

4 Leilões de Energia Eólica no Brasil: Análise dos Resultados com Base na Teoria de Jogos com Opções Reais

Esse Capítulo analisa a decisão de entrar no segmento eólico à luz da Teoria de Jogos com Opções Reais e, mais especificamente, baseando-se nos trabalhos de Huisman (2001) e Pawlina & Kort (2006) para duopólios assimétricos e estendendo-os de modo a considerar três assimetrias. Análises de sensibilidade do modelo aos parâmetros procuram identificar as situações-limite em que se passa a favorecer a entrada no mercado de empresas e projetos menos viáveis economicamente.

Conclui-se que uma pequena discrepância nas crenças dos investidores quanto ao futuro do mercado já pode ter sido suficiente para deixar empresas mais viáveis (que precisariam de menor investimento, por exemplo) de fora do leilão. O risco de preempção de empresas menos rentáveis poderia ser minimizado se o governo tivesse tornado as perspectivas futuras do setor mais claras.

Além disso, conclui-se que quando as empresas são menos informadas sobre a visão de seus concorrentes quanto ao futuro, assumindo que suas próprias visões são também as de seus concorrentes, o risco de preempção de empresas menos viáveis cai, favorecendo uma indústria eólica mais forte no Brasil. No entanto, isto se dá a preços de energia um pouco mais elevados para os consumidores.

Finalmente, o modelo demonstra que a melhor alternativa para reduzir o preço da energia para os consumidores seria ter investidores com horizonte de investimento de longuíssimo prazo, algo factível quando há sinais críveis de que o governo brasileiro tem também um compromisso de longo prazo com o segmento de geração eólica.

4.1. Introdução

Iniciado em 2004, o programa brasileiro para energia eólica ainda está em sua curva de aprendizagem. Uma mudança significativa ocorreu em 2009/2010, com a instituição de leilões com regras específicas para energia eólica e a divulgação do PDEE 2010, o qual sinaliza uma intenção de contratação, por parte do governo, de cerca de novos 400MW/ano de energia eólica até 2019. No entanto, persiste no mercado o sentimento de incerteza com relação ao futuro do segmento eólico, dado que a estratégia governamental para o segmento pode novamente ser revista à luz de novas informações e da evolução da oferta/demanda no Brasil, de modo a atender as duas principais metas da política energética brasileira: modicidade tarifária e confiabilidade energética.

Assim, este Capítulo assume que, embora uma parte significativa dos empreendedores acredite que o sistema de leilões e as atuais regras de contratação de energia eólica permanecerão por algum tempo²⁷, há ainda grande incerteza quanto ao comportamento futuro dos preços e dos custos da geração eólica e, conseqüentemente, quanto ao valor de projetos eólicos.

Empreendedores interessados em entrar no segmento eólico brasileiro estão, portanto, colocados diante do seguinte dilema: é melhor entrar já, ou esperar por uma melhor definição do mercado? Em outras palavras, a realização atual do mercado já é suficiente para que valha a pena entrar no segmento de eólicas, ou é melhor aguardar por um mercado mais favorável? Mas, enquanto se espera, competidores entram, tendendo a ocupar parcelas de mercado e deprimir preços e, portanto, o próprio valor de novos projetos eólicos, o que dificulta ainda mais a decisão.

O resultado do leilão 2009 mostra que os empreendedores responderam a essas questões de forma às vezes surpreendente: alguns projetos em locais de

²⁷ essa premissa é factível, embora reconheçamos que alguns investidores, especialmente aqueles que observaram o insucesso do sistema de leilões na China e Reino Unido, talvez tenham considerado que essa experiência poderia se repetir. Naqueles casos, o sistema de leilões foi substituído por outros sistemas mais protetores, o que poderia influenciar investidores a postergarem investimentos no Brasil, na esperança de regras/preços melhores. Por outro lado, investidores que acreditam que novos leilões não aconteceriam logo, tenderiam a antecipar investimentos.

menor potencial eólico ganharam o leilão, em detrimento de outros projetos mais viáveis; algumas empresas com experiência internacional em eólicas ficaram de fora, enquanto outras, novatas, venderam energia no leilão. Considerando-se que os projetos contratados no leilão 2009 são em princípio menos viáveis que os parques PROINFA, dados os preços de energia equivalentes a quase a metade dos preços PROINFA²⁸ e à introdução de penalidades para os desvios de geração, e considerando-se as dificuldades já mencionadas de implantação dos próprios parques eólicos PROINFA, resta a dúvida se os bons resultados colhidos pelo governo no leilão 2009 serão, de fato, materializados. Assim, este Capítulo tem o desafio de responder às seguintes perguntas de pesquisa:

Até que ponto o cenário incerto e as diferentes visões sobre o futuro podem ter favorecido a entrada de empresas eólicas menos viáveis no mercado, em detrimento de outras empresas com maiores chances de, de fato, concretizarem seus projetos?

A política atual garante menor preço para os consumidores de energia?

Ao analisar este problema, optou-se por considerar que, ao decidir entrar no mercado eólico, um investidor/empresa está na verdade tomando uma decisão de longo prazo: a empresa paulatinamente construirá um portfólio de parques-padrão que venderão energia eólica também nas próximas contratações. Tal premissa é consistente com o que se observa em diversos competidores do leilão, que já detêm um portfólio de parques em estágio adiantado de licenciamento ambiental, com medições anemométricas em andamento, mas que, dadas as limitações para captar capital, vão construindo aos poucos sua capacidade de geração. Em um cenário determinístico, o valor da empresa seria, portanto, o somatório do valor presente líquido desses projetos, agregados ao longo do tempo. Na notação aqui

²⁸ O preço dos equipamentos caiu desde 2008 devido à crise financeira internacional, permitindo preços mais baixos de energia nos leilões; cerca de 2/3 dos parques PROINFA vêm sendo construídos em 2009/2010, já com preços mais baixos de equipamento, porém novas prorrogações vêm sendo solicitadas.

adotada, o *VPL* de cada novo projeto agregado ao portfólio da empresa representa o Fluxo de Valor da Empresa, a partir de agora denominado *FVE*.

Analisa-se então a decisão de entrar no segmento eólico como se houvesse um duopólio, composto por dois grupos diferentes de competidores, entre os que inicialmente se registraram para o leilão ou, para simplificar, composto por duas empresas características que representem esses dois grupos de competidores. A primeira empresa tem um *FVE* menor do que o da segunda, por um ou mais dos seguintes motivos: menor capacidade de levantar capital no mercado; menor capacidade de negociar incentivos fiscais; maior custo do equipamento dado não ser um grande comprador; seus projetos ficam em local de ventos mais fracos, gerando com menor fator de capacidade²⁹ e, portanto, necessitando comprar mais turbinas; o projeto fica longe das linhas de transmissão. Além disso, o investimento para se qualificar a entrar no mercado, relacionados à constituição da empresa, contratação de pessoal, novas medições no *site* dos projetos, é mais alto, por motivos semelhantes aos descritos anteriormente. Por outro lado, esta empresa tem um maior senso de urgência para entrar no mercado, por acreditar, por exemplo, que o segmento tende a sofrer maior competição e pressão de preços e custos, de modo que novos projetos eólicos de sua carteira tendem a cair em valor, e/ou não acredita que há incerteza significativa quanto à variação de valor de seus projetos eólicos no futuro.

A segunda empresa necessita tanto gastar menos que a primeira para se qualificar a entrar no mercado, como também tem um fluxo de valor (*FVE*) maior. No entanto, ela acredita que os preços de energia eólica serão mais voláteis. Esta empresa também julga que a pressão exagerada por preços no primeiro leilão pode não se repetir no futuro e que o preço de equipamentos tende a cair, estando em geral mais otimista com relação à evolução do valor dos parques eólicos que compõem sua carteira de projetos.

Em resumo, as duas empresas se diferenciam por serem assimétricas com relação ao investimento necessário para entrar no mercado, quanto ao seu *FVE*, e quanto à visão de futuro. A visão de futuro está refletida no modelo via o processo estocástico adotado por cada empresa para descrever o seu *FVE*, no futuro. Desta

²⁹ Fator de capacidade= energia gerada/capacidade instalada. É usual eólicas brasileiras apresentarem fator de capacidade bruta da ordem de 35-48%.

forma, a análise identificará, com base na Teoria de Jogos com Opções Reais, para que níveis de assimetria a empresa menos viável deste duopólio se torna a primeira a entrar no mercado e, ainda, em que condições o preço da energia contratada seria o mais baixo para o consumidor.

Este Capítulo está organizado da seguinte maneira: a Seção 4.2 apresenta a revisão da literatura de Opções Reais e de Jogos com Opções Reais. A Seção 4.3 justifica as assimetrias utilizadas no modelo. A Seção 4.4 detalha o modelo de duopólio com três assimetrias, incluindo o desenvolvimento das funções de valor e das fronteiras de preço (gatilhos) que estimulam o investimento, enquanto a Seção 4.5 detalha como o modelo foi aplicado e discute os resultados, quando submetido a análises de sensibilidade aos parâmetros. A Seção 4.6 apresenta as conclusões e recomendações para o segmento de energia eólica no Brasil.

4.2. Revisão de Literatura

4.2.1. Opções Reais

Tradicionalmente, a teoria que ampara a decisão de investir é baseada nos conceitos de Marshall: investir quando o preço exceder o custo de produção e a remuneração pelo capital investido. O método do Fluxo de Caixa Descontado para avaliação de empresas e projetos adota o mesmo preceito e tem sido o critério de decisão mais utilizado, há décadas, desde sua introdução na primeira metade do século XX. No entanto, nesse racional está implícita uma miopia, dado que, baseando-se em valores esperados, parte-se do princípio que tais valores prevalecerão no futuro, a despeito da volatilidade inerente em um ou vários dos componentes que influenciam o fluxo de caixa do projeto/empresa.

Uma forma de avaliar o problema de forma mais coerente com a realidade é assumir que a empresa e os agentes econômicos têm expectativas racionais sobre como as incertezas se comportarão, probabilisticamente (DIXIT&PINDYCK, 1994, p.219). Análises de sensibilidade e de cenários, assim como simulações a exemplo das feitas no Capítulo 3, são uma alternativa para depreender o impacto da incerteza sobre o valor de projetos. Entretanto, nenhuma dessas alternativas

permite, em um mesmo arcabouço e de uma forma ainda consistente com a teoria financeira de que quanto maior o risco maior deve ser o retorno, considerar que algumas decisões podem ser tomadas na medida em que os cenários vão se revelando, assim como a probabilidade de que tais cenários aconteçam. À medida que novas decisões são tomadas, o risco pode estar sendo alterado; por outro lado, havendo flexibilidade para tomar as melhores decisões, um projeto naturalmente tem maior valor. Como apreçar este valor?

Um caminho natural foi o de usar a Teoria de Opções Financeiras, baseada nos trabalhos seminais de Black & Scholes (1973) e Merton (1973), como inspiração para a avaliação de projetos sujeitos a incertezas e com opções (flexibilidades) embutidas.

Tourinho (1979) foi o primeiro trabalho a aplicar a Teoria de Opções a projetos reais de exploração de recursos naturais, iniciando o que se passou a chamar de Teoria das Opções Reais (TOR). Na mesma época, Cox, Ross & Rubenstein (1979) desenvolveram o método binomial, que permitiu a solução de opções americanas³⁰ finitas, rompendo assim os limites da solução de Black & Scholes & Merton, restrita a opções européias, e também os limites de soluções analíticas, em tempo contínuo, em que a opção deve ter prazo infinito. Como as opções embutidas em projetos reais muitas vezes se caracterizam como opções americanas e, ainda, compostas, o método binomial abriu os caminhos para soluções discretas e para uma aplicação mais disseminada da TOR, amparada ainda nos trabalhos de Copeland & Antikarov (2003) e Brandão, Hahn & Dyer (2005). Tais trabalhos resolvem o problema via discretização do processo estocástico que descreve a variável de estado (a incerteza) subjacente à opção.

Métodos numéricos tradicionais (elementos finitos, diferenças finitas) também foram usados para resolver problemas desse tipo, porém via a discretização das equações diferenciais que descrevem o valor da opção. Outros métodos numéricos se seguiram para resolver problemas complexos, por exemplo aqueles que envolvem opções com diversas variáveis de estado (opções arco-íris),

³⁰ Opções americanas podem ser exercidas a qualquer tempo, durante a vida da opção. Opções européias só podem ser exercidas no seu vencimento.

entre os quais o *Least Square Method* (LSM) de Longstaff&Schwartz (2001) e o *Bootstrapping Real Options*, método este aplicado por Meade (2008).

Entre as diversas opções que podem estar embutidas em uma decisão de investimento, há a própria opção de esperar para investir, algo que se aproxima do problema que se quer resolver nesta tese: empresas têm a opção, em princípio perpétua (ou longa o suficiente para ser considerada perpétua), de investir em parques eólicos no Brasil, restando decidir o momento de fazê-lo. Tratar o problema como uma opção perpétua é aceitável e também simplifica o problema a ponto de se poderem usar os modelos tradicionais em tempo contínuo de apreçamento de opções, os quais permitem soluções analíticas (DIXIT & PINDYCK, 1994). A decisão sobre quando se deve parar de esperar e investir equivale, então, à decisão de quando se deve exercer uma *call*³¹ americana perpétua.

Ao se exercer a opção de investir, abdica-se da oportunidade de esperar por novas informações que poderiam afetar a viabilidade do projeto. Assim, o valor esperado das receitas do projeto deveria ser suficiente não só para cobrir o investimento necessário - critério este adotado pelo método do Fluxo de Caixa Descontado -, mas também para cobrir o custo oportunidade representado pelo valor da opção de esperar. Afinal, investir significa abdicar da opção.

O próprio trabalho seminal de Tourinho (1979) envolveu uma opção de esperar para investir, assim como os trabalhos de McDonald & Siegel (1986) e Dixit & Pindyck (1994), estes últimos as principais referências no assunto, até hoje, quando se trata de modelos em tempo contínuo. A opção de esperar para investir é modelada ou por Programação Dinâmica (Anexo 4.3), ou pelo método de Ativos Contingentes, identificando-se o ponto em que o valor da opção viva finalmente é equivalente ao valor esperado do projeto. A Figura 4.1 ilustra as diferentes decisões preconizadas pelos métodos do FCD e TOR para um investimento e também ilustra que quanto maior a volatilidade, maior o valor da espera e, portanto, mais alta deve ser a realização da variável de estado para que se tome a decisão de investir (gatilho).

³¹ *Call* = opção de comprar um ativo que vale S a um preço X = opção de investir em um projeto que vale VP por um preço I.

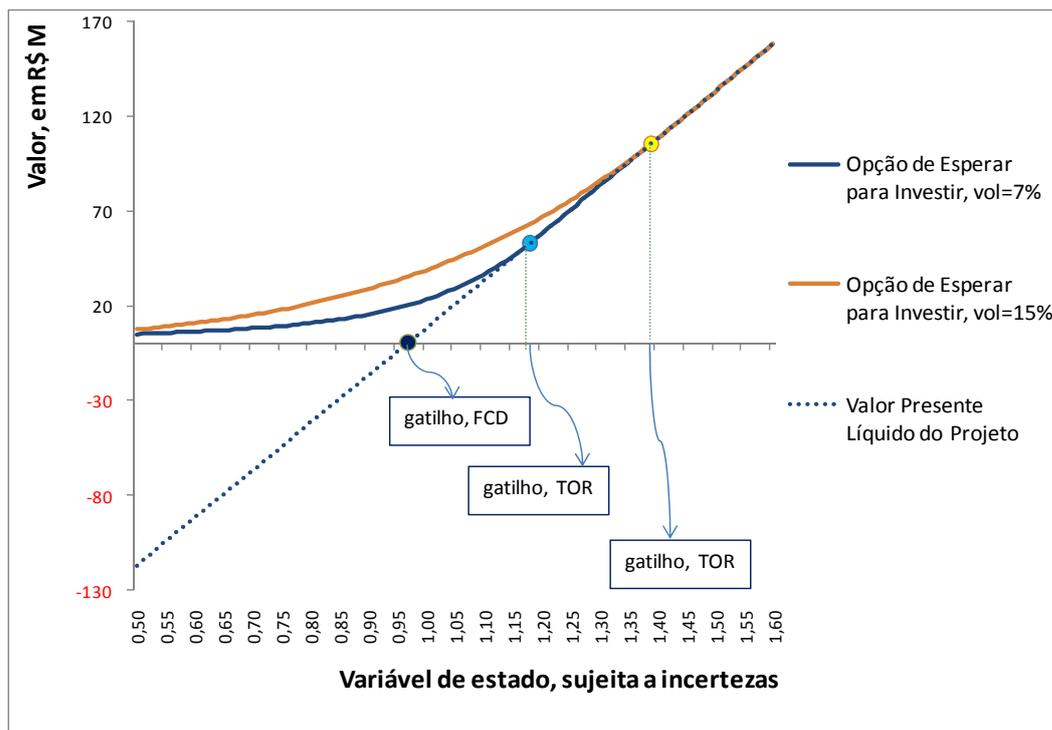


Figura 4.1: Momento de Investir, Conforme Recomendado pelo Método do FCD (VPL=0) e pela TOR (quando a incerteza é expressa em termos das volatilidades, por exemplo: $\sigma=7\%$ e $\sigma=15\%$).

Como lembram Dixit & Pindyck (1994, p.6), os modelos envolvendo opções ajudam a explicar porque as decisões de investimento observadas no mundo real muitas vezes diferem do que seria recomendado pelos modelos tradicionais de apreçamento de ativos, ensinados nas escolas de negócios.

Finalmente, vale mencionar alguns trabalhos que já avaliaram projetos eólicos usando a TOR: Scatista & Mennel (2009) comparam como a decisão de investir é alterada pela mudança na política de incentivos ao setor em alguns países da Europa. Venetsanosa, Angelopoulou & Tsoutsosb (2002) e Méndez, Goyanes & Lamothe (2009) avaliam a flexibilidade de abandonar, diferir ou expandir projetos eólicos, ao longo de seu desenvolvimento, também na Europa. Honda, Goto & Ohno (2005) avaliam os benefícios da flexibilidade operacional de plantas eólicas híbridas no Japão, associadas com geradores a diesel.

4.2.2. Teoria dos Jogos

Esta Seção tem por objetivo apresentar um histórico resumido do desenvolvimento da Teoria dos Jogos, chamando a atenção para alguns conceitos-base que serão mencionados nas seções seguintes. A evolução histórica aqui apresentada foi baseada em Smit&Trigeorgis (2004), Dias (2005), Mas-Collel, Whiston & Green (1995), Myerson (1999).

Considera-se que o arcabouço formal da Teoria dos Jogos se iniciou de fato nos trabalhos de Cournot (1838), considerado o fundador da teoria de oligopólios, e que apresenta uma solução de equilíbrio para duopólios que pode ser considerada uma versão restrita do Equilíbrio de Nash. Os trabalhos de Bertrand (1883), Borel (1921) e Neumann & Morgenstern³²(1944) representaram uma importante evolução nesta linha teórica e pavimentaram o caminho para que Nash (1950a,1950b) reestruturasse toda a teoria existente até então, separando os elementos e rearranjando-os na forma de uma teoria geral, unificada e consistente (Myerson, 1999, p.1073-77).

Tendo formulado a definição geral de equilíbrio não cooperativo e tendo provado a existência de equilíbrio em jogos não cooperativos, Nash (1951) refletiu sobre problemas como o Dilema dos Prisioneiros e outros, que ilustram como analisar qualquer jogo, conflituoso ou cooperativo, usando o conceito de equilíbrio não cooperativo.

Nash (1951) formalmente definiu o equilíbrio em jogos não cooperativos como um conjunto de estratégias, uma para cada jogador, de tal modo que a estratégia adotada por cada jogador maximiza sua utilidade, considerando-se as estratégias dos demais jogadores. Se pudermos prever o comportamento de todos os jogadores, então nossa previsão deve ser um equilíbrio de Nash, caso contrário ela contrariaria a premissa de comportamento racional individual. Um conjunto de estratégias é Equilíbrio de Nash quando nenhum jogador tem incentivo para desviar desta solução; trata-se da melhor alternativa, diante das respostas possíveis dos demais jogadores. Nash também provou que se podem relaxar algumas premissas usadas em outros trabalhos, tal como a de o jogo ser de soma-zero, sem

³² Von Neumann publicou uma série de artigos nos anos 1920 sobre o tema, e que serviram de base para o livro seminal acima referido.

perda de generalidade e, finalmente, deu os primeiros passos para que a Teoria dos Jogos tivesse maior aplicação prática.

Selten (1975) demonstrou que o equilíbrio de Nash pode gerar muitos equilíbrios, alguns inclusive irracionais quando o jogo envolve passos sequenciais, e refinou a análise via o conceito de equilíbrio perfeito em subjogos. Kreps & Wilson (1982) também deram importantes contribuições nesse ponto da teoria.

Harsanyi (1967, 1968) introduziu o conceito de jogos completos e apresentou solução para jogos incompletos, conhecida como jogos Bayesianos, os quais serão melhor definidos na Seção 4.2.2.1. Isso permitiu analisar problemas em que os jogadores têm informações assimétricas e os possíveis cenários são analisados com base em probabilidades de ocorrência, baseadas na experiência passada – e privada - dos jogadores. O conceito de Schelling (1960) de ponto-focal complementa a contribuição de Harsanyi, pois ele alerta que em qualquer jogo com múltiplos equilíbrios, qualquer fator de conhecimento comum que atraia a atenção dos jogadores pode influenciar nas suas estratégias, semelhante a uma profecia auto-realizável. Em outras palavras, Schelling alerta que o comportamento dos jogadores pode depender de informações, percepções culturais, tradições, que são de conhecimento público.

Myerson e autores como Hurwicz e Maskin lançaram as bases da teoria para mecanismos de incentivo (*mechanism design theory*). Vickrey (1961) deu importantes contribuições no desenho de incentivos em casos de informação assimétrica e à teoria dos leilões.

4.2.2.1. Caracterização do Jogo

Smit & Trigeorgis (2004, p.171) lembram que jogos da vida real envolvem muitos jogadores e uma infinidade de alternativas e de resultados possíveis; no entanto, empresas de uma mesma indústria conseguem em geral reduzir o leque e estimar razoavelmente bem as opções, os custos e os resultados de seus competidores. Assim, usar o arcabouço da Teoria dos Jogos permite transformar um problema estratégico complexo em uma estrutura de análise composta de quatro dimensões: a identificação dos jogadores, o momento e a seqüência em que

os jogadores têm que tomar decisões, as ações e informações que na prática estão disponíveis para cada jogador, o resultado financeiro que cada jogador pode auferir de cada uma das ações/conjunto de ações.

Entre os jogadores, estão os tomadores de decisão, mas também a Natureza, que escolhe randomicamente alguns estados do mercado ou dos outros competidores, os quais não são de conhecimento do jogador nos jogos de informação incompleta. Com relação ao momento das decisões, os jogos podem ser simultâneos, onde os jogadores decidem ao mesmo tempo com base no que eles esperam que será a melhor escolha adotada do oponente, ou seqüenciais, onde a decisão se dá após observar o movimento do oponente. Na vida prática, jogos envolvem uma combinação de jogos simultâneos e seqüenciais: investir é uma decisão seqüencial, embora sujeita ao risco de um ou mais jogadores decidirem investir simultaneamente; instaladas as capacidades de produção, o jogo de definição de preços pode se tornar simultâneo, por exemplo.

No que se refere às informações disponíveis para cada jogador, em cada momento de decisão, um jogo é de **informação perfeita** se todos os jogadores conhecem as decisões dos outros jogadores até aquele ponto. Um jogo é de **informação completa** se não só todas as decisões são conhecidas, mas também os resultados financeiros de cada decisão, para cada jogador.

Quando um jogo é de **informação incompleta**, faz-se necessário considerar as crenças de um jogador sobre os *payoffs* e correspondentes ações dos outros jogadores, que por sua vez também terão suas crenças sobre os resultados e comportamentos de seus oponentes (MAS-COLLEL, WHINSTON & GREEN, 1995). Harsanyi (1967, 1968) apresentou uma solução que permite transformar jogos de informação incompleta em jogos de informação completa, porém imperfeita: a Natureza faz o primeiro lance randomicamente, definindo qual o tipo do jogador *i* (ex.: alto custo ou baixo custo e, portanto, se o jogador terá o resultado *x* ou *y*). Adota-se a premissa de que todos os jogadores conhecem os resultados que cada jogador auferirá, conforme o seu tipo.

Uma solução é Equilíbrio Bayesiano de Nash se, para os conjuntos de estratégias puras de todos os jogadores, não há incentivo para desviar, tomando como base para esta decisão os valores esperados condicionais (bayesianos, portanto).

4.2.2.2.

Solução do Jogo

Smit & Trigeorgis (2004) apresentam um roteiro prático, baseado em Dixit & Nalebuff (1991), para encontrar as decisões ótimas e as estratégias de equilíbrio de um jogo:

- a) identificar, caso existam, as estratégias dominantes (aquelas em que o jogador está sempre melhor do que nas demais, não importando qual a ação tomada pelo oponente). Embora atraente, essas soluções estritamente dominantes são raras (MAS-COLLEL et al, 1995);
- b) eliminar sucessivamente as estratégias estritamente dominadas, isto é, para as quais há outra estratégia que é sempre melhor;
- c) nem sempre é possível identificar uma estratégia dominante ou eliminar as estratégias dominadas, mas a análise nó a nó dos resultados e a procura em cada um desses nós dos pontos de equilíbrio (Equilíbrios de Nash, EN), ajudam a identificar a melhor resposta dos jogadores.
- d) nem sempre há EN em estratégias puras, mas pode haver equilíbrio em estratégias mistas³³
- e) em jogos seqüenciais/dinâmicos, resolver o jogo via otimização de trás para a frente (*backward induction*). Em jogos finitos de informação perfeita, há equilíbrios de Nash em estratégias puras que podem ser obtidos via *backward induction* e, se nenhum jogador tem resultados iguais em dois nós terminais, então há um único Equilíbrio de Nash (teorema de Zermelo³⁴). No entanto, em jogos dinâmicos reais é usual encontrar múltiplos Equilíbrios de Nash e o conceito, portanto, não é capaz de, sozinho, eliminar estratégias não-críveis. Selten (1975) resolveu esta questão introduzindo o conceito de Equilíbrio de Nash

³³ em uma estratégia pura, define-se completamente como o jogador vai jogar em cada situação que lhe for apresentada. Em estratégias mistas, são atribuídas probabilidades de que o jogador adote cada uma das estratégias puras, em cada ponto de decisão. Se há estratégias puras, há infinitas estratégias mistas, entre as quais pode(m)-se encontrar aquela(s) que otimiza(m) o resultado esperado.

³⁴ MAS-COLLEL et al (1995, p.272) apresentam a prova do Teorema de Zermelo.

Perfeito em Subjogos (ENPS) para jogos dinâmicos: um perfil de estratégias $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, sendo n o número de jogadores, é um ENPS se ele induz um EN em cada subjogo³⁵.

Há jogos reais, no entanto, em que o único subjogo é o próprio jogo e, portanto, o conceito de ENPS não auxilia a encontrar uma solução ótima crível. Nestes casos, Myerson (1991, *apud* MAS-COLLEL *et al*, 1995) sugere o Equilíbrio Sequencial Fraco³⁶, em que se pressupõe um sistema de crenças sobre cada ação que o oponente pode tomar e, ainda, que há racionalidade sequencial. O sistema de crenças é tal que as probabilidades atribuídas para cada possível resultado é maior do que zero e, somadas, igualam 100%, respeitando-se ainda a lei de Bayes. As restrições quanto ao sistema de crenças são fracas e, novamente, podem não ser suficientes para eliminar equilíbrios que não fazem sentido. Assim, uma parte significativa da pesquisa em Teoria dos Jogos procura propor restrições adicionais, dentre as quais, a de supor também a racionalidade *forward induction*, isto é, procurar restringir o problema apenas às trajetórias que fazem sentido desde o início do jogo³⁷.

³⁵ um subjogo é uma parte do jogo que: - se inicia em apenas um nó de decisão e contém todos os nós sucessores ; - não há conjuntos quebrados de informação, isto é, toda a informação daquele ponto do jogo está contida no subjogo.

³⁶ Mas-Colell et al (1995) se referem a esse equilíbrio como Equilíbrio Bayesiano Perfeito Fraco.

³⁷ Mas-Colell et al (1995, p.292-295) apresentam um exemplo didático em que usando-se apenas o *backward induction* chega-se a dois ENs, porém só um deles faz sentido ao se aplicar também o *forward induction*: embora só faça sentido para uma determinada competidora A investir se for para entrar no mercado geral, pois é onde ela obtém os maiores resultados, a análise usando apenas o *backward induction* não exclui a possibilidade de a empresa A entrar apenas em um nicho de mercado, e essa trajetória também gera um EN para o jogo.

4.2.3. Jogos com Opções Reais (*Option-Games*)

4.2.3.1. Literatura & Referencial Teórico

A Teoria de Opções Reais (TOR) permite avaliar a decisão de fazer um investimento irreversível em um cenário de incertezas, porém em geral ignora o fato de que os competidores também detêm opções que, ao serem exercidas, podem afetar o valor do projeto/empresa.

Tentativas anteriores de incorporar o efeito da competição nos modelos de Opções Reais incluem o trabalho de Kester (1984), que considera que a entrada de competidores reduz o prazo para expiração da opção real, e Trigeorgis (1991), que modela a entrada de competidores como um *jump-down* no processo estocástico da empresa. Nestes trabalhos, o efeito da competição é modelado de forma randômica, ao invés de considerá-lo endógeno ao modelo. Como considerar, então, o efeito da competição?

Smit & Trigeorgis (2004) lembram que a criação de valor em um ambiente competitivo se dá de duas formas: primeiro, pela atratividade geral da indústria em que a empresa opera, bem capturada pelos métodos do FCD e TOR; segundo, pela vantagem competitiva da empresa em relação a seus rivais e em como a competição pode erodir o retorno da empresa. A erosão de valor causada pela ameaça de novos entrantes já havia sido bem abordada na literatura sobre investimento em ambiente competitivo, em que os trabalhos de Reinganum (1981) e Fudenberg&Tirole (1985) são exemplos clássicos, mas não na literatura de investimento em ambiente de incerteza.

Smets (1991,1993) foi o primeiro a combinar a Teoria de Opções Reais e a Teoria dos Jogos, tendo modelado a competição de forma endógena para analisar um problema em que duas empresas entram em um novo mercado. Smets assume que as empresas competidoras são simétricas, tendo os mesmos custos de produção. Dixit & Pindyck (1994, cap.8) apresentam o modelo de Smets de forma heurística e analisam o equilíbrio do jogo em estratégias puras. Huisman & Kort (2001)³⁸ estendem o modelo de Smets (1993) e a análise de Dixit&Pindyck (1994,

³⁸ Baseado em Huisman & Kort (1999), *Discussion Paper* nr. 9992, Tilburg University, The Netherlands.

cap.8), porém para empresas que consideram a opção de expandir em um mercado já existente, adicionando a análise de equilíbrio em estratégias mistas na região em que o lucro esperado do projeto já incentiva ambas as empresas a investirem. Nesse caso, embora seja ótimo que apenas uma empresa invista, há uma probabilidade positiva de que, por erro, ocorra investimento simultâneo, gerando valor menor para ambas as empresas^{39 40}.

Huisman & Nielsen (2001) analisam um duopólio em que as empresas são assimétricas no que se refere ao investimento inicial no projeto, para os casos em que há externalidades positivas e negativas⁴¹, estabelecendo os possíveis ENPS (Equilíbrios de Nash Perfeitos em Subjogos) que ocorrem para cada estado inicial do lucro do projeto, o qual segue uma função inversa em relação à demanda. Pawlina & Kort (2006), ainda considerando apenas a assimetria no investimento inicial, estendem o modelo de Huisman & Nielsen (2001), analisando em mais detalhe a região em que ambas as empresas são incentivadas a investir simultaneamente. Os autores fazem, também, uma análise das implicações de cada situação de equilíbrio no valor econômico dos projetos para a sociedade. Todos estes trabalhos analisam o problema analiticamente, embora outros autores, como Smit & Ankum (1993), usem modelos discretos. Smit & Trigeorgis (2004) apresentam as duas formas de análise, embora foquem mais os modelos discretos.

Kong & Kwok (2007) analisam duopólio com duas assimetrias, porém no que se refere ao investimento e às receitas do projeto. Miltersen & Schwartz (2004) analisam um duopólio em que há apenas assimetria no processo estocástico. Azevedo & Paxson (2010) apresentam uma extensiva revisão da literatura de Jogos com Opções Reais onde 23 trabalhos sobre duopólios em que a

³⁹ Nesse caso, Huisman (2001, caps.4 e 7) usa a solução adotada anteriormente por Fudenberg & Tirole (1985), baseada na literatura de controle ótimo estocástico, de modo a identificar as probabilidades de cada jogador investir primeiro e a probabilidade de investirem simultaneamente.

⁴⁰ Os autores fazem também uma pequena correção ao Dixit&Pindyck (1994, p.311, Fig. 9.2), mostrando que, usando a premissa de novo mercado, os pontos de “entrada como seguidor” e de “entrada simultânea de ambas as empresas” coincidem.

⁴¹ Externalidade negativa significa que a entrada do competidor reduz o lucro da empresa devido a, por exemplo, perda de parcela de mercado. Uma externalidade positiva ocorre quando, por outro lado, a entrada do competidor traz sinergias como a adoção mais intensa daquele produto pelo mercado.

liderança é definida endogenamente são citados, sendo que apenas 12 deles sugerem ou fazem aplicações práticas da teoria, incluindo os trabalhos seminais aqui mencionados. Os autores concluem que a literatura sobre o tema Jogos com Opções Reais ainda está em desenvolvimento.

Este Capítulo usa como referencial teórico os trabalhos de Huisman & Nielsen (2001) e Pawlina & Kort (2006), baseados em modelos em tempo contínuo, estendendo-os para o caso de três assimetrias: assimetria no processo estocástico que descreve o valor do projeto-padrão de cada jogador, assimetria no investimento inicial para entrada em um novo mercado e assimetria no valor do projeto-padrão de cada jogador.

4.2.3.2. Solução de Jogos com Opções Reais Envolvendo Duopólios Assimétricos

Os modelos de Jogos com Opções Reais ajudam a identificar qual o resultado líquido entre as vantagens de se investir mais cedo (preempção) *versus* as vantagens de esperar para investir. Como lembram Smit & Trigeorgis (2004), o investimento antecipado é uma forma de proteger a rentabilidade do projeto nas situações em que se auferem ganhos por ser o Líder no mercado (*first-mover advantage/vantagem da primeira movida*); por outro lado, o Seguidor obtém também uma importante vantagem devido à flexibilidade para esperar e investir apenas em um cenário mais favorável (*late-mover advantage/vantagem da segunda movida*).

Este dilema é solucionado ao se encontrar a estratégia ótima para cada jogador, considerando-se qual será a melhor resposta racional do outro jogador. Este problema é similar ao caso clássico de parada ótima (*optimal stopping problem*), discutido amplamente em Teoria de Opções Reais (DIXIT & PINDYCK, 1994, cap.4, é um bom exemplo), em que se procura identificar o ponto ótimo em que se deve parar de esperar, tomando-se finalmente a decisão de investir ou de entrar em determinado mercado.

Em modelos de Jogos com Opções Reais, esse problema também é resolvido *backwards* (de trás para frente), procurando encontrar o equilíbrio do

jogo com base na premissa de que os jogadores são racionais⁴². Desta forma, o impacto causado pela ação de outros jogadores é considerado endogenamente no modelo.

A intuição subjacente a Jogos com Opções Reais envolvendo Duopólios está ilustrada nas Figuras 4.2 a 4.6, a seguir. Na Figura 4.2 observa-se, ainda usando apenas o método do FCD, qual o impacto para uma empresa que estava sozinha no mercado, da entrada de um competidor. A entrada do competidor causa uma redução no fluxo de caixa da empresa e em seu valor, devida à perda de parcela de mercado ou por competição de preços.

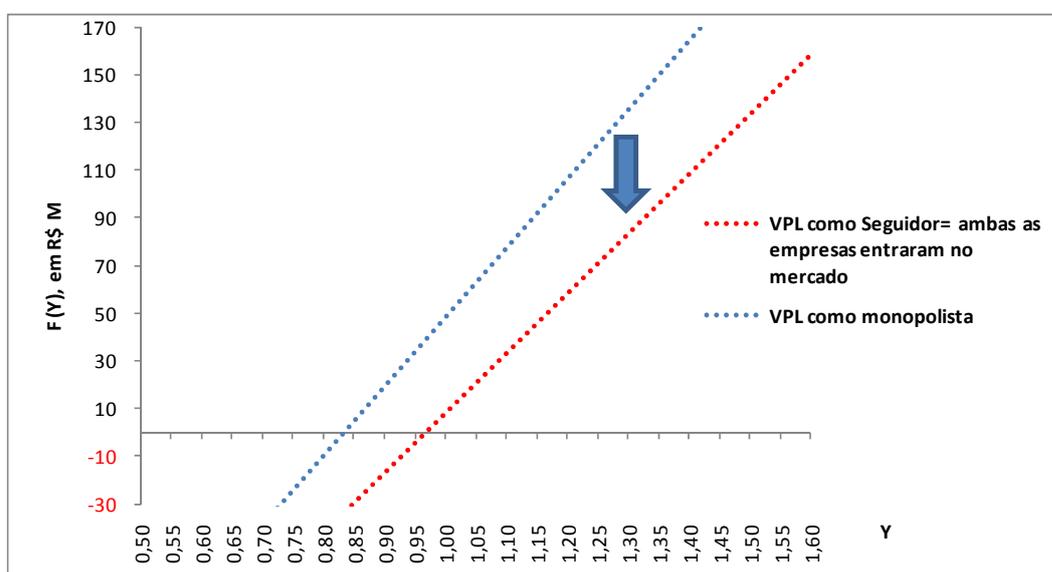


Figura 4.2: Valor de uma Empresa em Situação de Monopólio e já em Situação de Duopólio, segundo o Método do Fluxo de Caixa Descontado.

Na Figura 4.2, $F(Y)$ é o valor da empresa para cada realização de uma variável de estado Y , estocástica, que representa o fator determinante na geração de valor de uma empresa de projetos eólicos. De modo a já manter coerência com

⁴² Myerson (1999, p.1069) alerta que a premissa de racionalidade é certamente imperfeita para descrever o comportamento humano, conforme observado em estudos experimentais e na ampla literatura de finanças comportamentais. No entanto, nos casos reais em que a decisão tem efeitos no longo prazo e em que os valores envolvidos são grandes, pode-se esperar que o comportamento humano se aproxime mais do ideal de perfeita racionalidade, do que o que se observa em meros experimentos.

a modelagem adotada – a qual será explicada em mais detalhe na Seção 4.4 – definir-se-á aqui que Y incorpora todas as incertezas que afetam o valor de projetos eólicos-padrão, os quais compõem o portfólio de ativos de uma empresa de geração eólica. Desta forma, a variável estocástica Y reflete o impacto combinado das variações de preço para energia eólica no Brasil e das variações nos custos de implantação e operação, sobre o valor de um projeto eólico padrão. Quanto maior o Y , maior o VPL de um novo projeto-padrão do portfólio e, portanto, maior o valor esperado da empresa de projetos eólicos.

Para uma empresa que entra primeiro no mercado como Líder, porém ciente de que seu competidor poderá, em algum momento, também entrar no mercado e corroer seus resultados, é intuitivo que quando a realização de Y for muito baixa, o valor do Líder tende a ser muito próximo daquele preconizado pelo FCD para uma situação de monopólio (reta azul e mais alta da Figura 4.2). Isto, porque se o mercado está desfavorável, há pouco risco de que o competidor entrará logo no mercado. No entanto, para realizações de Y mais altas, a ameaça de entrada do competidor passa a ser mais significativa, de modo que é intuitivo que para Y alto o suficiente para também fazer o segundo jogador do duopólio entrar, o valor do Líder torna-se igual ao indicado pelo método do FCD em situação de duopólio.

Para realizações de Y entre essas duas situações-limite (monopólio garantido por um longo tempo & duopólio já estabelecido), o valor do Líder tende a crescer menos rapidamente em Y , ou até mesmo a decair, refletindo a possibilidade, cada vez mais premente, de que seu oponente também exercerá sua opção de entrar no mercado. Assim, o valor do Líder tende a ter a forma ilustrada na Figura 4.3, a qual se iguala à reta de valor segundo o FCD e em duopólio no momento em que o oponente também entra no mercado. O momento de entrada do oponente no mercado pode ser identificado usando os preceitos da Teoria dos Jogos, isto é, como o momento em que a melhor resposta do oponente é entrar no mercado como Seguidor.

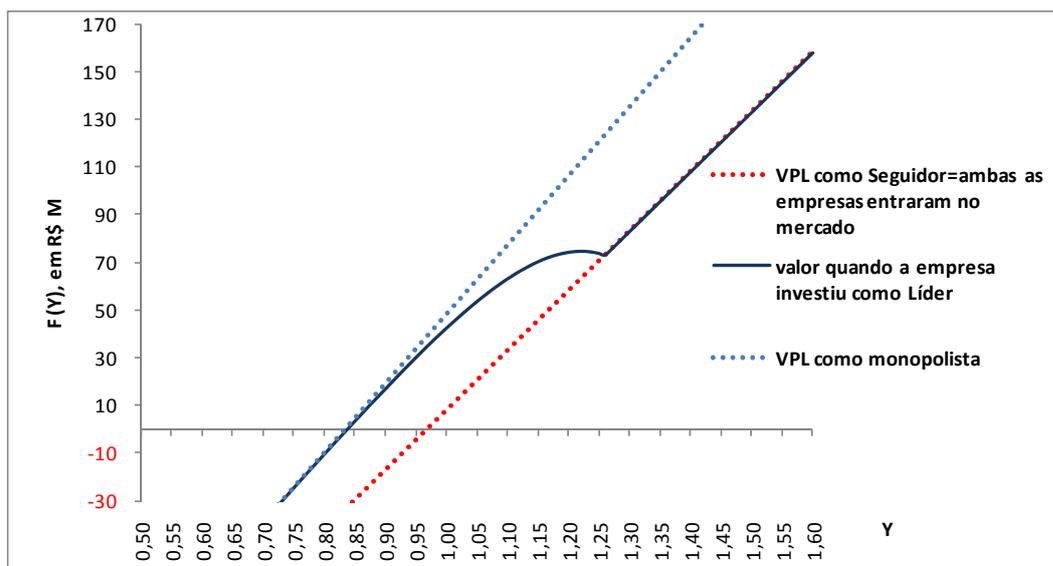


Figura 4.3: Curva de Valor do Líder em um Duopólio.

Olhando ainda esta mesma empresa do duopólio, só que agora não na posição de Líder, mas sim na posição de Seguidor, seu valor enquanto ainda detém a opção de entrar no mercado como Seguidor seria expresso pela curva de valor de uma *call*, tal qual ilustrada na Figura 4.1, Seção 4.2.1. Desta forma, as curvas de valor dessa empresa do duopólio, ou como Líder ou como Seguidor, estão ilustradas na Figura 4.4.

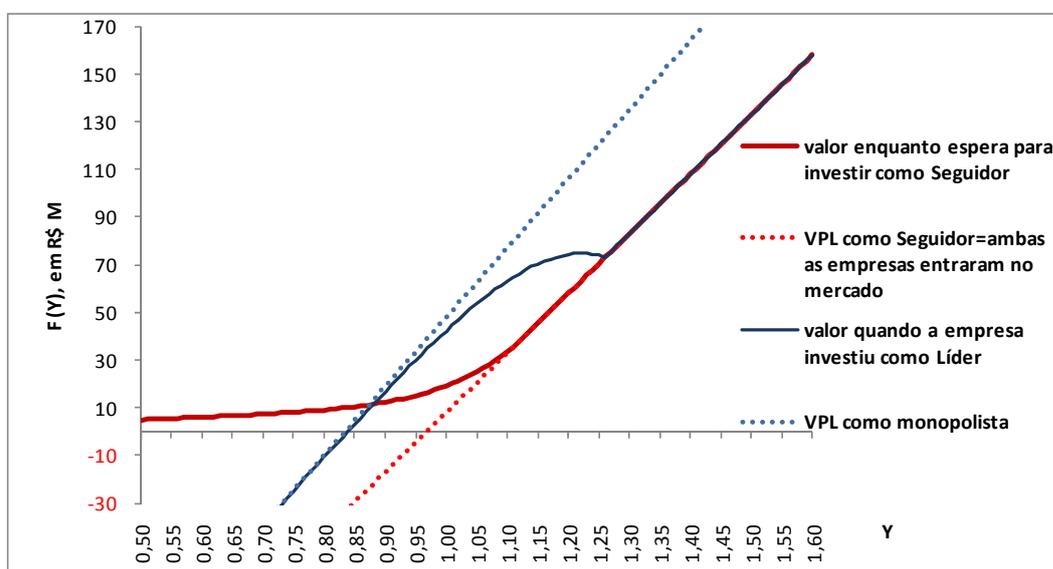


Figura 4.4: Curvas de valor como Líder e como Seguidor de uma das empresas do duopólio.

As realizações de Y acima do ponto em que a “curva de valor como Líder” primeiro cruza a “curva de valor da empresa ainda com a opção de entrar como

Seguidor” refletem o trecho em que ser Líder vale mais do que ser Seguidor. Já há, em princípio, incentivo para que tal empresa decida entrar como Líder no mercado⁴³. No entanto, ela não necessariamente o faz, como se verá mais adiante.

Se não houver risco de que o oponente entrará antes como Líder, nossa primeira empresa pode ainda esperar para entrar como Líder se o seu valor, ainda com a “opção de entrar como Líder” viva, exceder o seu valor já como Líder no mercado. Desta forma, a primeira empresa entraria apenas no ponto circular ilustrado na Figura 4.5. Demonstra-se, no Anexo 4.2, que este é também o ponto em que a mesma empresa, em uma situação de monopólio, entraria no mercado segundo a Teoria de Opções Reais. Esta conclusão, surpreendente, foi primeiro identificada por Leahy (1993).

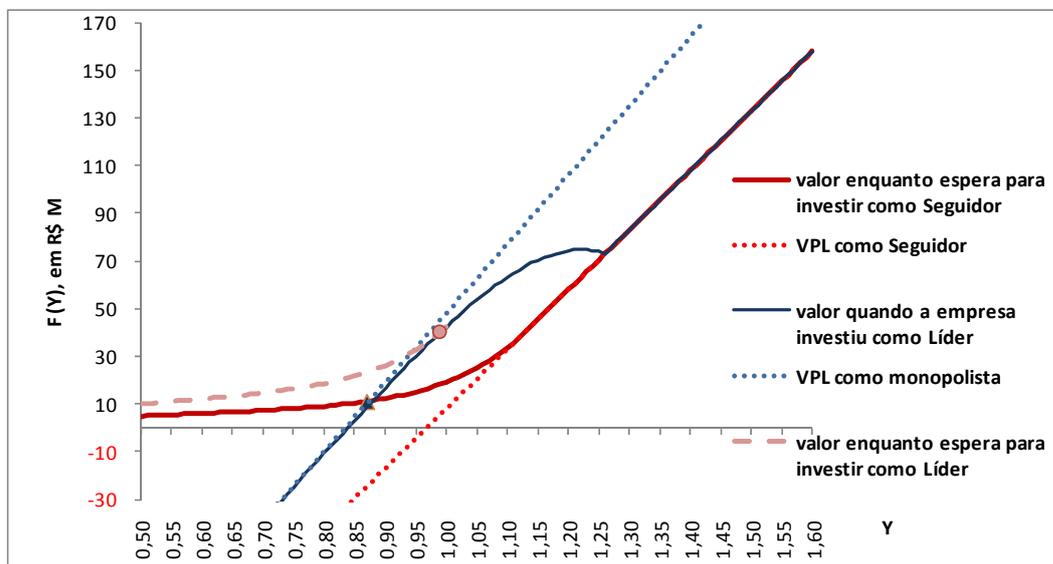


Figura 4.5: Entrada do Líder Quando não Há Ameaça de que o Oponente Entrará Antes como Líder no Mercado

O ponto triangular na Figura 4.5 reflete o momento em que, embora já exista incentivo para entrar como Líder, o valor de manter viva a opção de entrar no mercado ainda é maior do que o valor já como Líder.

A Figura 4.6 mostra agora as curvas de valor de duas empresas em duopólio, sendo que tais empresas são assimétricas no que se refere ao investimento inicial necessário para entrar no mercado, como se pode observar

⁴³ Isto é equivalente ao princípio conhecido como *rent equalization*, de Fudenberg & Tirole (1985).

pelas retas pontilhadas de valor, as quais cruzam o eixo vertical em pontos diferentes, iguais aos seus investimentos de entrada. Observe-se que no caso em que tais empresas também têm fluxos de caixa (=fluxos de valor) assimétricos, as retas pontilhadas, que representam o valor das empresas já em situação de duopólio, não seriam paralelas.

Dadas as assimetrias no investimento de entrada no mercado e/ou no fluxo de valor dessas duas empresas, suas curvas de valor como Seguidor ou Líder são também diferenciadas, conforme se observa na Figura 4.6, sendo que as curvas de valor da empresa mais viável economicamente (por ter custo de entrada menor, por exemplo) estão agora representadas em azul e mais altas, enquanto as curvas da empresa menos viável estão em amarelo. Ressaltam-se, ali, os pontos a partir dos quais cada empresa tem incentivos para fazer a preempção do mercado (ponto triangular) e também os pontos em que elas de fato entram no mercado, sinalizados por meio dos pontos quadrados em negrito. Observa-se que a empresa com maior propensão a ser Líder entra no mercado em um ponto no qual manter viva a opção de entrar como Líder ainda tem valor; no entanto, a empresa antecipa sua entrada de modo a impedir que seu oponente entre como Líder, o que a empurraria para a posição mais desfavorável de Seguidor no duopólio.

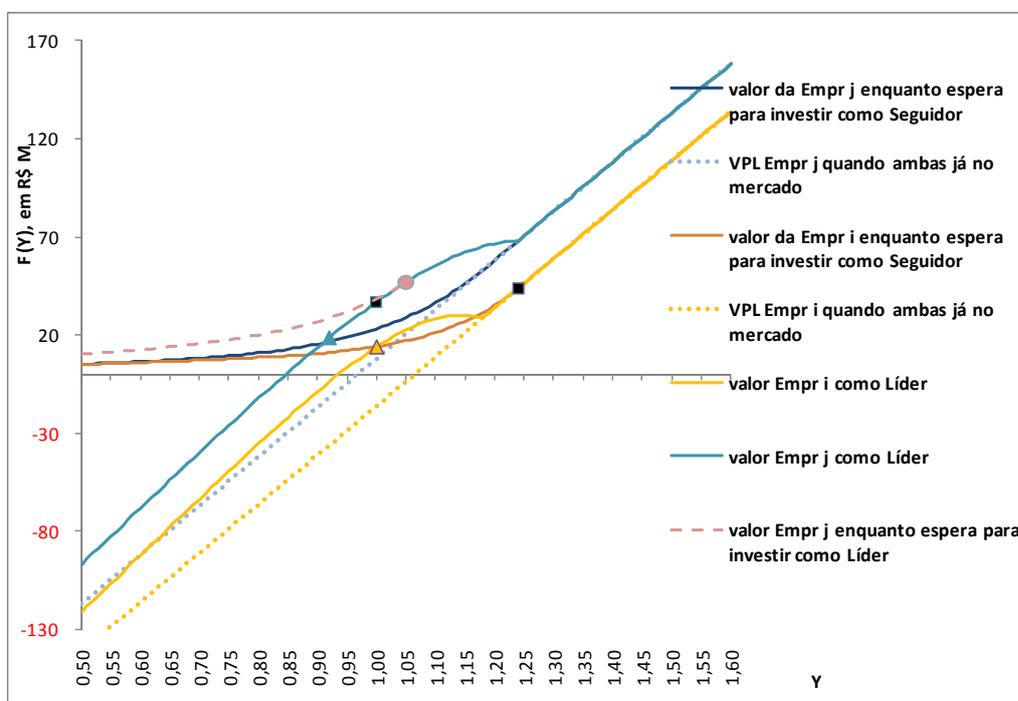


Figura 4.6: Curvas de Valor das Duas Empresas do Duopólio.

Observa-se que a entrada da primeira empresa ainda acontece em um gatilho Y^* maior que o sugerido pelo método do FCD, aquele no qual $VPL = 0$, porém antes do momento indicado pela Teoria de Opções Reais (TOR) – este último, seria no ponto circular, em que a opção de esperar para investir deixa de ter valor.

A solução de equilíbrio apresentada nesta Seção ocorre quando a realização inicial de Y é muito baixa, de modo que uma das empresas chega primeiro ao seu ponto de preempção do mercado. Há outras situações de equilíbrio quando Y inicial é suficientemente alto, de tal forma que ambas as empresas têm incentivo simultâneo para entrar no mercado, mas no qual a entrada simultânea é desvantajosa⁴⁴. Para uma realização inicial de Y muito alta, pode até ser mais vantajoso para ambas as empresas esperar para entrarem simultaneamente. Estas outras regiões de equilíbrio estão abordadas em Huisman & Nielsen (2001) e Pawlina & Kort (2006) nas situações em que há apenas uma assimetria no duopólio, e não serão discutidas aqui, haja vista que se presume o formato de leilões como equivalente à situação em que a realização inicial de Y é muito baixa (dado que faz os jogadores revelarem o menor preço em que entrariam no mercado).

O objetivo, nesta Seção, foi apenas apresentar de forma holística os benefícios de se combinarem os preceitos da TOR e da Teoria dos Jogos. As Seções 4.4.3 e 4.4.4 apresentarão o desenvolvimento das diversas curvas de valor para cada um dos jogadores, em maior detalhe.

4.3. Incertezas do Mercado de Energia Eólica no Brasil e Possíveis Condições de Assimetria entre os Concorrentes

Um projeto eólico envolve um grande investimento inicial e baixos custos operacionais. A incerteza dos resultados advém basicamente do comportamento intermitente dos ventos que é, na verdade, um risco específico de cada projeto e que será considerado aqui como idêntico para os jogadores. Outra incerteza é uma possível alteração da política de contratação de energia eólica, mas neste trabalho considera-se que a política adotada no leilão de dezembro 2009 será mantida por um longo período de tempo.

⁴⁴ Nesse caso, a situação de equilíbrio envolve estratégias mistas.

Tendo vencido um leilão, o parque contratado desfrutará de um contrato de venda com preço/MWh fixo em termos reais pelo prazo de 20 anos. Entretanto, as condições de contratação da energia e dos equipamentos/terras mudam a cada novo leilão, de modo que ao construir seu portfólio de projetos cada empresa terá um fluxo de valor, FVE^{45} , variável ao longo do tempo. Assim, a decisão de entrar no segmento de geração eólica equivale à decisão se é melhor começar a investir agora, ou se é melhor aguardar por melhores condições de mercado.

Há, entretanto, sinalizações contraditórias sobre o que pode ser o futuro dos projetos de energia eólica, tanto no Brasil quanto no exterior, conforme visto no Capítulo 2. Na Alemanha, os preços têm caído consistentemente e de forma significativa, de 18,34 centavos de euros/kWh em 1991, para 7,14 centavos de euros/kWh em 2013⁴⁶. Embora o país adote o regime de preços fixos, baseados em certos critérios técnicos e de custos, o exemplo alemão reforça a premissa de que os países tendem a exercer seu poder para pressionar por preços mais baixos. A China, por sua vez, conseguiu reduzir os preços em 35-45% nos leilões de energia eólica em 2002/2003, porém os parques contratados apresentaram prejuízo consistentemente (COSTA, CASOTTI & AZEVEDO, 2009). Lema & Ruby (2007) conjecturam que os empresários chineses, vencedores dos leilões de energia em detrimento de empresas que já operavam parques eólicos em outros países, podem ter considerado que o país voltaria a adotar preços fixos e em patamares mais elevados – e isto de fato aconteceu recentemente⁴⁷.

No Brasil, a expansão da oferta tem sido difícil de prever no longo prazo, em função de atrasos nas obras ou nas licenças ambientais, ou devido a projetos que acabaram não se materializando. A demanda também tem sido errática, especialmente após a crise internacional de 2008/2009. Energia térmica mais cara foi contratada, de modo a garantir a confiabilidade do sistema, mas quando se trata de energia eólica, não há uma política clara quanto aos volumes que serão contratados no futuro, tampouco com relação ao preço/MWh. Somem-se a isso as visões diferenciadas quanto aos preços de equipamento, custo de arrendamento de

⁴⁵ Lembre-se que o FVE , fluxo anual de valor da empresa, equivale ao VPL de cada projeto-padrão que é agregado, a cada ano, ao seu portfólio.

⁴⁶ fonte: seminário DEWI, agosto 2009, Rio de Janeiro, Brasil.

⁴⁷ fonte: Suzlon, apresentação para investidores, Set 2009, disponível em: http://www.suzlon.com/pdf/investor_p/Suzlon_Energy_Limited_Investor_Presentation.pdf.

terra e quanto ao custo de capital para projetos eólicos brasileiros e fica claro que visões assimétricas quanto ao futuro do mercado de energia eólica são uma realidade no Brasil.

Outra importante assimetria entre os projetos eólicos é o seu valor, assimetria esta que pode resultar tanto de uma necessidade diferenciada de investimento (de agora em diante referido como *Capex*), resultado de um potencial eólico diferente ou da capacidade de negociar vantagens junto a fornecedores, assim como pela capacidade de reduzir os custos operacionais e de capital. Assumimos neste trabalho que o tamanho e experiência dos acionistas do projeto e a localização do parque eólico são bons indicadores do valor inicial (*FVE0*), na data zero, do projeto-padrão de cada empresa característica. Assim, essa informação é conhecida pelos jogadores.

Apenas a título de ilustração, a Figura 4.7 mostra que alguns projetos de menor potencial eólico sobrepujaram outros de maior potencial eólico no leilão de 2009. Uma garantia física/potência instalada (*proxy* para o fator de capacidade dos parques) mais alta significa que menos turbinas são necessárias para produzir a mesma quantidade de energia e, portanto, o *Capex* é mais baixo. Em princípio, portanto, parques com maior fator de capacidade são mais viáveis economicamente, assumindo-se que as outras premissas principais – custo do equipamento, taxa de desconto – são uniformes para os jogadores.

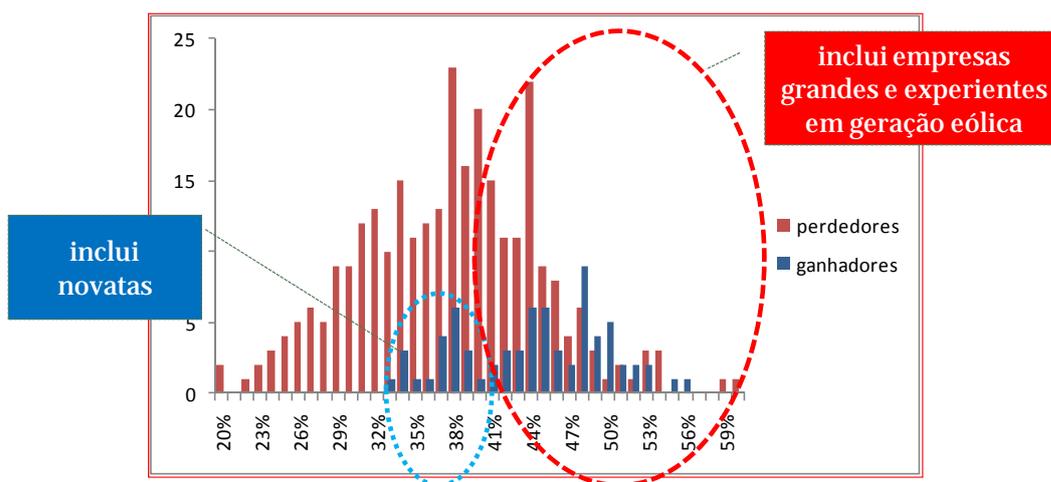


Figura 4.7: Distribuição de Frequência dos Ganhadores e Perdedores do Leilão 2009, por Garantia Física (MW médios)/Potência Instalada. Fonte: elaboração própria, com base em dados da CCEE (www.ccee.gov.br)

Pelas mesmas razões relacionadas à assimetria no valor, uma terceira assimetria está sendo considerada: os jogadores têm custos diferenciados de entrada no segmento eólico (I), custos estes relativos à própria abertura da empresa, a pesquisas mais detalhadas do potencial eólico nos *sites* dos projetos-padrão, à contratação de pessoal e de consultorias, entre outros.

Muitas são as razões que podem ter levado empresas em princípio menos viáveis economicamente a fazer a preempção do mercado, entre elas uma taxa de desconto menor, maior otimismo quanto à possibilidade de se conectar à linha de transmissão via instalações compartilhadas com outros parques (e, portanto, menor *Capex* projetado), maior propensão ao risco, ou até mesmo menor sofisticação financeira. No entanto, neste Capítulo se assume que tais condições são uniformes para os jogadores de modo a investigar apenas em que condições de assimetria na visão quanto ao futuro uma empresa do grupo de empresas menos viáveis que ganhou o leilão, faria a preempção do mercado, relegando uma empresa do segundo grupo (empresa mais viável, perdedora do leilão) à condição de Seguidor.

4.4. O Problema, Modelado Como Um Duopólio Em Que Há Três Assimetrias

4.4.1. Premissas Básicas

Duas empresas características detêm uma opção americana perpétua de entrar no mercado de geração eólica. Cada uma das duas empresas tem um projeto-padrão e, portanto, diferentes *FVEs*⁴⁸, e também têm visões diferentes

⁴⁸ considerar o próprio *VPLíquido* do projeto-padrão (e não o *Valor Presente, VP*) como a variável de estado estocástica *FVE* é mais consistente com a realidade do mercado: preços-teto nos leilões são definidos com base em uma análise de viabilidade feita pelo governo que considera os custos de implantação dos projetos, os quais também variam temporalmente. Além disso, como se verá no final desta Seção, a modelagem do *VPL* como um MGB automaticamente garante que a empresa não investe em projetos com *VPL* negativo, enquanto na modelagem baseada no *VP* isto não aconteceria.

quanto ao futuro para projetos eólicos. Para fins de simplificação, assumimos que cada projeto-padrão visa produzir 25MW⁴⁹.

Tendo decidido entrar no negócio, cada jogador manterá a estratégia de investir em um novo projeto igual ao projeto original, a cada ano. A decisão de entrar no mercado equivale, portanto, à decisão de paulatinamente construir um portfólio de projetos eólicos⁵⁰. A assimetria na visão de mercado dos dois jogadores se mantém ao longo dos anos.

Assume-se, ainda, que a demanda por energia cresce organicamente de tal forma que um novo projeto por ano, de apenas uma das empresas, é facilmente absorvido pelo mercado, sem causar pressão sobre os preços e custos do setor. No entanto, quando ambas as empresas já estão no mercado, cada uma agregando dois novos projetos por ano, há pressão sobre o valor dos projetos-padrão tal que uma função inversa de demanda D , determinística, descreva uma redução do FVE .

Além disso, o FVE também carrega um grau de incerteza (ex.: em relação ao preço contratado de energia elétrica no futuro, ao custo dos equipamentos, ao impacto da pressão competitiva nos futuros leilões), expresso no modelo por meio de um choque estocástico \tilde{Y} , de modo que o FVE da Empresa i , FVE_i , é definido como: $FVE_i = \tilde{Y}_i \cdot D_{iN_i, N_j}$. Assim, o fluxo de valor da empresa é definido endogenamente e varia não apenas com o volume total ofertado de energia eólica ao mercado, mas também em função de uma variável econômica que varia com o tempo (\tilde{Y}_i), sendo que:

⁴⁹ a premissa quanto ao tamanho do projeto foi adotada apenas para facilitar a conexão com projetos reais e, assim, a intuição sobre o problema. Não se considerou que os competidores definiriam otimamente a quantidade a ofertar de energia (equilíbrio de Cournot ou Stackelberg) dado que a liberdade para fazê-lo é cerceada pela política de compras de energia do governo.

⁵⁰ mesmo algumas empresas novatas no segmento eólico, tal como a Renova Energia, já detêm um portfólio significativo de projetos a serem negociados paulatinamente no futuro (a Renova Energia reporta ter 58 projetos já em fase adiantada de desenvolvimento e de licenciamento ambiental, fonte: documento da oferta inicial de ações da Renova, disponível em <http://www.b2i.cc/Document/1698/105731.pdf>), o que torna aceitável a premissa de que entrar no mercado é equivalente à decisão de construir paulatinamente um portfólio de projetos.

- \tilde{Y}_i segue um MGB (Movimento Geométrico Browniano), isto é,
- $$dY_i = \alpha_i Y_i dt + \sigma_i Y_i dz_i \quad (4.1)$$

Como D é determinístico, FVE_i segue o mesmo processo estocástico, e com os mesmos parâmetros, do processo estocástico de Y_i ;

- D_{iN_i, N_j} reflete a função inversa de demanda que se aplica à Empresa i , e depende apenas da condição dos dois jogadores neste duopólio, condição esta descrita pelos subscritos N_i e N_j . N_i é zero quando a Empresa i ainda não entrou no mercado, e 1 se a empresa já entrou. A mesma regra se aplica a N_j . Desta forma:

$D_{i00} = 0$ -> como nenhuma das empresas entrou ainda neste novo mercado, o valor é zero

D_{i10} -> FVE determinístico da Empresa i na situação em que ela já entrou como Líder, mas a Empresa j ainda não entrou

D_{i11} -> FVE determinístico da Empresa i na situação em que ambas as empresas já entraram no mercado

Assume-se que: $D_{i10} > D_{i11}$, isto é, o FVE_i é maior quando a própria Empresa i é a primeira a investir e ainda está sozinha no mercado; quando a competidora também entra no mercado, o FVE_i cai. A redução no fluxo de valor da Empresa i reflete a maior competição por parcelas de mercado, que impacta as receitas do projeto-padrão, assim como também os custos e o *Capex* (ex.: negociações mais acirradas para arrendar a terra e comprar equipamento).

A função que descreve o FVE da Empresa j é similar ao da Empresa i , porém com diferentes parâmetros para o processo estocástico: $FVE_j = \tilde{Y}_j \cdot D_{jN_i, N_j}$, onde:

$$dY_j = \alpha_j Y_j dt + \sigma_j Y_j dz_j \quad (4.2)$$

Da mesma forma, assume-se aqui que $D_{j01} > D_{j11}$.

Os *FVEs* determinísticos da Empresa *i* são menores que os da Empresa *j*, de modo que: $D_{i0} < D_{j01}; D_{i11} < D_{j11}$. Esta é a primeira assimetria considerada no problema, que se assume como conhecida pelos jogadores.

Os diferentes parâmetros – a tendência α e a volatilidade σ – que descrevem o comportamento estocástico de \tilde{Y}_i e \tilde{Y}_j (e, portanto, de FVE_i e FVE_j) refletem expectativas diferentes quanto ao futuro, a segunda assimetria do problema. Um jogador assumir uma tendência α positiva significa que ele imagina que os preços tendem a ser melhores nos próximos leilões, por exemplo, enquanto uma volatilidade σ mais alta que a de seu oponente reflete maior insegurança quanto às condições futuras do mercado. Nenhuma das empresas conhece a visão do competidor sobre o futuro, de modo que este é um jogo de informação incompleta. Não há como resolver o problema diante de um espectro infinito de cenários alternativos/tipos possíveis de jogadores, de modo que neste Capítulo se avalia apenas como cada empresa se comporta, caso considere que: - seu competidor tem a mesma visão quanto ao futuro; - seu competidor tem uma visão diferente do futuro, conhecida⁵¹.

A terceira assimetria, também conhecida pelos jogadores, refere-se ao investimento inicial para se qualificar a entrar no mercado, I : o investimento inicial da Empresa *i*, I_i , é mais alto que o investimento da Empresa *j*, I_j , tal que $I_i = \eta \cdot I_j$ e $\eta > 1$.

A Tabela 4.1 descreve as assimetrias consideradas no modelo. O Anexo 4.1 mostra a representação do jogo incompleto e esclarece os ramos que estão sendo considerados na análise.

⁵¹ Isso de certa forma equivale a adotar os conceitos de Schelling (1960) de ponto focal e de Myerson (1991, apud MAS-COLLEL, 1995), em que informações de conhecimento comum ou mesmo o próprio sistema de crenças de cada jogador ajudam a restringir os cenários e as possíveis situações de equilíbrio.

Tabela 4.1: Resumo das Características de Cada Empresa do Duopólio:

	Empresa i	Empresa j
Fluxo de Valor da Empresa (FVE)	$FVE_i = \lambda.FVE_j$ $\Rightarrow \tilde{Y}_i D_i = \lambda.\tilde{Y}_j D_j$ $\lambda < 1$	$FVE_j = \tilde{Y}_j D_j$
Visão quanto ao futuro do FVE	$dY_i = \alpha_i Y_i dt + \sigma_i Y_i dz_i$ $\alpha_i < \alpha_j$; $\sigma_i < \sigma_j$	$dY_j = \alpha_j Y_j dt + \sigma_j Y_j dz_j$ α_j ; σ_j
Investimento para se qualificar a entrar no mercado	$I_i = \eta.I_j$ $\eta > 1$	I_j

Também se assume aqui que a realização inicial de \tilde{Y} (Y_0) é baixa o suficiente para que o investimento imediato não seja ótimo para nenhum dos dois jogadores. Vale lembrar que um Y_0 baixo, no modelo, significa que o FVE da empresa no ano zero está próximo de zero⁵². Quando Y_0 já é alto, refletindo-se em um FVE que já estimula ambas as empresas a investir, então equilíbrios em estratégias mistas podem ocorrer, assim como o risco de investimento simultâneo por erro; estas possibilidades estão sendo negligenciadas aqui, dado que o objetivo é apenas identificar quem é tentado a investir antes, e a que preço.

Cabe aqui uma última observação sobre a premissa, já descrita anteriormente, de que o comportamento ao longo do tempo do FVE pode ser descrito como um MGB. O MGB é o processo estocástico mais adotado na literatura de Opções Reais e de Jogos com Opções Reais dada a simplicidade do seu tratamento matemático, que permite soluções analíticas, enquanto outros processos estocásticos demandam soluções discretas ou numéricas. Além disso, é raro rejeitar a hipótese nula de que um determinado ativo segue um MGB quando as séries são inferiores a 30-40 anos (DIXIT&PINDYCK, 1994). No entanto, a hipótese de que o processo subjacente de um ativo é um MGB tem limitações (LO & MAC KINLAY, 1988; INSLEY, 2002; BASTIAN-PINTO, 2009),

⁵² No entanto, é diferente de zero. Caso negativo, a trajetória estocástica do FVE já começa na barreira absorvente em zero, o que inviabilizaria o modelo. Isso significa que os investidores sempre exigirão um retorno anormal, por menor que seja, em relação ao custo de capital considerado aqui, de 10%aa reais.

especialmente no caso de *commodities*, em que a prática e a intuição indicam processos de Reversão à Média como os mais adequados para refletir o equilíbrio oferta *versus* demanda no longo prazo no preço desses ativos.

No caso do *FVE* de empresas eólicas, no entanto, o MGB parece ser aceitável, dado que: o *FVE* é afetado por uma variedade de fatores que, combinados, não permitem intuir um equilíbrio oferta *versus* demanda de longo prazo; o mercado eólico é novo e longe da maturidade, sendo ainda sujeito à interferência do governo via estabelecimento de preços-teto, calculados a cada contratação para um projeto típico (o qual não necessariamente reflete a realidade dos projetos de nossos jogadores). Lembra-se aqui que, ao adotar o MGB, a tendência α domina o comportamento de longo prazo dos *FVEs*, enquanto que no curto prazo a volatilidade é que domina a variação dos *FVEs* (DIXIT&PINDYCK, 1994, p.67), o que também corrobora a intuição sobre o problema.

Adotando-se o MGB para descrever o comportamento futuro dos *FVEs* de uma empresa eólica, também se está assumindo que as variações dos *FVEs*, no tempo, têm distribuição normal e que a distribuição de *FVEs* é lognormal, isto é, não há *FVEs* negativos. Implicitamente, isso significa que nas situações desfavoráveis de mercado, em que agregar um novo projeto-padrão ao portfólio geraria um *FVE* negativo, os jogadores não estarão investindo em novos parques, o que é consistente com a realidade. Fazendo-se um paralelo com modelos discretos de Opções Reais, adotar o MGB como o processo subjacente para o comportamento do *FVE* equivaleria a “podar” a árvore de decisão, eliminando aqueles galhos em que a realização seria um novo projeto com *VPL* negativo (e, portanto, *FVE* negativo para a empresa naquele ano).

4.4.2. Cenários/Modelos Considerados

Serão desenvolvidas as funções de valor e as soluções de equilíbrio para cada uma das seguintes duas alternativas (Tabela 4.2):

Tabela 4.2: Cenários a Serem Modelados

	Modelo 1 (ambas adivinham corretamente)	Modelo 2 (ambas adivinham erroneamente, supondo que não há assimetria na visão de futuro)
Empresa i acredita que a Empresa j	tem um FVE maior, tem menos custo para entrar no mercado, mas tem uma visão de futuro diferente da sua, isto é, acha que o futuro é mais incerto	tem um FVE maior, tem menos custo para entrar no mercado, e pensa o mesmo que a Empresa i sobre o futuro
Empresa j acredita que a Empresa i	tem um FVE menor, tem mais custo para entrar no mercado, mas tem uma visão de futuro diferente da sua, isto é, acha que o futuro é menos incerto	tem um FVE menor, tem mais custo para entrar no mercado, e pensa o mesmo que a Empresa j sobre o futuro

Além disso, os resultados dos dois modelos serão comparados com o cenário-base em que não existe, de fato, assimetria nas visões quanto ao futuro. Tal cenário-base seria mais factível caso o governo brasileiro tivesse enviado sinais claros e críveis quanto ao futuro do mercado de energia eólica⁵³, equalizando as crenças e, portanto, o processo estocástico adotado pelas empresas para descrever as perspectivas futuras de seus $FVEs$.

Em cada cenário/modelo, serão desenvolvidas as funções de valor das empresas para cada uma das seguintes alternativas:

⁵³ um exemplo de tal política é o modelo adotado pela Alemanha, que sinaliza os preços futuros de contratação de energia eólica, calculados com base em alguns critérios conhecidos.

- a Empresa i é a primeira a entrar (Líder), o que torna a Empresa j o Seguidor;
- a Empresa j é a primeira a entrar (Líder), o que torna a Empresa i o Seguidor.

Desta forma, serão encontrados os valores de Y em que os jogadores teriam incentivos para fazer a preempção do mercado, entrando antes que o concorrente (*preemptive equilibrium*). O objetivo aqui é identificar em que circunstâncias uma empresa com menor *FVE* teria incentivo para entrar no mercado antes da empresa que tem projetos mais viáveis economicamente, dadas suas visões assimétricas sobre o futuro do mercado de eólicas.

Como é usual em jogos dinâmicos, o problema é resolvido de trás para frente, primeiro resolvendo a função de valor do Seguidor, que já viu o Líder investir no mercado; depois, obtém-se a função de valor do Líder, cuja decisão de investir no mercado é baseada na expectativa sobre qual será o comportamento sequencial do Seguidor, isto é, sua melhor resposta.

4.4.3. Modelo 1 – Ambas Adivinham Corretamente

4.4.3.1. Empresa i é o Líder, Empresa j é o Seguidor

Considerando que a Empresa i investiu, a Empresa j apenas investirá quando Y_j for suficientemente alto, isto é, quando ele tiver excedido um determinado valor Y_{jF}^* (gatilho que incentiva a Empresa j a investir no mercado como Seguidor), o qual ocorre no tempo $t = \tau_{jF}^* = \inf(t \mid Y(t) \geq Y_{jF}^*)$.

Seguidor (Empresa j)

Usou-se a equação de Bellman em Programação Dinâmica para descrever o problema de uma empresa que detém uma opção de entrar em um mercado – um problema típico de parada ótima (o Anexo 4.3 detalha o desenvolvimento desta equação diferencial). Outra alternativa é desenvolver a função usando o método

de Ativos Contingentes ou o Método Integral, que geram resultados semelhantes⁵⁴. Assim:

$$\frac{1}{2}\sigma_j Y_j^2 F_{jY_j} + \alpha_j Y_j F_{jY_j} - \rho F = 0 \quad \text{ou, usando uma notação simplificada:}$$

$$\frac{1}{2}\sigma_j Y_j^2 F_j'' + \alpha_j Y_j F_j' - \rho F = 0 \quad (4.3)$$

, onde F_j'' e F_j' são, respectivamente, a segunda e primeira derivadas de F em relação à variável de estado Y_j , e F_j é o valor do detentor da opção.

Usando-se o Lema de Itô e a Equação (4.1), chega-se à Equação (4.3), uma equação diferencial ordinária homogênea, cuja solução tem a forma detalhada a seguir (o Anexo 4.3 descreve o procedimento para se chegar a esta solução, assim como ao valor de β_j):

$$\left[\begin{array}{l} F_j(Y_j) = AY_j^{\beta_j} \quad , \text{ na região de continuação}^{55}, \text{ isto é, quando } Y_j \leq Y_{jF}^* \\ F_j(Y_j) = \frac{Y_j D_{j11}(1 + \alpha_j)}{\rho - \alpha_j} + Y_j D_{j11} - I_j = \frac{Y_j D_{j11}(1 + \rho)}{\rho - \alpha_j} - I_j, \text{ quando } Y_j \geq Y_{jF}^* \end{array} \right. \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

A Equação (4.4) reflete o valor enquanto a opção de entrar no mercado ainda está viva, enquanto a Equação (4.5) reflete o valor da Empresa j após sua entrada no mercado como Seguidor. O primeiro termo do lado direito da Equação (4.5) reflete o valor esperado da empresa ao agregar, em perpetuidade, projetos-padrão ao seu portfólio; o segundo termo reflete o VPL do primeiro projeto-padrão agregado ao portfólio (isto é, o primeiro FVE); o terceiro termo, I_j , reflete

⁵⁴ O Anexo 4.3 chama a atenção para as pequenas diferenças nas funções de valor obtidas por Programação Dinâmica (PD) e por Ativos Contingentes (AC). Dias (2005, cap. 4.2) mostra que o Método Diferencial (que engloba PD e AC) gera os mesmos resultados que o Método Integral, este último mais observado na literatura de Jogos com Opções Reais em duopólios.

⁵⁵ aqui, a região de continuação é aquela região em que é ótimo continuar esperando, isto é, onde é ótimo manter viva a opção de entrar no mercado.

os custos de entrada no setor (contratação de pessoal, coleta de dados anemométricos, consultorias, custo de abertura da empresa, advocatícios, etc.).

A premissa de que se agregaria um novo projeto-padrão a cada dt , em perpetuidade, não é necessária. Ela foi adotada aqui, neste ponto do texto, apenas para apresentar a equação de valor de uma forma mais simples e comparável à utilizada em outros trabalhos na literatura de Jogos com Opções Reais. Em resumo, pode-se também adotar a premissa de que seriam agregados novos projetos-padrão ao portfólio apenas nos próximos x anos; neste caso, ao decidir exercer a opção e entrar no mercado, a Empresa j colheria o seguinte valor esperado:

$$F_j(Y_j) = Y_j D_{j11} - I_j + Y_j D_{j11} \frac{(1 + \alpha_j)}{(1 + \rho)} + Y_j D_{j11} \frac{(1 + \alpha_j)^2}{(1 + \rho)^2} + \dots + Y_j D_{j11} \frac{(1 + \alpha_j)^x}{(1 + \rho)^x} \quad (4.6)$$

Desta forma, a Equação (4.5) poderia também ser representada como:

$$F_j(Y_j) = \kappa_j \cdot Y_j D_{j11} - I_j, \text{ onde}$$

$$\kappa_j = \left[1 + \frac{(1 + \alpha_j)}{(1 + \rho)} + \frac{(1 + \alpha_j)^2}{(1 + \rho)^2} + \frac{(1 + \alpha_j)^3}{(1 + \rho)^3} + \dots + \frac{(1 + \alpha_j)^x}{(1 + \rho)^x} \right] \quad (4.7)$$

, nos casos em que a construção do portfólio de projetos acontecerá durante um tempo limitado, de x anos, ou:

$$\kappa_j = \frac{(1 + \rho)}{\rho - \alpha_j} \quad (4.8)$$

, que poderia por exemplo ser adotado na situação em que o empreendedor pretende construir paulatinamente o portfólio por um prazo muito longo, superior a 30 anos, em que o valor de κ_j se aproxima ao de uma perpetuidade.

Ao rodar o modelo, serão testadas as situações em que o horizonte de investimento é de 5 e ∞ anos (equivalente a portfólios de 5 e ∞ projetos-padrão) de modo a ilustrar o efeito de se ter investidores com perspectivas de médio prazo versus investidores com perspectivas de longuíssimo prazo.

Em resumo, as equações de valor da Empresa j como Seguidor, seriam:

$$\left[\begin{array}{l} F_j(Y_j) = AY_j^{\beta_j} \quad , \text{ na região de continuação, isto é, quando } Y_j \leq Y_{jF}^* \end{array} \right. \quad (4.9)$$

$$\left[\begin{array}{l} F_j(Y_j) = \kappa_j Y_j D_{j11} - I_j \quad , \text{ quando } Y_j \geq Y_{jF}^* \end{array} \right. \quad (4.10)$$

, sendo que κ_j é expresso pela Equação (4.7) ou Equação (4.8), conforme o caso.

Na fronteira Y_{jF}^* , as condições de contorno que garantem a continuidade entre as duas funções (VMC – *value matching condition*) e o seu contato suave (SPC – *smooth pasting condition*) são aplicadas, permitindo obter os valores de A e de Y_{jF}^* (DIXIT & PINDYCK, 1994, p.130-132, apresentam uma explicação heurística para estas condições de contorno).

$$\text{VMC: Equação (4.9) = Equação (4.10) } \Rightarrow AY_{jF}^{*\beta_j} = \kappa_j Y_{jF}^* D_{j11} - I_j \quad (4.11)$$

SPC: as derivadas das Equações (4.9) e (4.10) devem ser iguais

$$\Rightarrow \beta_j AY_{jF}^{*\beta_j-1} = \kappa_j D_{j11}$$

De modo que:

$$A = \kappa_j D_{j11} \frac{Y_{jF}^{*1-\beta_j}}{\beta_j} \quad (4.12)$$

a qual, substituída na Equação (4.11), nos dá:

$$\kappa_j D_{j11} \frac{Y_{jF}^{*1-\beta_j}}{\beta_j} Y_{jF}^{*\beta_j} = \kappa_j Y_{jF}^* D_{j11} - I_j$$

e, finalmente,

$$Y_{jF}^* = \frac{\beta_j}{(\beta_j - 1) \kappa_j D_{j11}} I_j \quad (4.13)$$

Do desenvolvimento feito no Anexo 4.3 sabe-se que:

$$\beta_j = \frac{\frac{1}{2}\sigma_j^2 - \alpha_j + \sqrt{[\alpha_j - \frac{1}{2}\sigma_j^2]^2 + 2\rho\sigma_j^2}}{\sigma_j^2} \quad (4.14)$$

As Equações (4.7), (4.8), (4.9), (4.10), (4.12), (4.13), (4.14) permitem traçar a curva de valor da Empresa j como Seguidor.

Líder (Empresa i)

A equação diferencial que descreve o Líder é:

$$\frac{1}{2}\sigma_i Y_i^2 F_i'' + \alpha_i Y_i F_i' - \rho F + \pi_i = 0$$

Seguindo procedimentos similares aos adotados anteriormente, obtêm-se as funções de valor aplicáveis ao Líder, Empresa i :

$$\left[\begin{array}{l} F_i(Y_i) = B Y_i^{\theta_i} + (\kappa_i Y_i D_{i10} - I_i), \text{ na região de continuação, onde } Y_j \leq Y_{jF}^*, \quad (4.15) \\ F_i(Y_i) = \kappa_i Y_i D_{i11} - I_i, \text{ para } Y_j \geq Y_{jF}^* \quad (4.16) \end{array} \right.$$

Onde:

$$\kappa_i = \left[1 + \frac{(1 + \alpha_i)}{(1 + \rho)} + \frac{(1 + \alpha_i)^2}{(1 + \rho)^2} + \frac{(1 + \alpha_i)^3}{(1 + \rho)^3} + \dots + \frac{(1 + \alpha_i)^x}{(1 + \rho)^x} \right] \quad (4.17)$$

, nos casos em que a construção do portfólio de projetos acontecerá durante um tempo limitado, de x anos, ou:

$$\kappa_i = \frac{(1 + \rho)}{\rho - \alpha_i} \quad (4.18)$$

, o qual poderia ser adotado para representar a situação em que a Empresa i construirá seu portfólio por um prazo muito longo, em que o valor de κ_i se aproxima ao de uma perpetuidade.

Observe-se que o Líder não detém nenhuma opção, aqui (ele já exerceu sua opção de entrar no mercado). Na verdade, a função do Líder reflete o que acontece ao seu valor se seu competidor, o Seguidor, também exercer sua opção de entrar no mercado. Portanto, os termos entre parênteses do lado direito da Equação (4.15) refletem o valor do Líder se o seu competidor nunca entrar na geração eólica, enquanto o primeiro termo reflete a erosão no valor do Líder, dado o risco de o competidor também entrar no mercado.

Desta forma, é intuitivo que a constante B deve ser negativa e que a curva representativa do valor do Líder na região de continuação é côncava (à medida

que Y cresce, aumenta o risco de o competidor parar de esperar e também entrar no mercado, o que erode o valor do Líder).

A expressão para Y_{jF}^* já foi obtida durante o desenvolvimento das equações de valor do Seguidor, mas ainda é necessário encontrar o valor da constante B , a qual pode ser obtida usando a condição de continuidade (VMC), isto é, basta igualar as Equações (4.15) e (4.16), no ponto em que $Y_i = Y_j = Y_{jF}^*$. Segue-se que:

$$BY_{jF}^{*\theta_i} + \kappa_i Y_{jF}^* D_{i10} - I_i = \kappa_i Y_{jF}^* D_{i11} - I_i$$

$$B = \kappa_i (D_{i11} - D_{i10}) Y_{jF}^{*1-\theta_i} \quad (4.19)$$

$$\theta_i = \frac{\frac{1}{2} \sigma_i^2 - \alpha_i + \sqrt{[\alpha_i - \frac{1}{2} \sigma_i^2]^2 + 2\rho \sigma_i^2}}{\sigma_i^2} \quad (4.20)$$

É importante observar que a raiz θ_i reflete as próprias crenças da Empresa i sobre o futuro do mercado: ela espera que o oponente, Empresa j , entre quando Y atingir Y_{jF}^* , mas a velocidade/probabilidade com que Y atingirá esse gatilho é comandado pelo processo estocástico adotado pela Empresa i para descrever as perspectivas futuras do mercado. Finalmente, as Equações (4.13), (4.14), (4.15), (4.16), (4.17) ou (4.18), (4.19) e (4.20) permitem traçar a curva de valor do Líder.

O momento em que a Empresa i entrará no mercado como Líder envolve algumas sutilezas, no entanto. A Empresa i tem incentivos para se tornar Líder assim que seu valor como Líder exceder seu valor como Seguidor (este último, conforme detalhado na Seção 4.4.3.2), isto é, assim que $Y = Y_{iP}$, o qual ocorre quando $t = \inf(t | F_{iLider} \geq F_{iSeguidor})$. No entanto, a Empresa i não necessariamente tem que entrar no mercado neste momento, caso não haja o risco de que seu oponente passe à sua frente investindo como Líder e, portanto, forçando a Empresa i a se tornar Seguidor. Se não houver o risco de preempção do mercado pelo oponente, a Empresa i pode esperar por uma realização mais favorável do mercado, isto é, a sua opção de “esperar para entrar” pode ainda ter valor. Assim, a Empresa i pode esperar até um pouco antes que $t = \inf(t | F_{jLider} \geq F_{jSeguidor})$, isto

é, um pouco antes que seu oponente também seja incentivado a entrar como Líder, o que acontece em $Y = Y_{jP}$. Em resumo, a Empresa i de fato se interessa em investir em $Y_{jP} - \xi$.

Existe outra sutileza a resolver: ainda vale a pena esperar, de fato? Quando a Empresa i ainda mantém viva sua opção de entrar no mercado como Líder, seu valor é definido pela seguinte expressão: $F_i(Y_i) = MY_i^{\theta_i}$ (4.21)

Somente vale a pena continuar esperando se o valor da espera exceder o valor da Empresa i como Líder, o qual é definido pelas Equações (4.15) e (4.16). O ponto de parada ótima, aqui, pode novamente ser obtido por meio das condições de contorno de continuidade e contato suave (VMC, SPC), aplicadas às Equações (4.15) e (4.21), no ponto aqui definido como $Y = Y_i^*$, isto é, o ponto em que esperar para investir não é mais ótimo. Assim:

$$\text{VMC: } MY_i^{*\theta_i} = BY_i^{\theta_i} + (\kappa_i Y_i D_{i10} - I_i)$$

$$\text{SPC: } \theta_i MY_i^{*\theta_i-1} = \theta_i BY_i^{*\theta_i-1} + \kappa_i D_{i10}$$

$$\text{Como resultado: } Y_i^* = \frac{\theta_i}{\theta_i - 1} \cdot \frac{I_i}{\kappa_i D_{i10}} \quad (4.22)$$

$$M = B + \frac{Y_i^{*(1-\theta_i)}}{\theta_i} \kappa_i D_{i10} \quad (4.23)$$

Vale lembrar que o gatilho que faz a empresa parar de esperar, Y_i^* , é também o gatilho que aciona a entrada da empresa na situação em que ela é monopolista no mercado e, portanto, não há ameaça de que a entrada de um competidor erodirá seu valor (referir-se ao Anexo 4.2 para uma breve discussão do gatilho na situação de monopólio e da comparação do valor do Líder nas situações de monopólio e duopólio). Dependendo dos parâmetros do problema, Y_i^* pode ser maior ou menor que Y_{jP} . Assim, a Empresa i irá de fato entrar no mercado como Líder quando:

a) $Y_{iL}^* = Y_i^*$, se $Y_i^* < Y_{jP}$; neste caso, a Empresa i decide entrar no mesmo ponto em que entraria se fosse monopolista no mercado.

b) $Y_{iL}^* = Y_{jP} - \zeta$, se $Y_i^* \geq Y_{jP}$; a empresa entra no mercado um pouco antes do ponto em que seu oponente tem incentivo para entrar como Líder.

4.4.3.2.

Empresa j é o Líder, Empresa i é o Seguidor

Seguindo procedimentos semelhantes aos adotados na Seção 4.4.3.1, são desenvolvidas as funções de valor do Líder e do Seguidor, também neste caso.

Seguidor (Empresa i)

$$\frac{1}{2}\sigma_i Y_i^2 F_{i,Y_i} + \alpha_i Y_i F_{i,Y_i} - \rho F = 0 \quad \text{ou, simplificando a notação:}$$

$$\frac{1}{2}\sigma_i Y_i^2 F_i'' + \alpha_i Y_i F_i' - \rho F = 0$$

$$\left[\begin{array}{l} F_i(Y_i) = CY_i^{\varphi_i} \quad , \text{ na região de continuação, isto é, para } Y_i \leq Y_{iF}^* \quad (4.24) \\ F_i(Y_i) = \kappa_i Y_i D_{i11} - I_i \quad , \text{ para } Y_i \geq Y_{iF}^* \quad (4.25) \end{array} \right.$$

$$C = \kappa_i D_{i11} \frac{Y_{iF}^{*1-\varphi_i}}{\varphi_i} \quad (4.26)$$

$$Y_{iF}^* = \frac{\varphi_i}{(\varphi_i - 1) \kappa_i D_{i11}} I_i \quad (4.27)$$

$$\varphi_i = \theta_i = \frac{\frac{1}{2}\sigma_i^2 - \alpha_i + \sqrt{[\alpha_i - \frac{1}{2}\sigma_i^2]^2 + 2\rho\sigma_i^2}}{\sigma_i^2} \quad (4.28)$$

Líder (Empresa j)

$$\frac{1}{2}\sigma_j Y_j^2 F_j'' + \alpha_j Y_j F_j' - \rho F + \pi_j = 0$$

$$\left[\begin{array}{l} F_j(Y_j) = EY_j^{\phi_j} + (\kappa_j Y_j D_{j01} - I_j), \text{ na região de continuação, onde } Y_i \leq Y_{iF}^* \\ F_j(Y_j) = \kappa_j Y_j D_{j11} - I_j, \text{ para } Y_i \geq Y_{iF}^* \end{array} \right. \quad (4.29)$$

$$E = \kappa_j (D_{j11} - D_{j01}) Y_{iF}^{*1-\phi_j} \quad (4.31)$$

$$\phi_j = \beta_j = \frac{\frac{1}{2} \sigma_j^2 - \alpha_j + \sqrt{[\alpha_j - \frac{1}{2} \sigma_j^2]^2 + 2\rho\sigma_j^2}}{\sigma_j^2} \quad (4.32)$$

Novamente, é necessário obter o gatilho de monopolista para o Líder, neste caso, a Empresa j . Seguindo o mesmo racional da Seção 4.4.3.1, chega-se a:

$$Y_j^* = \frac{\beta_j}{\beta_j - 1} \frac{I_j}{\kappa_j D_{j01}} \quad (4.33)$$

O valor da Empresa j , enquanto a opção de entrar no mercado como Líder ainda está viva, é:

$$F_j(Y_j) = NY_j^{\beta_j} \quad (4.34)$$

$$\text{, onde: } N = E + \frac{Y_j^{*(1-\beta_j)}}{\beta_j} \kappa_j D_{j01} \quad (4.35)$$

4.4.4.

Modelo 2 – Ambas Adivinham Erroneamente – o Impacto da Falta de Informação Sobre as Crenças do Concorrente

Cada jogador, não sabendo o que o competidor acha sobre o futuro, toma como premissa que ambos adotam o mesmo processo estocástico para descrever o futuro do mercado. Olhando do ponto de vista de cada competidor, o problema é resolvido como um duopólio com apenas duas assimetrias - no fluxo de valor da empresa, FVE , e no investimento I para entrar no mercado - mas cada jogador usa o seu próprio processo estocástico para resolver o problema. Ao eliminar a assimetria de crenças, o momento esperado de preempção por parte do competidor

muda, afetando, portanto, quanto tempo o Líder acredita que será capaz de colher os frutos de ser o primeiro a entrar no mercado.

Cada empresa espera que o oponente entre em determinado momento no mercado, mas será surpreendida pelo comportamento inesperado do outro jogador, que tomará suas decisões com base em seu próprio e real processo estocástico, o que acaba por alterar o valor das empresas. Os gatilhos de entrada do Líder e do Seguidor, assim como as funções de valor, podem ser derivados de forma equivalente à da Seção 4.4.3. As Seções 4.4.4.1 e 4.4.4.2 exemplificam as mudanças na equação de valor do Líder.

4.4.4.1.

Empresa i como Líder, Empresa j como Seguidor

A Empresa i assume que o competidor, Empresa j , entrará como Seguidor em:

$$Y_{jF}^* = \frac{\theta_i}{(\theta_i - 1)} \frac{I_j}{\kappa_i D_{j11}} \quad (4.36)$$

$$\theta_i = \frac{\frac{1}{2}\sigma_i^2 - \alpha_i + \sqrt{[\alpha_i - \frac{1}{2}\sigma_i^2]^2 + 2\rho\sigma_i^2}}{\sigma_i^2} \quad (\text{conforme já visto na Equação 4.20})$$

e, usando as Equações (4.15), (4.16), (4.17) ou (4.18), (4.19), (4.20) e (4.36), definirá sua curva de valor como Líder. No entanto, a Empresa j entraria como Seguidor no momento definido pela expressão (4.13), não pela expressão (4.36).

4.4.4.2.

Empresa j como Líder, Empresa i como Seguidor

De forma análoga, a decisão do Líder é pautada pela crença de que o Seguidor entrará no seguinte gatilho:

$$Y_{iF}^* = \frac{\beta_j}{(\beta_j - 1)} \frac{I_i}{\kappa_j D_{i11}} \quad (4.37)$$

$$\beta_j = \frac{\frac{1}{2}\sigma_j^2 - \alpha_j + \sqrt{[\alpha_j - \frac{1}{2}\sigma_j^2]^2 + 2\rho\sigma_j^2}}{\sigma_j^2} \quad (\text{conforme já visto na Equação 4.14})$$

As expressões (4.7) ou (4.8), (4.14), (4.29), (4.30), (4.31), e (4.37) definem a equação de valor do Líder, usada para tomar sua decisão de investimento. Essa equação não se materializará, no entanto, pois o Seguidor entrará no momento definido pela expressão (4.27), não pela expressão (4.37).

4.5.

Aplicação do Modelo e Discussão dos Resultados

4.5.1.

Aplicação do Modelo

Usando certa turbina, adequada para o perfil de ventos de uma localidade com bom potencial eólico no Nordeste do Brasil, o parque eólico usado aqui como referência para a Empresa j poderia gerar com um fator de capacidade bruto de 48%. Dado que ainda há perdas estimadas em 7%, investimentos em capacidade instalada de 56 MW são necessários para que o projeto possa vender 25 MW médios no leilão.

Estimou-se um *Capex* de USD 2325/kW para a Empresa j e USD 2372/kW para a Empresa i , uma assimetria de 2%. Uma assimetria de 10% foi adotada para os investimentos iniciais de entrada no mercado, isto é, ($I_i = R\$13,20M$;

$I_j = R\$12M$)⁵⁶. Este investimento corresponde à situação em que o horizonte de investimento de ambas as empresas é de 5 anos.

Por meio de uma projeção do fluxo de caixa esperado deste projeto eólico, apurado com base nas premissas detalhadas na Seção 3.4 e para um preço de energia de R\$153/MWh (o maior preço contratado no leilão 2009), foi obtido o *FVE* esperado de cada uma das empresas do duopólio.

Observe-se que as receitas e custos operacionais previstos para o primeiro projeto-padrão foram considerados iguais para ambos os jogadores, de modo que os fluxos de caixa dos projetos-padrão, na data zero, se diferenciam basicamente em função do *Capex*, apenas para facilitar a intuição. Os fluxos de caixa foram então trazidos a valor presente pela taxa real de 10% aa e os *FVEs* resultantes – R\$ 18,8 M e R\$ 22,0 M - foram usados como estimativa para os parâmetros D_{i10} e D_{j01} , respectivamente, no modelo.

Supôs-se, ainda, que a entrada do concorrente cause uma erosão de aproximadamente R\$ 10 M no *FVE* de cada empresa, de modo que $D_{i11} = 8,8$ e $D_{j11} = 12$. Tal erosão de valor, tomando sempre como base o cenário de referência em que o preço está a R\$ 153/MWh, poderia ocorrer se os custos de equipamento subirem em 6,2-6,4% ou, ainda, se os preços de energia caírem para R\$ 147,55-147,35/MWh ($\Delta < 4\%$) em função do aumento de concorrência, o que parece razoável.

⁵⁶ o custo de projeto de um parque pode equivaler a 2-4% do valor das turbinas, que por sua vez, representa 80% do investimento total em um parque eólico (DEWI, 2009). Isto representaria R\$3,7 a 7,4M no nosso parque de referência. Considerou-se que para se habilitar a ter um portfólio de 3-5-10 parques-padrão (custo total de R\$ 22-37-74M, só nos projetos técnicos), pelo menos 20% deste valor seria despendido na fase de estudos de viabilidade, isto é, R\$ 4-7-11M (no horizonte de 10 anos, considerou-se um custo médio de R\$ 5,6M/parque). Medições anemométricas representam outros 0,15% do custo das turbinas (DEWI, 2009) o que, para parques com 25 MW, representariam R\$ 0,8-1,4-2,8M em custos apenas de medição de ventos para os mesmos 3-5-10 parques-padrão. A esses valores devem ser somados os custos advocatícios, processuais, contratação de pessoal e para captação de capital, entre outros, estimados em R\$ 3,6M, de modo que se adotou como premissa $I_j = R\$ 8,4-12,0-17,4M$ para 3-5-10 parques-padrão, respectivamente. Para 30 parques, *proxy* para uma carteira de número infinito de projetos, assumiu-se $I_j = R\$ 34M$.

Com estas premissas, na hipótese de o mercado de eólicas deteriorar a ponto de as empresas não fazerem novos projetos-padrão ou, ainda, os novos projetos tiverem apenas *FVE* zero, os valores esperados de tais empresas seriam, na pior das hipóteses, $V_i = 8,80 - 13,20 = (\text{R}\$4,4\text{M})$ e $V_j = 12 - 12 = \text{R}\0M . Em resumo, adotaram-se premissas iniciais que, ainda consistentes com a realidade, tornam apenas a Empresa *j* economicamente viável no cenário em que, por erro, ambas as empresas investem simultaneamente⁵⁷.

Neste ponto, é importante observar que o *FVE* das empresas eólicas é muito sensível às principais variáveis do fluxo de caixa: 2% de aumento no *Capex* causam 14% de redução no *FVE*; 5% de aumento no *Capex* causam 35% de redução no *FVE*. Da mesma forma, cada redução de R\$ 1/MWh no preço reduz o *FVE* de ambas as empresas em R\$ 1,37 M, o que significa que, se o preço cair 2%, de R\$ 153/MWh para R\$ 150/MWh, o *FVE* da Empresa *j* se reduz em 19%, por exemplo. Assim, a volatilidade a ser utilizada no processo estocástico do *FVE* deve ser bem alta e foi, portanto, inicialmente arbitrada em 40%.

Pelos mesmos motivos, também faz sentido que os parâmetros α_i e α_j , que expressam a tendência de crescimento ou decaimento do valor esperado dos *FVEs* sejam mais altos do que os usualmente observados em processos estocásticos que descrevem os preços de ativos financeiros ou *commodities*. Os parâmetros α_i e α_j foram inicialmente arbitrados em 5%.

Com este conjunto inicial de parâmetros, resumidos na Tabela 4.3 a seguir, foi montado então o cenário-base, a partir do qual foram feitas as análises de sensibilidade.

⁵⁷ Não se considerou aqui que o desempenho poderia ainda ser também afetado pelo risco privado, por exemplo, o risco de geração.

Tabela 4.3: Cenário-Base para Cada Empresa, no Qual não Há Assimetria Quanto à Visão de Futuro

	Empresa i	Empresa j
<i>FVE determinístico</i> , quando o competidor ainda não entrou no mercado	$D_{i10} = R\$18,8M$	$D_{j01} = R\$22,0M$
<i>FVE determinístico</i> , quando ambas as empresas já entraram no mercado	$D_{i11} = R\$8,8M$	$D_{j11} = R\$12,0M$
Investimento para entrar no mercado (I), conforme o horizonte de investimento	$I_{i\infty} = 1,10.I_{j\infty} = R\$37,4M$ $I_{i5anos} = R\$13,2M$	$I_{j\infty} = R\$34,0M$ $I_{j5anos} = R\$12,0$
Visão de Futuro	$\alpha_i = 5\%$ $\sigma_i = 40\%$	$\alpha_j = 5\%$ $\sigma_j = 40\%$

Nota: os *FVEs* apresentados nesta tabela equivalem à situação em que a Empresa i gasta USD 2372/kW (=R\$ 4174/kW=> $Capex\ i = R\$ 235\ M$) em seu projeto-padrão, na data zero, enquanto a Empresa j gasta R\$ 2325/kW (=R\$ 4069/kW => $Capex\ j = R\$ 231\ M$), assumindo-se, ainda, que todos os demais fluxos de entrada e saída de caixa são iguais para ambas as empresas.

O modelo, por meio das equações de valor detalhadas nas seções anteriores, identifica os valores de Y que acionam a entrada da Empresa i e da Empresa j no mercado, para cada conjunto de parâmetros utilizado. Estes valores de Y podem então ser traduzidos em *FVEs* das empresas (ex.: *FVE* de entrada como Seguidor: $FVE_j = Y \cdot D_{j11}$; *FVE* de entrada como Líder: $FVE_j = Y \cdot D_{j01}$).

De modo a tornar essa informação – o *FVE* que aciona a entrada das empresas no mercado – em algo mais palpável e de fácil intuição, foram obtidas as equações “*FVE*” versus “preço da energia” para cada um dos projetos-padrão. Deste modo, os *FVEs*-gatilho de cada empresa, gerados pelo modelo, foram simplesmente transformados em preços-gatilho da energia, em R\$/MWh. Este passo visou calcular um “preço sintético”, isto é, o preço tal que, considerando-se todas as demais premissas do fluxo de caixa do projeto como constantes, faria com que as empresas obtivessem o *FVE* que as faria entrar no mercado.

A Figura 4.8 ilustra a relação “*FVE*” versus “preço da energia” utilizada para se obterem os preços-gatilho, os preços de entrada no mercado.

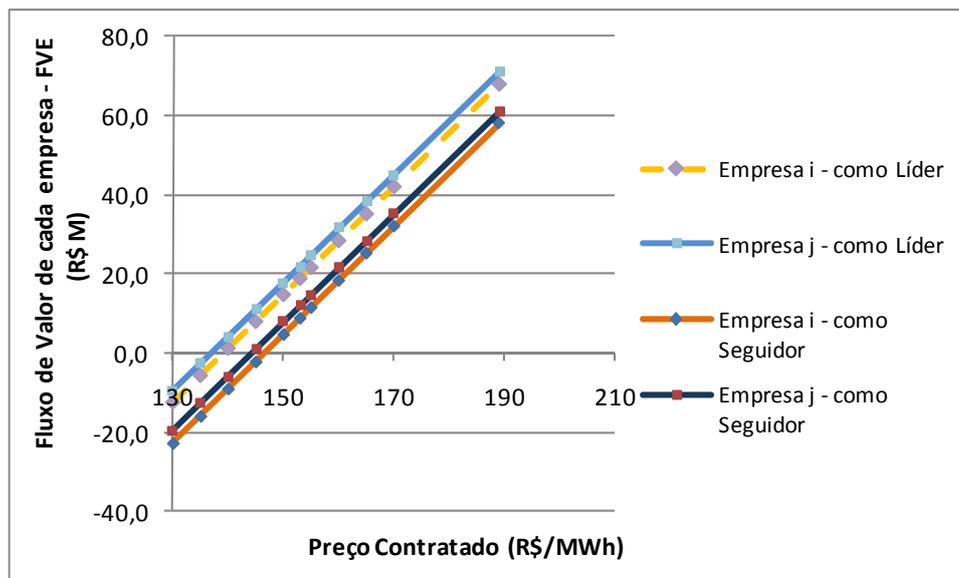


Figura 4.8: Resultado das Projeções do *FVE* Esperado do Projeto-Padrão de Cada Empresa, Quando Sujeitos a Variação no Preço Contratado da Energia.

A diferença entre as retas nas condições de Líder e Seguidor refletem a “vantagem da primeira movida”. A relação *FVE* \times *Preço* expressa por estas retas foi utilizada para converter o *FVE*-gatilho em preço-gatilho.

4.5.2. Discussão dos Resultados

4.5.2.1. Cenário-Base

Primeiramente, verificou-se qual seria o resultado do jogo representado pelo cenário-base, cujas premissas estão detalhadas na Tabela 4.3. No cenário-base, e considerando-se um horizonte de investimento de 5 anos, o modelo indica que a Empresa *j* entraria como Líder no mercado, ao preço de R\$ 143,64/MWh (equivalente ao $Y=0,419$ e, portanto a um $FVE=R\$9M$). A Empresa *i* seria, portanto, o Seguidor, entrando no mercado apenas ao preço de R\$ 154,02 (equivalente ao $Y=1,152$ e, portanto a um $FVE=R\$10M$).

É interessante observar que a realização de Y que incentivaria a Empresa *i* a entrar teria que ser quase três vezes superior ao Y que aciona a entrada da Empresa *j*. No entanto, como $FVE_i = \tilde{Y}_i \cdot D_{i11}$ e $D_{i11} = 0,47D_{i10}$, a Empresa *i* entra no

mercado quando seu FVE está apenas um pouco maior que o FVE de seu concorrente, quando este entrou no mercado como Líder.

De qualquer forma, o cenário-base está consistente com os lances apresentados pelas empresas que de fato participaram do 1º. leilão de eólicas no Brasil: R\$ 131 a 189/MWh. O cenário-base também reflete a situação em que a Empresa i não teria vendido energia no leilão, no qual o maior preço contratado foi R\$ 153/MWh.

A Figura 4.9 mostra as curvas de valor das duas empresas no cenário-base. Estão assinalados, também, o ponto em que haveria risco de preempção por parte da Empresa i e o ponto em que a Empresa j de fato entra como Líder. Neste caso, a Empresa j entra em seu gatilho como monopolista, que coincide com o ponto em que a opção de esperar para entrar no mercado deixa de ter valor, o qual ocorre antes do ponto em que há risco de o concorrente entrar como Líder.

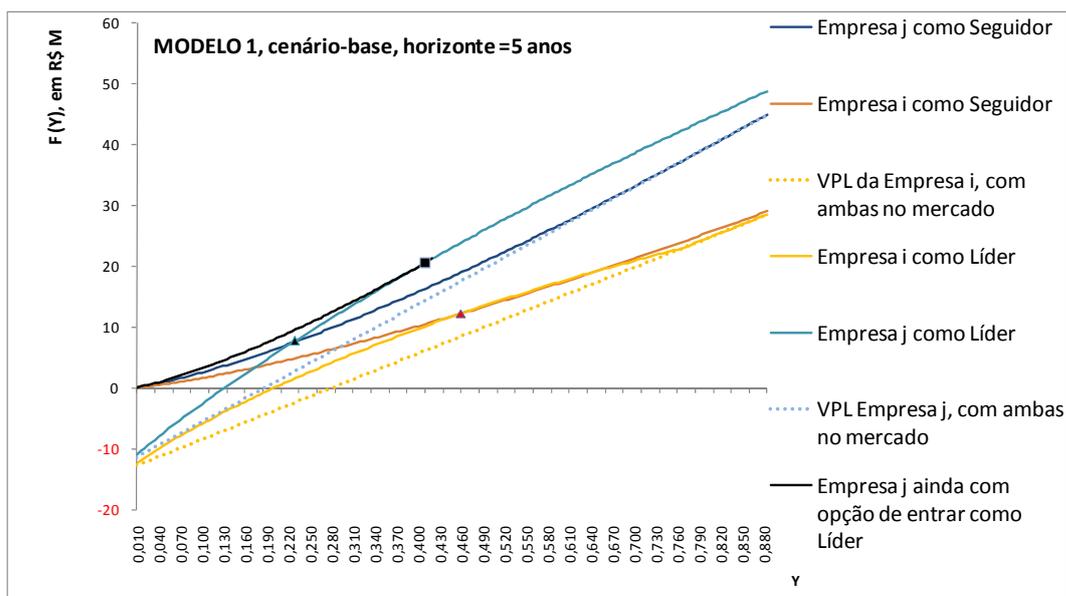


Figura 4.9: Curvas de Valor no Cenário-Base. Horizonte de Investimentos = 5 Anos.

A Empresa j entra em $Y=0,419$, seu gatilho como monopolista (também o gatilho para entrar no mercado como Líder), antes, portanto, do ponto $Y= 0,460$, a partir do qual haveria risco de preempção por parte de seu competidor. As empresas entram no mercado quando seus $FVEs$ valem, respectivamente, $FVE_i = R\$ 10 M$ (\Rightarrow preço $i = R\$ 154,02/MWh$) e $FVE_j = R\$ 9M$ (\Rightarrow preço $j = R\$ 143,64/MWh$).

Observa-se na Figura 4.10 que quando as empresas têm uma intenção de investimento de longuíssimo prazo, a entrada se dá para realizações de Y bem inferiores à situação em que o horizonte de investimentos é de apenas 5 anos. Este resultado reflete os parâmetros escolhidos para o investimento de entrada no mercado, I , que assumem haver ganhos de escala. Quando não se considera ganhos de escala, a entrada das empresas se dá em momentos semelhantes nos dois casos, horizonte 5 anos e horizonte infinito de investimentos. Também há que se pensar se a tendência α de 5%aa faria sentido em um horizonte infinito, porém optou-se por mantê-la neste patamar apenas para fins de comparação de resultados.

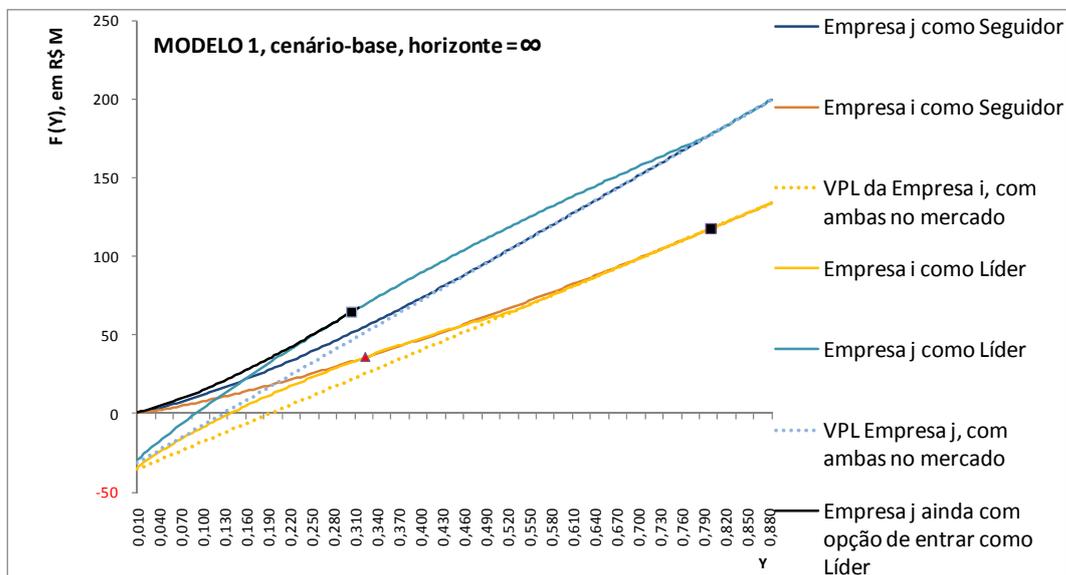


Figura 4.10: Curvas de Valor no Cenário-Base, Horizonte Infinito de Investimentos.

A Empresa j entra em $Y=0,289$, seu gatilho como monopolista (também o gatilho para entrar no mercado como Líder), antes, portanto, do ponto $Y=0,320$, a partir do qual haveria risco de preempção por parte de seu competidor. As empresas entram no mercado quando $FVE_i = R\$ 7 \text{ M}$ (\Rightarrow preço $i = R\$ 151,73/\text{MWh}$) e $FVE_j = R\$ 6 \text{ M}$ (\Rightarrow preço $j = R\$ 141,55/\text{MWh}$).

Alterações nos parâmetros do cenário-base, onde as visões de futuro são simétricas, não são suficientes para que mude o resultado do problema: a Empresa j , com projetos de maior FVE , sempre entra antes no mercado.

Resta, então, verificar o efeito que a introdução de assimetria quanto à visão de futuro causa na decisão. Isto será ilustrado nas próximas seções, via exemplos que mostrarão as situações-limite em que há mudança na decisão.

4.5.2.2. Modelo 1

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram o que acontece quando se introduz assimetria nas crenças das empresas com relação ao futuro, traduzidas aqui na incerteza (volatilidade σ) dos $FVEs$ de cada empresa, assim como em uma expectativa diferenciada quanto à tendência (α) dos $FVEs$. É importante notar que, dados os sinais contraditórios com relação ao futuro do mercado para energia eólica, essa assimetria é factível, para não dizer bastante provável.

Assume-se no Modelo 1 que cada empresa tem uma boa idéia sobre as crenças de seu competidor. Assim, se a Empresa j julgar que o mercado será mais volátil, tal qual modelado na Figura 4.11, ela suporá que a concorrente, mais segura quanto ao mercado, logo terá incentivos para entrar; portanto, a Empresa j não poderá colher as vantagens de ser Líder por muito tempo. Deste modo, a Empresa i - cujo FVE é menor -, acabaria por ser a Líder no mercado.

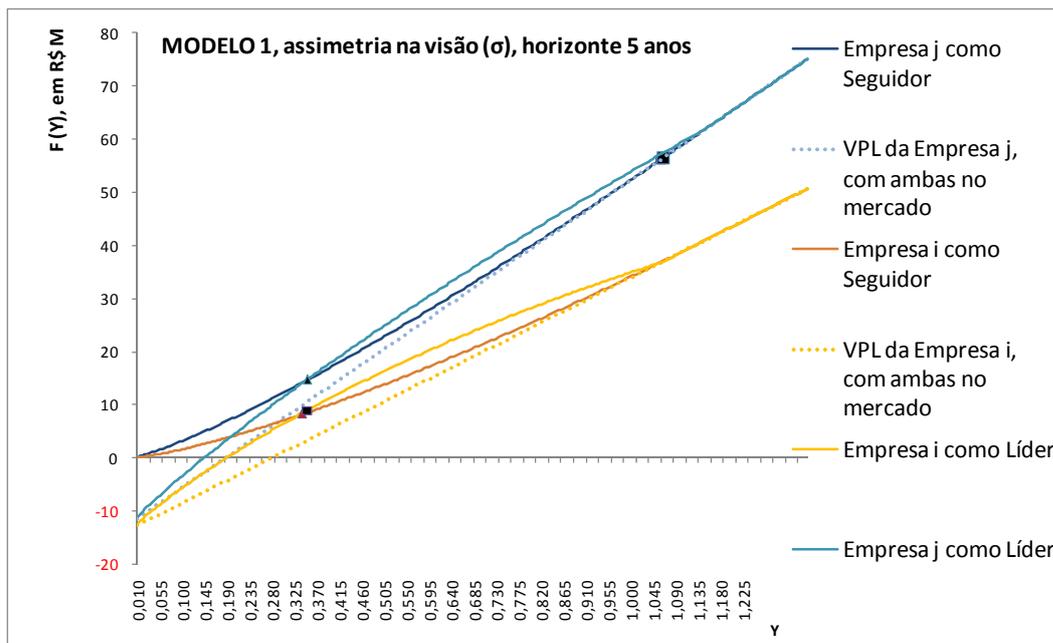


Figura 4.11: Curvas de Valor Quando o Cenário-Base é Alterado de Modo a Refletir Assimetria na Volatilidade dos $FVEs$ ($\sigma_i = 40\%$; $\sigma_j = 55\%$), Horizonte de Investimentos = 5 anos.

Na Figura 4.11 a Empresa i entra antes no mercado, em $Y=0,3449$, um pouco antes do ponto em que seu concorrente seria incentivado a entrar como Líder. Se não houvesse esse risco, a Empresa i entraria apenas no seu gatilho como monopolista ($Y=0,5391$). Assim, as empresas entram no mercado quando $FVE_i = R\$ 6 M$ (\Rightarrow preço $i = R\$ 143,89/MWh$) e $FVE_j = R\$ 13M$ (\Rightarrow preço $j = R\$ 153,53/MWh$).

A Figura 4.12 mostra outra situação factível: neste caso são mantidas as premissas do cenário-base, porém introduz-se assimetria na tendência α , isto é, a Empresa i , com menor FVE , acha que em média as condições do mercado se manterão constantes durante o seu horizonte de investimentos ($\alpha_i=0$), enquanto a Empresa j projeta uma melhoria geral das condições, tal que a tendência é de um crescimento esperado de 5%aa nos $FVEs$. O resultado, aparentemente contra-intuitivo, é de que a Empresa i entra antes no mercado: como o valor de esperar para investir como Seguidor cai, o ponto em que o valor como Líder supera o valor como Seguidor ocorre para uma realização de Y mais baixa.

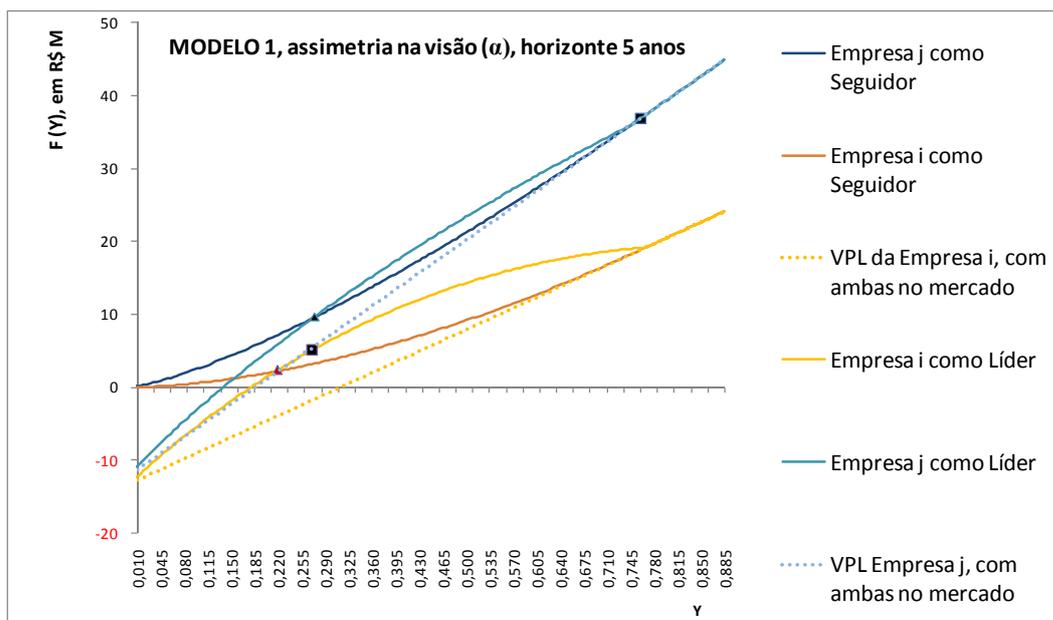


Figura 4.12: Curvas de Valor Quando o Cenário-Base é Alterado de Modo a Refletir Assimetria na Tendência dos $FVEs$ ($\alpha_i = 0; \alpha_j = 5\%$), Horizonte de Investimentos = 5 anos.

Na Figura 4.12 a Empresa i entra antes no mercado, em $Y=0,2749$, um pouco antes do ponto em que seu concorrente seria incentivado a entrar como Líder. Se não houvesse esse risco, a Empresa i entraria apenas no seu gatilho como monopolista ($Y=0,3488$). Assim, as empresas entram no mercado, respectivamente, em $FVE_i = R\$ 5$ M (\Rightarrow preço $i = R\$ 142,93/\text{MWh}$) e $FVE_j = R\$ 9$ M (\Rightarrow preço $j = R\$ 150,98/\text{MWh}$).

Observe-se que, até o ponto em que a $\alpha_i = 2,1\%$, o resultado é semelhante ao apresentado na Figura 4.12, isto é, a Empresa i , menos viável economicamente, é a primeira a entrar no mercado, e para uma realização de Y apenas um pouco menor, equivalente a um preço de $R\$ 142,65/\text{MWh}$.

A Figura 4.13 mostra outra situação, com parâmetros iguais aos da Figura 4.12, exceto pela assimetria no custo de entrada no mercado. Esta Figura mostra que apenas quando o custo de entrada no mercado da Empresa i aumenta para 1,24 x o custo de entrada da Empresa j , deixa de ser interessante a entrada da Empresa i como Líder. Em resumo, pequenas assimetrias na tendência do processo estocástico já fazem com que a Empresa i , menos viável

economicamente, entre antes no mercado, mesmo nas situações em que o custo de entrada é significativamente maior que o da sua concorrente e o seu FVE é menor.

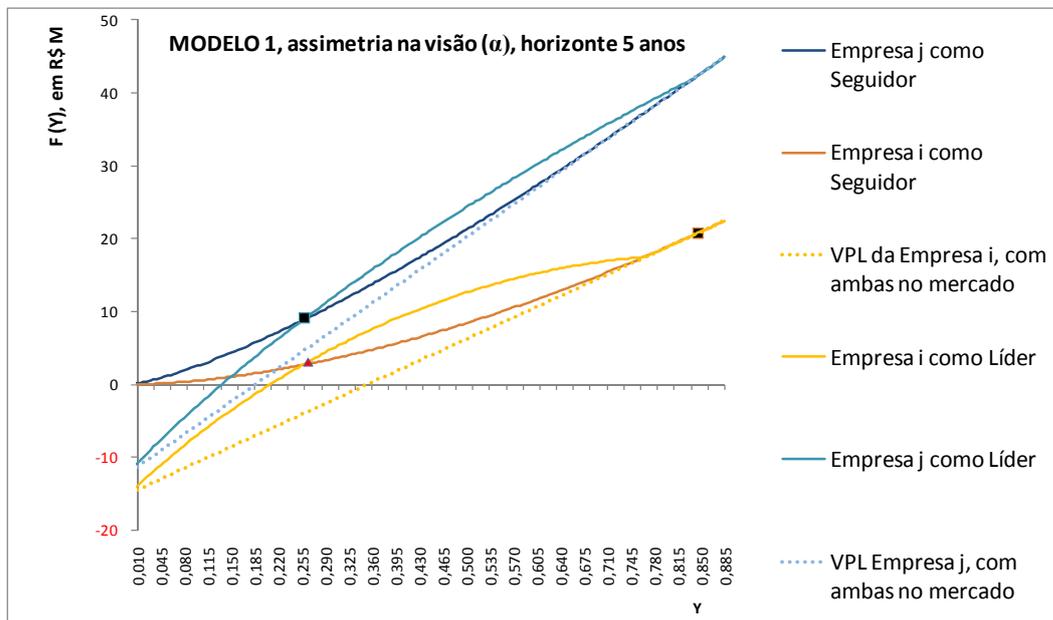


Figura 4.13: Curvas de Valor Quando o Cenário é Equivalente ao da Figura 4.12, Porém Alterado de Modo a Refletir Maior Assimetria no Custo de Entrada no Mercado ($I_i = 1,24I_j = R\$14,88M$), Horizonte de Investimentos = 5 anos.

Na Figura 4.13 a Empresa j passa a ser a Líder, entrando em $Y=0,2599$, um pouco antes do ponto em que seu concorrente seria também incentivado a entrar como Líder. Se não houvesse esse risco, a Empresa j entraria apenas no seu gatilho como monopolista ($Y=0,4188$). Assim, as empresas entram no mercado quando $FVE_i = R\$ 7 M$ (\Rightarrow preço $i = R\$ 152,02/MWh$) e $FVE_j = R\$ 6M$ (\Rightarrow preço $j = R\$ 141,08/MWh$).

A Figura 4.14 mostra outra situação factível em que há assimetria na tendência α , porém a Empresa j agora acredita que em média as condições de mercado se deteriorarão, talvez pela competição com outras fontes de energia ou por um aumento no custo mundial de equipamentos, por exemplo. Observa-se que o modelo é pouco sensível a uma visão pessimista da Empresa j quanto à evolução futura do mercado, pois a decisão não muda significativamente. Isto ocorre para qualquer α baixo ou negativo dado que, por construção, a Empresa j já se viabiliza apenas com seu primeiro projeto e a Empresa i só exerce a opção de entrar se a

realização do mercado for bem mais favorável. Como já visto, o modelo é, no entanto, sensível a uma visão mais pessimista da Empresa i , pois ela tende a fazer a preempção do mercado.

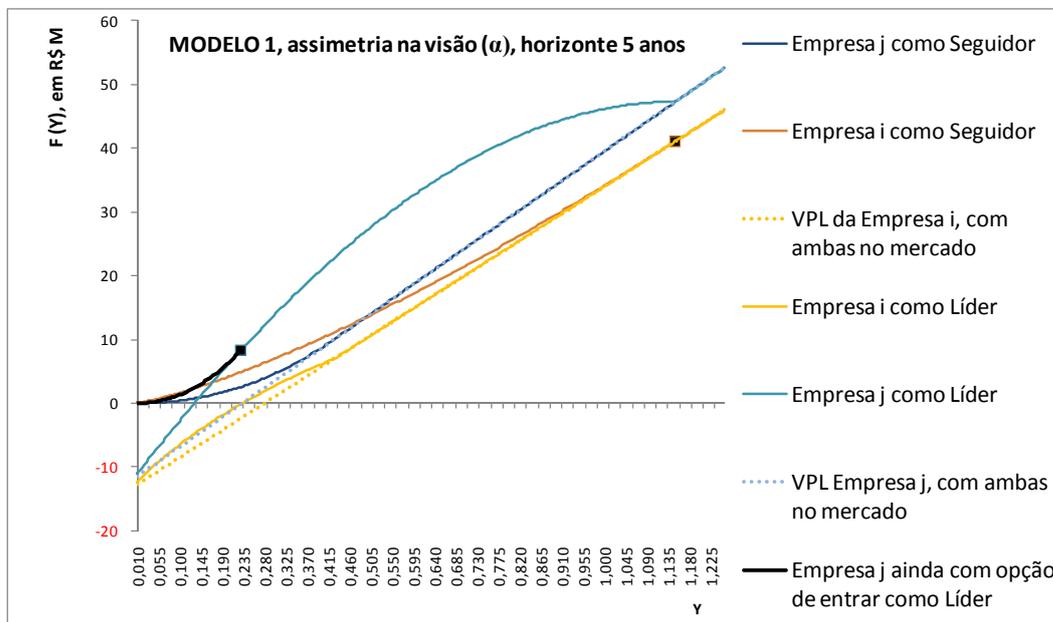


Figura 4.14: Curvas de Valor Quando o Cenário é Equivalente ao Cenário-Base, Exceto no que se Refere ao α_j , Agora Arbitrado em -5%.

Na Figura 4.14 a Empresa j entra como Líder, entrando em $Y=0,2336$, seu gatilho como monopolista. Assim, as empresas entram no mercado quando $FVE_j = R\$ 5 M$ (\Rightarrow preço $j = R\$ 140,66/MWh$) e $FVE_i = R\$ 10M$ (\Rightarrow preço $i = R\$ 154,02/MWh$).

Analisando um pouco melhor a sensibilidade do modelo à visão de futuro da Empresa i (com relação à tendência α dos $FVEs$), observa-se que, enquanto a sua concorrente permanece otimista com relação à tendência do mercado ($\alpha_j = 5\%$) e mantidas as demais premissas do cenário-base, há uma janela na qual a Empresa i faz a preempção do mercado: $-30,0\% < \alpha_i < 2,1\%$. Isto ocorre porque a decisão para a Empresa i se aproxima da situação “agora ou nunca”: o risco de a concorrente entrar é muito grande, o que aumentará a pressão sobre custos e receitas inclusive de seu primeiro projeto (o efeito da curva inversa de demanda) e o mercado não melhorará a ponto de ser melhor aguardar para entrar. Assim, a Empresa i prefere entrar antes no mercado, forçando a concorrente a aguardar mais. Na perspectiva pessimista da Empresa i , a realização de Y que levaria a

concorrente a entrar no mercado demoraria a acontecer, permitindo-lhe colher a vantagem da primeira movida por mais tempo.

A Figura 4.15 ilustra a situação-limite em que a Empresa i , embora extremamente pessimista quanto aos seus futuros $FVEs$, se vê ainda compelida a entrar no mercado.

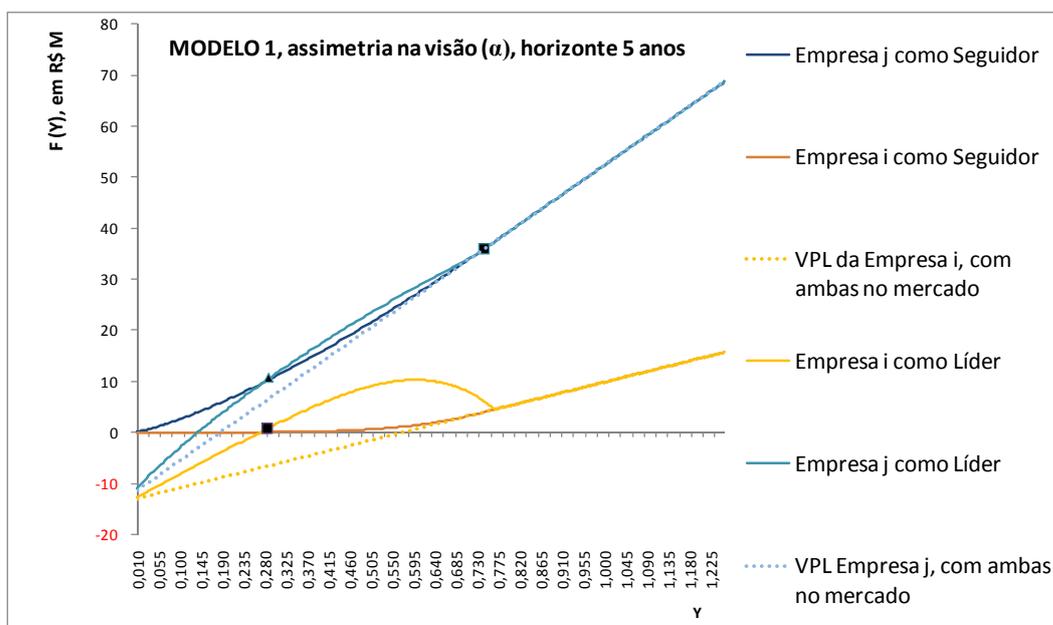


Figura 4.15: Curvas de Valor Quando o Cenário é Equivalente ao Cenário-Base, Exceto no que se Refere ao α_i , Agora Arbitrado em -29%.

Na Figura 4.15 a Empresa i entra como Líder, entrando em $Y=0,2799$, logo após seu ponto de preempção ($Y=0,275$) e um pouco antes do ponto de preempção de seu competidor ($Y=0,280$). Assim, as empresas entram no mercado quando $FVE_i = R\$ 5 M$ (\Rightarrow preço $i = R\$ 143,00/MWh$) e $FVE_j = R\$ 9M$ (\Rightarrow preço $j = R\$ 150,98/MWh$).

A existência de uma “janela de preempção” para a Empresa i reflete o efeito dual que a tendência α causa no modelo de análise⁵⁸: à medida que se reduz o α_i ,

⁵⁸ As equações de valor da Empresa i (nos trechos que antecedem o contato com as equações de FVE esperado) estão reproduzidas abaixo para auxiliar a intuição sobre o efeito dos parâmetros na decisão:

$$\text{valor como Líder: } F_i(Y_i) = \kappa_i (D_{i11} - D_{i10}) Y_{jF}^{*1-\theta_i} Y_i^{\theta_i} + (\kappa_i Y_i D_{i10} - I_i);$$

$$\text{valor como Seguidor: } F_i(Y_i) = \kappa_i D_{i11} \frac{Y_{iF}^{*1-\theta_i}}{\theta_i} Y_i^{\theta_i}.$$

κ_i cai, a raiz θ_i aumenta de valor, e o termo $\frac{\theta_i}{(\theta_i - 1)\kappa_i}$ primeiro se reduz e depois começa a aumentar para valores de α muito negativos. O termo $\frac{\theta_i}{(\theta_i - 1)\kappa_i}$ impacta o gatilho de entrada da Empresa i como Seguidor e da Empresa j como Líder.

A Figura 4.16 mostra o nível de grandeza dos parâmetros que influenciam as equações de valor da Empresa i e como eles variam, para diversos valores da tendência α_i .

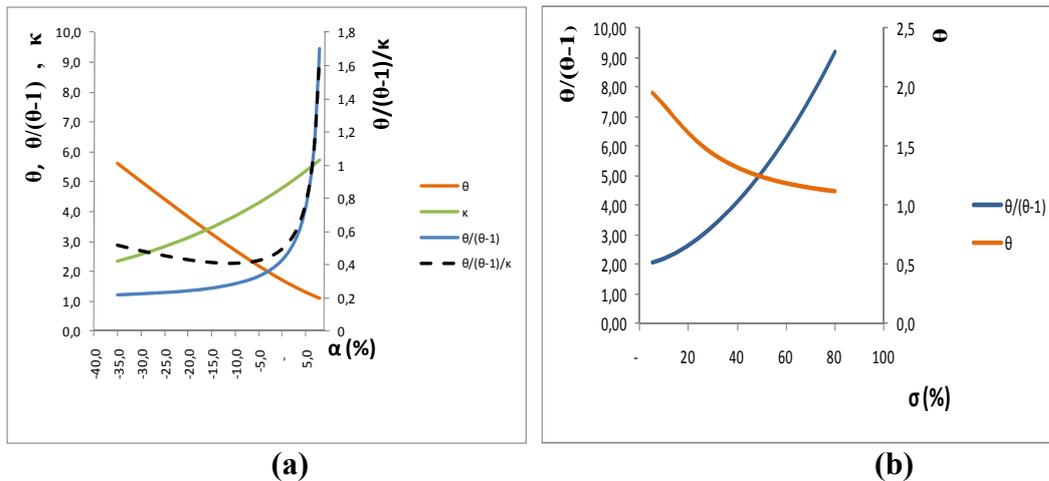


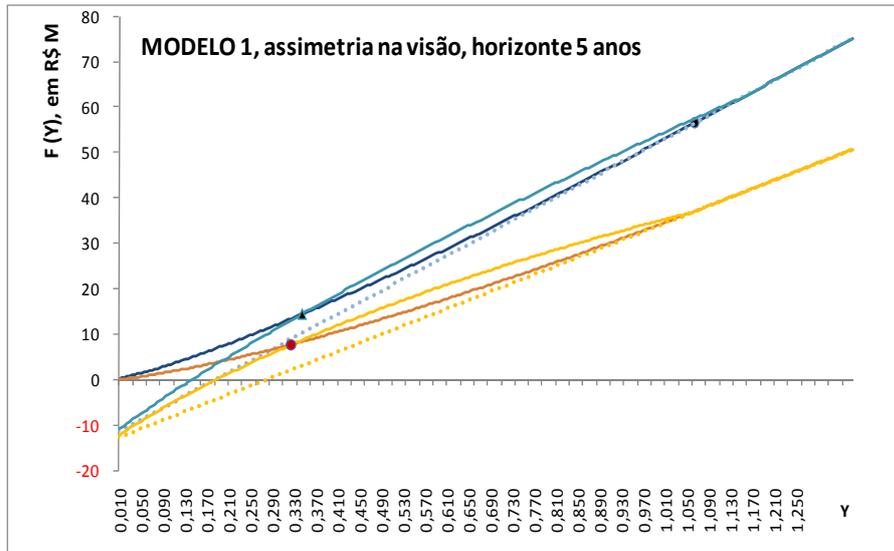
Figura 4.16: Parâmetros que Influenciam as Equações de Valor como Líder e como Seguidor, para Diferentes Valores de α e σ .

Na Figura 4.16(a), assumiu-se uma volatilidade $\sigma=40\%$; na Figura 4.16(b), assumiu-se $\alpha=5\%$. Custo de oportunidade de capital $\rho=10\%$.

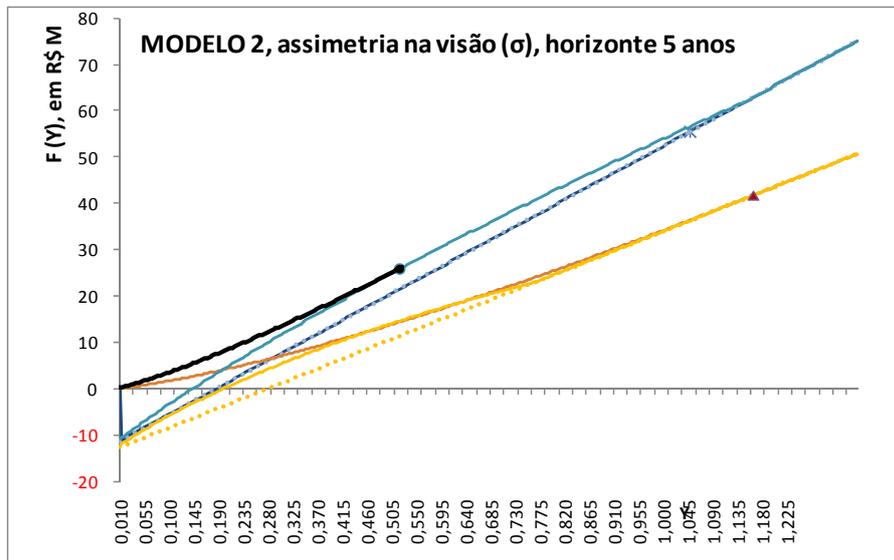
4.5.2.3. Modelo 2

A Figura 4.17 mostra as funções de valor quando os parâmetros são os mesmos da Figura 4.11, sendo que agora, embora as empresas continuem tomando suas decisões de investimento baseadas no que esperam como melhor resposta de seu concorrente, as premissas infelizmente estão erradas. Aqui, não

sabendo o que o concorrente imagina sobre o futuro, assume-se que ele partilha da mesma crença, usa o mesmo processo estocástico.



(a)



(b)

Figura 4.17: Curvas de Valor Quando: (a) os Jogadores Conhecem a Visão de Futuro do Competidor (igual à Figura 4.11); (b) Cada Jogador Assume que o Competidor Tem a Mesma Visão de Futuro que a sua Própria.

Nesta situação de informação equivocada (Figura 4.17(b)), não há preempção do mercado pela Empresa i . A Empresa j entra antes no mercado, em $Y=0,577$, no seu gatilho como monopolista, e a Empresa i entraria como Seguidor em $Y=1,1517$. Assim, as empresas entram no mercado quando $FVE_i = R\$ 10 M$ (\Rightarrow preço $i = R\$ 154,02/MWh$) e $FVE_j = R\$ 13M$ (\Rightarrow preço $j = R\$ 146,20/MWh$).

Ao adotar premissas erradas sobre quando o oponente também entraria no mercado, a Empresa j prevê que seu competidor adiará sua entrada, o que permitiria à Empresa j colher os benefícios da primeira movida por mais tempo. Assim, a Empresa j fica tentada a entrar logo como Líder, em $Y=0,577$, ou R\$ 146,20/MWh, enquanto que, se soubesse o correto processo estocástico adotado pelo competidor, a Empresa j teria investido somente como Seguidor, em $Y=1,059$, ou R\$ 153,53/MWh. Com $Y=0,577$, a Empresa j espera auferir um valor de R\$ 31M com o novo investimento, mas este valor não se realizará.

A Empresa i , por outro lado, assume que seu oponente também imagina que o mercado não será significativamente volátil no futuro e, sabendo-se como a empresa com projetos de menor FVE , imagina que seu oponente ficará tentado a investir antes, em $Y=0,419$, ou R\$ 143,64/MWh. Neste caso, nunca é ótimo para a Empresa i investir com o Líder, de modo que ela planeja investir apenas no seu gatilho de Seguidor, em $Y=1,1517$, ou R\$ 154,02/MWh, antes, portanto, que o esperado pela Empresa j . Como resultado, ao invés de colher o valor de R\$ 31M ao ter investido em $Y=0,577$, a Empresa j valerá apenas R\$ 29M (calculado como na Seção 4.4.3, para $Y=0,577$).

A Tabela 4.4 resume essa discussão, detalhando os gatilhos como Líder e como Seguidor de cada empresa, assim como os gatilhos erroneamente assumidos pelo seu concorrente, para o seguinte conjunto de fatores:

$$\sigma_i = 0,40; \sigma_j = 0,55; \alpha_i = \alpha_j = 0,05; I_i = 1.1I_j = 13,20;$$

$$\rho = 0.10; D_{i11} = 8,8; D_{j11} = 12; D_{j01} = 18,8; D_{i10} = 22.$$

Ao final da Tabela 4.4, o valor de Y em que cada empresa de fato investe, em cada um dos dois modelos.

Tabela 4.4: Comparando o Modelo 1 e o Modelo 2, para um Conjunto Específico de Parâmetros:

	Modelo 1 – ambas adotam premissas corretas sobre o concorrente		Modelo 2 – ambas adotam premissas erradas sobre o concorrente	
	Empresa <i>i</i>	Empresa <i>j</i>	Empresa <i>i</i>	Empresa <i>j</i>
Y em que entra como Seguidor	$Y_{iF}^* = 1,1517$	$Y_{jF}^* = 1,0587$	$Y_{iF}^* = 1,1517$ (mas o concorrente assume que é a $Y=1,5880$)	$Y_{jF}^* = 1,0587$ (mas o concorrente assume que é a $Y=0,7678$)
Y que incentiva a preempção do mercado	$Y_{iP} = 0,3350$	$Y_{jP} = 0,3450$	$Y_{iP} = 0,460$	$Y_{jP} = 0,305$ (mas o oponente assume que há incentivo para investir em $Y=0,2250$)
Y em que investiria como monopolista	$Y_i^* = 0,5391$	$Y_j^* = 0,5774$	$Y_i^* = 0,5391$	$Y_j^* = 0,5774$
Y em que, afinal, ocorre o investimento	como Líder, em: $Y_{iL}^* = 0,3449$	como Seguidor em: $Y_{jF}^* = 1,0587$	como Seguidor, em: $Y_{iF}^* = 1,1517$	como Líder, em: $Y_{jL}^* = 0,5774$

Nota: parâmetros específicos do problema:

$$\sigma_i = 0,40; \sigma_j = 0,55; \alpha_i = \alpha_j = 0,05; I_i = 1. I_j = 13,20;$$

$$\rho = 0,10; D_{i11} = 8,8; D_{j11} = 12; D_{j01} = 18,8; D_{i10} = 22.$$

No Modelo 1 a Empresa *i*, que tem menor *FVE*, entra primeiro no mercado. No Modelo 2 a Empresa *j*, mais viável, é que se torna Líder. Em resumo, um grupo de investidores menos informado sobre as crenças de seus competidores – e assumindo que sua própria visão prevalece no mercado – favorece a entrada de empresas mais viáveis no mercado. Nesse caso, no entanto, o Líder desfruta de

sua vantagem como primeiro entrante por um período de tempo mais curto e acaba por ter um valor menor que o originalmente esperado.

Sob o ponto de vista restrito do custo da eletricidade para os consumidores finais, a situação mostrada pelo Modelo 1 é um pouco melhor, dado que permite que não só que a energia seja oferecida inicialmente a preço mais baixo (R\$ 143,89/MWh versus R\$ 146,20/MWh) mas também que o preço médio da energia fique menor (R\$148,71/MWh, após o investimento da segunda empresa, versus um preço médio de R\$ 150,02/ MWh no Modelo 2)⁵⁹. Esse melhor resultado para os consumidores, no entanto, pode ser colocado em risco se considerarmos que a empresa Líder na situação refletida no Modelo 1 é a Empresa *i*, menos robusta para enfrentar os riscos específicos da empresa.

A Tabela 4.5 apresenta os equilíbrios previstos pelos dois modelos, dados os parâmetros assumidos nos exemplos das Figuras 4.9 a 4.17, assim como em alguns novos cenários.

⁵⁹ Note-se que o preço médio está refletido aqui em termos reais, porém sem considerar o efeito do tempo transcorrido para a entrada do Seguidor. Seria possível uma análise do tempo esperado de toque (*hitting time*), trazendo então o preço do Seguidor para a mesma moeda do preço do Líder e, aí sim, apurar o preço médio. No entanto, para essa análise seria necessário escolher o processo estocástico que comandará os *FVEs* das empresas. Neste caso, bastaria trazer o

preço do Seguidor a valor presente pelo fator de desconto $E \left[e^{-\rho T^*} \right] = \left(\frac{Y_{LiderEntrou}}{Y^*_{Seguidor}} \right)^{\beta_1}$ (DIAS,

2005), onde β_1 reflete o processo estocástico que considerariamos razoável para os *FVEs*. Calcular os preços médios sem considerar o fator de desconto equivale a considerar que no próximo leilão o governo teria que aceitar o preço exigido pelo Seguidor, sob pena de não conseguir comprar energia. Se o governo não concordar com tal preço, a compra seria postergada até que a realização do mercado (=interesse do governo) se iguale ao gatilho do Seguidor. Assim, as comparações dos preços médios obtidos nos diversos cenários apresentados na Tabela 5 podem ser comparados, pois a entrada do Seguidor se dará sempre no mesmo tempo T^* .

Tabela 4.5: Resultados Previstos pelos Modelos 1 e 2, em Diversos

Cenários:

parâmetros	Modelo 1				Modelo 2			
	Empr. <i>i</i> Y (FVE)	Empr. <i>j</i> Y (FVE)	1o. preço	Preço médio	Empr. <i>i</i> Y (FVE)	Empr. <i>j</i> Y (FVE)	1º. preço	Preço médio
Cenário-base (2) $\alpha_i = \alpha_j = 5\%$; $\sigma_i = \sigma_j = 40\%$ $I_j = 34$; $I_i = 1.1 I_j$; Horizonte ∞ ; $D_{i0} = 18,8$; $D_{j0} = 22$; $D_{i1} = 8,8$; $D_{i0} = 12$	0,795 (7,0M)	0,289 (6,4M)	142	147	-	-	-	-
Cenário-base (3) Iguais a (2), exceto pelo horizonte de investimento= 5 anos ($I_j = 12$, $\kappa_j = 5,4$)	1,152 (10,1M)	0,419 (9,2M)	144	149	-	-	-	-
(4) Iguais a (3), exceto por $\sigma_i = 40\%$; $\sigma_j = 55\%$	0,345 (6,5M)	1,059 (12,7M)	144	149	1,152 (10,1M)	0,577 (12,7M)	146	150
(5) Iguais a (3), exceto por $\alpha_i = 0$; $\alpha_j = 5\%$	0,275 (5,2M)	0,768 (9,2M)	143	147	1,588 (29,9M)	0,419 (9,2M)	144	152
(6) Iguais a (5), exceto por $I_i = 1,24 I_j$	0,840 (7,4M)	0,260 (5,7M)	141	147	0,840 (7,4M)	0,419 (9,2M)	144	148
(7) Iguais a (3), exceto por $\alpha_i = 5\%$; $\alpha_j = 0$	1.152 (10,1M)	0,271 (6,0M)	141	148	1,152 (10,1M)	0,271 (6,0M)	141	148
(8) Iguais a (3), exceto por: $\alpha_i = -29\%$; $\alpha_j = 5$	0,280 (5,3M)	0,768 (9,2M)	143	147	0,721 (6,3M)	0,419 (9,2M)	144	147

Nota: preços em R\$/MWh e FVEs em R\$ M; a tabela informa os gatilhos *Y* e os FVEs em que cada empresa entra no mercado, assim como o primeiro preço oferecido ao mercado e o preço médio das duas empresas.

Confirma-se em todos os cenários preços iniciais e médios para o consumidor um pouco maiores na situação em que os jogadores partem de informações equivocadas sobre a visão de futuro do competidor, porém com a

posição de liderança sempre ocupada pela Empresa j , mais viável economicamente.

A Tabela 4.6 apresenta de outra forma o resumo dos resultados, enfatizando as conclusões que se pode tirar no que se refere aos três fatores que deveriam ser levados em consideração, ao se desenhar uma política de contratação de energia: modicidade tarifária (preços os mais baixos possíveis); indústria forte (formada por empresas capazes de concretizar seus projetos); valor previsível (pois empresas colhendo de seus projetos um valor próximo ao que haviam imaginado, sem surpresas negativas, são mais suscetíveis a continuar investindo no mercado).

Observa-se que o Caso-Base, aquele em que as empresas têm visões simétricas sobre o futuro do mercado, é o que garante a melhor combinação desses três fatores. Tal cenário seria factível se a política governamental para o setor de energia eólica fosse calcada em um plano de contratação bem definido e claro para o mercado. A se considerar os resultados do leilão 2009, há indícios que o cenário do Modelo 1 pode ter se concretizado, no entanto.

Tabela 4.6: Resumo dos Resultados, para Diferentes Combinações da Visão de Futuro dos Jogadores

		Líder	Seguidor	
Caso-Base	Visões simétricas, 5 anos	143,64	154,02	Indústria forte, preços baixos, valor previsível
	Visões simétricas, ∞	141,55	151,73	
Modelo 1	$\sigma_i = 40\%$; $\sigma_j = 55\%$	143,89	153,53	Indústria fraca, preços baixos, valor previsível
	$\alpha_i = 0$; $\alpha_j = 5\%$	142,93	150,98	
	$\alpha_i = 0$; $\alpha_j = 5\%$; $li = 1,24lj$	141,08	152,02	
	$\alpha_i = 5\%$; $\alpha_j = -5\%$	140,66	154,02	
	$\alpha_i = -29\%$; $\alpha_j = 5\%$	143,00	150,98	
Modelo 2	$\sigma_i = 40\%$; $\sigma_j = 55\%$	146,20	154,02	Indústria forte, preços altos, valor imprevisível
	$\alpha_i = 0$; $\alpha_j = 5\%$	143,64	154,02	
	$\alpha_i = 0$; $\alpha_j = 5\%$; $li = 1,24lj$	143,64	152,02	
	$\alpha_i = 5\%$; $\alpha_j = -5\%$	140,66	154,02	
	$\alpha_i = -29\%$; $\alpha_j = 5\%$	143,64	151,25	

Nota: nas colunas Líder/Seguidor, os preços de entrada no mercado, em R\$/MWh. Quando o dado estiver em vermelho, significa que se refere à Empresa i , a empresa menos viável. Dados em azul se referem à Empresa j , mais viável economicamente.

4.6. Conclusões e Recomendações

Smit & Trigeorgis (2004, p.52) lembram que a importante contribuição da Teoria de Jogos com Opções Reais à literatura de planejamento estratégico é que ela permite a quantificação do pensamento estratégico, normalmente qualitativo. Este Capítulo procurou fazer exatamente isso, ao analisar os fatos recentes na indústria eólica brasileira sob a ótica desta teoria.

Os resultados do leilão 2009 surpreenderam o setor e o governo. Os vencedores ainda estão no processo final de habilitação, de modo que ainda é cedo para identificar se todos os parques contratados serão viáveis financeiramente. O risco de que o Brasil possa repetir as experiências mal sucedidas da China e do Reino Unido que, ao implantar o sistema de leilões de energia eólica tiveram que lidar com diversos projetos inviáveis financeiramente, gerou as perguntas dessa pesquisa e o estímulo para analisar o problema à luz da teoria de Jogos com Opções Reais.

Interpretando o problema como um duopólio com três assimetrias – no fluxo de valor (*FVE*) de cada empresa, no custo necessário para entrar no mercado (*I*) e nas crenças quanto ao futuro do mercado -, foi feita uma análise de sensibilidade de modo a identificar em que condições o resultado seria alterado, privilegiando a entrada de empresas menos viáveis economicamente no mercado. Concluiu-se que quando os competidores são assimétricos tanto em termos do investimento necessário para implantar seus parques e em termos de suas visões subjetivas sobre as perspectivas para o mercado de eólicas, o risco de preempção do mercado por parte das empresas menos viáveis economicamente cresce significativamente na situação em que tais empresas acham que o mercado será mais estável ou declinante em termos de valor. Assimetrias pequenas na visão de futuro incentivam empresas menos viáveis a entrarem antes, isto é, a um *FVE* (ou *VPL* do projeto-padrão) e a preço mais baixos, que outros projetos mais viáveis economicamente.

Quando os participantes do mercado são menos informados sobre como seus competidores projetam o futuro dos preços de energia eólica, há um incentivo implícito à entrada de projetos mais viáveis, embora isso ocorra à custa de um

preço um pouco mais alto de energia para o consumidor. Com relação ao leilão ocorrido em dezembro 2009, houve diversos seminários congregando os potenciais investidores na discussão das regras de contratação e das características do segmento. Em resumo, os participantes podem ter tido uma boa idéia da visão subjetiva de seus concorrentes, o que pode ter favorecido a contratação de projetos piores (ex.: com menor fator de capacidade), porém a preços mais baixos para os consumidores.

Finalmente, é importante notar que, usando os parâmetros específicos de nosso problema, a decisão é muito sensível ao processo estocástico adotado, especialmente aqueles utilizados pela empresa menos viável economicamente, de modo que equalizar as visões ajudaria na construção de uma indústria eólica mais robusta no Brasil.

A melhor alternativa para reduzir o preço de energia para os consumidores ocorreu quando os investidores têm horizontes de investimento de longuíssimo prazo – cenário factível quando se tem segurança quanto à política de longo prazo do governo para eólicas. Assim, como forma de evitar o efeito perverso de contratar projetos menos viáveis e não necessariamente ao menor preço para o consumidor, o governo brasileiro poderia enviar sinais claros – e críveis – sobre seu comprometimento de longo prazo com o segmento de geração eólica.

Este trabalho tem algumas limitações: primeiro, as conclusões valem para o conjunto adotado de premissas que, embora alinhadas com o que se observou no mercado, podem não refletir a realidade dos ganhadores/perdedores do leilão 2009. Segundo, não foram consideradas as incertezas específicas de cada empresa, que podem variar significativamente entre os competidores, especialmente no que se refere à volatilidade do comportamento dos ventos nos locais dos projetos. Além disso, esperar pode ser a decisão ótima quando há incerteza técnica e alguns competidores podem ter esperado para obter uma série mais longa de ventos antes de investir, de fato, o que é um bom tema para pesquisa futura, assim como a replicação da análise por meio de modelos discretos e a comparação com os resultados obtidos nesta tese. Finalmente, adotou-se um modelo em tempo contínuo como *proxy* do problema, sendo que as contratações de energia eólica não se dão continuamente no tempo.

Apesar das limitações, o trabalho permite aos legisladores e às empresas ganhar intuição sobre os fatores que influenciam a decisão de investimento no segmento eólico e pode trazer informações práticas para os atores do mercado, podendo ainda a metodologia ser replicada para analisar outros setores da economia.

Com base no que se identificou na literatura, vale notar que este é o primeiro trabalho a analisar este mercado no Brasil e no mundo do ponto de vista da teoria de Jogos com Opções Reais. Além disso, é também o primeiro trabalho a utilizar a teoria de duopólios em presença de três assimetrias, sendo uma delas a assimetria no processo de difusão do valor de uma carteira de projetos eólicos, análise original em presença da literatura já existente.

4.7. Referências Bibliográficas

AZEVEDO, A.; PAXSON, D.A. Real Options Investment Games: A Review. 14th Annual International Conference. Real Options Group. June 2010. Rome/Italy. Available at: http://realoptions.org/openconf/modules/request.php?module=oc_program&action=program.php&p=program.

BASTIAN-PINTO, C.L. Modelagem de opções reais com processos de reversão à média em tempo discreto: uma aplicação na indústria brasileira de etanol. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

BERTRAND, J. 1883. Traduzido por J.W.Friedman em 1988. In: DAUGHETY, A.F. Cournot Oligopoly. Ed. Cambridge: Cambridge University Press, p.73-81.

BLACK, F.; SCHOLES M. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy*, n. 81, p.p. 637 – 654, May-Jun, 1973.

BOREL, E. 1921. Traduzido por L.J.Savage. In: *Econometrica*, 21, p.97-100, 1953.

BOYER, M.; GRAVEL, E.; LASSERRE, P. Real Options and Strategic Competition: a survey. Real Options Conference, 2004. Disponível em: www.realoptions.org.br. Acesso em dez 2009.

BRANDÃO, L. E. T.; HAHN, W.J.; DYER, J.S. Using Binomial Decision Trees to solve Real Options Valuation Problems. *Decision Analysis*, v. 2, n. 2, p.p. 69-88, June , 2005.

CHEVALIER-ROIGNANT,B.; FLATH, C.M.; HUCHZZERMEIER, A.; TRIGEORGIS, L. Strategic Investment under Uncertainty: a synthesis. Real Options Conference, 2010. Disponível em: www.realoptions.org.br. Acesso em março, 2010.

COPELAND, T.; ANTIKAROV, V., A. *Real Options: A Practitioner's Guide* . Texere , New York, 2003.

COSTA, R.A.; CASOTTI,B.P.; AZEVEDO,R.L.S. Um panorama da indústria de bens de capital relacionados à energia eólica. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n.29, p.229-278, março 2009.

COURNOT,A.A. Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses. 1838. In: Researches into the Mathematical Principles of the Theory of Wealth. BiblioBazaar. 2009. Tradução em inglês por Bacon (1927): Researches into the mathematical principles of the Theory of Wealth. NY, MacMillan.

COX, J, C.; ROSS, S. A.; RUBINSTEIN, M. Option pricing: A simplified approach. *Journal of Financial Economics*, n. 7, p.p. 229–263, September, 1979.

DEWI. Energia Eólica: técnica, planejamento, economia e riscos. Seminário. Rio de Janeiro, Agosto 2009.

DIAS, M.A.G. Opções reais híbridas com aplicações em petróleo. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica, PUC-Rio. Departamento de Engenharia Industrial. 2005.

DIXIT,A.; NALEBUFF,B.J. Thinking Strategically: the competitive edge in business, politics and everyday life. New York Press, New York. 1991.

DIXIT, A. & PINDYCK,R. *Investment Under Uncertainty*. Princeton University Press.1994.

FUDENBERG, D.; TIROLE, J. Preemption and rent equalization in the adoption of new technology. *The Review of Economic Studies*, n.52, p.383-401, 1985.

_____. Perfect Bayesian and sequential equilibrium. *Journal of Economic Theory*. 1991, n.53, p.236-260.

HARSANYI, J.C. Games with Incomplete Information Played by 'Bayesian' Players, parts I, II, III. *Management Science*, v. 14(3), Nov 1967, p.159-182; v.14(5), Jan 1968, p.320-334; v. 14(7), Mar 1968, p.486-502.

HONDA, H.; GOTO, M.; OHNO, T. Real Option Approach on Implementation of Wind-diesel Hybrid Generators. In: HAASIS, H.-D.; KOPFER, H. and SCHÖNBERGER, J. *Operations Research Proceedings 2005*, Springer, Berlin, pp.519-524, 2006.

HUISMAN, K.J.M. *Technology Investment: a game theoretical real options approach*. Kluwer Academic Publishers. USA. 2001.

HUISMAN, K.J.M; KORT, P. One Technology and Symmetric Firms. In: HUISMAN, K.J.M. *Technology Investment: a game theoretical real options approach*, cap. 7, 2001.

HUISMAN, K.J.M.; NIELSEN, M. One Technology and Asymmetric Firms. In: HUISMAN, K.J.M. *Technology Investment: a game theoretical real options approach*, cap. 8, 2001.

INSLEY, M. A Real Options Approach to the Valuation of a Forestry Investment. *Journal of Environmental Economics and Management*, 44. p.471-492, 2002.

KESTER, W.C. Today's Options for Tomorrow's Growth. *Harvard Business Review*, n.62, Mar-Apr, 1984. p.153-160.

KONG, J.J.; KWOK, Y.K. Real Options in strategic investment games between two asymmetric firms. *European Journal of Operational Research*, 2007, n.181, p.967-985.

KREPS, D.M.; WILSON, R. Sequential equilibria. *Econometrica*, v.50, p.863-894.1982.

LEAHY, J. Investment in Competitive Equilibrium: the optimality of myopic behavior. *Quarterly Journal of Economics*, p.1105-1133, 1993.

LEMA, A.; RUBY, K. Between fragmented authoritarianism and policy coordination: creating a Chinese market for wind energy. *Energy Policy*, nr. 35, p.3879-3890, 2007.

LO, A. W.; Mc KINLAY, A. C. Stock market prices do not follow random walks: Evidence from a simple specification test. *The Review of Financial Studies*, v. 1, n. 1, p.p. 41-66, Spring, 1988.

LONGSTAFF, F.A.; SCHWARTZ, E.S. Valuing American Options By Simulation: A Simple Least-Square Approach. *Review of Financial Studies*, v. 14, n. 1, p.p. 113-147, 2001.

MAS-COLELL, A.; WHINSTON, M.D.; GREEN, J.R. *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, 1995.

McDONALD, R.; SIEGEL, D. The Value of Waiting to Invest. *Quarterly Journal of Economics*. 101, p.707-728, November 1986.

MEADE et al. Forest and Forest Land Valuation: how to value forests and forest land to include carbon costs and benefits. Relatório preparado para o New Zealand Ministry of Agriculture & Forestry. ISCR, New Zealand Institute for the Study of Competition and Regulation, 2008.

MÉNDEZ, M.; GOYANES, A.; LAMOTHE, P. Real Options Valuation of a Wind Farm. Real Options Conference, 2009. Disponível em: www.realoptions.org.br. Acesso em dez 2009.

MERTON, R.C. Theory of Rational Option Pricing. *Bell Journal of Economics and Management Science*, n. 4, p.p. 141-183, Spring, 1973.

MILTERSEN, K.R.; SCHWARTZ, E.S. R&D Investments with competitive interactions. *Review of Finance*, n.8, p.355-401, 2004.

MYERSON, R.B. Nash equilibrium and the history of economic theory. *Journal of Economic Literature*. v. XXXVII, p.1067-1082, Sep 1999.

NASH, J.F. The Bargaining Problem. *Econometrica*. 18, p.155-162, 1950.

NASH, J.F. Equilibrium Points in n-Person Games. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 36, p. 48-49. 1950.

NASH, J.F. Non-cooperative games. *Annals Mathematics*. 1951, n.54, p.289-295.

NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. Theory of Games and Economic Behavior. 1944. Princeton Classic Editions.

PDEE-Plano Decenal de Expansão de Energia 2008/2017. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2008.

PDEE-Plano Decenal de Expansão de Energia 2019. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2010.

PAWLINA, G.; KORT, P.M. Real Options in an Asymmetric Duopoly: who benefits from your competitive disadvantage? *Journal of Economics and Management Strategy*, vol 15, n.1, p. 1-35, 2006.

REINGANUM, J.F. On the diffusion of new technology: a game theoretic approach. *The Review of Economic Studies*. 1981, n.48, p.395-405.

SCATASTA, S.; MENNEL, T. Comparing Feed-In Tariffs and Renewable Obligation Certificates – the Case of Wind Farming. Real Options Conference, 2009. Disponível em: www.realloptions.org.br. Acesso em dez 2009.

SCHELLING, T. Strategy of Conflict. Harvard U. Press. USA. 1960.

SELTEN, R.. Reexamination of the Perfectness Concept for Equilibrium Points in Extensive Games. *International Journal of Game Theory*, 4, p.25-55, 1975.

SMETS, F. Exporting versus FDI: the effect of uncertainty, irreversibilities and strategic interactions. Working Paper, Yale University, 1991.

_____. Essays on Foreign Direct Investment. Doctoral dissertation. Yale University. 1993.

SMIT,H.Y.J.; ANKUM,L.A. A Real Options and Game-Theoretic approach to corporate investment strategy under competition. *Financial Management*. Autumn 1993, p.241-250.

SMIT,H.T.J.; TRIGEORGIS,L. Strategic Investment: real options and games. Princeton Universty Press, USA. 2004.

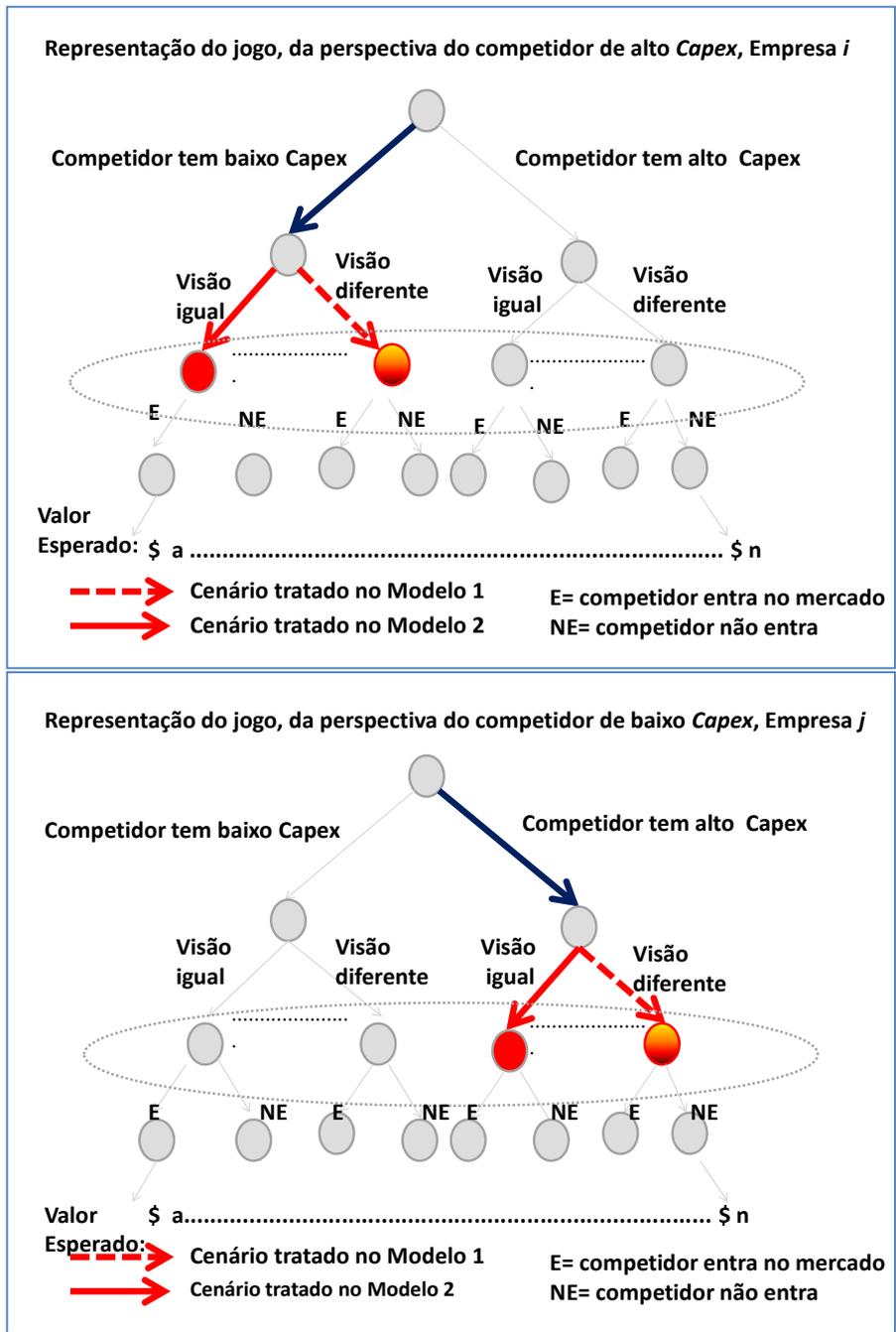
TOURINHO, O. A. F. The valuation of reserves of natural resources: an option pricing approach. PhD Dissertation, University of California, Berkeley, 1979.

TRIGEORGIS, L. Anticipated Competitive Entry and Early Preemptive Investment in Deferrable Projects. *Journal of Economics and Business*, v. 43, n.2, May 1991, p.143-156.

VENETSANOSA, K.; ANGELOPOULOUA, A.;TSOUTSOSB, T. 2002. Renewable energy sources project appraisal under uncertainty: the case of wind energy exploitation within a changing energy market environment. *Energy Policy*, n. 30, p. 293–307, 2002.

VICKREY, W. Counterspeculation, Auctions and Competitive Sealed Tenders. *Journal of Finance*, n.16, p.8-17, 1961.

Anexo 4.1: Representação extensiva do jogo, mostrando os cenários considerados no Modelo 1 e no Modelo 2



Anexo 4.2: Funções de valor da Empresa i , que detém uma opção americana perpétua de entrar como monopolista no setor eólico

Seguindo-se o desenvolvimento da EDO via Programação Dinâmica (Anexo 4.3), o valor de uma empresa com a opção de investir como monopolista pode ser descrito como:

$$\begin{cases} F_i(Y_i) = mY_i^{\theta_i} & , \text{ para } Y < Y_i^* & , \text{ ou} \\ F_i(Y_i) = \kappa_i Y_i D_{i10} - I_i & , \text{ para } Y \geq Y_i^* \end{cases}$$

O momento ótimo de parada pode ser obtido via as condições de contorno que definem a continuidade (VMC) e o contato suave (SPC) entre as duas expressões acima, no ponto em que $Y = Y_i^*$, isto é, no ponto em que esperar deixa de ser ótimo:

$$\text{VMC: } mY_i^{*\theta_i} = \kappa_i Y_i D_{i10} - I_i \qquad \text{SPC: } \theta_i m Y_i^{*\theta_i - 1} = \kappa_i D_{i10}$$

De modo que: $Y_i^* = \frac{\theta_i}{\theta_i - 1} \frac{I_i}{\kappa_i D_{i10}}$, igual à Equação (4.22) na Seção 4.4.3.1, e

$$m = \frac{Y_i^{*(1-\theta_i)}}{\theta_i} \kappa_i D_{i10} . \text{ Da Equação (4.23), pode-se observar que } M = m + B .$$

B , que é dado pela Equação (4.19), é uma constante estritamente negativa, de modo que, $M < m$. Assim, o valor de uma empresa que detém a opção de investir como Líder, definido pelas Equações detalhadas na Seção 4.4.3.1, é menor que o valor de uma empresa que detém a opção de investir como monopolista, mas o gatilho para investir, Y_i^* , é o mesmo nos dois casos, como ilustrado na Figura 4.18 (“miopia de Leahy”, LEAHY, 1993).

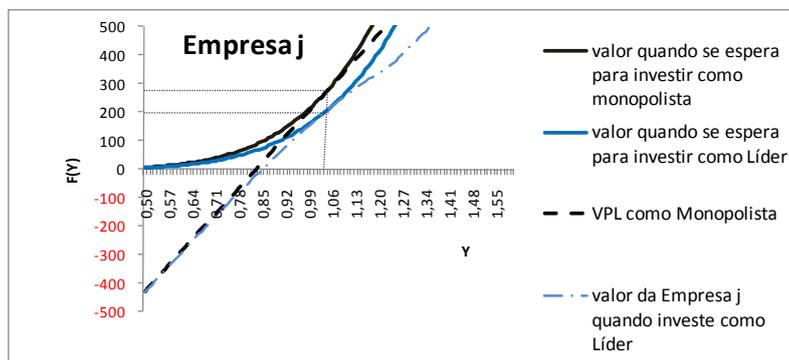


Figura 4.18: Gatilho para Investir, como Monopolista ou como Líder, e Respectivos Valores em Cada Caso (Miopia de Leahy).

Anexo 4.3: Desenvolvimento da Equação Diferencial Parcial (EDP) que Descreve o Valor de Uma Empresa Que Detém Uma Opção de Investir, Sujeita a Uma Variável de Estado Y (fonte: DIXIT & PINDYCK, 1994).

Considere-se uma empresa que detém uma opção americana perpétua de investir em um projeto sujeito a uma variável Y , a qual evolui estocasticamente no tempo segundo um Movimento Geométrico Browniano, descrito por:

$$dY = \alpha Y dt + \sigma Y dz \quad (4.38)$$

, onde $dz = \xi \sqrt{dt}$, for $\xi \sim N(0,1)$

O valor V dos direitos ao fluxo de caixa desta empresa é:

$$V(Y(t)) = \max \{ \Omega(Y); \pi(Y) + \frac{1}{1+\rho} E[V(Y(t+1)) | Y(t)] \}$$

O primeiro termo da função de maximização, acima, refere-se ao fluxo de caixa da empresa se ela investir, enquanto o segundo termo descreve a região de continuação, isto é, a região em que ainda é ótimo continuar esperando, ao invés de investir. Nesta região de continuação, o valor é:

$$V(Y(t)) = \pi(t)dt + \frac{1}{1+\rho dt} E[V(Y(t+dt))]$$

$$V(Y(t)) \cdot (1 + \rho dt) = \pi(t)dt \cdot (1 + \rho dt) + E[V(Y(t)) + dV]$$

$$V(Y(t)) + \rho V(Y(t))dt = \pi(t)dt(1 + \rho dt) + V(Y(t)) + E[dV]$$

$$\rho V(Y(t))dt = \pi(t)dt + \pi(t)\rho dt^2 + E[dV]$$

Eliminando-se os termos em dt^2 , que tendem a zero, e simplificando a notação, chega-se a:

$$\rho V dt = \pi dt + E[dV], \text{ ou: } \boxed{\rho V = \pi + \frac{1}{dt} E[dV]} \quad (4.39)$$

Usando-se o Lema de Itô, sabe-se que:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial t} dt + \frac{\partial V}{\partial Y} dY + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} (dY)^2 \quad ; \text{ ou, em notação simplificada:}$$

$$\boxed{dV = V_t dt + V_Y dY + \frac{1}{2} V_{YY} (dY)^2} \quad (4.40)$$

Da Equação (4.38), tem-se que:

$dY^2 = \alpha^2 Y^2 dt^2 + 2\alpha Y^2 \sigma dt dz + \sigma^2 Y^2 dz^2$, em que os dois primeiros termos podem ser negligenciados dado que dt está elevado a potências maiores que 1 e, portanto, estes termos tendem a zero. Assim, reduz-se a expressão a:

$$dY^2 = \sigma^2 Y^2 dz^2 \quad (4.41)$$

Lembre-se que:

$$dz^2 = \xi^2 dt, \quad \xi \sim N(0,1), \text{ ou seja, } E[\xi] = 0 \text{ e}$$

$$VAR(\xi) = 1 \Rightarrow E[\xi^2] - E^2[\xi] = 1 \Rightarrow E[\xi^2] = 1 + 0 = 1$$

$$\text{O que faz com que: } E[dz^2] = E[\xi^2 dt] = dt \cdot E[\xi^2] = dt$$

e $VAR(dz^2) = VAR(\xi^2 dt) = dt^2 \cdot VAR(\xi^2) \sim \text{zero}$, de modo que pode-se afirmar que $dz^2 = dt$.

Assim, a Equação (4.41) pode ser reescrita como:

$$\boxed{dY^2 = \sigma^2 Y^2 dt} \quad (4.42)$$

Combinando-se as Equações (4.38), (4.40) e (4.42), chega-se a:

$$dV = V_t dt + V_Y dY + \frac{1}{2} V_{YY} (dY)^2$$

$$dV = V_t dt + V_Y (\alpha Y dt + \sigma Y dz) + \frac{1}{2} V_{YY} (\sigma^2 Y^2 dt)$$

$$E[dV] = E[V_t dt + V_Y (\alpha Y dt + \sigma Y dz) + \frac{1}{2} V_{YY} (\sigma^2 Y^2 dt)]$$

$$E[dV] = V_t dt + \alpha Y V_Y dt + \frac{1}{2} V_{YY} (\sigma^2 Y^2 dt) + \underbrace{\sigma Y V_Y \sqrt{dt} \cdot E[\xi]}_{\text{Zero}}$$

$$E[dV] = V_t dt + \alpha Y V_Y dt + \frac{1}{2} \sigma^2 Y^2 V_{YY} dt \quad (4.43)$$

Combinando-se as Equações (4.39) e (4.43):

$$\rho V = \pi + \frac{1}{dt} \left\{ V_t dt + \alpha Y V_Y dt + \frac{1}{2} \sigma^2 Y^2 V_{YY} dt \right\}, \text{ obtém-se:}$$

$$\frac{1}{2} \sigma^2 Y^2 V_{YY} + \alpha Y V_Y + V_t - \rho V + \pi = 0$$

Em uma opção perpétua, postergar a decisão de investir apenas leva a uma nova opção perpétua, igual à anterior; desta forma, o valor da opção não varia com a passagem do tempo e, portanto, $V_t = 0$. Assim:

$$\frac{1}{2}\sigma^2 Y^2 V_{YY} + \alpha Y V_Y - \rho V + \pi = 0 \quad (4.44)$$

EDO homogênea + termo não homogêneo

A solução para a parte homogênea da EDP é:

$$V_{\text{hom}} = A.Y^\beta \quad (4.45)$$

Derivando-se a Equação (4.45) uma e duas vezes em relação a Y e substituindo os resultados na parte homogênea da EDP chega-se a:

$$\frac{1}{2}\sigma^2 \beta(\beta-1) + \alpha\beta - \rho = 0 \quad (4.46)$$

, uma expressão quadrática cujas raízes são:

$$\beta_1 = \frac{\frac{1}{2}\sigma^2 - \alpha + \sqrt{(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2)^2 + 2\sigma^2\rho}}{\sigma^2} \quad (4.47)$$

$$\text{e } \beta_2 = \frac{\frac{1}{2}\sigma^2 - \alpha - \sqrt{(\alpha - \frac{1}{2}\sigma^2)^2 + 2\sigma^2\rho}}{\sigma^2}$$

Prova-se que $\beta_1 > 1$ e $\beta_2 < 0$, de modo que a solução geral da parte homogênea da EDP é, então:

$$V_{\text{homogenea}} = A_1 Y^{\beta_1} + A_2 Y^{\beta_2}$$

No entanto, sabe-se que se $Y \rightarrow 0$, $V \rightarrow 0$, e isso só é factível se A_2 é zero (dado que a raiz negativa β_2 faz com que o segundo termo da equação tenda a ∞ quando Y tende a zero).

A parte não homogênea da EDP pode ser considerada incluindo-se uma solução particular, isto é, qualquer termo que ainda satisfaça a Equação (4.44).

Uma alternativa natural é considerar a solução que reflita o valor de projeto no caso em que nunca é ótimo exercer a opção, isto é: $\frac{\pi}{\rho - \alpha}$, uma perpetuidade.

Assim, a solução da Equação (4.44) é:

$$\boxed{V = AY^{\beta_1} + \frac{\pi}{\rho - \alpha}} \quad (4.48)$$

Neste trabalho, adota-se a hipótese de novo mercado, isto é, a empresa não tem receitas enquanto a opção de entrar no mercado está viva, de modo que $\pi=0$ para o Seguidor do duopólio e, nesse caso, a EDO é homogênea.

As mesmas equações, acima, podem ser obtidas usando o método de Ativos Contingentes, que assume que o comportamento/valor da empresa pode ser replicado por um portfólio de ativos negociados em mercado (referir-se a Dixit&Pindyck, 1994, p.114-119). Os resultados são semelhantes, bastando substituir a tendência α do processo estocástico de Y por $(r - \delta)$ e ρ por r nas Equações (4.44), (4.47) e (4.48)⁶⁰.

Observe-se que $r + \pi = \mu = \alpha + \delta$, isto é, a taxa livre de risco r , somada ao prêmio de risco π , é igual à taxa de desconto (que pode ser obtida pelo modelo CAPM, por exemplo, ou igualado ao custo de oportunidade do investidor), o qual por sua vez é também equivalente à tendência apresentada pelos retornos do investimento, α , somada aos dividendos recebidos δ .

Quando se assume que a empresa é neutra ao risco, a função valor é semelhante, sendo que o custo de oportunidade de capital, ρ , é substituído pela taxa livre de risco, r . Uma empresa é neutra ao risco quanto o risco do ativo em questão é totalmente diversificável, isto é, quando tem zero correlação com o risco do mercado como um todo. Quando as empresas são assumidas como neutras a risco, as mesmas expressões também se aplicam, mas ρ deve ser substituído por r nas Equações (4.44), (4.47) e (4.48).

⁶⁰ r é a taxa livre de risco e δ são os dividendos, enquanto ρ é a taxa de desconto, interpretada na prática como o custo de oportunidade de capital.