

## **Análise do impacto de uma opção de abandono para usinas eólicas no Brasil diante das incertezas modeladas a partir de um processo de reversão à média com saltos**

### **Autoria**

GIANCARLO AQUILA - giancarlo.aquila@yahoo.com

Engenharia de Produção /Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Edson de Oliveira Pamplona - pamplona@unifei.edu.br

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção/UNIFEI

Paulo Rotela Junior - paulo.rotela@gmail.com

PPGEP/UFPB - Universidade Federal da Paraíba

Pedro Paulo Balestrassi - ppbalestrassi@gmail.com

Engenharia de Produção/UNIFEI

LUIZ CELIO SOUZA ROCHA - luiz.rocha@ifnmg.edu.br

Curso de Tecnólogo em Processos Gerenciais/Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas

Gerais - IFNMG

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

### **Resumo**

As circunstâncias do mercado livre associadas às peculiaridades das regras de comercialização de energia no país, proporcionam incertezas aos investidores em energia eólica, que só podem ser avaliadas pela teoria das Opções Reais. Este estudo analisa o caso de uma usina eólica operando no mercado livre brasileiro, com a opção de abandono ao longo da vida do projeto. A principal contribuição do estudo é considerar no cálculo do valor do ativo a incerteza endógena, referente a liquidação das diferenças, a partir das simulações de um random walk de um processo de reversão à média com saltos dos preços de energia no mercado spot, e, em seguida a incerteza exógena representada pela volatilidade dos preços. O cálculo do ativo subjacente é feito através da Simulação de Monte Carlo, na qual o random walk é simulado para os cenários de liquidações de diferenças, e, em seguida o valor do ativo com a opção de abandono é calculado. Os resultados mostram que ao considerar os dois tipos de incerteza, a opção de abandono acrescenta 22,45% de valor ao projeto, e a chance de não abandonar até o final da vida útil do ativo é igual a 67%.

## **Análise do impacto de uma opção de abandono para usinas eólicas no Brasil diante das incertezas modeladas a partir de um processo de reversão à média com saltos**

### **Resumo**

As circunstâncias do mercado livre associadas às peculiaridades das regras de comercialização de energia no país, proporcionam incertezas aos investidores em energia eólica, que só podem ser avaliadas pela teoria das Opções Reais. Este estudo analisa o caso de uma usina eólica operando no mercado livre brasileiro, com a opção de abandono ao longo da vida do projeto. A principal contribuição do estudo é considerar no cálculo do valor do ativo a incerteza endógena, referente a liquidação das diferenças, a partir das simulações de um *random walk* de um processo de reversão à média com saltos dos preços de energia no mercado *spot*, e, em seguida a incerteza exógena representada pela volatilidade dos preços. O cálculo do ativo subjacente é feito através da Simulação de Monte Carlo, na qual o *random walk* é simulado para os cenários de liquidações de diferenças, e, em seguida o valor do ativo com a opção de abandono é calculado. Os resultados mostram que ao considerar os dois tipos de incerteza, a opção de abandono acrescenta 22,45% de valor ao projeto, e a chance de não abandonar até o final da vida útil do ativo é igual a 67%.

**Palavras-chave:** Mercado de Energia Elétrica; Energia Eólica; Teoria das Opções Reais; Volatilidade; Reversão à média com saltos.

## 1. Introdução

A energia eólica está entre as fontes que contribuído cada vez para a geração de energia elétrica (GWEC, 2017), sendo o Brasil um dos países em que a energia eólica cresceu significativamente em participação na matriz de energia elétrica (SILVA et al., 2013). Historicamente, o Brasil possui uma matriz de energia elétrica com predominância hídrica, porém devido aos apagões ocorridos entre os anos de 2001 e 2002, e mais recentemente os períodos de seca entre 2014 e 2015, que afetou principalmente alguns reservatórios nos estados do sul e centro do país, o uso de fontes de energia alternativas tem sido mais incentivado (HUNT et al., 2018; BRADSHAW, 2017).

Após os apagões e racionamentos entre 2001 e 2002, o setor eólico brasileiro presenciou as primeiras grandes experiências com políticas de incentivo (AQUILA et al, 2017; JUAREZ et al, 2014). As primeiras experiências se basearam em programas baseados no mecanismo de *feed-in tariffs*, sendo que a inicial foi a partir do Programa Emergencial de Energia Eólica (PROEÓLICA), cujo objetivo foi promover um modelo alternativo para o desenvolvimento econômico, social e ambiental baseado na energia eólica (RUIZ, 2007). Entretanto o PROEÓLICA foi encerrado em 2002, quando a fonte passou a ser incentivada pelo do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), desenvolvido com uma estrutura regulatória mais segura para o produtor, e que também apoiou a eletricidade gerada por PCH e biomassa (DUTRA e SZKLO, 2008; COSTA et al., 2008).

Aquila et al. (2017) destacam que desde a criação do PROINFA, a energia eólica tem crescido acentuadamente na participação da geração de energia elétrica no Brasil. A partir de 2009, quando ocorreu a primeira participação da energia eólica em leilões de energia no país, a fonte demonstrou boa competitividade e com isso o modelo de contratação de projetos eólicos passou gradativamente a ser realizado via leilões (REGO e RIBEIRO, 2018).

Porém, recentemente, algumas fazendas eólicas no Brasil, também têm sido construídas para comercializar energia no mercado livre, representada por cerca de 18% da potência eólica no país (ABEEÓLICA, 2019). Dalbem et al (2014) explicam que no mercado livre, os contratos bilaterais são negociados de forma flexível entre produtores de energia eólica e os compradores da energia, sendo que tanto investidores quanto o governo demonstram interesse em desenvolver esse mercado.

Entretanto, as análises de investimentos para os projetos de geração a partir de fontes de energia renovável no mercado livre são complexas, pois os projetos possuem características que os diferenciam de outros tipos de investimento. Além de seu investimento ser completamente irreversível, pois o capital investido nesse tipo de projeto não pode ser usado em outros setores, também existem muitas incertezas associadas ao mercado liberalizado de energia (SANTOS et al., 2014). Dentre algumas das incertezas presentes em projetos de geração a partir de FER estão: volatilidade dos preços da energia, tecnologia, disponibilidade de recursos naturais, macroeconômicas (câmbio, preço de commodities) e políticas (estabilidade dos preços de carbono e compromisso com metas estabelecidas) que tornam complexas a avaliação do investimento (FUSS et al., 2012).

No que concerne aos critérios de decisão para avaliar deste tipo de investimento, embora seja comumente utilizado o Valor Presente Líquido (VPL), este método desconsidera o valor criado pelas opções em circunstâncias em que a flexibilidade é uma das características do projeto, subestimando as oportunidades e, conseqüentemente, os valores reais de um projeto (PLESS et al. 2016; FERNANDES et al., 2016). Para superar essa limitação, a teoria das

Opções Reais (OR) se mostra como um método capaz de avaliar projetos de geração de energia, diante de circunstâncias em que existem a incerteza e irreversibilidade.

No presente estudo será analisada a opção de abandono para uma fazenda eólica no mercado livre de energia elétrica brasileiro. Dentre as incertezas analisadas, será considerada a incerteza dos preços de energia elétrica no mercado *spot*, que representa uma incerteza exógena do projeto e a incerteza relacionada ao cálculo da liquidação das diferenças, considerada uma incerteza endógena pois também depende do potencial de geração mensal da fazenda eólica. A volatilidade do projeto será estimada partir da volatilidade dos preços de liquidação das diferenças e o valor do projeto com a opção de abandono é calculado a partir do modelo binomial.

## 2. Fundamentação teórica

### 2.1 Movimento de reversão à média com saltos

De acordo com Hull (2008), qualquer variável a qual o valor varia ao longo do tempo evolui de modo ao menos parcialmente aleatória e imprevisível, segue um processo estocástico. Uma lei de probabilidade para a evolução de uma variável  $x_t$  ao longo de um período define um processo estocástico, com isso, pode ser calculada a probabilidade de que o valor  $x_t$  pertença a um intervalo específico ( $a_t < x_t < b_t$ ) (DIXIT e PINDYCK, 1994).

Os movimentos que seguem um *random walk* são processo estocásticos caracterizados pelos processos de Markov, que não são influenciados por acontecimentos passados. Ou seja, em um *random walk*, a distribuição de probabilidade de  $x_{t+1}$  depende somente de  $x_t$  e não do que ocorreu antes do tempo  $t$  (NORONHA, 2012). Neste aspecto, Deng (2000) afirma que o comportamento mais perceptível para as commodities de energia elétrica é o movimento de reversão à média.

O processo de reversão à média é um processo markoviano, com variação aleatória ao longo do tempo em torno de um valor médio. Segundo Dixit e Pindyck (1994), o processo mais simples de reversão à média é conhecido como processo de Ornstein-Uhlenbeck (O-U).

Conforme descrito na Equação 5, o movimento de reversão à média de O-U pode ser visto como a versão em tempo contínuo do processo em tempo discreto, muito conhecido em econometria e denominado processo autorregressivo de ordem 1 (DIXIT e PINDYCK, 1994).

$$x_t - x_{t-1} = x_{t-1} \left( e^{-\eta \Delta t} - 1 \right) + \bar{x} \left( 1 - e^{-\eta \Delta t} \right) + \varepsilon_t \quad (5)$$

onde:

$x$  = variável estocástica

$\bar{x}$  = média de longo prazo da variável estocástica

$\eta$  = velocidade de reversão à média (velocidade a qual a variável estocástica reverte ao valor da média no longo prazo)

$\varepsilon_t \sim$  distribuição normal  $N(0, \sigma^2)$ .

A variância pode ser expressa, conforme descrito na Equação 6:

$$Var[x(T)] = \frac{\sigma^2}{2\eta} (1 - e^{-2\eta T}) \quad (6)$$

Para realizar a estimativa dos parâmetros do processo O-U e a simulação de um *random walk* é mais útil descrever a versão discreta dada pela Equação 5 como uma equação de regressão, conforme descrito na Equação 7 (DIAS, 2015):

$$x_t = x_{t-1}e^{-\eta\Delta t} + \bar{x} \left[ \left( \frac{\mu - r_{fc}}{\eta} \right) \right] (1 - e^{-\eta\Delta t}) + \sigma \sqrt{(1 - \exp(-2\eta\Delta t)) / (2\eta)} N(0,1) \quad (7)$$

onde:  $\mu$  = taxa de desconto;  $r_{fc}$  = taxa livre de risco contínua.

Dias (2015) explica que a partir da equação de regressão que estima os log-retornos, representados  $\ln(x(t)) - \ln(x(t-1))$  da variável analisada com o logaritmo da variável do período anterior, indicada por  $\ln(x(t-1))$ . Dessa forma tem-se a seguinte equação de regressão:

$$\ln[x(t)] - \ln[x(t-1)] = a + (b-1)\ln[x(t-1)] + \varepsilon_t \quad (8)$$

Com os parâmetros da regressão é possível estimar os parâmetros do processo O-U, da seguinte forma:

$$\eta = -\ln(b) / \Delta t \quad (9)$$

$$\bar{x} = a / (1-b) \quad (10)$$

$$\sigma = \sigma_\varepsilon \sqrt{\frac{2 \ln b}{(b^2 - 1)\Delta t}} \quad (11)$$

onde:  $\sigma_\varepsilon$  = erro padrão da regressão

Entretanto, as commodities de eletricidade possuem características específicas, como a dificuldade de armazenamento e a baixa elasticidade, pois a demanda é pouco sensível a mudança de preço. Devido a isso, em alguns momentos os preços de energia elétrica podem presenciar saltos (DENG, 2000). Portanto, os modelos de reversão à média simples apesar de captarem a característica de reversão à média dos preços *spot*, precisam ser complementados, de modo que considerem a possibilidade de saltos nos preços (CARTEA e FIGUEROA, 2005).

Neste aspecto, embora os saltos possam ser eventos raros, é válido incluir a possibilidade de saltos no processo de reversão à média, conforme descrito na Equação 12:

$$x_t = x_{t-1}e^{-\eta\Delta t} + \bar{x} \left[ \left( \frac{\mu - r_{fc}}{\eta} \right) \right] (1 - e^{-\eta\Delta t}) + \sigma \sqrt{(1 - \exp(-2\eta\Delta t)) / (2\eta)} N(0,1) + jumps \quad (12)$$

Os saltos podem ser descritos como a somatória da probabilidade de saltos para cima e saltos para baixo:

$$jumps = \sum_{i=1}^{J(\Delta t)} \phi_i \quad (13)$$

O processo de Poisson se encaixa perfeitamente na modelagem da parte descontinuada desse processo. Com isso, o salto ocorrido pode ser representado por um processo estocástico discreto. O evento é um salto de tamanho  $k$ , que pode ser aleatório ou determinístico. Sendo  $\lambda$  a taxa média de chegada do evento durante um intervalo adimensional  $dt$ , a probabilidade da ocorrência desse evento  $\lambda dt$  e a probabilidade de não ocorrência é  $1 - \lambda dt$  (DIAS, 2015). Dessa

forma, o processo de Poisson  $q$  pode ser representado por suas probabilidades de ocorrência, como:

$$dq = \begin{cases} 0, & \text{com probabilidade } 1 - \lambda dt \\ \phi - 1, & \text{com probabilidade } \lambda dt \end{cases} \quad (14)$$

No presente estudo, a possibilidade de saltos para cima é incluída na simulação do processo de reversão à média para os preços *spot* no mercado de energia elétrica brasileiro. Embora não seja comum, os saltos nos preços *spot* já ocorreram em 2014, durante um período de seca e redução do nível de reservatórios no Brasil, o que comprometeu a oferta de energia elétrica.

## 2.2 Cálculo da OR pelo Modelo Binomial

Para o cálculo do valor da OR, o método mais popular, intuitivo e transparente é o modelo binomial (BRANDÃO et al., 2005). O modelo supõe que um ativo subjacente ( $S$ ) tem um valor presente no período ( $t$ ) e pode assumir dois valores no período seguinte ( $t + 1$ ). O valor do ativo subjacente está sujeito a variações, e será multiplicado por um fator de subida ( $u$ ) ou descida ( $d$ ), em cada período ( $\Delta t$ ). Os fatores  $u$  e  $d$  são calculados a partir da volatilidade ( $\sigma$ ) do ativo subjacente e o período de expiração da opção ( $\Delta t$ ).

A formulação para o cálculo dos fatores  $u$  e  $d$  são descritas nas Equações 15 e 16, respectivamente:

$$u = \exp^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (15)$$

$$d = \frac{1}{u} = \exp^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (16)$$

onde:

$u$ : fator multiplicativo ascendente (*up*);

$\sigma$ : volatilidade do ativo subjacente;

$\Delta t$ : tempo de expiração da opção;

$d$ : fator multiplicativo descendente (*down*).

A cada período o ativo só pode assumir um valor de duas alternativas de subida ou descida, com probabilidades  $p$  e  $1-p$ , respectivamente. Para o cálculo da probabilidade, além dos valores de  $\sigma$ ,  $\Delta t$ ,  $u$  e  $d$ , também é utilizada uma taxa livre de risco ( $r_f$ ). Entretanto, como o modelo binomial é uma abordagem em tempo discreto que busca aproximar um processo estocástico em tempo contínuo, é comum utilizar a taxa livre de risco em tempo contínuo ( $r_{fc}$ ), calculada por:  $\ln(1 + r_f)$  (DIAS, 2014). Com isso, a partir destas variáveis é possível obter a probabilidade neutra ao risco, cujo cálculo é descrito na Equação 17:

$$p = \frac{e^{r_{fc}\Delta t} - d}{u - d} \quad (17)$$

Depois de determinar todos os parâmetros, o valor da opção pode ser calculado a partir de uma árvore de decisão binomial. A construção da árvore de decisão é baseada na programação dinâmica estocástica, sendo o período de análise dividido em intervalos (estágios da árvore) e usando a técnica de cálculo *backwards*, encontra-se a melhor decisão para cada possível situação. Na Figura 1 é ilustrada uma árvore binomial para três estágios.

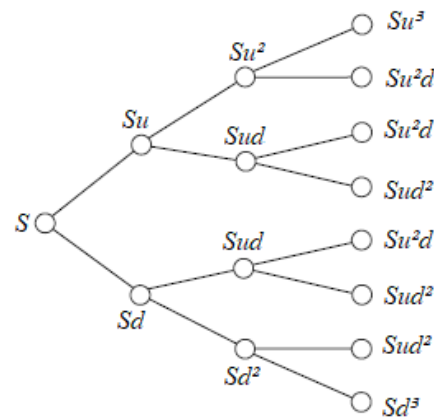


Figura 1 – Árvore binomial para três estágios.

O cálculo por *backwards*, se caracteriza como uma otimização por retroindução, ou seja, começa pelos cenários mais distantes, determinando em cada nó terminal se é ótimo exercer a opção ( $X$ ) ou não, e se trabalha para trás no tempo até o período inicial ( $t = 0$ ) (MUN, 2002). Nas Equações 18 e 19 são descritos os cálculos para o valor da opção em cada estágio.

$$F_{(t)} = \text{Max.} \left[ S_t - X; pS_{u_{t+1}} + (1-p)S_{d_{t+1}} / (1+r_c) \right] \quad (18)$$

Se, a expiração ocorrer no período  $t = T$ , o valor da opção é:

$$F_{(t)} = \text{Max.} [S_t - X; 0] \quad (19)$$

Neste estudo será utilizado o modelo binomial para avaliar o ativo com opção de abandono, a partir dos cálculos apresentados nesta seção. A aplicação do modelo binomial permite incorporar o valor criado pela flexibilidade proporcionado pela opção de abandono, para uma fazenda eólica, dada a volatilidade dos preços *spot* de energia elétrica. O modelo binomial apresenta-se como adequado para este estudo, visto que emprega apenas uma fonte de incerteza no cálculo da volatilidade (DIAS, 2014).

### 3. Contexto de uma fazenda eólica no mercado livre de energia elétrica

#### 3.1 Liquidação das diferenças de geração

Silva et al. (2016) explicam que no mercado livre de energia elétrica brasileiro, a compra de energia ocorre por meio de agentes regulamentados, como consumidores livres, cuja demanda é maior ou igual a 500 kW e comercializadores de energia. Também existe concorrência entre as concessionárias de geração de energia e permissionárias, empresas comerciais e importadores de energia. De acordo com Signorini et al. (2015), apesar de no mercado livre existir autonomia para as partes autorizadas definir o estabelecimento dos contratos, é necessário informar a quantidade de energia negociada para a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), que é responsável por coordenar a liquidação das diferenças de geração no final de cada mês.

Portanto, caso o produtor não consiga gerar 100% da energia firmada no contrato, terá que comprar essa energia liquidando e contabilizando essa diferença no mercado de curto prazo

(MCP) para cumprir o lastro estabelecido na contratação (CCEE, 2010). As diferenças são liquidadas pelo Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), forma como é denominado o preço *spot* da energia elétrica no Brasil.

Para calcular o valor da liquidação da diferença mensal, simplesmente calcula-se o produto do excedente ou déficit de energia em relação a energia contratada, representada pela garantia física do projeto, pelo valor do PLD naquele mês (CCEE, 2010). Dalbem et al. (2014) explicam que como a principal fonte para geração de energia elétrica no Brasil é a hídrica, o valor do PLD alcança níveis baixos em períodos com abundância de chuva. Entretanto, em períodos de seca podem ser acionadas usinas térmicas que possuem altos custos marginais de operação, aumentando o valor do PLD. Em alguns casos, pode o aumento causar um salto para cima do preço, provocando aumento nos preços dos contratos no mercado livre, e, conseqüentemente no valor de liquidação das diferenças.

### 3.2 Valor resgatado com a opção de abandono

Ao longo do tempo de vida de uma fazenda eólica, devido as oscilações dos preços *spot*, o valor de mercado usina pode aumentar ou diminuir. Dependendo das circunstâncias, pode se tornar mais vantajoso para o produtor vender os aerogeradores pelo valor contábil, equivalente a diferença entre o valor que o produtor adquiriu os aerogeradores e a depreciação acumulada, do que manter o projeto em operação. Na Equação 20 está ilustrado o cálculo do valor contábil (DAMODARAN, 2003).

$$VC = I_{aer} - D_t \quad (20)$$

onde:

VC = valor contábil;

$I_{aer}$  = investimento em aerogeradores;

$D_t$  = depreciação acumulada, no período t.

No Brasil, é prática de mercado os projetos de geração de energia elétrica constituírem sociedades de propósito específico, poderão tributar seus ganhos pelo regime de lucro presumido. Caso no final de cada período, o projeto esteja valendo abaixo do valor contábil dos aerogeradores, o proprietário de uma fazenda eólica que opera no mercado livre poderá exercer a opção abandono. No caso analisado, será considerado que ao final de cada ano o produtor poderá escolher entre continuar a operação da fazenda eólica ou exercer a opção de abandono.

### 3.3 Dados referente a fazenda eólica analisada

A fazenda eólica considerada na análise estaria localizada no sul da Bahia e possui 16 MW de potência instalada, equivalente a 8 aerogeradores de 2 MW instalados a 138 m de altura. A produção média mensal de energia da fazenda eólica para a fazenda eólica no local instalado está ilustrada na Figura 3, e, observa-se que a produção mensal de energia pode variar acima ou abaixo da garantia física dependendo do mês, o que provoca a necessidade de o produtor ter que liquidar as diferenças de geração pelo PLD.



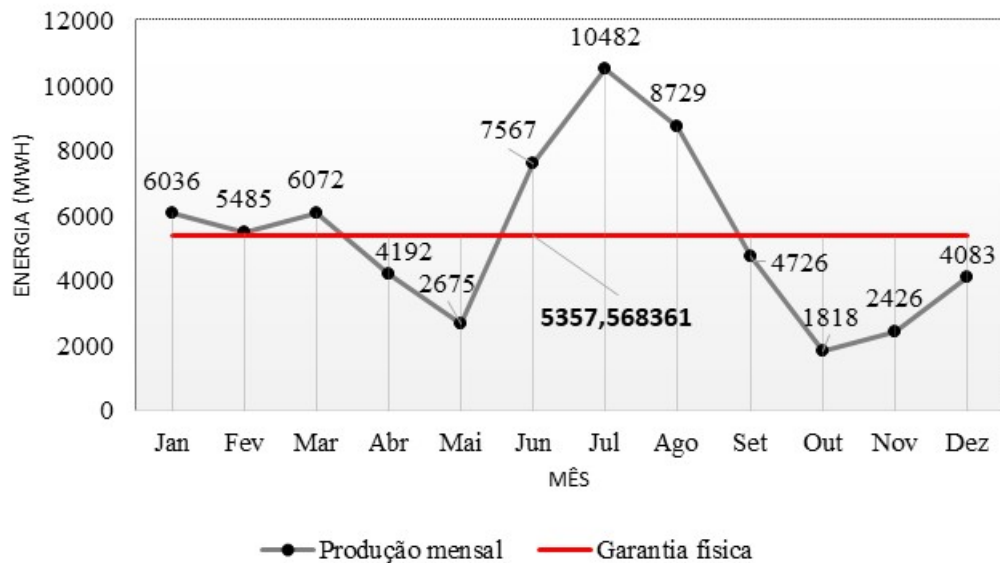


Figura 3 – Produção média mensal de energia x garantia física

O valor do ativo subjacente é estimado a partir das premissas financeiras de uma fazenda eólica tributada pelo regime de lucro presumido, durante os 20 anos de vida útil do projeto. Os valores de entrada de caixa correspondem a receita bruta formada pelo produto da garantia física com o preço de venda de energia somada aos possíveis acréscimos ou decréscimos ocorridos devido a liquidação das diferenças. Em relação aos valores de saída de caixa tem-se o pagamento dos impostos PIS/Cofins, os encargos setoriais, custos de O&M, despesas administrativas e com seguros, pagamento de imposto de renda (IRPJ) e contribuição social (CSLL) e os investimentos na construção da fazenda eólica.

O valor de investimento e de preço de venda da parcela fixa da receita foram estimados com base nos valores médios de investimento, obtido a partir dos resultados divulgados pela CCEE (2018). Os encargos setoriais se referem a: Taxa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST), Taxa ANEEL e Taxa ONS/CCEE. Os valores utilizados para os cálculos desses encargos e dos demais impostos e gastos estão listados na Tabela 1, junto com as demais informações do projeto.

No que se refere ao valor proveniente da liquidação das diferenças ao anual, representado pela soma de cada produto de PLD mensal com a diferença de geração no período de um ano, foram utilizados os modelos estocásticos para o cálculo. Para tanto, foram coletados os dados de PLD mensal do período de maio de 2003 a março de 2018, e em seguida, foi estimada a regressão linear dos log-retornos do PLD com os logaritmos do PLD, do período t-1, conforme indicado na Equação 8.

Tabela 1 – Premissas para o cálculo do valor do ativo subjacente

Parâmetro	Valor	Fonte
Investimento	R\$ 3.825.867,23	CCEE (2018)
Vida útil do projeto	20 anos	COPEL (2007)
Preço de venda de energia	R\$ 164,82	CCEE (2018)
Garantia Física	64.290,82 MWh	Calculado pela Equação 1
Arrendamento	1% do investimento	COPEL (2007)
Custo O&M	2% do investimento	Baseado em Aquila et al. (2016)
TUST	R\$ 4.580,00 por MW instalado	COPEL (2007)

Taxa CCEE	R\$ 0,07 por MWh	Aquila et al. (2016)
Taxa ONS	R\$ 470,00 por MW instalado	Aquila et al. (2016)
Taxa ANEEL	R\$ 2.556,24 por MW instalado	ANEEL (2016b)
Despesas administrativa e com seguros	0,3% do investimento	COPEL (2007)
CSLL	9% sobre 12% da receita bruta	Aquila et al. (2016)
IRPJ	25% sobre 8% da receita bruta	Aquila et al. (2016)

A partir dos parâmetros  $a$ ,  $b$  e  $\sigma_\epsilon$  obtidos na regressão e considerando o intervalo de um período ( $\Delta t = 1$ ), calculou-se os parâmetros do movimento de reversão à média  $\eta$ ,  $\bar{x}$  e  $\sigma$ , de acordo com as Equações 9, 10 e 11, respectivamente. No que concerne aos saltos do PLD, foi considerado um salto um valor de preço que acima de três desvios padrões da média de preços da série coletada e identificou-se uma frequência de saltos para cima ( $\lambda$ ) de 6,98%, com uma distribuição  $N \sim (169,02; 25,52)$ .

A taxa de desconto ( $\mu$ ) foi obtida a partir do método do WACC, descrito na Equação 21, conforme Ertürk (2012) e UNFCCC (2011):

$$WACC = k_d D(1 - \tau) + k_e E \quad (21)$$

onde:  $k_d$  = o custo de capital de terceiros;  $D$  = fração de capital de terceiros (%);  $\tau$  = alíquota de imposto de renda cobrada da empresa;  $k_e$  = custo de capital próprio;  $E$  = fração de capital próprio (%).

Para o presente estudo, o WACC foi deflacionado pela inflação, conforme recomendado pela ANEEL (2016a). No cálculo do  $k_d$  foi aplicada a mesma metodologia de Ertürk (2012) e indicada pela ANEEL (2016a) para empresas investidoras no setor elétrico, que se baseia na soma da taxa livre de risco com o prêmio de risco de crédito e o prêmio de risco país. O cálculo está indicado na Equação 22.

$$k_d = r_f + r_c + r_b \quad (22)$$

onde:  $r_f$  = taxa livre de risco;  $r_c$  = prêmio de risco de crédito;  $r_b$  = prêmio de risco país.

Para o cálculo do  $k_e$  utilizou-se o *Capital Asset Pricing Model* (CAPM), originalmente apresentado por Sharpe (1964), somado ao risco país. Este é um modelo bastante utilizado na literatura, como nos estudos de Aquila *et al.* (2016) e Ertürk (2012). O cálculo é apresentado na Equação 23.

$$k_e = r_f + \beta \times (r_m - r_f) + r_b \quad (23)$$

onde:  $r_m$  = prêmio de risco de mercado;  $\beta$  = beta, que mensura o risco do projeto em relação ao mercado.

A taxa livre de risco foi determinada a partir da média dos retornos dos títulos públicos nos EUA, entre o período de outubro de 2016 a setembro de 2018. Na Tabela 2 são apresentados todos os parâmetros para o cálculo da taxa de desconto.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados para o cálculo da taxa de desconto.

Parâmetro	Valor	Fonte
-----------	-------	-------

$D$	63,55%	Damodaran (2017)
$E$	36,45%	Damodaran (2017)
$r_f$	2,73%	USDT (2018)
$r_c$	3,37%	ANEEL (2016a)
$r_b$	2,62%	ANEEL (2016a)
$r_m$	13,20%	ANEEL (2016a)
$\beta$	1,14	Damodaran (2017)
$k_d$	11,63%	Equação 22
$k_e$	16,88%	Equação 23
Inflação	2,41%	ANEEL (2016a)
$\mu$	11,03%	Equação 21
$\mu$ deflacionado	8,42%	Calculado

#### 4. Caso estudado: análise de investimento em uma fazenda eólica no Brasil, com opção de abandono

##### 4.1 Valor do projeto da fazenda eólica calculado a partir da SMC

Após serem coletadas todas as premissas financeiras e ter sido construído o modelo de reversão à média com saltos do PLD, para calcular o valor de liquidação das diferenças, foi estruturado o fluxo de caixa líquido do projeto para os 20 anos de vida útil. Com isso, a partir do fluxo de caixa descontado ao longo dos 20 anos a partir da taxa de desconto sem inflação, indicada na Tabela 2, é possível estimar o valor do ativo subjacente, que nesse caso corresponde a fazenda eólica.

Para realizar a estimativa do valor do projeto foram simulados 5.000 cenários para o VPL do fluxo de caixa do projeto, incorporando como incerteza os possíveis caminhos do processo estocástico de reversão à média com saltos, de acordo como está descrito na Equação 12.

Com isso, conseqüentemente foi possível estimar do valor do projeto, considerando diferentes cenários para a liquidação das diferenças. Na Tabela 3 estão os parâmetros calculados para modelar o processo de reversão à média com saltos do PLD.

Tabela 3 – Parâmetro do processo de reversão à média com saltos

Parâmetro	Valor
$\eta$	0,093
$\bar{x}$	4,59
$\sigma$	29,57%
$\mu$	11,03%
$r_{fe} = \ln(1 + r_f)$	2,69%
$j_m$	169,02
$\sigma_j$	24,52

Conforme é possível observar na Figura 4, o valor médio encontrado para o VPL do projeto foi de R\$ 36.729.532,62, com valor mínimo e máximo igual a R\$ 32.182.966,30 e R\$ 39.537.596,33, respectivamente. Dessa forma considerou-se o valor do ativo subjacente equivalente ao VPL médio da fazenda eólica. O VPL positivo mostra que o produtor deve considerar o investimento no projeto. Sendo assim, o próximo passo será analisar se a existência opção de abandono, ao longo dos 20 anos de vida útil do projeto, irá acrescentar valor ao ativo.

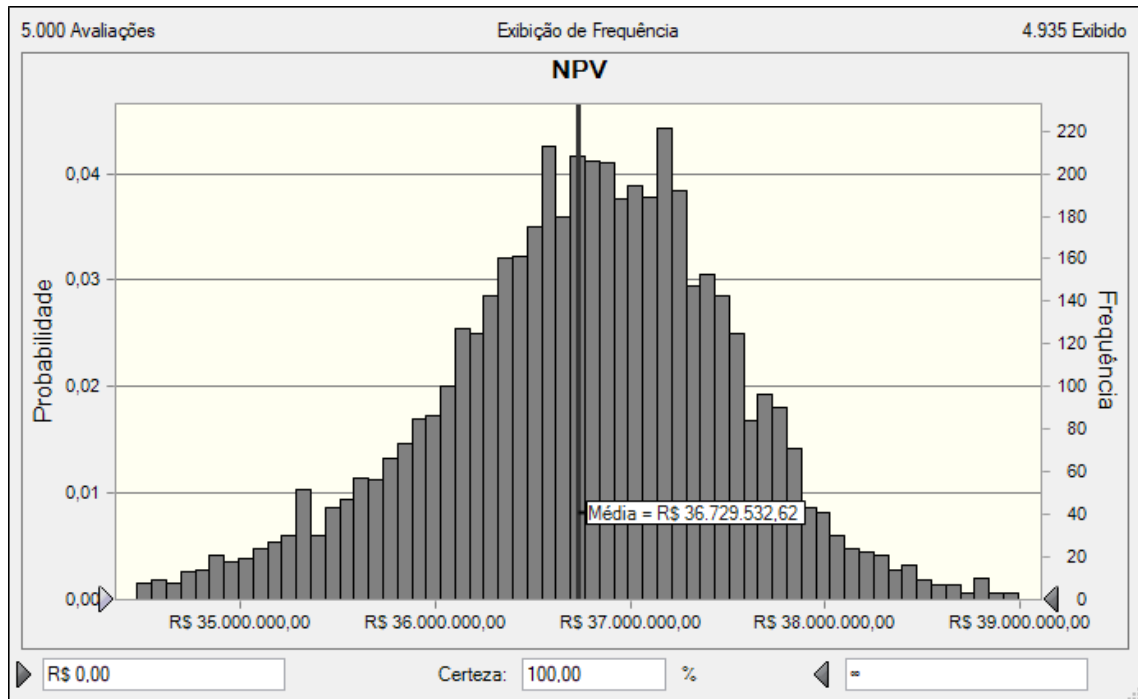


Figura 4 – Distribuição dos valores de VPL previstos

#### 4.2 Resultado da análise de investimento a partir da Análise por Opções Reais

Finalmente, por meio do modelo binomial é analisado o valor presente da fazenda eólica, considerando a flexibilidade gerencial a partir da opção de abandono. Para tanto, ao longo dos 20 anos de vida útil do projeto é analisado se ao final de cada ano ( $\Delta t=1$ ), o produtor continua mantendo o projeto em operação ou se abandona o projeto, negociando os aerogeradores no mercado pelo valor contábil do período. A Equação 24 é utilizada para calcular o valor do ativo em cada período, que pode ser otimizado por meio da possibilidade de exercer a opção de abandono.

$$F_{(t)} = \text{Max.}[\text{VP esperado}; \text{exercer a opção de abandono}] \quad (24)$$

É importante destacar, que para comparar o valor do projeto com e sem a opção de abandono foram calculadas as probabilidades neutra ao risco para os cenários de subida e descida do valor do ativo. Portanto, nessa etapa foi calculado o valor presente do projeto com e sem opção, descontando os valores futuros pela taxa livre de risco contínua ( $r_{fc}$ ). Na Tabela 5 estão listados os parâmetros  $u$ ,  $d$  e  $p$  calculados a partir das Equações 17,18 e 19, respectivamente. Os valores de  $\sigma$  e  $r_{fc}$  utilizados nos cálculos são os mesmos obtidos para modelar o processo de reversão à média com saltos do PLD.

Tabela 4 – Parâmetros do modelo binomial

Parâmetro	$u$	$d$	$p$	$1-p$
Valor	1,344	0,744	0,473	0,527

Dessa forma foi possível construir uma árvore binomial com vinte estágios, com a estrutura baseada na lógica da Figura 2, sendo o valor do ativo na data zero igual a R\$ 36.729.532,62. Portanto, com após a construção da árvore binomial e seus respectivos parâmetros, foi calculado o VPL do projeto, descontado pela  $r_{fc}$ , com e sem a opção de

abandono. Na Tabela 6 é feita a comparação dos resultados e o percentual de valor criado pela flexibilidade gerencial.

Tabela 6 – VPL da fazenda eólica com e sem flexibilidade gerencial

	Com opção de abandono	Sem opção de abandono	% Variação
VPL da fazenda eólica	R\$ 46.543.972,87	R\$ 38.009.461,34	22,45%

Observa-se a partir dos resultados que a opção de abandono aumenta em 22,45% o VPL da fazenda eólica. Ou seja, apesar de no mercado livre de energia o projeto não possuir a garantia de um contrato de longo prazo, a flexibilidade gerencial é maior e não deve ser menosprezada na avaliação deste tipo de investimento. É importante destacar, que a opção de abandono de certa forma protege o investidor de perdas significativas de valor de seu projeto, nos casos de consecutivos cenários de descida do valor de projeto.

Conforme é possível notar na Figura 2, o potencial eólico da região nordeste é maior durante a estação seca, o que caracteriza complementariedade dessa fonte com a energia hídrica na região (SCHIMIDT et al., 2013; DE JONG et al., 2013). Dessa forma, pode-se considerar que volatilidade do PLD considerada no estudo é uma boa medida, visto que além de ser o preço do mercado *spot*, a fonte eólica é um produto substituto da fonte hídrica, que possui maior representatividade na formação do PLD.

Ainda a respeito da volatilidade, cumpre destacar a alta sensibilidade que ela possui para o valor da opção. Caso ela fosse subestimada no patamar de 20%, a opção acrescentaria 15,48% de valor ao projeto, e se fosse superestimada para 40% a opção aumentaria o valor do projeto em 30,12%.

Na Figuras 5 é possível observar que a opção de abandono seria exercida em 76 cenários da árvore binomial, enquanto nos demais 154 cenários o produtor continuaria operando o projeto. A predominância de cenários de não exercício da opção de abandono revela que na região analisada, o excelente potencial eólico proporciona um valor esperado de fluxos de caixa capaz de garantir a operação do projeto na maioria dos cenários, em um mercado em que volatilidade de preços é alta.

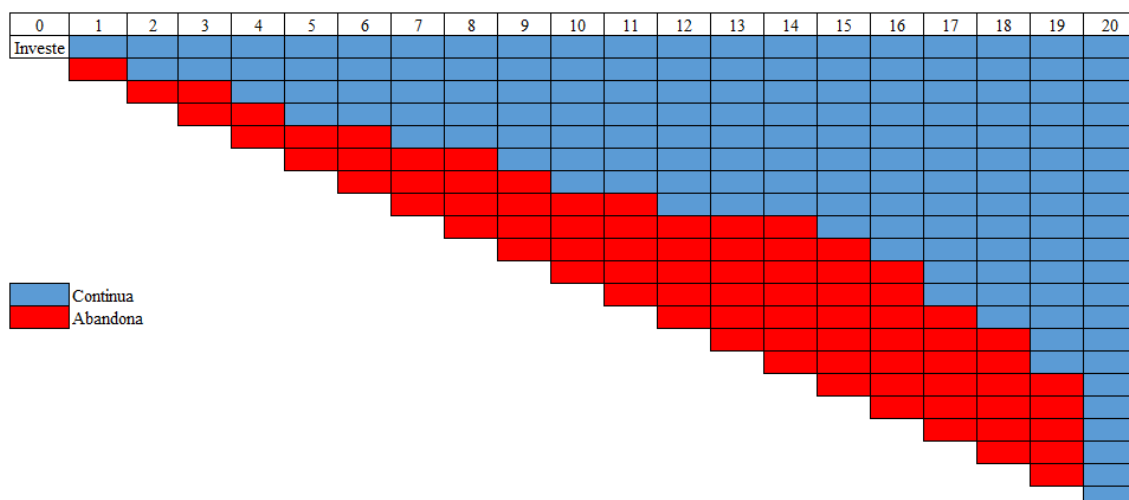


Figura 5 – Árvore de decisão do projeto.

## 5. Conclusões

O presente estudo teve como objetivo e principal contribuição avaliar o impacto da opção de abandono no VPL de uma fazenda eólica, levando em consideração as circunstâncias de comercialização, com a presença da liquidação de diferenças e as de mercado, a partir do

processo de reversão à média com saltos do PLD. Para tanto, foi necessário estimar a diferença entre a PMEE e a PG da usina e a modelar o processo estocástico do PLD, considerando a possibilidade de saltos.

A alta volatilidade do PLD revela que o produtor de energia eólica no mercado livre está inserido em contexto de muitas incertezas. A possibilidade de saltos, embora seja rara, também pode provocar um alto valor de diferença a ser liquidada no mercado de curto prazo, afetando o valor médio de mercado do ativo. Neste contexto, a opção de abandono se torna uma flexibilidade gerencial valiosa, e que de certa forma protege o produtor no caso de ocorrer consecutivos cenários de descida para o valor do ativo.

No caso analisado, nota-se que a flexibilidade gerencial proporciona o aumento de valor para o ativo em relação ao contexto sem a opção de abandono. Também é possível destacar o potencial eólico da região considerada, para a instalação da fazenda eólica, a partir dos cenários verificados na árvore de decisões. Em 67% dos cenários deve se considerar que o projeto tem que continuar em operação, o que é consequência do bom valor de mercado que o potencial eólico da região proporciona para o valor do ativo.

Por fim, é importante destacar que o modelo desenvolvido e aplicado neste estudo pode ser replicado para avaliar projetos inseridos em um contexto semelhante que envolve a liquidação de diferenças. Entretanto, para avaliar outros tipos de opções deve ser analisado o impacto de outras variáveis, além do preço *spot* e avaliar o cálculo da volatilidade e das opções consideradas a partir de outros métodos, além daqueles utilizados neste estudo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro a esta pesquisa.

### Referências bibliográficas

ABEEÓLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica. **Dados Mensais – Fevereiro de 2019**, 2019.

AQUILA, G.; PAMPLONA, E.O.; QUEIROZ, A.R.; ROTELA JR., P.; NUNES, M.F. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v.70, p.1090-1098, 2017.

AQUILA, G., ROCHA, L.C.S, ROTELA JUNIOR, P., PAMPLONA, E.O., QUEIROZ, A.R., PAIVA, A.P. Wind power generation: An impact analysis of incentive strategies for cleaner energy provision in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.p.137, 1100-1108, 2016.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica no 33 /2016–SGT/ANEEL**, 2016a. Disponível em:<  
[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2016/005/documento/ntecnica\\_33\\_sgt\\_ap\\_caiua.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2016/005/documento/ntecnica_33_sgt_ap_caiua.pdf)>. Acesso em: 01 de dezembro de 2017.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Despacho nº086**, 2016b. Disponível em: <  
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/dsp2016086ti.pdf>>.

BRADSHAW, A. Regulatory change and innovation in Latin America: The case of renewable energy in Brazil. **Utilities Policy**, v.49, p.156-164, 2017.

BRANDÃO, L.E.; DYER, J.S.; HAHN, W.J. Using binomial trees to solve real option valuation problem. **Decision Analysis**. v,2, p.68–88, 2005.

CARTEA, A.; FIGUEROA, M.G. Pricing in Electricity Markets: A Mean Reverting Jump Diffusion Model with Seasonality. **Applied Mathematical Finance**, v.12, n.4, p.313-335, 2005.

CCEE. **Visão Geral das Operações**. 94p, 2010.

CCEE. **Leilões: Consulte Resultados consolidados**, 2018. Disponível em:< [https://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso\\_rapido\\_header\\_publico\\_ao\\_logado/biblioteca\\_virtual](https://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso_rapido_header_publico_ao_logado/biblioteca_virtual)>. Acesso: 02 de abril de 2018.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **Manual de avaliação técnico-econômica de empreendimentos eólio-elétricos**. Curitiba: LACTEC, 2007. 104p.

DALBEM, M.C; BRANDÃO, L.E.T; GOMES, L.L. Can the regulated market foster a free market for wind energy in Brazil? **Energy Policy**, v.66, p.303-311, 2014.

DAMODARAN, A. **Avaliação de investimentos: ferramentas e técnicas para a determinação do valor de qualquer ativo**. 5. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2003. 630 p.

DAMODARAN, A. **Betas by sector (US)**. 2017. Disponível em: < [http://people.stern.nyu.edu/adamodar/New\\_Home\\_Page/datafile/Betas.html](http://people.stern.nyu.edu/adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html) >. Acesso em: 13 oct. 2017.

DENG, S. Stochastic Models of Energy Commodity Prices and Their Applications: Mean-reversion with Jumps and Spikes. **Berkeley: University of California Energy Institute**, 2000.

DE JONG P, SANCHEZ A, ESQUERRE K, KALID R, TORRES E. Solar and wind energy production in relation to the electricity load curve and hydroelectricity in the northeast region of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.23, p.526–35, 2013.

DIAS, M.A.G. **Análise de Investimentos com Opções Reais: Teoria e prática com aplicação em petróleo e outros setores. Volume 2: Teoria e prática com aplicações em petróleo e em outros setores**. 1.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

DIAS, M.A.G. **Análise de Investimentos com Opções Reais: Teoria e prática com aplicação em petróleo e outros setores. Volume 1: Conceitos básicos e Opções Reais em tempo discreto**. 1.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

DIXIT, A.K; PINDYCK, R.S.. **Investment Under Uncertainty**. Princeton University Press, Princeton, 468 p, 1994.

DUTRA, R.M; SZKLO, A.S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v.33, p.65-76, 2008.

ERTÜRK, M. The evaluation of feed in tariff regulation of Turkey for onshore wind energy based on the economic analysis. **Energy Policy**, 45, 359-367, 2012.

FERNANDES, G.; PEROBELLI, F.F.C.; BRANDÃO, L.E.T. A model for valuing new technologies under a pull new incentives environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.59, p.482-493, 2016.

FUSS, S.; SZOLGAYOVÁ, J.; KHABAROV, N.; OBERSTEINER, M. Renewables and climate change mitigation: Irreversible energy investment under uncertainty and portfolio effects. **Energy Policy**, v.40, p.59-68, 2012.

- GWEC – Global Wind Energy Council. **Globo Wind Report**, 2017. 72p.
- HULL, J.C. **Options, Futures, and Other Derivatives Securities**. Prentice Hall, 7a ed., 2008.
- JUÁREZ, A.A.; ARAÚJO, A.M.; ROHATGI, J.S.; FILHO, O.D.Q.O. Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v.39, p.828-834, 2014.
- MUN, J. **Real Options Analysis**. Ed. Wiley Finance. 416 f .2002.
- NORONHA, J.C. **Investimentos em distribuição de Energia Elétrica sob incerteza regulatória utilizando opções reais**. 2012, 225p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá.
- PLESS, J.; ARENT, D.J.; LOGAN, J.; COCHRAN, J.; ZINAMAN, O. Quantifying the value of investing in distributed natural gas and renewable electricity system complements: Applications of discounted cash flow and real options analysis with stochastic inputs. **Energy Policy**, v.97, p.378-390, 2016.
- REGO, E.E.; RIBEIRO, C.O. Successful Brazilian experience for promoting wind energy generation. **The Electricity Journal**, v.31, p.13-17, 2018.
- RUIZ, B.J; RODRIGUEZ, V.; BERMAN, C. Analysis and perspective of the government programs to promote the renewable electricity generation in Brazil. **Energy Policy**, v.35, p.2989-2994, 2007.
- SANTOS, L., SOARES, I., MENDES, C., FERREIRA, P. Real options versus traditional methods to assess renewable energy projects. **Renewable Energy**, v.68, p.588–594, 2014.
- SCHMIDT J, CANCELLA R, PEREIRA JR. A., An optimal mix of solar PV, wind and hydro power for a low-carbon electricity supply in Brazil. **Renewable Energy**, v.85, p.137–47, 2013.
- SHARPE, W. Capital asset prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk. **The Journal of Finance**, v.19, n.3, p.425-442, 1964.
- SIGNORINI, G.; ROSS, R.B.; PETERSON, H.C. Governance strategies and transaction costs in a renovated electricity Market. **Energy Economics**, v.52, p.151-159, 2015.
- SILVA, N.F; ROSA, L.P; FREITAS, M.A.V; PEREIRA, M.G. Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the Favorable environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.22, p. 686-697, 2013.
- SILVA, R.; MARCHI NETO, I.; SEIFERT, S.S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 328-341, 2016.
- UNFCCC – United Framework Convention on Climate Change. **Guidelines on the Assessment of Investment Analysis**, 2012.
- USDT – United States Department of Treasury. **Daily Treasury Long Term Data**, 2017. Disponível em: < <https://www.treasury.gov/resource-center/data-chart-center/interest-rates/Pages/TextView.aspx?data=longtermrate> >. Acesso em: 13 de outubro de 2017.