

Geração de energia eólica no Brasil: um investimento viável?

Resumo: Em 2015, a fonte eólica foi responsável por 6,2% da capacidade instalada de energia elétrica no Brasil, tendo crescido substancialmente de 27 MW instalados em 2005 para 8.726 MW em 2015. Entretanto, a análise de viabilidade de um empreendimento no Brasil, considerando suas flexibilidades, revela que há riscos relevantes para o investidor, o que pode comprometer o desenvolvimento dessa fonte de energia. Avaliamos um projeto derivado de um leilão A-5 para venda no segmento regulado (ACR), com possibilidade de venda de parte da energia gerada também no segmento livre (ACL) e ganhos de aprendizagem. Os resultados indicaram que a opção de abandono gera valor para o projeto, porém, a opção de aguardar para investir no momento mais adequado não gera. Concluímos que, em diversos cenários, o projeto não seria executado, sinalizando a necessidade de desenvolver regras mais consistentes para os leilões do ACR com o intuito de evitar investidores oportunistas.

Palavras-chave: Projetos de energia eólica; Opções Reais; Avaliação de Investimento.

Abstract: In 2015, wind power was responsible for 6.2% of electric power installed capacity in Brazil, having grown substantially from 27 MW installed in 2005 to 8.726 MW in 2015. However, the viability analysis of one project in Brazil, considering its flexibility, shows that there are relevant risks to investors, which can hinder the development of this important source of energy. We analyzed one Greenfield wind park for an A-5 tender, to sell energy in regulated market (ACR), with possible selling of some quota in the free market (ACL) and with learning gains. The results indicated that the option of abandoning the project creates value, while the option of waiting to invest did not produce value. We concluded that in different scenarios the project would not be executed, signaling the need to develop more consistent rules to ACR tenders, in order to avoid opportunistic investors..

Keywords: Wind energy projects, real options, valuation.

Classificação JEL: G31; Q42.

Lucas Barbosa Rodrigues¹

Fernanda Finotti Cordeiro Perobelli²

Silvinha Vasconcelos³

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora. Contato: Lucasbr_Rodrigues@hotmail.com. Endereço: Rua da Fonte, 46, apt 1402, Nova Lima – MG, CEP 34006-071.

² Universidade Federal de Juiz de Fora. Contato: fernandafinotti.perobelli@ufjf.edu.br.

³ Universidade Federal de Juiz de Fora. Contato: silvinha.vasconcelos@ufjf.edu.br.

1. Introdução

A energia eólica tem expandido substancialmente sua participação na matriz energética mundial, de tal modo que, entre 2010 e 2015, a oferta deste tipo de energia cresceu em média 21% ao ano no mundo (WWEA, 2016). A tendência de consolidação deste tipo de energia na matriz energética brasileira é irrefutável. Em 2015, essa fonte energética representou cerca de 6,2% de tal matriz, com 8,5 GW de capacidade instalada, e, segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDEE, 2015), representará aproximadamente 8% até 2024.

A partir do cenário recente de consolidação e expansão da geração de energia eólica no Brasil, torna-se importante estudar a viabilidade financeira da construção de um portfólio de projetos eólicos sujeitos a incertezas técnicas e de mercado. Neste sentido, este trabalho se propõe a responder à seguinte pergunta: um investimento representativo no setor de geração de energia eólica no Brasil, contratado na modalidade de leilão A-5 e considerando a opção de aguardar para investir no momento mais adequado, é viável? Parte-se da premissa de que um investidor, ao decidir entrar no mercado de energia eólica no Brasil, tem um horizonte de longo prazo (20 anos) para vender a energia no ambiente de contratação regulado (ACR) e, ao ganhar um leilão para fornecimento de energia eólica, tem 5 anos para desenvolver seu parque eólico e iniciar a entrega da energia. Como o parque demanda cerca de 2 anos para ser concluído, o investidor tem a opção de aguardar para investir no momento em que vislumbrar o melhor cenário, até o terceiro ano. Caso construa antes, tem a opção de vender a energia gerada no ambiente de contratação livre (ACL). Caso não construa até $t=3$, tem a opção de abandonar o projeto.

Para analisar tal investimento, a metodologia tradicional de análise de projetos baseada em fluxos de caixa estimados é falha, ao não incorporar as flexibilidades existentes no projeto. A fim de lidar com tais flexibilidades, foi utilizada a metodologia de opções reais. O modelo utilizado segue o arcabouço metodológico proposto por Dalbem *et alli* (2012). Foi utilizado um modelo quadrinomial, em que se considerou a incerteza do valor do investimento (*capex*) e do preço da energia praticado no ACL. Os principais avanços em relação ao trabalho de Dalbem *et alli* (2012) foram a utilização de simulação das séries históricas de *capex* e preço da energia para estimar a volatilidade dessas variáveis (consideradas estocásticas neste trabalho), a avaliação da possibilidade de perda de competitividade do projeto que tenha seu início adiado por três anos e o efeito que reduções no valor do *capex* por questões de oferta/demanda (semelhante ao pagamento de dividendos nas opções financeiras) gera sobre o projeto.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: no capítulo 2 é desenvolvido um panorama geral da energia eólica no Brasil, explicando os principais *drivers* deste crescimento e as perspectivas futuras. No capítulo 3, é desenvolvido o arcabouço teórico utilizado neste trabalho, explicando a metodologia de opções reais. No capítulo 4, é apresentado um estudo de caso de um projeto eólico, considerando as premissas utilizadas pelo setor ao valorar investimentos, por meio da metodologia tradicional e da consideração das opções reais. No capítulo 5, são feitas as considerações finais do estudo, bem como sugestões de trabalhos futuros.

2. Panorama da energia eólica no Brasil

No Brasil, a energia eólica começou a se desenvolver a partir do PROINFA, lançado pelo governo federal em 2002, através da Lei n. 10.438/2002, cujo objetivo era incentivar o desenvolvimento de geração de energia alternativa (biomassa, eólica e PCH) no país. A primeira fase do programa (PROINFA-1) determinava 1.422 MW de potência instalada,

que deveriam ser conectadas ao sistema até 2008. Isto seria um grande avanço, uma vez que, naquele momento, o parque brasileiro praticamente não contemplava energia alternativa (PROINFA, 2006). O Plano Anual do PROINFA (2012) indicava que 51 empreendimentos eólicos participantes do programa estariam efetivamente em operação em 2012, totalizando 1,18 GW de potência instalada, o que demonstra o atraso ao cronograma e o não cumprimento da meta estabelecida inicialmente (ELETROBRAS, 2012).

De acordo com Dalbem (2010), diversos motivos contribuíram para o atraso dos projetos, sendo que os principais deles foram: atraso nos processos licitatórios; dificuldade em cumprir o índice de nacionalização, dado a pequena presença de fabricantes de aerogeradores no país, o que atrasava a liberação de financiamento pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES); elevada demanda externa por energia eólica, o que encarecia e dificultava a importação de equipamentos no Brasil; atrasos nas licenças ambientais; problemas na conexão à rede, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Nordeste.

A partir de 2007, o governo decidiu inserir a energia eólica nos leilões de energia do mercado regulado (ACR), em que a energia eólica competiria com outras fontes. No entanto, no Leilão de Fontes Alternativas de junho 2007 e no Leilão de Energia de Reserva de agosto 2008, nenhuma eólica foi contratada. O primeiro leilão exclusivo para a modalidade eólica (LER-2009) ocorreu em dezembro de 2009, contratando 1,8 GW de potencial energético ao preço médio de R\$ 148,39 MWh⁴ para ser incorporado ao mercado de reserva brasileiro. O preço da tarifa foi bastante competitivo, ficando 22% abaixo do teto estabelecido no leilão, o que representou uma redução média de 45% em relação aos preços praticado no PROINFA (CCEE, 2013,b).

Tabela 1. Resumo dos preços praticados nos leilões do ACR

Leilão ACR	R\$/MWh médio leilão	R\$/MWh ⁵ dez/15	Potência (MW)
LER 2009	148,39	220,9	1.805
LER 2010	126,2	182,2	545
LFA 2010	134,1	193,6	1.525
LER 2011	99,3	133,7	861
A-3 2011	99,5	133,9	1.055
A-5 2011	105,2	138,9	1.025
A-5 2012	87,9	109,7	250
LER 2013	110,5	133,3	1.504
A-3 2013	124,9	148,5	868
A-5 2013	119,0	140,2	2.337
A-3 2014	129,3	146,7	551
LER 2014	142,3	159,6	769
A-5 2014	136,0	151,7	926
LFA 2015	177,47	187,8	90
A-3 2015	181,1	187,2	509
LER 2015	203,5	205,4	548

Fonte: EPE. Elaboração própria.

⁴ Preço em moeda nominal (dezembro de 2009).

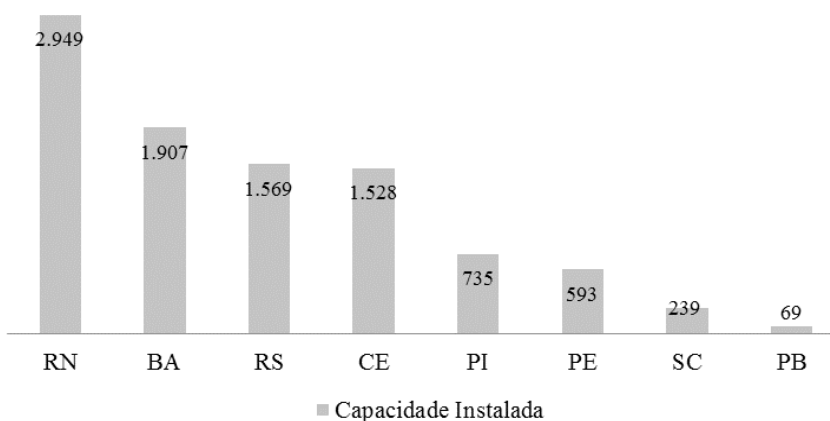
⁵ Valores corrigidos pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo - IPCA.

A Tabela 1 indica que, comparativamente aos primeiros leilões, em 2009 e 2010 a energia eólica tornou-se mais competitiva, com os preços médios saindo de 220,9 R\$/MWh em 2009 para 109,7 R\$/MWh em 2012. Porém, desde 2013 o governo tornou as regras mais rígidas, privilegiando parques com maiores facilidades para integração ao sistema de transmissão. Assim, os preços acabaram ficando acima do praticado nos leilões de 2011 e 2012. No tocante à potência instalada dos leilões, a média anual entre 2009 e 2015 foi de 2,17 GW de potência instalada, com o ano de 2012 apresentando o menor valor contrato, 0,25 GW de potência instalada. Neste ano, devido à baixa demanda, um leilão A-3 foi cancelado e postergado para 2013.

Diversos motivos têm contribuído para o aumento da competitividade da energia eólica no Brasil, dentre eles destacando-se as desonerações fiscais⁶, o desenvolvimento tecnológico, o financiamento público do BNDES e a queda dos custos de produção, associada ao crescente número de empresas fabricantes de aerogeradores que têm se instalado no país (PDDE, 2012). Além disso, o mapeamento de parques eólicos mais viáveis, com intensidade e frequência de ventos melhores, tem aumentado o fator de capacidade dos parques. De acordo com Dedeca (2012), outro fator importante que trouxe maior competitividade para a energia eólica foi a oferta mundial excedente de aerogeradores, resultante da recessão econômica que afetou o crescimento da energia eólica em regiões tradicionais, como Europa e Estados Unidos, desde a crise de 2008.

A expansão da energia eólica apresenta diversos benefícios para o país. O Brasil tem um regime de ventos que apresenta complementariedade em relação à geração hidráulica, uma vez que o regime fluvial é mais baixo justamente nos períodos do ano em que os ventos são mais fortes. Também existe sinergia com o regime diário de demanda, pois o vento é mais intenso no final da tarde e início da noite, ou seja, no período de maior demanda por energia elétrica. Além disso, o potencial eólico é maior no Nordeste e Sul do país (Gráfico 1), que são regiões tradicionalmente importadoras líquidas de energia de outros sub-sistemas. Essa complementariedade contribui para o balanceamento diário do sistema e para a queda dos custos de transmissão e perdas do sistema (DALBEM, 2010).

Gráfico 1. Estados com capacidade instalada (MW) em energia eólica no Brasil



Fonte: Abeeólica 2016. Elaboração própria. Dados em maio de 2016.

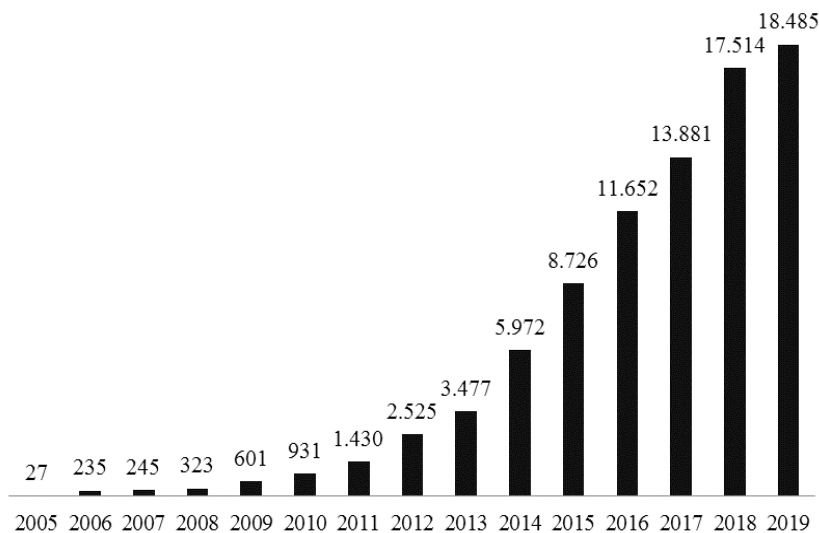
Apesar do recente avanço da capacidade instalada de energia eólica no país, que cresceu substancialmente a potência instalada de 27 MW em 2005 para 8.726 MW em 2015,

⁶ Os principais benefícios fiscais são: enquadramento no Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI), que isenta da contribuição do PIS/PASEP e de COFINS a compra e importação de equipamentos e serviços nas obras de infraestrutura (com exceção de terrenos e mão-de-obra), conforme a Lei n. 11.488/2007; isenção do ICMS até o final de 2013 para os produtos que também têm isenção do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), ou que sua alíquota seja zero, conforme o convênio ICMS 101/97; isenção do imposto de importação para os aerogeradores.

o setor ainda não atingiu a plena maturidade e deve se expandir consideravelmente nos próximos anos. Segundo a Abeeólica, a capacidade instalada do setor passará dos 8.726 MW em 2015 para 18.485 MW em 2019, um crescimento de 112% em quatro anos, incluindo os projetos contratados no ACR e ACL. Desta forma, o investimento no setor tem crescido substancialmente e obtido cada vez mais espaço na matriz energética brasileira.

Em 2006 foram investidos US\$ 113 MM em energia eólica no país, o que representou 2% do total investido em energia renovável. Ao longo dos anos, o setor cresceu impulsionado pelo aumento dos investimentos, que em 2015 atingiu US\$ 4,9 bi e representou 66% do total investido em energia renovável.

Gráfico 2. Evolução da capacidade instalada (mw) em energia eólica no Brasil



Fonte: Abeeólica 2016. Projeções a partir de 2015. Elaboração própria.

3. O projeto sem flexibilidade

Existem diversos métodos e ferramentas para auxiliar na tomada de decisão de investimento, sendo o método do Fluxo de Caixa Descontado, que retorna o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto, a ferramenta mais utilizada e difundida atualmente. Apesar de amplamente utilizado, o método de avaliação por VPL possui algumas limitações que podem levar a uma análise equivocada do investimento. A mais importante diz respeito ao fato do método ser estático, ou seja, somente considera um cenário para todas as variáveis do modelo e, dessa forma, não permite incorporar as flexibilidades que o projeto pode ter ao longo de sua vida útil. A análise de investimento baseada no VPL é especialmente falha quando o projeto está sujeito a muitas incertezas (técnicas e de mercado) e há flexibilidade gerencial.

Dado que análises de viabilidade falhas podem prejudicar o desenvolvimento do projeto e, em última instância, do setor, o objetivo desse trabalho é considerar um método de avaliação alternativo, baseado na existência de flexibilidades gerenciais, na avaliação de um projeto eólico típico. Adicionalmente, procuramos também verificar, utilizando tal método, se o atual cenário de contratação de geração eólica no Brasil favorece a participação de investidores comprometidos com o projeto ou, por outro lado, incentiva a participação de investidores oportunistas, definidos como aqueles capazes de abandonar o projeto caso ele se mostre inviável aos preços contratados.

O estudo empírico desenvolvido neste trabalho considera um investidor típico que tem um projeto de parque eólico e está analisando a viabilidade de ofertar energia em um leilão A-5 do mercado ACR. Este investidor precisa desenvolver seu plano de negócios e sua estratégia de implementação do parque eólico para conseguir obter o valor mínimo (*break even*) da oferta de energia elétrica (R\$/MWh) no leilão e, ainda assim, obter rentabilidade.

Para a avaliação desse projeto, foi adotada como premissa que o investidor precisaria de dois anos para a construção do parque; portanto, ele pode começar a investir imediatamente após o leilão e vender energia no mercado ACL entre os anos 3-5 e, posteriormente, entregar a energia pactuada no leilão no mercado ACR por 20 anos. Esse é um cenário determinístico que desconsidera as incertezas e flexibilidades/opções de que o investidor dispõe.

O investimento no parque eólico considerado neste trabalho foi estimado em consulta ao BNDES, por meio do Serviço de Informação ao Cidadão, em que foi obtida uma série histórica contendo o valor do investimento total (R\$) e a capacidade instalada (MW) de todos os parques financiados pelo BNDES entre 2005 e julho de 2013. Optamos por fazer a média anual do investimento e da capacidade instalada de todos os parques da série. Assim, o valor do investimento em R\$/MW instalados considerado neste trabalho foi de R\$ 4.000,00, em linha com o valor médio obtido para junho de 2013 (de R\$ 4.059,99).

As receitas do projeto foram consideradas provenientes apenas da venda de energia elétrica e consideramos o preço de venda inicial igual para os mercados ACL e ACR (de R\$ 110,51 MWh). O fator de capacidade⁷ considerado foi de 50%, em linha com os parques ganhadores dos últimos leilões do ACR.

O parque desse estudo tem dez torres, cada uma com capacidade para gerar 2,6 MW, totalizando uma capacidade instalada de 26 MW; sendo assim, a energia total gerada em um ano é calculada pela multiplicação da energia gerada por hora, pelo fator de capacidade (13MWh) e pela quantidade total de horas de um ano (8.760), obtendo um total de 113.880 MW gerados em um ano. O total de energia gerada foi chamado de TMWh. A receita total anual é obtida pela multiplicação do preço da energia pelo total de energia gerada em um ano.

Os custos, despesas e taxas foram baseados em dados empíricos de uma grande empresa do setor.

a. Despesas Administrativas: R\$ 150 mil/ano para custos administrativos indiretos de gestão deste parque eólico, como *overhead* da empresa, assessoria jurídica, dentre outros.

b. Despesas Ambientais: R\$ 100 mil/ano para despesas de cunho ambiental (como manter a vegetação em situação correta no parque eólico).

c. Operação e Manutenção (O&M) das torres, aerogeradores e rede elétrica: R\$ 639 mil/ano. Em geral, as empresas terceirizam e fecham contratos de longo prazo para prestação deste serviço.

d. Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST): foram utilizados os dados da ANEEL (2011) referentes à média do valor cobrado de todos os parques eólicos para 2019⁸ (ano em que o empreendimento deste trabalho começaria a fornecer no ACR). Sendo assim, foi considerada uma TUST de R\$ 4,52 KW/mês. É importante ressaltar que o valor adotado já considera o desconto de 50% na tarifa da TUST obtido por parques eólicos com menos de 30 MW de capacidade instalada.

e. Arrendamento da terra: R\$ 4 mil/ano por torre instalada, em linha com o que é praticado nos melhores parques do país, localizados no Nordeste Brasileiro.

f. Seguros: 0,10% do valor do investimento total, em linha com o que as principais

⁷ Fator de capacidade (FC) = energia gerada/capacidade instalada.

⁸ A lista utilizada contempla apenas os parques homologados até 07/2011.

seguradoras cobram para este tipo de seguro.

g. Encargos setoriais: Taxa de Fiscalização de Serviço de Energia Elétrica (TFSEE) de R\$ 1,9 mil/MW instalado por ano (ANEEL, 2013) e Taxa da CCEE de R\$ 0,0001/MW gerado. (CCEE, 2013).

Além disso, este parque eólico paga PIS/COFINS de 3,65% sobre a receita bruta. O projeto enquadra-se na modalidade de imposto de renda presumido, em que é assumido um lucro de 8% sobre a receita líquida e uma alíquota de Imposto de Renda (IR) de 25% sobre esse lucro. É assumido um lucro de 12% sobre a receita líquida para fins de pagamento de Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) e uma alíquota de 9%. Assim, o projeto não apresenta benefício fiscal da dívida.

Em linha com as práticas comuns de mercado, o valor do projeto sem flexibilidades é calculado por meio do *Free Cash Flow to the Firm* (FCFF) descontado pela taxa WACC (*Weighted Average Cost Of Capital*). Para o cálculo do custo de capital próprio, foi utilizada a metodologia do CAPM (*Capital Asset Pricing Model*). Foram utilizados valores reais (desconsiderando a inflação) e tomou-se o custo da dívida (Kd) como igual a 5,29%, o custo do capital próprio (Ke) como igual a 9,22% e o custo médio de capitais (WACC) igual a 6,53% (cálculos no Anexo I).

O fluxo de caixa livre da empresa (FCFF) pode ser representado por:

$$FCFF = LAJ - capex$$

$$LAJ = \text{receita líquida (RL)} - \text{custo operacional (CO)} - \text{IR} - \text{CSLL}$$

Utilizando as premissas expostas anteriormente, a geração de caixa anual do empreendimento (LAJ) é R\$ 9.905,4 mil/ano. Sendo que a margem LAJIDA (Lucro antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização) foi de 84,9%.

Assim, tem-se:

$$VPL = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{VPACR_t}{(1+WACC)^t} + \frac{VPACL_t}{(1+WACC)^t} - \frac{Capex_t}{(1+WACC)^t} \quad (1)$$

onde:

VPACR = valor presente do fluxo de caixa da venda de energia no mercado regulado entre os anos 5 e 25;

VPACL = valor presente do fluxo de caixa da venda de energia no mercado livre entre os anos 3 e 5;

capex = valor total do investimento no parque eólico.

Os resultados calculados por meio da metodologia tradicional de fluxo de caixa descontado indicaram que um investidor comprometido em levar o projeto até o final não teria participado do leilão promovido pelo governo para fonte eólica em agosto de 2013, pois obteria um VPL a partir do preço contrato (VPL) de R\$ -59.030,00, ou seja, estaria destruindo valor caso empreendesse. Porém, este cenário é inflexível e, apesar de incluir a venda de energia no mercado ACL, não considera as opções que o investidor tem e as incertezas que, caso minimizadas ao longo do tempo, podem influenciar o valor do projeto.

O valor de venda de energia que deixaria o investidor indiferente entre participar ou não (*break even*) seria de R\$ 110,56/MWh, ou seja, muito próximo do valor do último leilão de agosto de 2013 (R\$ 110,50). Desta forma, por uma diferença de preço muito

pequena e assumida como inflexível, o investidor poderia tomar uma decisão irreversível.

Considerando que os cenários traçados no momento da avaliação podem mudar e que o investidor tem a opção de alterar as decisões subsequentes à medida que as incertezas são resolvidas, o VPL calculado certamente está enviesado. A solução proposta para resolver esse problema – aplicação do arcabouço de Opções Reais – se baseia no trabalho de Dalbem *et alii* (2012), em que os autores analisaram o valor que a opção de esperar para investir em um empreendimento eólico geraria para o projeto. Foi avaliado o efeito que “ganhos de aprendizagem” podem gerar para o projeto e como isso afeta a decisão de investimento do investidor. O presente trabalho, entretanto, implementa alguns avanços com relação ao trabalho de Dalbem *et alii* (2012), como utilizar séries de dados reais para estimar a volatilidade dos fatores de risco, avaliar a possibilidade de perda de competitividade (em adição aos ganhos de aprendizagem⁹) do projeto à medida que o tempo passa e o parque não é construído e analisar o efeito que reduções no valor do *capex* por questões de oferta/demanda (semelhante ao pagamento de dividendos/*yield* nas opções financeiras) gera sobre o projeto.

4 Avaliando projetos com flexibilidades

De acordo com Dixit e Pindyck (1994), boa parte das decisões de investimento possuem as seguintes características: (i) o futuro é incerto, ou seja, existe incerteza com relação aos fluxos futuros esperados do projeto; (ii) a decisão do investimento é irreversível (totalmente ou em parte); (iii) existe flexibilidade com relação ao *timing* de execução do projeto, pois é possível adiar o investimento e obter mais informações ao longo do tempo. O método do VPL sozinho não consegue lidar com essas três características, devendo ser complementado pela análise das opções implícitas no projeto.

É importante ressaltar que as duas metodologias são complementares. Assim sendo, o valor de um projeto pode ser definido como:

$$\text{Valor do investimento/projeto} = \text{Valor Presente Líquido sem flexibilidade (VPL)} + \text{Valor Presente das Opções Implícitas} \quad (2)$$

⁹ Ambos os efeitos são justificáveis e observados na prática, variando entre diferentes tipos de investidores. O ganho de aprendizado é justificável uma vez que a melhoria do projeto de engenharia do parque eólico pode otimizar a geração de energia do parque. Com uma série de dados de ventos maior, o investidor pode otimizar o posicionamento das turbinas, elevando o fator de capacidade do parque, ou mesmo comprar turbinas mais adequadas ao seu parque. O ganho de aprendizado tem como consequência direta induzir os investidores a aguardar para investir. Por outro lado, foi avaliado o efeito oposto ao ganho de aprendizado, chamado perda de competitividade. Esse efeito decorre de fatores que pioram o projeto no tempo, como contratos de operação e manutenção menos vantajosos no futuro. Esse fato induz os investidores a investirem antes, pois, neste caso, esperar para investir destrói valor para o projeto. Ambos os efeitos serão analisados do ponto de vista de investidores oportunistas, que consideram a opção de abandonar o parque, e investidores comprometidos, que executariam o investimento independente do cenário.

O modelo binomial em tempo discreto de Cox, Ross e Rubinstein (1979) permite calcular o valor de qualquer opção tomando por base o valor do ativo objeto evoluindo no tempo de maneira discreta e segundo um processo estocástico. Para ativos financeiros, o processo estocástico mais utilizado para descrever os preços é o Movimento Geométrico Browniano (MGB):

$$\frac{dS}{S} = \mu dt + \sigma dz \quad (3)$$

Em que S é o valor do ativo-objeto no processo estocástico (neste caso, os preços ACL ou o *CAPEX*), σ é a volatilidade do valor do ativo-objeto e μ é a taxa de crescimento esperada desse valor, t é o intervalo de tempo em que serão consideradas variações no valor do ativo-objeto e z é um choque aleatório em tais valores, assumido como normalmente distribuído. A variável d indica a variação no tempo do valor do ativo-objeto.

Simulado o comportamento do preço do ativo objeto, o modelo binomial tem solução matemática relativamente simples ao representar graficamente o comportamento de um determinado ativo ao longo do tempo de duração da opção. O modelo assume

que os movimentos de preços do ativo sejam compostos por um grande número de pequenos movimentos binomiais, ou seja, a cada intervalo de tempo é possível haver uma alta ou baixa no preço do ativo.

Assim, a cada instante de tempo T , o preço do ativo sai de seu valor inicial S e é multiplicado por uma variável aleatória que pode assumir os valores u e d . Portanto, o valor do ativo será S_u ou S_d , o mesmo ocorrendo para o valor da opção f , que segue o valor do ativo para f_u ou f_d . Se o preço do ativo subir para S_u , supõe-se que o valor da opção seja f_u , e, se o preço do ativo cair, supõe-se que o valor da opção seja f_d . Considerando uma carteira composta por uma posição comprada em Δ ações e uma posição vendida na opção, se houver aumento do preço da ação, o valor da carteira ao final da vida da opção será:

$$S_u \Delta - f_u \quad (4)$$

Se houver um movimento de queda no preço da ação, o valor da carteira será:

$$S_d \Delta - f_d \quad (5)$$

Supondo que os dois valores sejam iguais em qualquer estado da natureza (enfoque risco-neutro):

$$S_u \Delta - f_u = S_d \Delta - f_d \quad (6)$$

Ou seja, a carteira não terá risco e deve teoricamente render a taxa livre de risco da economia. Considerando a taxa livre de risco como r , o valor da carteira será:

$$(S_u \Delta - f_u) e^{-rt} \quad (7)$$

Substituindo essa expressão em (4) e (5) chega-se a:

$$f = e^{-rt} [pf_u + (1-p)f_d] \quad (8)$$

onde:

$$p = \frac{e^{rt} - d}{u - d} \quad (9)$$

sendo p a probabilidade risco-neutra de alta do preço do ativo e $1-p$ a probabilidade risco-neutra de queda. Como a média (μ) e a variância σ^2 dos retornos S são iguais aos parâmetros do Movimento Geométrico Browniano (MGB), tem-se que

$$u = e^{\sqrt{\Delta t}} \quad e \quad d = e^{-\sqrt{\Delta t}} \quad (10)$$

O retorno esperado do ativo S , no instante de tempo T , assumindo a probabilidade risco-neutra de um movimento de alta como p é dada por:

$$E(S_T) = pS_u + (1-p)S_d \quad (11)$$

Essa abordagem torna a solução do problema de opções reais por árvores binomiais bastante simples, pois as probabilidades neutras ao risco, que são utilizadas para descontar os fluxos de caixa da opção, permanecem constantes por todo o período de

vida da opção. Importante mencionar que o Lema de Itô garante que o preço de qualquer derivativo é uma função das variáveis estocásticas do ativo-objeto do derivativo e do tempo. Esse é um pressuposto importante, que vamos utilizar neste trabalho com relação ao valor presente do fluxo de caixa da empresa proveniente das vendas no mercado ACL, que será assumido como seguindo o mesmo processo estocástico do preço da energia neste mercado.

Com relação ao estudo de projetos em energia eólica utilizando opções reais, no âmbito internacional, Dykese e Neufville (2008) estudaram o investimento em energia eólica no estado de Ohio (EUA), considerando a opção de expandir o parque ou de abandonar o projeto em um modelo binomial em tempo discreto. Os resultados indicaram que construir o parque gradativamente, de acordo com o cenário observado para as variáveis de incerteza consideradas, seria a melhor opção. Méndez *et alii* (2009) analisaram o investimento em um projeto eólico na Europa através de um modelo binomial, considerando as opções de abandonar o projeto ou investir ao longo do tempo (as mesmas consideradas neste trabalho). Abadie e Chamorro (2012) estudaram o investimento em energia eólica no mercado desregulado do Reino Unido, utilizando um modelo trinomial, onde o investidor tem a opção de investir ou abandonar o projeto.

No Brasil, destaca-se a tese de Dalbem (2010), que faz uma extensa análise do mercado de energia eólica no país, analisando a decisão de se investir em projetos eólicos sob o arcabouço da teoria dos jogos e opções reais. Os resultados indicam que uma pequena discrepância nas crenças dos investidores quanto ao futuro do mercado pode ser suficiente para deixar empresas mais viáveis de fora do leilão, ou seja, o governo deveria tornar as perspectivas futuras do setor mais consistentes de forma a atrair bons investidores. O resultado do trabalho de Dalbem (2010) contribui para consolidar a importância do problema de pesquisa abordado neste trabalho, uma vez que empresas mais viáveis teoricamente ficaram de fora dos últimos leilões de energia eólica. Se tal comportamento continuar a ocorrer, o risco para o setor é grande. Luna (2011) estuda a viabilidade do investimento em energia eólica de cinco parques geradores de energia participantes do programa PROINFA, comparando os resultados de viabilidade obtidos através da análise de investimento tradicional (VPL) e opções reais e atestando a superioridade do método expandido sobre a avaliação sem flexibilidade. Dalbem *et alii* (2012) analisaram o valor que a opção de aguardar para investir no momento mais adequado gera para um investidor que entre em um leilão A-5 e A-3 do mercado ACR, considerando a opção de antecipar a obra e vender energia no ACL ou abandonar o projeto. O presente trabalho retoma o arcabouço decisório proposto por Dalbem *et alii* (2012) e o sensibiliza com parâmetros utilizados por tomadores de decisão típicos neste mercado e pela consideração de ganhos de aprendizagem/perdas de competitividade considerados por eles como passíveis de ocorrer.

5. Estratégia de avaliação da flexibilidade contida no projeto

Se o investidor não considerar as opções e incertezas que afetam o projeto, o VPL calculado poderá estar enviesado. No problema proposto neste trabalho, o valor que a opção de esperar para investir em um empreendimento eólico é capaz ou não de gerar será mensurado.

Conforme já mencionado, as duas principais incertezas que podem afetar o valor do projeto são o valor do *capex* (*capex*) e o preço da energia no mercado ACL (PACL). O valor do *capex* pode variar em função do mercado de aerogeradores (oligopolizado), do mercado de construção civil (quanto mais aquecido, maior será o preço para execução da obra civil) e da situação dos demais fornecedores de insumos gerais necessários para a construção do parque, como fornecedores de artigos elétricos, cimento e aço. O

valor da energia no mercado ACL varia em função principalmente da oferta de energia projetada no país, que é influenciada pela entrada de novos projetos em operação e pelo índice pluviométrico, uma vez que cerca de 79% da capacidade instalada do país é hidráulica. Como os fatores de risco subjacentes a cada variável não são exatamente os mesmos, optou-se por considerar a correlação entre ambos como igual a zero em conformidade com o trabalho de Dalbem *et alli* (2012)¹⁰. Serão, portanto, construídas duas árvores binomiais, uma para cada fonte de incerteza (*capex* e PACL). A árvore da opção (valor da flexibilidade no projeto) vai depender dos valores assumidos pelas duas fontes de incerteza.

Neste modelo, considerou-se que as variáveis que representam a incerteza do modelo, quais sejam, PACL e *capex* seguem o processo estocástico do Movimento Geométrico Browniano (MGB).

A série de *capex* obtida junto ao BNDES foi simulada utilizando o *software @Risk*, em que se obteve uma volatilidade de 21,66%¹¹ para essa variável. A série de preços da energia foi obtida nas apresentações da empresa CEMIG a investidores, em que a empresa divulga o preço médio recebido pela sua geradora em cada ano. A simulação utilizando o *software @Risk* indicou uma volatilidade de 12,03% para a variável PACL.

Foi considerado como possível gerador de valor decorrentes da opção o “ganho de aprendizagem” (variável ‘gl’ nas equações 15 a 17 abaixo), segundo o qual o investidor poderia otimizar a geração do parque através de uma melhor compreensão do projeto de engenharia. Com uma maior série de dados de ventos, o investidor poderia otimizar o posicionamento das turbinas, elevando o fator de capacidade do parque ou, até mesmo, comprar turbinas mais adequadas ao seu parque. Além disso, o investidor poderia fechar melhores contratos de O&M com seus fornecedores. O ganho de aprendizado tem como consequência direta induzir os investidores a aguardarem para investir

Outro possível gerador de valor considerado foi decorrente de reduções no *capex* (semelhantes ao pagamento de dividendos/*yield* em opções financeiras), calculados sobre o modelo gerador de *capex* futuros. Neste caso, o investidor conseguiria otimizar o investimento, após o detalhamento do projeto em nível executivo. Outra possibilidade seria conseguir um contrato de construção mais barato do que o orçado inicialmente, como por exemplo, através da modalidade contratual de *Engineering, Procurement & Construction* e *lump sum turnkey*, onde a empresa contratada é responsável pela engenharia, suprimento e construção, entregando o parque por um preço fechado e pronto para funcionar. Esse efeito modifica a equação geradora de valores futuros de *capex* conforme a equação (12):

$$S = S_0 e^{(\mu - \gamma)t} \quad (12)$$

onde:

$$S = \text{capex em } t; S_0 = \text{capex em } t-1; \gamma = \text{yield (redução no capex)}$$

É importante notar que, devido à mudança em S , as probabilidades de alta e queda (p) e $(1-p)$ na árvore do *capex*, se alteram.

A Figura 1 apresenta o valor para o projeto dependendo do momento em que a opção de investir é exercida. Optou-se por apresentar tal informação seguindo a mesma sistemática de Dalbem *et alli* (2012), adaptada a este trabalho.

As variáveis da Figura 1 são as mesmas descritas na equação (1), em que o VPL representa o somatório de valor presente da venda no ACL (VPACL) e da venda no ACR (VPACR) subtraído o *capex*. As variáveis com o sobrescrito “~” (*capex* e VPACL) são estocásticas, ou seja, o valor do projeto depende do estado de realização das incertezas

¹⁰ A correlação calculada entre as duas variáveis é de 0,041.

¹¹ Foi simulado 1000 cenários no *software @Risk*, utilizando a função de probabilidade uniforme, definindo como parâmetros mínimos e máximos encontrados nas séries históricas de *capex* e PACL.

associadas a essas variáveis no momento em que a opção de investir for exercida.

Como o VPACL é obtido pelo somatório do FCFF da venda de energia no mercado ACL, descontado pelo WACC, pode-se afirmar que:

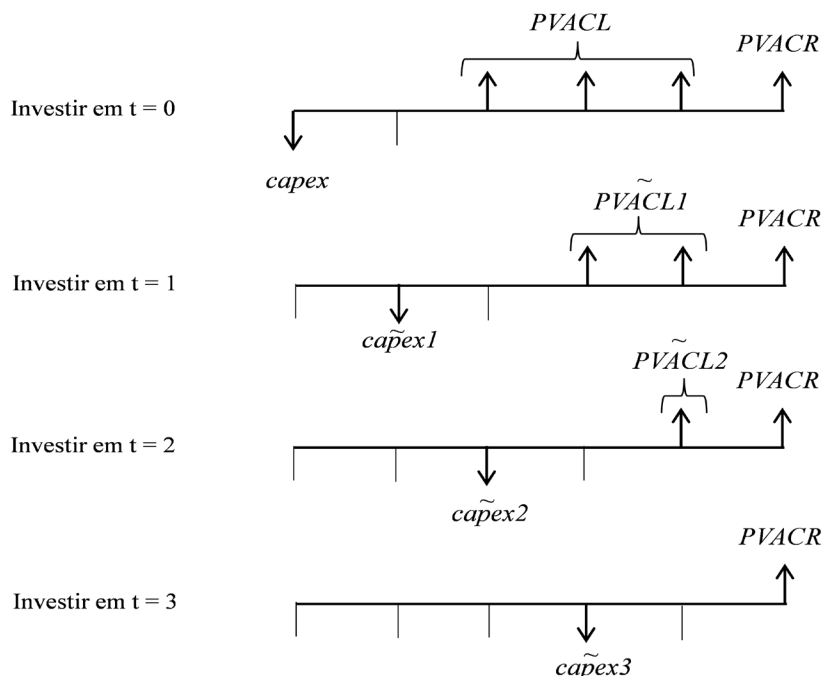
$$VPACL = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{LAJ}{(1+WACC)^t} \quad (13)$$

em que LAJ = Receita líquida (RL) – custo operacional (CO) – IR – CSLL

Como explicado anteriormente, a receita líquida (RL), IR e CSLL dependem fundamentalmente do preço da energia no mercado ACL. Pode-se afirmar que RL, IR e CSLL são linearmente dependentes da realização da variável preço da energia no mercado ACL (PACL) quando a opção é exercida, assim, RL, IR e CSLL também são estocásticos. Através do Lemma de Itô, pode-se demonstrar que essas variáveis seguem o mesmo processo estocástico da variável PACL e com os mesmos parâmetros. Entretanto, o componente CO é determinísticos e depende dos itens de custos já explicados.

Assim, quando a decisão de investir é tomada, o valor do projeto depende da realização do estado das variáveis PACL e *capex* em uma árvore quadrinomial. Portanto, o valor do projeto no caso 0 é determinístico e nos casos 1, 2 e 3 é estocástico, sendo representado pela combinação, em cada ramo da árvore quadrinomial, gerada pela realização estocástica das duas incertezas binomiais.

Figura 1. Valor do projeto dependendo da opção de investimento em cada período



Fonte: Elaboração própria com base em Dalbem *et alli* (2012).

A abordagem de avaliação risco-neutra permite utilizar as taxas livres de risco para descontar os fluxos para o valor presente (dado que toda a incerteza foi calculada nas probabilidades). Como exemplo, o valor estocástico em t=1 tem que ser dividido pela taxa livre de risco (*rf*), ou seja, por $(1+rf)$ para se obter o valor em t=0. Intuitivamente, o

valor de $t=2$ tem de ser descontado por $(1+rf)^2$.

Caso 0: Investe em $t=0$

$$VPL_0 = \left[PACL_0 \times TMWh \times (1 - 3,65\% - 8\% \times 25\% - 12\% \times 9\%) \right] \times \left[\frac{1}{(1+WACC)^2} + \frac{1}{(1+WACC)^3} + \frac{1}{(1+WACC)^4} \right] + VPACR - capex \quad (14)$$

Caso 1: Investe em $t=1$

$$VPL_1 = \left\{ \left[\tilde{PACL}_1 \times TMWh \times (1 - 3,65\% - 8\% \times 25\% - 12\% \times 9\%) \right] \times \left[\frac{1}{(1+WACC)^2} + \frac{1}{(1+WACC)^3} \right] - \tilde{capex}_1 \right\} \times \frac{1}{(1+rf)^1} + VPACR \times (1+gl) \times (1+WACC) \quad (15)$$

Caso 2: Investe em $t=2$

$$VPL_2 = \left\{ \left[\tilde{PACL}_2 \times TMWh \times (1 - 3,65\% - 8\% \times 25\% - 12\% \times 9\%) \right] \times \left[\frac{1}{(1+WACC)^2} \right] - \tilde{capex}_2 \right\} \times \frac{1}{(1+rf)^2} + VPACR \times (1+gl \times 2) \times (1+WACC)^2 \quad (16)$$

Caso 3: Investe em $t=3$

$$VPL_3 = -\frac{1}{(1+rf)^3} \times \tilde{capex}_3 + VPACR \times (1+gl \times 3) \times (1+WACC)^3 \quad (17)$$

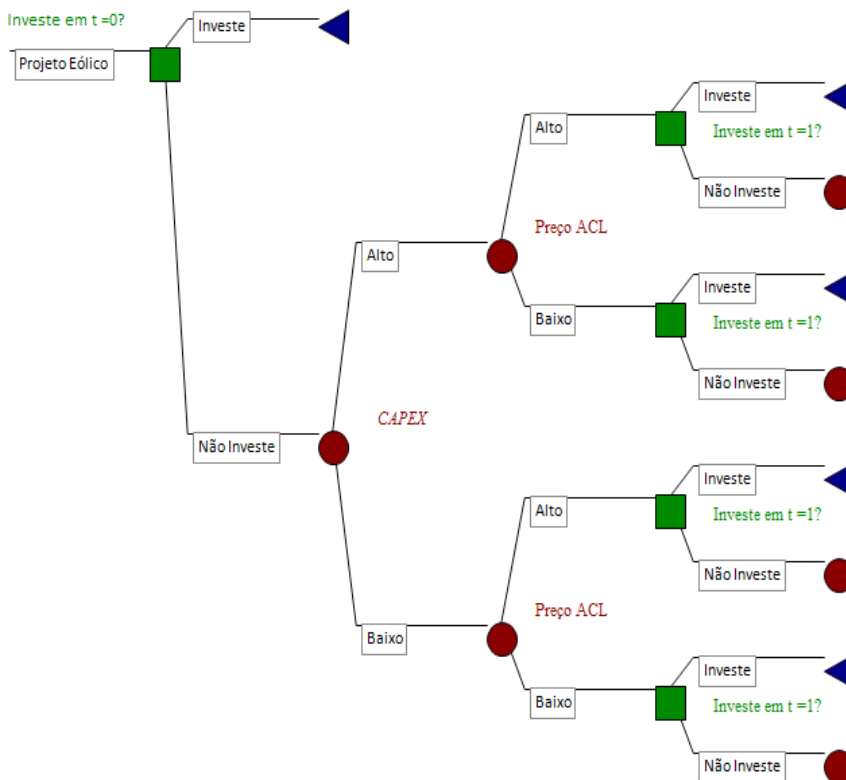
Caso 4: Abandono do projeto¹²

$$VPL_4 = -5\% \times \tilde{capex}_3 \times \frac{1}{(1+rf)^3} \quad (18)$$

As equações 14 a 18 refletem o valor esperado dos *payoffs* em $t=0$, considerando o exercício das opções disponíveis em cada instante de tempo. Quando a melhor alternativa é aguardar para investir, o retorno é obtido através do melhor resultado do nó seguinte da árvore, ponderado pelas probabilidades neutras ao risco. Desta forma, em cada nó da árvore, a melhor decisão é a que agrega maior valor para o investidor.

Escolha ótima $n,i = \max[\text{valor de investir } n,i; \text{valor esperado de aguardar } n,i]$

¹² A multa contratual estimada para o abandono de um projeto do género é de 5% do valor que seria investido (capex).

Figura 2. Esboço da árvore de decisão até $t = 1$ 

Fonte: Elaboração própria utilizando o *Software PrecisionTree*.

6. Resultados e sensibilidades

Os resultados apurados com a aplicação da estratégia de avaliação exposta no item anterior indicaram que a opção de esperar e decidir para investir no melhor momento gerou valor para o investidor. Neste trabalho considera-se como um investidor oportunista, um empreendedor que considera a opção de abandonar o projeto, e ter suas garantias de performance executadas pelo contratante. Além disso, considera-se como um investidor comprometido, o empreendedor que não leva em conta a opção de abandonar o projeto caso ganhe o leilão. Ou seja, mesmo que as condições sejam desfavoráveis, o investidor comprometido executará o projeto até sob cenários de VPL negativo.

Os resultados indicaram que para um investidor oportunista, ou seja, que considera a opção de abandonar o projeto em $t=3$ caso o cenário se torne desfavorável para ele, o VPL do projeto é de R\$ 4.983 mil, ou seja, acima do VPL negativo de R\$ 59.030 mil que a metodologia tradicional indicou. A Tabela 2 indica os resultados para diferentes valores de preço de energia no ACR e para várias possibilidades de ganhos de aprendizagem.

Os resultados da sensibilidade considerando a perda de competitividade e a opção de abandonar o projeto estão indicados na Tabela 3 e mostram que, para uma perda de competitividade de 12%, os projetos do último leilão que tiveram preço médio de R\$ 110,51/MWh não seriam viáveis. Além disso, conforme esperado, a perda de competitividade destrói valor do projeto em caso de espera e caso o valor inicial do leilão seja baixo (pois tal cenário induz à opção de esperar para investir em situações

mais favoráveis), reduzindo o VPL.

Tabela 2. VPL (R\$ mil) considerando a opção de abandono e ganhos de aprendizagem.

Ganho de Aprendizado	Preço ACR						
	85,03	88,97	100	105,0	110,5	115	120
0,0%	-3.832	-3.156	-362	1.689	4.983	8.146	11.669
5,0%	-2.287	-1.475	3.065	6.099	9.632	12.655	16.024
8,9%	-1.065	13	7.246	10.526	14.143	17.091	20.403
11,4%	7	2.739	10.395	13.868	17.696	20.816	24.306
15,0%	3.648	6.603	14.883	18.639	22.780	26.989	32.891

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo.

Tabela 3. VPL (R\$ mil) considerando a opção de abandono e perda de competitividade

Perda de Competitividade	Preço ACR						
	85,03	88,97	100	105,0	110,5	115	120
0,0%	-3.832	-3.156	-362	1.689	4.983	8.146	11.669
3,0%	-4.749	-4.165	-1.691	351	3.264	5.813	10.588
6,0%	-5.219	-5.173	-2.990	-988	1.929	4.977	10.588
9,0%	-5.219	-5.219	-4.244	-2.326	594	4.977	10.588
12,0%	-5.219	-5.219	-5.093	-3.629	-59	4.977	10.588

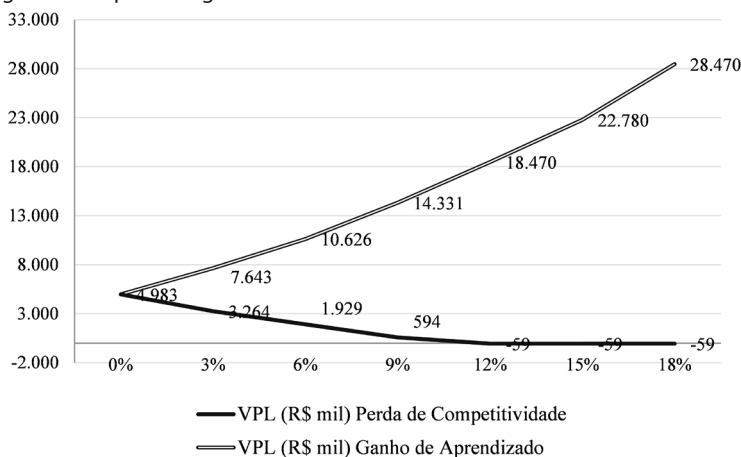
Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo.

O Gráfico 3 indica a sensibilidade do modelo a diferentes valores de ganho de aprendizagem e perda de competitividade para o caso base, onde a energia é vendida a R\$ 110,51MWh. Para valores de perda de competitividade acima de 9%, o VPL é sempre negativo em R\$ -59.030, remetendo para o caso base (ou seja, não investir nunca, dado que o preço da energia não deve subir e o investidor perde condições melhores ao esperar para investir no futuro).

A Tabela 4 mostra alguns resultados para o cenário onde o investidor tem a opção de abandonar o parque tendo suas garantias executadas. É interessante notar que, considerando um *yield* líquido entre ganho de aprendizagem e perda de competitividade da ordem de 5%, para o cenário de venda de energia a R\$ 110,51 MWh, o VPL do projeto aumenta para R\$ 9.632. Porém, também aumentam as chances (para 42%) do investidor abandonar o projeto. Ou seja, um melhor conhecimento (ganho de aprendizagem) acerca do projeto aumenta a chances do investidor esclarecido desistir do mesmo¹³.

¹³ Para fins didáticos, considerou-se que o efeito líquido da perda de competitividade + ganho de aprendizagem é negativo se a perda de competitividade for superior ao ganho de aprendizagem e positiva para a situação inversa.

Gráfico 3. Sensibilidade do VPL a diferentes valores de perda de competitividade e ganho de aprendizagem.



Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo.

Tabela 4. Probabilidades de investimento considerando o investidor oportunista.

Premissas	Probabilidade de Investir em Cada Período	Probabilidade de Abandonar o Projeto em t=3 ou Venda no ACL	Período	VPL R\$ (mil)
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh Perda de Competitividade + Ganho de Aprendizado = 0	0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL 31%	T=0	4.983
	55%		T=1	
	0%		T=2	
	14%		T=3	
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh Perda de Competitividade + Ganho de Aprendizado = 5%	0%	Energia é vendida por 1 ano no ACL 42%	T=0	9.632
	0%		T=1	
	31%		T=2	
	27%		T=3	
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh Perda de Competitividade + Ganho de Aprendizado = - 5%	0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL 45%	T=0	2.374
	55%		T=1	
	0%		T=2	
	0%		T=3	
Preço Energia = R\$ 100/MWh Perda de Competitividade + Ganho de Aprendizado = 0	0%	Energia é vendida por 1 ano no ACL 69%	T=0	-362
	0%		T=1	
	31%		T=2	
	0%		T=3	

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo.

A seguir, são detalhados os resultados do modelo para um investidor comprometido, que não considera abandonar o projeto caso ganhe o leilão. No caso base, para o preço de energia de R\$ 110,51/MWh, o VPL do projeto foi o mesmo do caso determinístico, de R\$ -59.030. A Tabela 5 sumariza os resultados para diferentes valores de preço de energia no ACR e para os ganhos de aprendizagem.

Tabela 5. VPL (R\$ mil) para diferentes valores de ganho de aprendizagem

Ganho de Aprendizagem	Preço ACR						
	85,03	88,97	100	105,0	110,5	115	120
0,0%	-28.602	-24.193	-11.841	-6.237	-59	4.977	10.588
5,0%	-28.602	-24.193	-11.841	-6.237	-59	4.977	10.588
8,9%	-27.348	-22.897	-10.433	-4.780	1.451	6.529	12.186
11,4%	-23.627	-18.928	-5.764	207	6.788	12.153	18.129
15,0%	-17.480	-12.390	1.871	8.340	15.473	21.287	27.763

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo

A análise dos resultados considerando um investidor comprometido, para o cenário base, com o preço da energia igual a R\$ 110,51 /MWh, indica que a melhor estratégia é executar o investimento em $t=0$. Apesar do VPL em $t=0$ ser negativo, o cenário futuro para este investidor é ainda pior, o que levaria a uma destruição de valor ainda maior.

Outro cenário interessante de ser analisado é que, para valores de energia de R\$ 120/MWh, o projeto seria sempre executado em $t=0$, gerando um VPL de R\$ 10.588 e, ao considerar ganhos líquidos de 10%, o VPL aumenta para R\$ 14.490, sendo que as probabilidades de venda de energia no ACL são as mesmas do exemplo para o preço de energia em R\$ 110,51 (Tabela 6).

Conforme explicado anteriormente, foi analisado ainda o efeito no valor do projeto com opções do pagamento de um *'yield'* sobre o *capex* (investir em momentos em que haja redução no *capex*). O intuito desse exercício foi avaliar sob outra ótica o efeito do ganho de aprendizagem, neste caso, ocorrendo essencialmente apenas sobre o *capex*. Inicialmente era esperado que o VPL aumentasse linearmente com o crescimento do *yield*.

Os resultados indicaram que o *yield* positivo ocasiona um efeito não linear sobre o VPL do projeto. Para o caso base, com a energia vendida a R\$ 110,51 R\$/MWh, o VPL é crescente conforme o *yield* cresce até 5% e a partir deste ponto, passa a decrescer. A não linearidade dos resultados é retratada na tabela 7, que indica o VPL do projeto para diferentes valores de *yield* e de valor da energia. Por exemplo, para um valor de energia a R\$ 105 R\$/MWh, o VPL do projeto cresce com o *yield* até 6%, e a partir deste ponto passa a cair com o aumento do *yield*.

Desta forma, os resultados considerando o *yield* não se assemelham aos obtidos para o ganho de aprendizagem, onde o VPL do projeto é crescente com o fator de aprendizagem utilizado. Esse fato pode decorrer das diferenças estruturais entre as duas abordagens. Na primeira, o ganho de aprendizagem tem efeito sobre todos os fluxos de caixa do projeto, enquanto na segunda abordagem (utilizando o *yield*), apenas a árvore binomial do *capex* é afetada. Além disso, o *yield* não teve efeitos sobre o valor do projeto sem a opção de abandono, indicando que, para esse cenário, o projeto só seria viável com os ganhos de aprendizagem sobre os resultados operacionais considerados anteriormente.

Tabela 6. Probabilidades de investimento considerando o investidor comprometido

Premissas	Probabilidade de Investir em Cada Período	Venda no ACL	Período	VPL R\$ (mil)
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh Perda de Competitividade + Ganho de Aprendizado = 0	100% 0% 0% 0%		T=0 T=1 T=2 T=3	-59
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh Perda de Competitividade + Ganho de Aprendizado = 10%	0% 0% 0% 0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL Energia é vendida por 1 ano no ACL	T=0 T=1 T=2 T=3	3.485
Preço Energia = R\$ 120/MWh Perda de Competitividade + Ganho de Aprendizado = 0%	100% 0% 0% 0%		T=0 T=1 T=2 T=3	10.588
Preço Energia = R\$ 120/MWh Perda de Competitividade + Ganho de Aprendizado = 10%	0% 0% 0% 0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL Energia é vendida por 1 ano no ACL	T=0 T=1 T=2 T=3	14.490

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo.

Tabela 7. VPL ((R\$ mil) considerando a opção de abandono e *yield*

Efeito <i>Yield</i>	Preço ACR						
	85,03	88,97	100	105	110,5	115	120
0,0%	-3.755	-3.007	76	1.979	4.983	7.760	10.847
1,0%	-3.658	-2.887	142	2.018	5.295	7.960	10.924
2,0%	-3.612	-2.824	159	2.390	5.526	8.076	10.912
4,0%	-3.482	-2.744	486	2.894	5.735	8.045	10.650
6,0%	-3.444	-2.839	797	3.065	5.596	7.701	10.234
8,0%	-3.547	-2.935	889	2.899	5.176	7.247	9.852

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo.

A tabela 8 mostra alguns resultados para o cenário onde o investidor tem a opção de abandonar o parque tendo suas garantias executadas, considerando diferentes valores de *yield*. É interessante notar que a probabilidade do investidor abandonar o projeto é crescente com relação ao *yield*. A comparação do cenário base apresentado na tabela 4, indica que sem o *yield* a probabilidade de abandono do projeto é de 31% e com *yield* de 1% é de 34%.

Os resultados indicaram que com o *yield* variando entre 1% e 6% o projeto seria executado apenas em t=1 ou t=3 ou então seria abandonado. Com o *yield* em 8% o

projeto também poderia ser desenvolvido em $t=2$. É interessante notar que não há relação linear entre o VPL e a probabilidade de abandono do projeto.

Tabela 8. Probabilidades de investimento considerando o investidor oportunista e *yield*

Premissas	Probabilidade de Investir em Cada Período	Probabilidade de Abandonar o Projeto em $t=3$ ou Venda no ACL	Período	VPL R\$ (mil)
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh <i>Yield</i> = 1%	0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL 100%	T=0	5.295
	0%		T=1	
	0%		T=2	
	0%		T=3	
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh <i>Yield</i> = 2%	0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL 100%	T=0	4.780
	0%		T=1	
	0%		T=2	
	0%		T=3	
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh <i>Yield</i> = 4%	0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL 100%	T=0	5.735
	0%		T=1	
	0%		T=2	
	0%		T=3	
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh <i>Yield</i> = 6%	0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL 100%	T=0	5.596
	0%		T=1	
	0%		T=2	
	0%		T=3	
Preço Energia = R\$ 110,51/MWh <i>Yield</i> = 8%	0%	Energia é vendida por 2 anos no ACL Energia é vendida por 1 ano no ACL 100%	T=0	5.176
	0%		T=1	
	0%		T=2	
	0%		T=3	

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados do modelo.

7. Considerações finais

Esse trabalho buscou estudar o mercado de energia eólica brasileiro, analisando o histórico de contratações recente e os principais *drivers* do negócio. Além disso, foi feito um estudo de caso com as características típicas de um projeto eólico no Brasil utilizando a metodologia tradicional de VPL e de opções reais.

As opções analisadas neste trabalho foram a de aguardar para investir no momento mais adequado e de abandonar o projeto e ter as garantias executadas caso a situação futura se torne demasiadamente desfavorável para o investidor. As incertezas analisadas foram o valor da energia no mercado ACL e o valor do *capex*.

O resultado obtido por meio do VPL indicou um VPL de R\$ -59.030 mil, ou seja, o

projeto não seria executado nesta situação, pois levaria à destruição de valor para o investidor. Ao considerar a opção de abandono do projeto (investidor oportunista), o VPL encontrado foi de R\$ R\$ 4.983 mil, ou seja, essa opção gera valor para o projeto. Além disso, em diversos cenários o projeto não seria executado, sendo o melhor para o investidor abandonar o projeto e ter as garantias executadas. Esse efeito é potencializado para valores menores de preços de energia fixados nos leilões.

O estudo de caso desenvolvido neste trabalho apresenta algumas limitações, como quanto à premissa de que o processo estocástico do valor do projeto siga um Movimento Geométrico Browniano. Além disso, as séries de dados utilizadas para obtenção das volatilidades das variáveis estocásticas são curtas (nove períodos), o que pode levar ao enviesamento das volatilidades e, consequentemente, do resultado do projeto. Outra limitação importante diz respeito à estimação do prêmio de risco que foi calculado utilizando um *beta* do mercado energético americano, dado que um projeto eólico no Brasil não está sujeito às mesmas incertezas que o setor elétrico americano como um todo.

A inviabilidade do projeto na maioria dos cenários, que leva a comportamentos oportunistas por parte dos investidores, é um fator importante que emerge da análise e sugere que o modelo de contratação de energia eólica ora em vigor no Brasil precisa ser revisto de modo a atrair bons projetos no futuro e tornar o segmento relevante na matriz energética nacional.

Referências Bibliográficas

ABADIE, L, M.; CHAMORO, J, M. Valuation of Wind Energy Projects: A Real Options Approach. Working Papers Series: Basque Centre for Climate Change, Bilbao, nov. 2012.

ABEEOLICA. Boletim de Dados de junho de 2016.

Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/images/pdf/Boletim-de-Dados-ABEEolica-Junho-2016-Publico.pdf>>. Acesso em ago. 2016.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. DESPACHO Nº 101, DE 16 DE JANEIRO DE 2013.

_____. Nota Técnica No 76, de 15 de julho de 2011. Dispõe sobre o estabelecimento de critérios e premissas para utilização da base de dados do programa Nodal encaminhada pela EPE para cálculo das Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão – TUST de longo prazo, em atendimento as disposições da Resolução Normativa nº 267, de 5 de junho de 2007, para os novos empreendimentos de geração de energia elétrica partícipes do Leilão nº 02/2011, denominado A-3, e do Leilão nº 03/2011, denominado Leilão de Reserva. Disponível em:< <http://www.aneel.gov.br/cedoc/nreh20111179.pdf>> Acesso em: 20 fev. 2013.

CCEE. CAMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Info Mercado. Número 70. Brasília, 2013a. Disponível em:<<http://www.ccee.org.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

_____. Sítio. 2013,b. Disponível em:< <http://www.ccee.org.br/>>. Acesso em: 26 jun. 2013.

_____. O Setor Elétrico Brasileiro. Brasília, 2011. Disponível em:< <http://>

www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/ondeatueamos/setor_eletrico?_afLoop=297041769276000#%40%3F_afLoop%3D297041> Acesso em: 19 abr.2012.

COX, J.; ROSS, S.; RUBINSTEIN, M. Option pricing: a simplified approach. *Journal of Financial Economics*, v.7, p.229-264, 1979.

DALBEM, M, C. Análise de investimentos em energia eólica no Brasil. 2010. 198 f. Tese de Doutorado (em Administração)-Programa de Pós-Graduação em Administração, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

DALBEM, M, C. *et alli*. Brazil's quest to also foster wind energy in the deregulated market: will it work? In: USAEE/IAEE NORTH AMERICAN CONFERENCE, 31., Austin, 2012. Disponível em:<<http://www.usaee.org/usaee2012submissions/OnlineProceedings/PaperWindEnergyAminu5Auctions07setembro2012.pdf>> Acesso em: 20 fev. 2013.

DIXIT, A.K.; PINDYCK, R.S. *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1994.

DYKES, K. ; NEUFVILLE, R. Real Options for a Wind Farm in Wapakoneta, Ohio. In: *World Wind Energy*, 2008, Ontário, Canadá. Proceedings... Ontário, Canadá: 2008. Disponível em: < <http://www.ontario-sea.org/Page.asp?PageID=1209&ContentID=1094> > Acesso em: 24 fev.2013.

ELETROBRAS. Plano Anual do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Brasília, 2012. Disponível em:<http://www.aneel.gov.br/cedoc/areh20111244_3.pdf> Acesso em: 14 jan. 2013.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Anuário Estatístico de Energia. Brasília, 2012. Disponível em:< <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletric/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

LUNA, N, A. Avaliação de Empresas Utilizando Opções Reais: o caso de uma geradora de energia eólica. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Economia)-Programa de Pós-Graduação em Economia, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MÉNDEZ *et alli*. Real Options Valuation of a Wind Farm. *Real Options Conference*, 2009. Disponível em: <www.realoptions.org.br>. Acesso em: 15 dez. 2012.

PDEE - Plano Decenal de Expansão de Energia 2015/2024. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

PROINFA. Ministério de Minas e Energia. Política Pública de Energia Renovável. Set 2006. Disponível em: <www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/politica_publica.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2013.

WWEA. World Wind Energy Association. *Wind Energy Around the World - Quarterly*

Bulletin, march 2016. Disponível em: http://www.wwindea.org/wwea_bulletin_issue_1_2016/. Acesso em: 16 jul.2016.

Anexo 1 - Cálculo do Custo de Capital

O mercado de capitais brasileiros é pequeno se comparado com outros países e, em função disso, utilizar variáveis do mercado local para calcular WACC e CAPM pode enviesar os resultados do modelo. Sendo assim, com o intuito obter uma taxa de desconto adequada e condizente com a realidade, optou-se por utilizar dados do mercado americano, que é considerado maduro e diversificado. A única exceção foi o custo de financiamento da firma, em que foi considerado o praticado pelo BNDES e é a realidade utilizada pelas empresas do setor. Para o cálculo do WACC e CAPM foram utilizadas as seguintes variáveis extraídas do banco de dados da Bloomberg:

a. Taxa Livre de Risco (rf): foi utilizado o retorno médio anualizado de 1929 a 2012 dos T-Bonds, que são títulos de 10 anos do tesouro americano e são considerados livres de risco. A taxa estimada foi de 5,11% ao ano.

b. Prêmio de Risco País: considerou-se o CDS (*Country Default Spreads*) calculado com base na nota de risco país da agência de classificação de risco Moodys. Atualmente, a taxa em vigor é de 2% ao ano.

c. Prêmio de Risco de Mercado: foi adotada a diferença entre o retorno médio anualizado entre 1929 e 2012 dos títulos T-Bonds e do índice de ações americano S&P500. Sendo assim, o prêmio de risco de mercado adotado foi de 4,20% ao ano.

d. Medida *Beta*: foi adotado o *beta* desalavancado do setor "*Green & Renewable Energy*", equivalente a 0,346. Essa talvez seja a variável mais controversa do modelo, porque um projeto eólico no Brasil não está sujeito às mesmas incertezas que o setor elétrico americano. Porém, a falta de dados exclusivamente de empresas que estão inseridas na geração eólica no Brasil, levou à adoção dessa variável como *proxy* para o *beta* de projetos eólicos no Brasil.

e. Custo da Dívida: utilizou-se como custo da dívida a taxa de 7,40% ao ano, equivalente à TJLP de 5% ao ano, acrescida do *spread* de risco de crédito de 2,40%, em linha com o praticado pelo BNDES.

f. Relação Dívida/Capital Próprio (D/E): o BNDES financia até 70% do *capex* de projetos eólicos. O projeto inicia com elevada alavancagem (70%) e não requerer novos financiamentos ao longo de sua vida útil, de tal forma que a alavancagem diminui com o tempo. Desta forma, com o intuito de obter uma relação D/E menos viesada possível, optou-se por descontar a relação D/E ao longo do período de vida do projeto ao Ke (calculado com o *beta* desalavancado). Esse método parte do pressuposto que o peso relativo do endividamento varia com o tempo, senão assim, a alavancagem no início de vida do projeto, tem um peso maior que a alavancagem no final da vida do projeto.

$$\frac{D}{E} = \sum_{n=1}^p \left[\frac{(D/E)_n}{(1+k)^n} \right] \bigg/ \sum_{n=1}^p \left[\frac{1}{(1+k)^n} \right]$$

onde:

D/E = Índice médio de alavancagem

$(D/E)_n$ = Índice de alavancagem em um determinado período de tempo

k = taxa de desconto desalavancada (K_e desalavancado)

n = período de tempo

p = número total de períodos

Sendo assim, o cálculo da estrutura meta de endividamento do projeto ao longo do período de vida útil foi estimado em 0,45 (dívida/capital próprio a longo prazo).

g. Inflação Americana: foi estimada em 2% ao ano, em linha com a estimativa de diversas instituições financeiras.

Como os fluxos de caixa deste trabalho estão expressos em valores constantes, ou seja, já descontada a inflação, calculou-se a taxa de desconto também em valores constantes (real). Tem-se que:

$$E(R_i) = R_f + \beta_i [E(R_m) - R_f]$$

$$E(R_i) = K_e$$

$$K_{e \text{ nominal}} = 5,11\% + 2\% + 0,346 \times (1 + 0,45) \times 4,20\%$$

$$K_{e \text{ nominal}} = 9,22\%$$

$$K_{e \text{ real}} = \frac{K_{e \text{ nominal}}}{1 + \text{inflação}}$$

$$K_{e \text{ real}} = 7,08\%$$

$$K_{d \text{ nominal}} = 7,40\%$$

$$K_{d \text{ real}} = 5,29\%$$

