde{g}_t] \Delta T \dots\dots\dots \text{eq.}(59)$$

Onde:

- \tilde{s}_t : preço spot
- \tilde{h}_t, \tilde{g}_t : produção hidrelétrica / termelétrica
- c : custo marginal da produção termelétrica
- ΔT : duração de 1 período de tempo (período mensal = 730 horas)
- α : fator de participação da geração hidrelétrica na capacidade de geração do produtor

Considerando que o capital do produtor poderia ter sido investido sem risco no mercado financeiro, o valor agregado pelo investimento e venda da energia produzida no mercado à vista é:

$$\Delta \tilde{R}_t^0 = \tilde{R}_t^0 - R^I \dots\dots\dots \text{eq.}(60)$$

Onde “ R^I ” é a renda que seria obtida pela aplicação sem risco no mercado financeiro do capital investido na compra de capacidade produção hidrelétrica e termelétrica:

$$R^I = \alpha R^H + (1 - \alpha)R^G \dots\dots\dots \text{eq.}(61)$$

A renda instantânea equivalente do produtor é a soma dessa renda sem risco ao equivalente certo da renda agregada pela compra da capacidade de produção e venda da energia no mercado à vista:

$$R_t^0 = U^{-1}(E\{U(\tilde{R}_t^0 - R^I)\}) + R^I \dots\dots\dots \text{eq.}(62)$$

Onde “ $U(\bullet)$ ” é a Função Utilidade do Produtor e “ $U^{-1}(\bullet)$ ” é a sua inversa.

Considerando que a Função Utilidade do Produtor é a exponencial negativa, que implica numa aversão ao risco constante, a renda instantânea equivalente do produtor seria:

$$R_t^0 = R_t^1 + U^{-1}(\bar{u}_t) = R_t^1 - \log(-\bar{u}_t)/\lambda \dots\dots\dots \text{eq.}(63)$$

$$\bar{u}_t = -E\left\{\exp\left(-\lambda\left(\bar{R}_t^0 - R_t^1\right)\right)\right\} \dots\dots\dots \text{eq.}(64)$$

Onde “ λ ” é o grau de aversão ao risco.

A renda média do produtor ao longo do tempo é a razão entre o valor presente da renda e o somatório dos fatores de desconto:

$$\bar{R}^0 = \frac{\sum_t R_t^0 / (1 + \rho)^t}{\sum_t 1 / (1 + \rho)^t} \dots\dots\dots \text{eq.}(65)$$

Onde “ ρ ” é a taxa de juros livre de risco.

A princípio, o valor do grau de aversão ao risco (λ) é arbitrário e depende do agente. No entanto, num contexto em que não haja possibilidade de arbitragem, o equivalente certo da renda deve ser igual à renda sem risco, uma vez que ele é descontado à taxa de juros livre de risco. Essa condição de igualdade do equivalente certo da renda líquida à renda sem risco, condiciona o grau de aversão ao risco (λ) à composição (α) do portfolio de geração do produtor:

$$\lambda(\alpha) = \left\{ \lambda \mid \bar{R}^0(\lambda, \alpha) = R^1(\alpha) \right\} \dots\dots\dots \text{eq.}(66)$$

O requisito mais importante para a inexistência de arbitragem é a liquidez do investimento, a qual depende, dentre outras condições, da “granulação” do investimento, isto é, da sua divisão em títulos de valor nominal reduzido, que possam ser negociados mais facilmente. Assim, uma forma de tentar aumentar a liquidez dos investimentos em geração seria a negociação de títulos de “energia assegurada”, que daria ao portador direito sobre a renda de um conjunto de ativos em geração.

A figura abaixo mostra a relação entre o grau de aversão ao risco (λ) e a composição (α) do portfolio de geração do produtor desde totalmente termelétrico ($\alpha=0$) à totalmente hidrelétrico ($\alpha=1$), num caso considerando o sistema em equilíbrio, onde investimentos marginais em geração hidrelétrica e termelétrica são minimamente viáveis.

Podemos notar que o grau de aversão ao risco é crescente com a participação da geração hidrelétrica no portfólio. O crescimento do grau de aversão ao risco com a participação da geração hidrelétrica decorre da condição de igualdade com a renda sem risco, pois o equivalente certo da renda da produção hidrelétrica é muito maior que o da produção termelétrica e para compensar esta diferença, o grau de aversão ao risco que deve ser aplicado no sobre a renda de um portfólio com maior participação hidrelétrica deve ser maior, para reduzir o equivalente certo dessa renda.

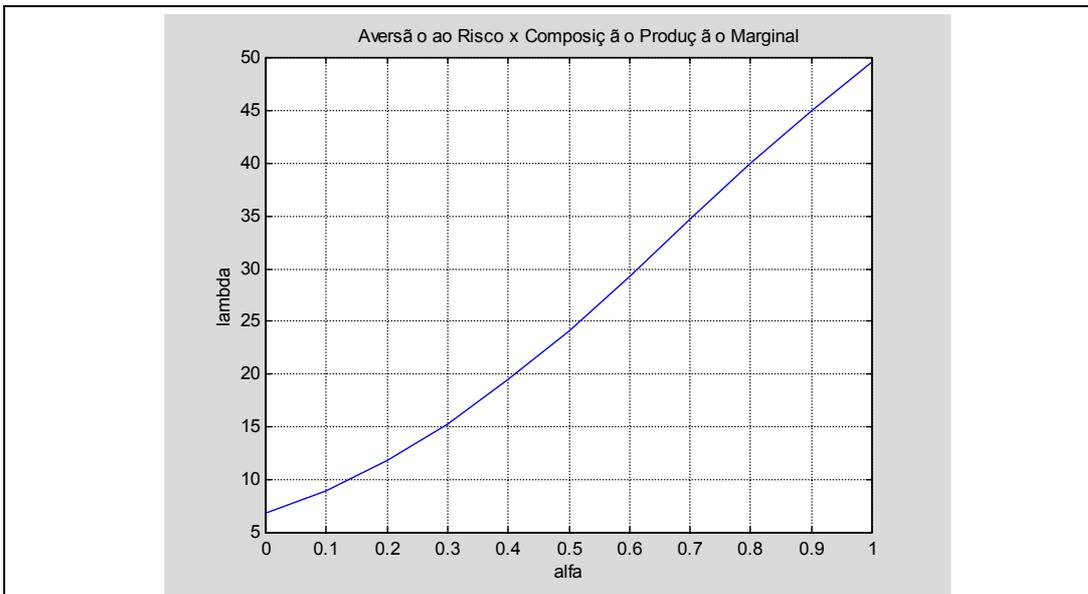


Figura 45 – Grau de Aversão Risco e Portfólio de Geração

A contratação da energia no longo prazo pode reduzir o risco, incrementando o equivalente certo da renda do produtor.

A renda líquida instantânea da venda de um contrato “R^F” é o produto da quantidade contratada “F”, pela diferença entre o preço do contrato “f” e o preço spot “s_t”:

$$\tilde{R}_t^F = (f - \tilde{s}_t) \cdot F \dots\dots\dots \text{eq.}(67)$$

Portanto, a renda líquida instantânea do produtor com a venda da energia e de um contrato é:

$$\tilde{R}_t = \tilde{R}_t^0 + \tilde{R}_t^F = \left[\alpha \tilde{s}_t \tilde{h}_t + (1 - \alpha)(\tilde{s}_t - c) \tilde{g}_t + (f - \tilde{s}_t)F \right] \cdot \Delta T \dots\dots \text{eq.}(68)$$

O valor agregado pela venda do contrato ao equivalente certo da renda líquida do produtor é o equivalente certo da diferença entre a renda líquida total

(venda da energia + contrato) e o equivalente certo da renda da venda da energia:

$$\Delta R_t = U^{-1}\left(E\left\{U\left(\tilde{R}_t - R_t^0\right)\right\}\right) \dots\dots\dots \text{eq.(69)}$$

Portanto, a renda líquida instantânea equivalente do produtor após a contratação é a soma do equivalente certo da renda da venda da energia com o equivalente certo do valor agregado pelo contrato:

$$R_t = R_t^0 + \Delta R_t = R_t^0 + U^{-1}\left(E\left\{U\left(\tilde{R}_t - R_t^0\right)\right\}\right) \dots\dots\dots \text{eq.(70)}$$

Mantendo a suposição que a Função Utilidade do Produtor é a exponencial negativa, a renda líquida instantânea equivalente do produtor após a contratação é:

$$R_t = R_t^0 + U^{-1}(\bar{u}_t) = R_t^0 - \log(-\bar{u}_t)/\lambda \dots\dots\dots \text{eq.(71)}$$

Onde “ \bar{u} ” é o valor esperado da utilidade do valor agregado pelo contrato:

$$\bar{u}_t = -E\left\{\exp\left(-\lambda\left(\tilde{R}_t - R_t^0\right)\right)\right\} \dots\dots\dots \text{eq.(72)}$$

O valor médio da renda líquida equivalente do produtor após a contratação é:

$$\bar{R} = \frac{\sum_t R_t / (1 + \rho)^t}{\sum_t 1 / (1 + \rho)^t} \dots\dots\dots \text{eq.(73)}$$

Onde “ ρ ” é a taxa de juros livre de risco.

A função de oferta e demanda por contratos é definida pelo menor preço que o produtor aceita para um determinado nível de contratação, ou pela máxima contratação aceitável para cada preço. Assim, a oferta / demanda por contrato num determinado nível de preço é aquela “ F^* ” que maximiza o equivalente certo da renda média do produtor após a contratação àquele preço “ F^* ”:

$$F^*(f^*) = \left\{F \mid \bar{R} = \max_F \bar{R}(F, f)\right\} \dots\dots\dots \text{eq.(74)}$$

Derivando o valor presente da renda instantânea equivalente do produtor em relação ao nível de contratação e em relação ao preço do contrato, obtemos:

$$\partial R / \partial F = \sum_t (\partial R_t / \partial F) / (1+r)^t \dots\dots\dots \text{eq.(75)}$$

$$\partial R / \partial f = \sum_t (\partial R_t / \partial f) / (1+r)^t \dots\dots\dots \text{eq.(76)}$$

Derivando a renda instantânea equivalente do produtor em relação ao nível de contratação e ao preço do contrato, obtemos:

$$\rightarrow \partial R_t / \partial F = (\partial R_t / \partial \bar{u}_t) \cdot E \left\{ (\partial \tilde{u}_t / \partial \Delta \tilde{R}_t) \cdot (\partial \Delta \tilde{R}_t / \partial F) \right\} \dots\dots\dots \text{eq.(77)}$$

$$\rightarrow \partial R_t / \partial f = (\partial R_t / \partial \bar{u}_t) \cdot E \left\{ (\partial \tilde{u}_t / \partial \Delta \tilde{R}_t) \cdot (\partial \Delta \tilde{R}_t / \partial f) \right\} \dots\dots\dots \text{eq.(78)}$$

Desenvolvendo cada uma das derivadas parciais:

$$(i) \quad \partial R_t / \partial \bar{u}_t = 1 / (\lambda \bar{u}_t) \dots\dots\dots \text{eq.(79)}$$

$$(ii) \quad \partial \tilde{u}_t / \partial \Delta \tilde{R}_t = \lambda \exp(-\lambda \Delta \tilde{R}_t) = -\lambda U(\Delta \tilde{R}_t) \dots\dots\dots \text{eq.(80)}$$

$$(iii) \quad \partial \Delta \tilde{R}_t / \partial F = (f - \tilde{s}_t) \cdot \Delta T \dots\dots\dots \text{eq.(81)}$$

$$(iv) \quad \partial \Delta \tilde{R}_t / \partial f = F \cdot \Delta T \dots\dots\dots \text{eq.(82)}$$

Sendo a Função Utilidade, a exponencial negativa, a (i)^a derivada parcial é positiva, pois “u” é negativa. Pela mesma razão, a (ii)^a derivada parcial é negativa. O sinal da (iii)^a derivada parcial depende do cenário e o da (iv)^a depende se o produtor é vendedor ou comprador do contrato (F>0: vendedor, F<0: comprador). Portanto a derivada do equivalente certo da renda líquida instantânea do produtor em relação ao preço só é nula se o nível de contratação “F” for nulo:

$$\rightarrow \partial R_t / \partial f = \underbrace{(\partial R_t / \partial \bar{u}_t)}_{<0} \cdot E \left\{ \underbrace{(\partial \tilde{u}_t / \partial \Delta \tilde{R}_t)}_{<0} \cdot \underbrace{(\partial \Delta \tilde{R}_t / \partial f)}_{\neq 0} \right\} \neq 0 \dots\dots\dots \text{eq.(83)}$$

Porém a derivada a derivada do equivalente certo da renda líquida instantânea do produtor em relação ao nível de contratação pode ser nulo:

$$\partial R_t / \partial F = \underbrace{(\partial R_t / \partial \bar{u}_t)}_{<0} \cdot E \left\{ \underbrace{(\partial \tilde{u}_t / \partial \Delta \tilde{R}_t)}_{<0} \cdot (\partial \Delta \tilde{R}_t / \partial F) \right\} = 0$$

$$\rightarrow \partial R_t / \partial F = 0 \leftrightarrow E\{U(\Delta \tilde{R}_t) \cdot (f - \tilde{s}_t) \Delta T\} = 0 \dots\dots\dots \text{eq.}(84)$$

Como o valor da derivada do equivalente certo da renda líquida instantânea do produtor em relação ao nível de contratação é função do preço, a curva de oferta / demanda por contratos pelo produtor é definida pelo menor preço que mantém o nível de contratação que maximiza o valor médio do equivalente certo da renda líquida do produtor, com aquele nível de contratação:

$$f^*(F) = \left\{ f \mid \min_f \left\{ \max_F \{ \bar{R} \} \right\} \right\} \dots\dots\dots \text{eq.}(85)$$

As figuras abaixo mostram as curvas de oferta ($F > 0$) e demanda ($F < 0$) por contratos para o produtor, obtidas aplicando essa formulação e utilizando os graus de aversão ao risco pequeno, médio e alto, correspondentes composições do portfólio de geração totalmente termelétrico ($\alpha = 0$), totalmente hidrelétrico ($\alpha = 1$) e igualmente ($\alpha = 0.5$) composto por geração hidrelétrica e termelétrica. Todos os casos foram feitos supondo o sistema em equilíbrio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9725007/CA

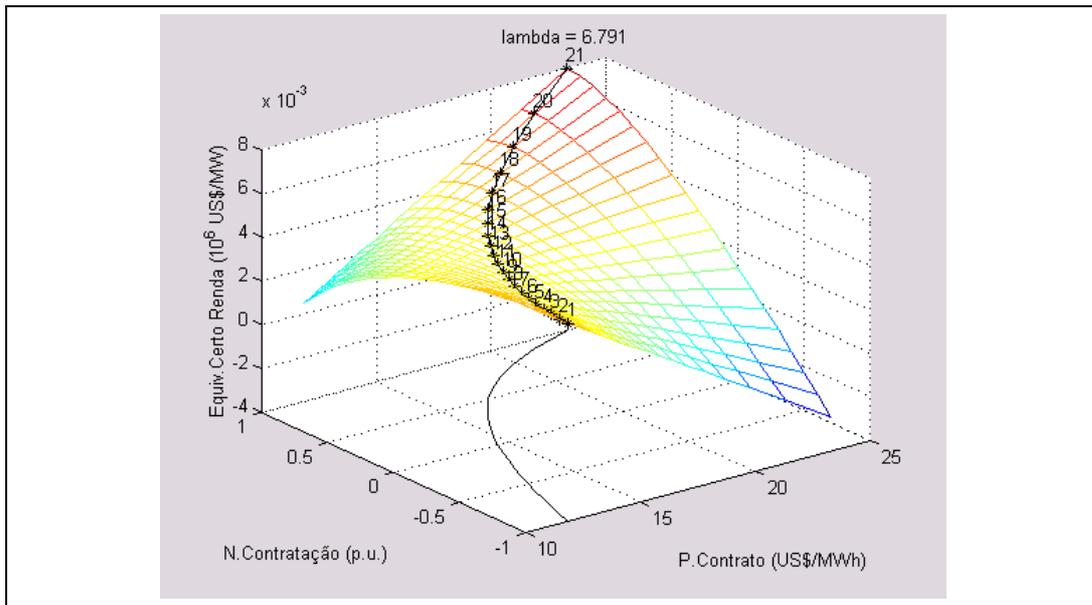


Figura 46 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Produtor – ($\lambda = 6.791$)

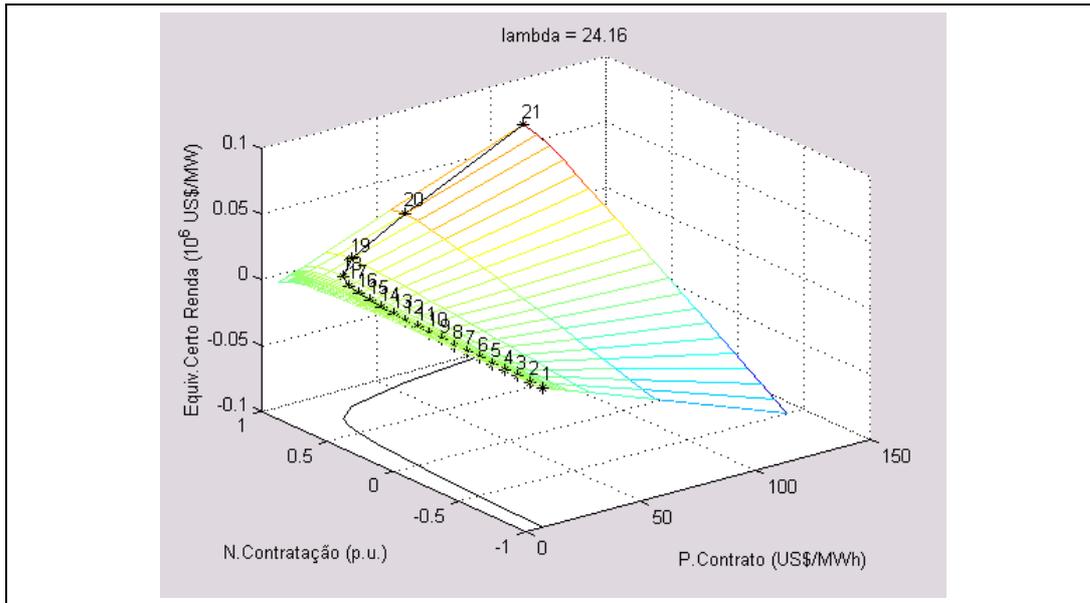


Figura 47 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Produtor – ($\lambda = 24.160$)

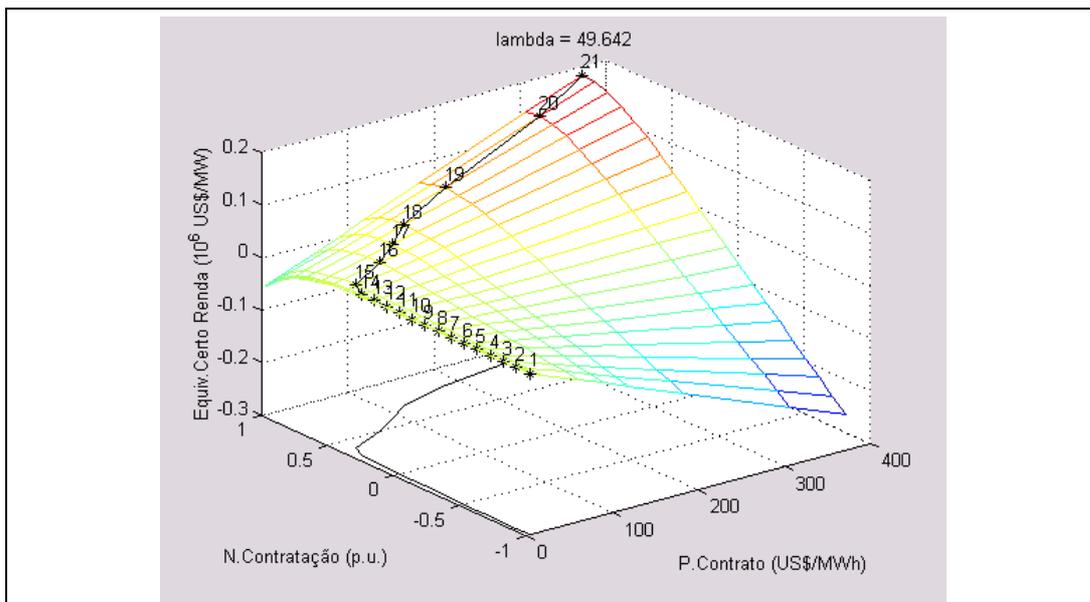


Figura 48 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Produtor – ($\lambda=49.642$)

A concavidade das curvas de oferta / demanda do produtor significa que para preços pequenos (contratação pode ser danosa para o produtor) a oferta / demanda varia muito para pequenas variações do preço e para preços altos, onde a contratação a oferta varia pouco em para uma grande variação do preço. Esse comportamento é explicado pela aversão ao risco do produtor, que é mais suscetível a resultados danosos que a resultados benéficos.

**5.3.2
FUNÇÃO DE OFERTA E DEMANDA DO CONSUMIDOR**

O custo da aquisição da energia no mercado à vista em cada período de tempo é simplesmente o produto do preço spot pela demanda, como mostrado na equação abaixo, na qual o sinal negativo denota que é um custo (renda negativa):

$$\tilde{R}_t^0 = - [\tilde{s}_t D_t] \cdot \Delta T \dots\dots\dots \text{eq.(86)}$$

O valor agregado do benefício pela compra da energia é a diferença entre o custo da aquisição da energia e o da falta da energia “R^D”:

$$\Delta \tilde{R}_t^0 = \tilde{R}_t^0 - R_t^D \dots\dots\dots \text{eq.(87)}$$

Portanto, o equivalente certo do custo da energia para o consumidor é a soma do custo de déficit ao equivalente certo do valor agregado pela compra da energia:

$$R_t^0 = U^{-1} \left(E \left\{ U \left(\Delta \tilde{R}_t^0 \right) \right\} \right) + R_t^D \dots\dots\dots \text{eq.(88)}$$

Sendo a energia elétrica essencial e insubstituível na vida social e na maioria das atividades econômicas, o verdadeiro custo social da falta da energia é inestimável. O custo econômico da falta da energia varia para cada atividade de cada consumidor. Por exemplo, para um consumidor industrial, o custo da falta da energia é o custo de oportunidade da perda de produção. Como visto anteriormente, o modelo de despacho hidrelétrico valora o custo econômico do déficit de energia, como um custo crescente, com a profundidade do déficit. O valor médio do custo de déficit adotado no modelo adotado neste estudo é de US\$ 867.35/MWh. Assim, adotamos este valor como o preço da falta de energia “d”:

$$R_t^D = -d D_t \Delta T \dots\dots\dots \text{eq.(89)}$$

A contratação da energia pode reduzir a incerteza e agregar valor (reduzir o equivalente certo do custo) para o consumidor. O custo da energia após a contratação é:

$$\tilde{R}_t(f, F) = - [\tilde{s}_t D_t + (f - \tilde{s}_t) F] \cdot \Delta T \dots\dots\dots \text{eq.(90)}$$

O valor agregado pela contratação da energia é a diferença entre o custo da energia após a contratação e o equivalente certo do custo da aquisição da energia no mercado à vista:

$$\Delta\tilde{R}_t = \tilde{R}_t - R_t^0 \dots\dots\dots \text{eq.(91)}$$

O equivalente certo do custo da energia após a contratação é a soma do equivalente certo do valor agregado pelo contrato ao custo da compra da energia:

$$R_t = U^{-1}\left(E\left\{U\left(\Delta\tilde{R}_t\right)\right\}\right) + R_t^0 \dots\dots\dots \text{eq.(92)}$$

O custo médio da energia ao longo do tempo é simplesmente a média do valor presente do equivalente certo do custo da energia em cada período ponderada pelo fator de desconto:

$$\bar{R} = \frac{\sum_t R_t / (1 + \rho)^t}{\sum_t 1 / (1 + \rho)^t} \dots\dots\dots \text{eq.(93)}$$

A função de oferta e demanda do consumidor por contratos pode então ser determinada de forma dual à do produtor, ou seja, determinando o máximo preço que o consumidor está disposto a pagar para cada nível de contratação, ou a máxima contratação que o consumidor está disposto a fazer a um determinado preço. Este nível de contratação é então aquele que minimiza o valor médio do equivalente certo do custo, como expresso na equação abaixo, onde a minimização do custo é substituída pela maximização da “renda negativa”:

$$F^*(f^*) = \left\{ F \mid \bar{R} = \max_F \bar{R}(F, f) \right\} \dots\dots\dots \text{eq.(94)}$$

Supondo que a Função Utilidade do Consumidor é, tal como a do Produtor, a exponencial negativa, as derivadas do equivalente certo do custo médio da energia em relação ao nível de contratação e em relação ao preço futuro, são iguais às do produtor, alterando somente a expressão das derivadas parciais de cada termo:

$$\partial R_t / \partial F = \left(\partial R_t / \partial \bar{u}_t \right) \cdot E \left\{ \left(\partial \bar{u}_t / \partial \Delta \tilde{R}_t \right) \cdot \left(\partial \Delta \tilde{R}_t / \partial F \right) \right\} \dots\dots\dots \text{eq.(95)}$$

$$\partial R_t / \partial f = \left(\partial R_t / \partial \bar{u}_t \right) \cdot E \left\{ \left(\partial \bar{u}_t / \partial \Delta \tilde{R}_t \right) \cdot \left(\partial \Delta \tilde{R}_t / \partial f \right) \right\} \dots\dots\dots \text{eq.(96)}$$

(i) $\partial R_t / \partial \bar{u}_t = 1 / (\lambda \bar{u}_t) \dots\dots\dots \text{eq.(97)}$

(ii) $\partial \bar{u}_t / \partial \Delta \tilde{R}_t = \lambda \exp(-\lambda \Delta \tilde{R}_t) = -\lambda U(\Delta \tilde{R}_t) \dots\dots\dots \text{eq.(98)}$

(iii) $\partial \Delta \tilde{R}_t / \partial F = -(f - \tilde{s}_t) \cdot \Delta T$ eq.(99)

(iv) $\partial \Delta \tilde{R}_t / \partial f = -F \cdot \Delta T$ eq.(100)

As figuras abaixo mostram o equivalente certo do custo médio da energia em função do nível de contratação e do preço futuro e a curva da função de demanda (F>0) e oferta (F<0) por contratos por um consumidor marginal. Estas curvas foram obtidas com o grau de aversão ao risco (λ), que são iguais ao menor (6.791), intermediário (24.160) e maior (49.642) aplicados aos produtores.

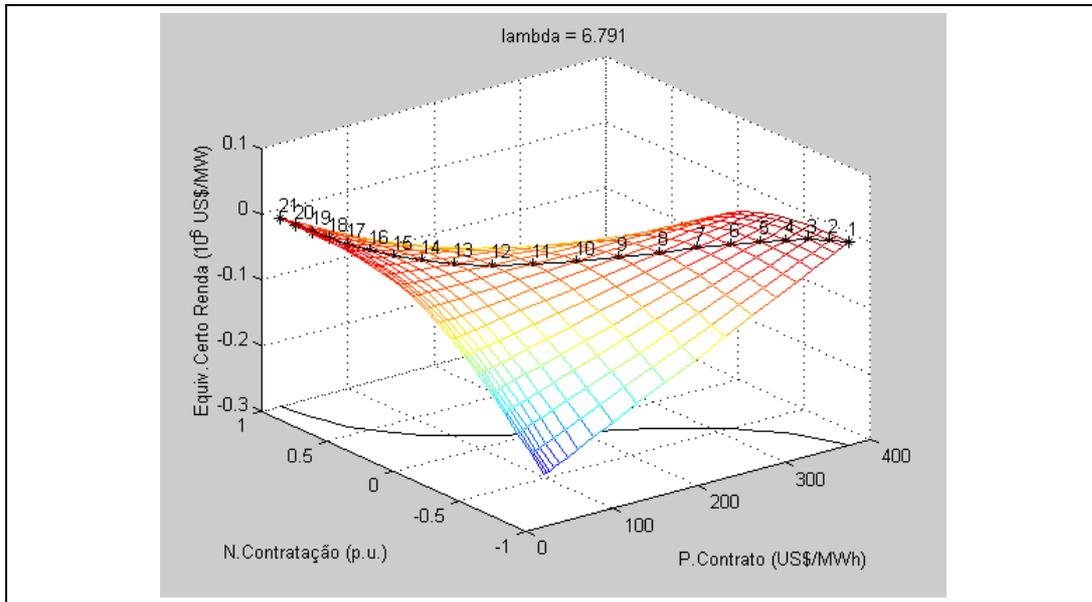


Figura 49 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Consumidor - $\lambda = 6.791$

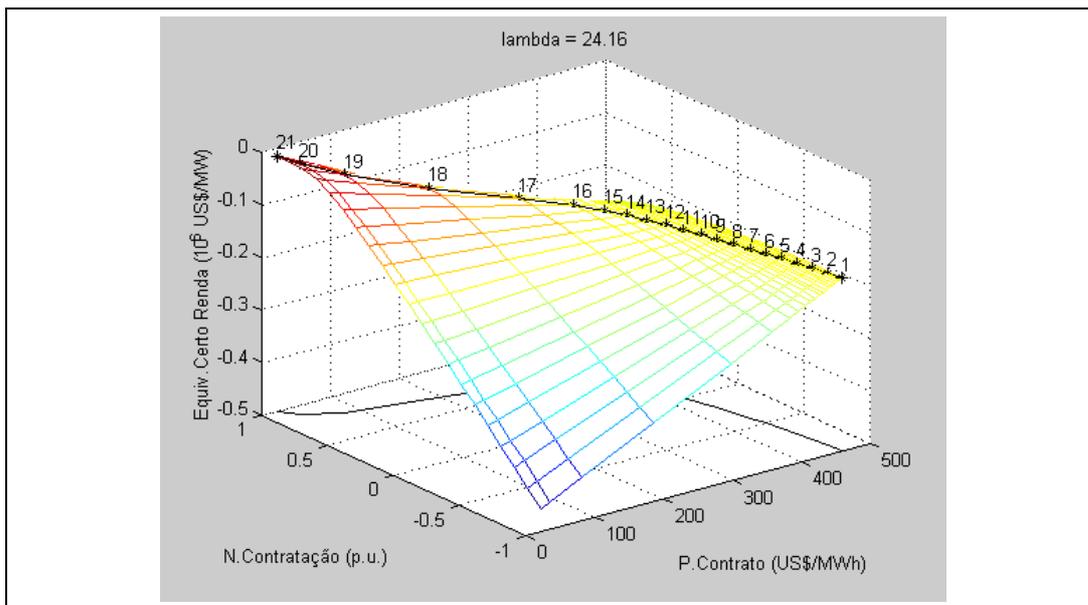


Figura 50 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Consumidor - $\lambda = 24.160$

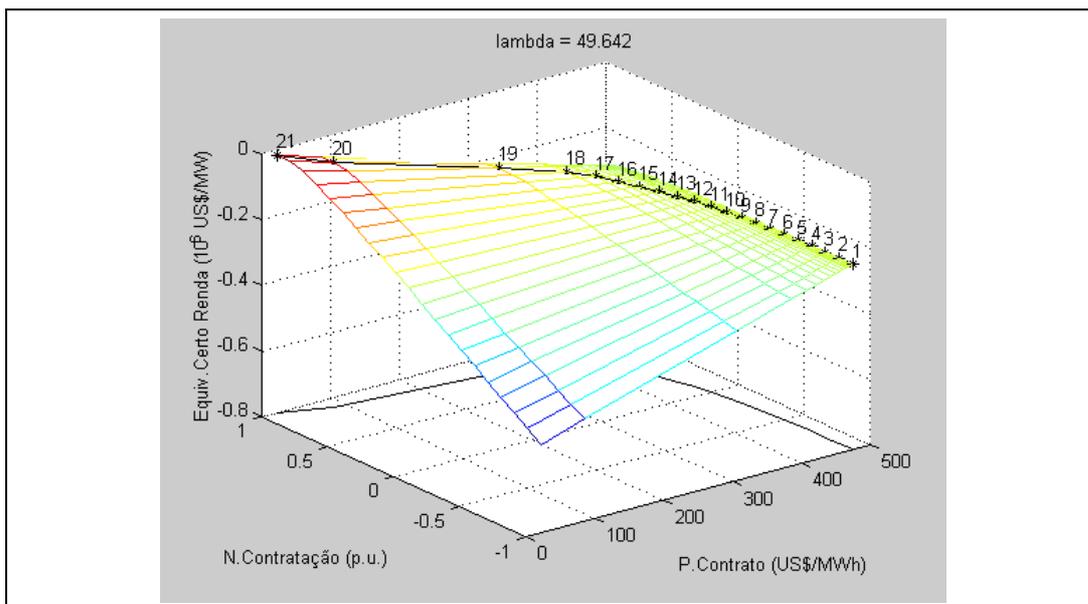


Figura 51 – Curva de Oferta e Demanda por Contratos pelo Consumidor - $\lambda = 49.642$

Para consumidores com baixa aversão ao risco, a curva de oferta e demanda por contratos é convexa demonstrando baixo interesse na contratação. À medida que cresce a aversão ao risco, a curva de oferta e demanda por contratos se torna mais côncava, indicando alto interesse na contratação.

5.3.3 EQUILÍBRIO DE OFERTA E PROCURA POR CONTRATOS DE ENERGIA

A figura abaixo mostra as curvas de oferta dos produtores e demanda dos consumidores por contratos. As curvas de oferta são crescentes com o preço e as de demanda são decrescentes. Quanto maior a aversão ao risco do produtor, mais baixa a sua curva de oferta, indicando que ele requer preços maiores para ofertar uma determinada quantidade e quanto maior a aversão ao risco do consumidor, mais alta a sua curva de oferta, indicando que ele aceita pagar um preço maior por uma determinada quantidade. Os pontos marcam os possíveis pontos de equilíbrio.

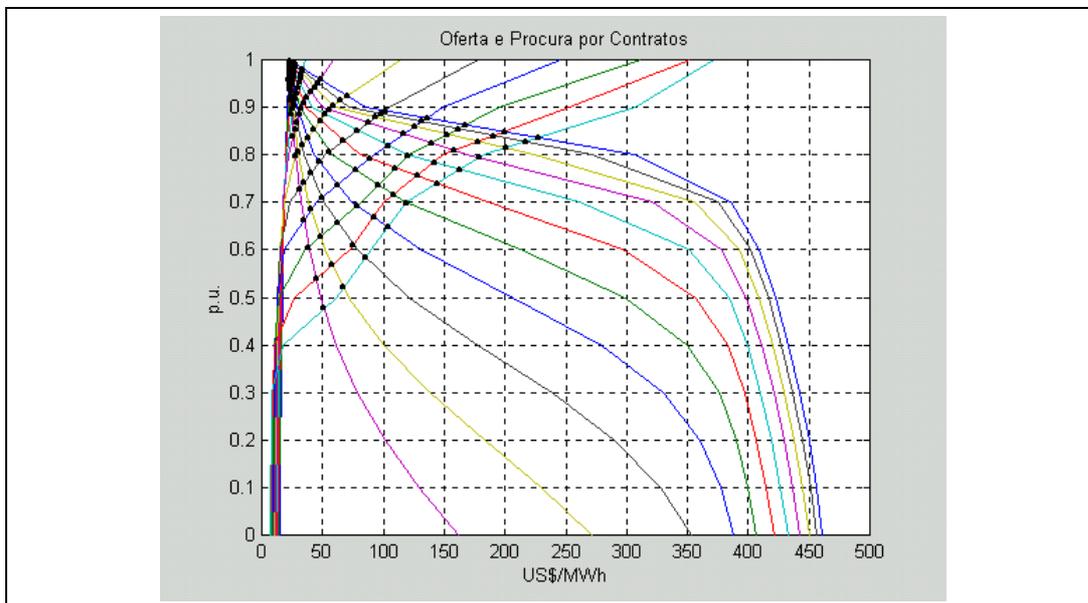


Figura 52 – Oferta e Procura por Contratos

Como se pode observar na figura acima, o preço e o nível de contratação que equilibram a oferta e a demanda (cruzamento das curvas) são função do grau de aversão ao risco do produtor e do consumidor. As figuras abaixo mostram o preço e o nível de contratação de equilíbrio, em função do grau de aversão ao risco do produtor e do consumidor.

Podemos observar que o preço de equilíbrio é crescente com o grau de aversão ao risco, tanto do produtor, como do consumidor, mas o preço de equilíbrio é mais influenciado pelo grau de aversão ao risco do produtor do que pelo do consumidor, pois o preço varia mais com a aversão ao risco do produtor do que com o do consumidor.

Com relação ao nível de contratação, observamos que ele decai com o grau de aversão ao risco do produtor e aumenta com o do consumidor.

O decremento da contratação do produtor é aparentemente contraditório, pois, a princípio, se esperaria que o nível de contratação aumentasse com o grau de aversão ao risco. Esse comportamento aparentemente contraditório do produtor é devido à relação entre o grau de aversão ao risco e a participação da geração hidrelétrica no portfólio do produtor, pois a produção hidrelétrica é negativamente correlacionada com o preço spot e, portanto, se o produtor estiver muito contratado, ele fica descoberto (produção menor que a contratação), precisando comprar energia no mercado à vista para cumprir seu contrato, exatamente quando o preço spot está alto. Assim, quanto mais hidrelétrico for o produtor, maior será a margem (capacidade de produção descontratada) que ele deverá ter.

O comportamento inverso do produtor (redução da oferta) e do consumidor (incremento da demanda) com o incremento do grau de aversão ao risco, provoca a forte elevação do preço de equilíbrio com a aversão ao risco. Também podemos observar que a contratação acima de 95% da capacidade de produção só é ofertada por produtores com baixa aversão ao risco (predominantemente termelétricos).

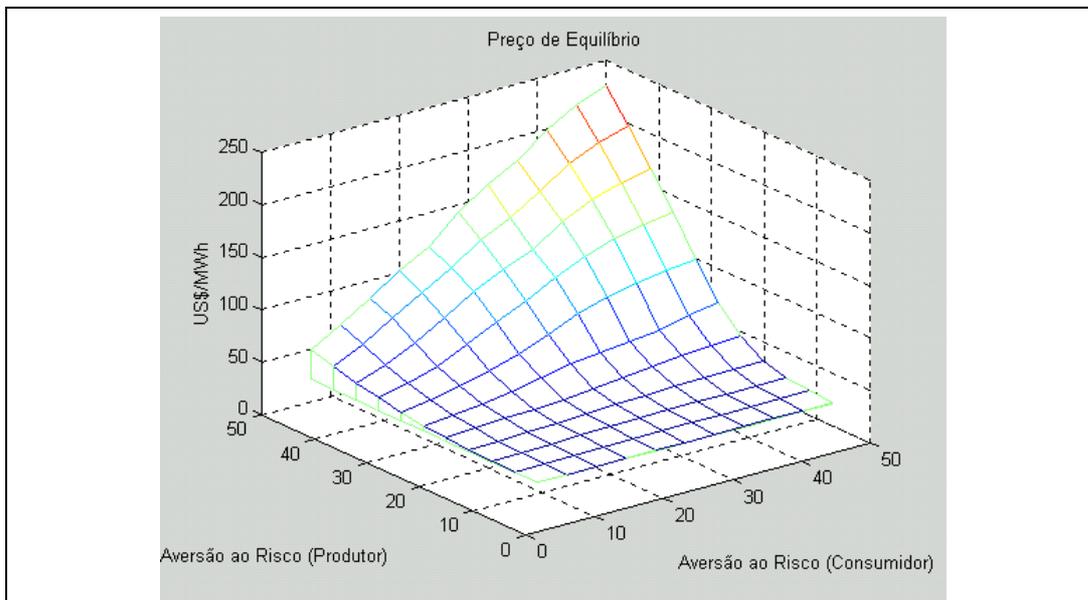


Figura 53 – Preço de Equilíbrio x Aversão ao Risco

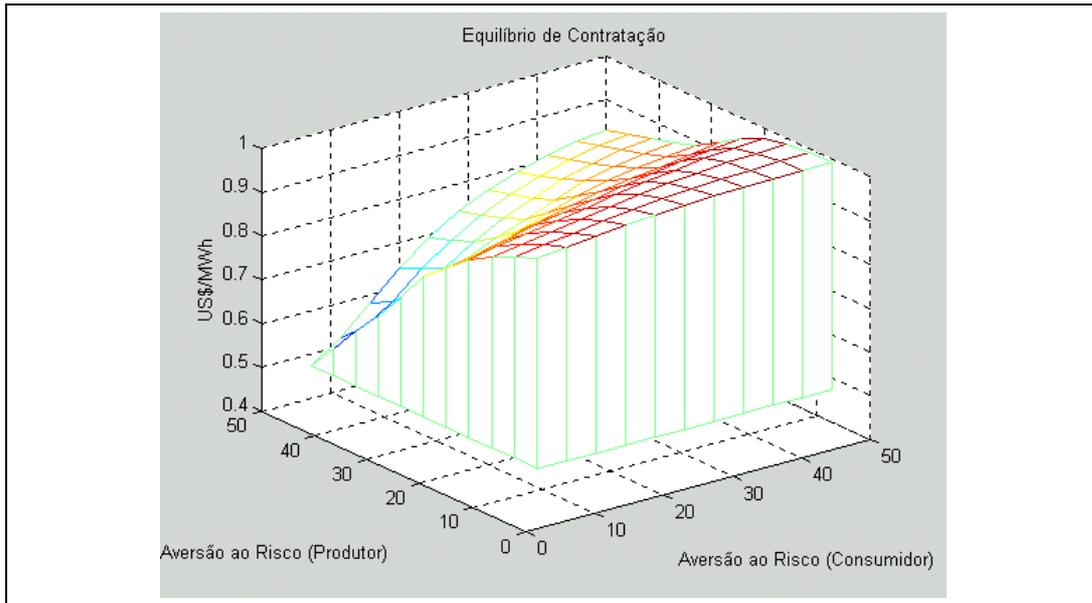


Figura 54 – Nível de Contratação x Aversão ao Risco

A elasticidade preço “ε”, definida na equação abaixo, indica o quanto o produtor / consumidor é sensível ao preço e, portanto, indica a robustez quanto à manipulação do mercado, pois quanto maior a elasticidade preço de um agente (produtor / consumidor), menor a possibilidade de manipulação do mercado pelo outro agente (consumidor / produtor).

$$\epsilon = \left| \frac{\partial F/F}{\partial f/f} \right| \dots\dots\dots \text{eq.(101)}$$

As figuras abaixo mostram a elasticidade preço do produtor e a do consumidor em função do grau de aversão ao risco e do nível de contratação. As figuras mostram que tanto a elasticidade preço do produtor, como a do consumidor, caem rapidamente para níveis muito baixos, com a elevação do nível de contratação, sendo <2 para contratação acima de 80% da capacidade / demanda e <1 para contratação acima de 90%. Também podemos observar que enquanto a elasticidade preço do produtor decai com o incremento da aversão ao risco, a do consumidor aumenta, mas este efeito só é notável nos níveis baixos de contratação.

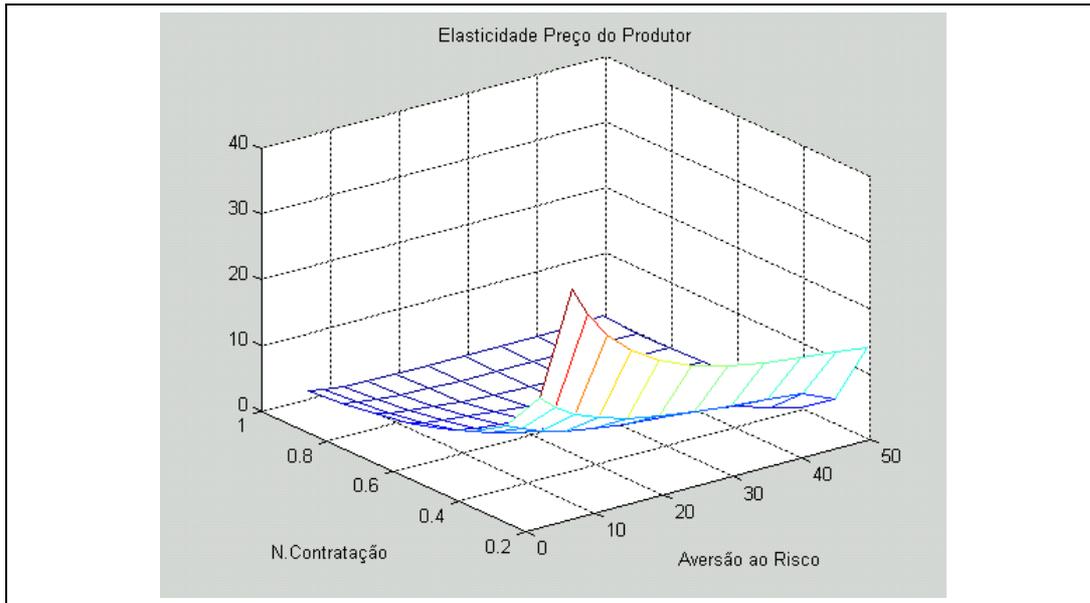


Figura 55 – Elasticidade Preço do Produtor

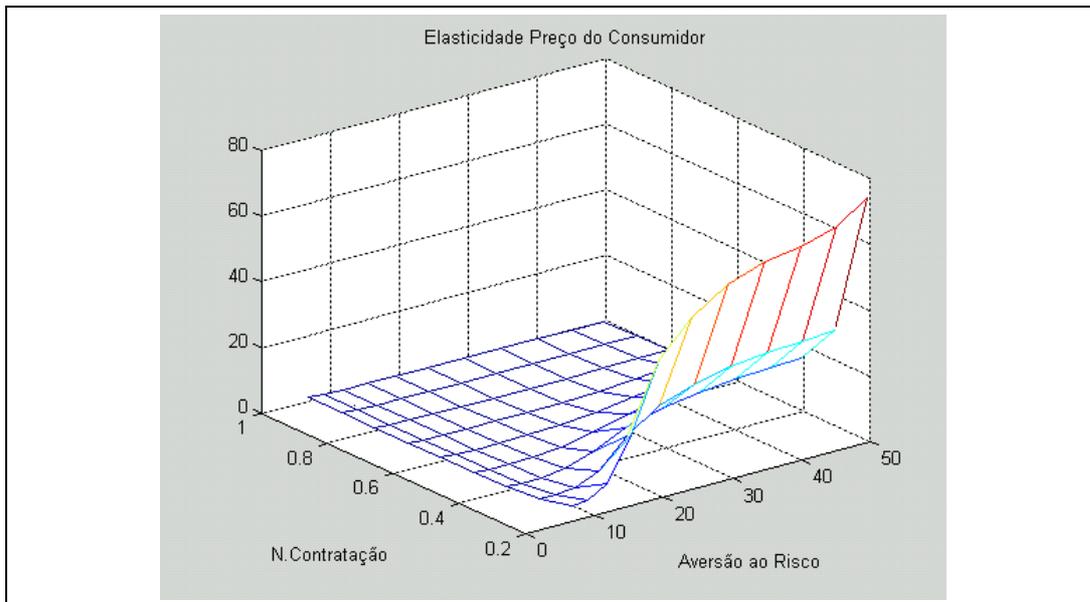


Figura 56 – Elasticidade Preço do Consumidor