



# MODELO DE EQUILÍBRIO PARA LANÇAMENTO DE CERTIFICADOS DE ENERGIA RENOVÁVEL NA BLOCKCHAIN

## AN EQUILIBRIUM MODEL FOR BLOCKCHAIN-BASED RENEWABLE ENERGY CERTIFICATES

Recebido em 31.03.2018. Aprovado em 17.08.2018  
Avaliado pelo sistema *double blind review*

66

**Michael Espindola Araki**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (IAG/PUC - Rio) – Rio de Janeiro - RJ  
[arakimichael@gmail.com](mailto:arakimichael@gmail.com)

**Paulo Vitor Jordão da Gama Silva**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (IAG/PUC - Rio) – Rio de Janeiro - RJ  
[paulo.jordao.rural@gmail.com](mailto:paulo.jordao.rural@gmail.com)

**Leonardo Lima Gomes**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (IAG/PUC - Rio) – Rio de Janeiro - RJ  
[leonardolima@iag.puc-rio.br](mailto:leonardolima@iag.puc-rio.br)

**Luiz Eduardo Teixeira Brandão**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (IAG/PUC - Rio) – Rio de Janeiro - RJ  
[brandao@iag.puc-rio.br](mailto:brandao@iag.puc-rio.br)

### Resumo

O Certificado de Energia Renovável (CER) é tido como um veículo de grande potencial para promover mudanças nas matrizes energéticas, visando a difusão de práticas limpas e sustentáveis por indivíduos e organizações. Uma interessante oportunidade para ampliação do uso de CERs envolve a utilização de uma nova e disruptiva tecnologia: a *blockchain*. Entre as potenciais vantagens conferidas por essa tecnologia estão a redução da burocracia, o aumento de transparência, e a redução de custos. Contudo, ainda é raro que se utilizem modelos visando à proteção dos participantes da extrema volatilidade encontrada neste mercado, algo que consideramos fundamental para uma implantação bem-sucedida de um CER baseado na *blockchain*. Assim, este trabalho tem como objetivo lançar as bases teóricas para a modelagem de lançamento de uma moeda digital que englobe o controle da oscilação do seu preço. Para isso, utilizamos o ferramental teórico de microeconomia, a teoria de opções reais, árvores de decisão e simulações de Monte Carlo. Finalmente, esboçamos uma função valor para maximização do retorno desse tipo de projeto.

**Palavras-chaves:** Certificados de Energia Renovável; Initial Coin Offering; Criptomoedas; Blockchain; Opções Reais

### Abstract

Renewable Energy Certificates (RECs) are regarded as an instrument of great potential to promote changes in the energy matrix, aiming at the widespread adoption of clean and sustainable energy practices by individuals and organizations. An interesting opportunity to expand the use of RECs involves the utilization of a new and disruptive technology: the *blockchain*. Among the potential advantages conferred by this technology are reduced bureaucracy, increased transparency, and reduced costs. However, it is still rare to find models that aim to protect investors from the extreme volatility inherent of this market, even though such

protection is considered pivotal for the successful implementation of a blockchain-based REC. Thus, this work aims to lay the theoretical basis for the modeling of operationalization of a digital currency whose protocol encompasses the control of the price oscillation. For this, we utilize tools from microeconomic theory, the theory of real options, decision trees and Monte Carlo simulations. Finally, we outline a value function to maximize the return of this type of project.

**Keywords:** Renewable Energy Certificates; Initial Coin Offering; Cryptocurrency; Blockchain; Real options

## Introdução

O mercado de Certificados de Energia Renovável (CERs) vem apresentando impressionante expansão junto com uma crescente liquidez no mercado mundial nos últimos anos. No período entre 2005 e 2015, o valor do mercado global de carbono passou de US\$ 11 bilhões para US\$ 278 bilhões (Thomson Reuters, 2016). Nos próximos anos, espera-se crescimento ainda maior. Como exemplo, chega-se a prever que, em 2035, mais de 50% da demanda mundial de energia será suprida por fontes renováveis (Singer, Denruyter, & Yener, 2017). Contudo, a despeito desse crescimento, autores postulam que ações ainda mais vigorosas para o fomento da geração de energia limpa são necessárias (Mathews, 2008; Narula, 2015). Afinal, o que está em jogo é a capacidade de se suprir as demandas energéticas globais ao mesmo tempo em que se reduzem as emissões de gases de efeito estufa.

Existem duas questões importantes que dificultam a expansão do mercado de CERs: (i) a existência de barreiras operacionais, técnicas e institucionais, dificultando sua acessibilidade em especial em países emergentes; e (ii) a extrema suscetibilidade desse mercado à instabilidade de preços, gerando um nível de risco financeiro muito alto para os seus participantes (ver Birol, 2010; Coulon, Khazaei, Powell, 2015; Singer, Denruyter, & Yener, 2017).

Uma possível solução para os problemas supracitados pode passar pela utilização da tecnologia *blockchain*, que possibilita a distribuição e negociação de CERs através de contratos inteligentes por meio de moedas digitais (*tokens*) especialmente programadas para esse fim.

Muitas das moedas digitais baseadas na *blockchain* (também conhecidas como criptomoedas) têm como proposta um aumento na agilidade, segurança, transparência e confiança das transações ao mesmo tempo em que diminuem ou anulam a burocracia provocada por intermediários (Ciccarino & Araki, 2017; Extance, 2015; Maffei, 2014; Negurita, 2014; Little, 2014; Hurlburt & Bojanova, 2014; Brito & Castillo, 2013).

Embora uma série de autores considere o enorme potencial transformacional dessa tecnologia (e.g., Catalini & Gans, 2016; Davidson, De Filippi & Potts, 2016; Ølnes, Ubacht & Janssen, 2017), há uma escassez de estudos — em especial no Brasil — que utilizam metodologias sólidas de economia e finanças (e.g. opções reais e modelos de equilíbrio dinâmico) para tratar de questões referentes às criptomoedas. Tal escassez é ainda mais evidente em relação à aplicação desses conhecimentos para a modelagem do lançamento de novas criptomoedas no mercado (os chamados ICOs, ou *initial coin offerings*).

Dessa forma, esse artigo tem como objetivo iniciar o desenho de uma modelagem para o lançamento de criptomoedas baseada em CERs. Uma preocupação central do nosso modelo é endereçar a instabilidade de preços que é inerente ao mercado de CERs, pois ela gera uma série de consequências negativas: com o aumento do risco, gera-se o afastamento de potenciais investidores, e leva o mercado com mais frequência a situações sub-ótimas de precificação. Assim, nosso modelo tem como objetivo garantir que a curva inflacionária da moeda seja controlada, principalmente a partir de ajustes em sua oferta.

No modelo, a oferta de novas moedas será função da observação da demanda histórica e da modelagem da demanda futura. Assim, partiu-se de fundamentos da microeconomia e da teoria de opções reais para realizar um modelo de equilíbrio entre oferta e demanda que, uma vez pronto, poderá ser automatizado e incluído num protocolo inteligente (*smart contract*) dentro da própria *blockchain*, fazendo com que essa nova

moeda digital opere praticamente sem a necessidade de intervenções, seguindo um conjunto de regras previamente estabelecidas e de conhecimento público. Desta forma, os participantes do mercado saberão as suas regras de antemão, gerando clareza, confiabilidade e previsibilidade — ativos valiosos num mercado pautado pela incerteza e pela volatilidade.

Para modelar o valor presente líquido do projeto de lançamento de CERs na blockchain, utilizamos a teoria de opções reais, e mais especificamente, simulações de Monte Carlo e a metodologia de árvore de decisão. Quanto ao uso de opções reais, duas opções estão presentes no projeto (e incluídas na sua precificação): a opção real do adiar leilões, que será exercida caso haja escassez de demanda; e a opção real de adiantar leilões, que será exercida caso haja excesso de demanda. Fica, então, claro que a demanda é a variável estocástica do estudo. Para seu cálculo foi utilizado o método de simulação de Monte Carlo. Os dados obtidos através das simulações fornecem a quantidade de moeda que deve ser disponibilizada a cada período. Finalmente, espera-se que os algoritmos de previsão de demanda fiquem cada vez mais precisos na medida em que mais dados sobre o comportamento da demanda forem se acumulando (lembrando que a oferta de novas moedas é função da observação da demanda histórica e da modelagem da demanda futura).

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: a próxima seção apresenta uma revisão da literatura sobre opções reais, árvore de decisão e a teoria de leilões; a seção seguinte descreve a estratégia empírica utilizada para modelar a emissão da moeda; a quarta seção apresenta o resultado dos cálculos de valor para o projeto; e a quinta seção conclui o trabalho incluindo discussões sobre suas limitações e possíveis estudos futuros.

### Referencial Teórico

#### Teoria de Opções Reais e o Cálculo do Valor da Opção

Como observam Copeland e Tufano (2004), a teoria de opções reais nasceu da necessidade de se levar em consideração a flexibilidade na avaliação de projetos. Uma necessidade que não era contemplada por modelos anteriores como o fluxo de caixa descontado. As opções reais, ao contrário das opções financeiras, são investimentos em ativos reais. [Myers \(1977\)](#) é conhecido como um autor seminal no uso de opções reais para calcular o valor da opção real de uma firma deter a flexibilidade (e a capacidade) para fazer investimentos no futuro. Isto é, empresas que têm alto risco atrelado à sua dívida deixarão passar valiosas oportunidades de investimento enquanto empresas com pouco risco atrelado à dívida poderão aproveitar melhor as oportunidades de investimento futuro.

[Trigeorgis \(1996\)](#) e [Copeland e Antikarov \(2001\)](#) descreveram quatro principais tipos de opções reais: (i) opção de adiar, consiste na opção de adiar a realização de um investimento buscando o melhor momento para sua realização, i.e., novas informações podem apresentar cenários mais favoráveis; (ii) opção de expandir, concedem ao investidor o direito de investir em projetos relacionados a futuros ganhos de escala ou de escopo; (iii) opção de contrair, incorpora a flexibilidade de reduzir a escala de um projeto mediante os novos fatos ou expectativas que possam ser desfavoráveis ao escopo original; e (iv) opção de abandonar, consiste na opção de abandonar ou vender um projeto. Isto permite que se evite um cenário ruim esperado.

[Kemna \(1993\)](#) e Trigeorgis (2007) exemplificam a utilização de opções reais (o primeiro em projetos no setor de recursos naturais e o segundo com exemplo genérico), avaliando a possibilidade de se adiar a decisão de exploração. [Oppenheimer \(2002, p. 222\)](#) sugere que esta flexibilidade — exemplificada por [Kemna \(1993\)](#) e Trigeorgis (1993) — também está presente em empreendimentos imobiliários que possam ser adiados até que o cenário apresente melhoras (adiamento da decisão de lançamento). Uma situação similar à que será enfrentada com a emissão de criptomoedas lastreadas em CERs.

Copeland e Antikarov (2001) indicam uma série de abordagens para o cálculo do valor de um investimento com flexibilidade. Essas abordagens podem ser agrupadas nas seguintes categorias: fluxo de caixa descontado ajustado ao risco, fórmula de Black e Scholes, árvore de decisão ajustada ao risco, e árvore de decisão neutra em relação ao risco (utilizada neste estudo). A escolha da árvore de decisão neutra em

relação ao risco é justificada pois ela torna mais simples e prático o cálculo do valor da opção real, gerando o mesmo resultado da abordagem árvore de decisão ajustada ao risco. Além disso, essa metodologia é extremamente útil para se trazer a valor presente (pela taxa livre de risco) os fluxos de caixas assimétricos, típicos de opções reais.

### Teoria de Leilões

Devido ao diverso número de políticas e incentivos visando à adoção de energias renováveis (que podem advir de setores governamentais, de organizações da sociedade civil, do próprio mercado, ou da vontade de certas organizações e empresas de se mostrarem alinhadas a uma visão de mundo de desenvolvimento sustentável), partimos do pressuposto de que existe um número suficientemente grande de agentes que estão dispostos a comprar e vender CERs (uma discussão mais aprofundada sobre esses temas e as razões para a adesão ao mercado de CERs está além do escopo desse artigo e pode ser encontrada em trabalhos tais como Lohmann, 2010; Wara, 2007; Mackenzie, 2007).

Dado esse pressuposto, do ponto de vista de modelagem, a teoria dos leilões pode ser vista como uma aplicação da teoria de desenho de mecanismos ou de jogos Bayesianos (e.g., Makowski, Mezzetti, 1994), atuando como uma ferramenta de controle da oferta e demanda (Smit e Trigeorgis, 2006). Isto é, a empresa interessada em distribuir seus CERs deverá concorrer com outras por meio de leilão para ter acesso a um número limitado de CERs que poderão ser emitidos num dado intervalo de tempo.

Com o objetivo de aperfeiçoar a teoria dos leilões, diversos modelos teóricos foram propostos em numerosos trabalhos (e.g., Maskin & Riley, 2003; Myerson, 1981; Milgrom, 2000; Krishna, 2002; Klemperer, 1999; Harris & Raviv, 1988; Milgrom & Weber, 1982; Riley & Samuelson, 1981). Embora muitos modelos adotem pressupostos considerados não verossímeis, alguns dos modelos mais modernos já abrangem questões comportamentais, admitindo, por exemplo, como o comportamento do agente em relação ao risco irá afetar seu comportamento como licitante.

Alguns dos principais exemplos de técnicas convencionais (ou alternativas) de leilões para formação de preço são os leilões competitivos e não competitivos. Nos leilões competitivos, segundo a teoria dos leilões estabelece quatro tipos básicos de leilões competitivos utilizados para a venda de bens: leilão inglês ou de preço ascendente, leilão alemão ou de preço descendente, leilão discriminatório ou leilão de primeiro preço e leilão de segundo preço. Nos leilões não competitivos, os licitantes pagam o preço médio verificado no leilão competitivo.

As formas de leilões mencionadas acima podem ser classificadas, segundo suas características, em (i) leilões abertos e leilões de lance selado; (ii) leilões de preço uniforme e leilões de preços múltiplos; e (iii) leilões de valor privado e leilões de valor comum. Nos leilões abertos os lances são propostos publicamente, enquanto nos leilões de lance selado as propostas são submetidas ao leiloeiro através de envelope fechado. A segunda distinção entre os leilões refere-se ao preço pago pelos licitantes ao item leilado, ou seja, se os licitantes ganhadores pagam o mesmo preço — o preço mínimo que aloca todos os bens vendidos (ou a mais alta rentabilidade aceita) — o leilão é denominado leilão de preço uniforme. Por outro lado, se os licitantes pagam seu lance individual, estes são leilões de preços múltiplos.

Como discutido anteriormente, previmos que a oferta de CERs será abundante. Para controlar a inflação e manter o nível de emissão *pari passu* com o comportamento da demanda, nosso modelo prevê leilões de *direito* de emissão de CERs de tempos em tempos. Tais leilões podem ser *adiantados* ou *atrasados*, dependendo dos resultados da demanda realizada mais a demanda projetada. Assim, como será mostrado na seção três, chegamos a um modelo de leilão de direitos de emissão cujo acontecimento se dará em janelas que durarão entre 12 a 36 meses, com valor esperado de 24 meses, e cuja variação é uma função do mercado.

## Estratégia Empírica

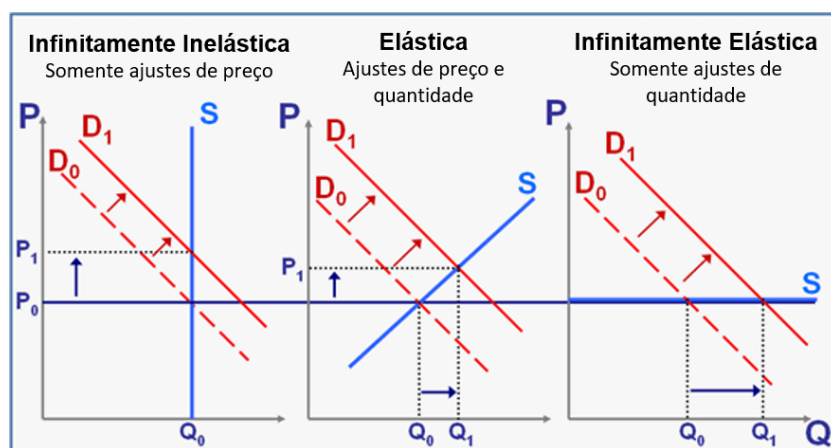
Essa seção descreve a estratégia empírica que servirá de modelo para a emissão dos CERs. A primeira parte contém a modelagem da oferta e a segunda conterá a modelagem da demanda. O modelo prevê que uma quantidade de CERs será disponibilizada ao mercado a cada mês sempre com o fim de manter um preço de equilíbrio. Tal oferta dependerá do histórico da demanda passada e de uma simulação da demanda do mês seguinte; uma simulação (e consequente emissão) correta significa que a quantidade ofertada irá corresponder a demanda, mantendo o preço em um nível de equilíbrio.

O modelo também prevê que a criação de novas moedas se dará em leilões que devem ocorrer com uma média de 24 meses. Portanto, é importante identificar e separar dois momentos diferentes: o da criação de moedas, que acontece via leilões; e a disponibilização das moedas ao mercado, que acontecerá todo mês. Tal separação foi concebida a fim de proporcionar maior poder discricionário na emissão da moeda, visando a manter um preço de equilíbrio através da oferta ajustada mensalmente. Além disso, existirá certo grau de flexibilidade para o acontecimento dos leilões. Dependendo do comportamento da demanda, haverá a opção de adiantar o leilão, ou de atrasá-lo; assim, a janela para o acontecimento de um novo leilão se dará entre 12 a 36 meses, sendo 24 meses o tempo esperado.

70

## Modelagem da Oferta

Duas premissas foram consideradas no modelo. A primeira delas se refere à quantidade de oferta de CERs no mercado. Como discutido anteriormente, assumimos a existência de uma oferta abundante. Dessa forma, o modelo funciona presumindo a existência de uma oferta infinitamente elástica, onde apenas ajustes de quantidade são necessários para se responder aos movimentos de demanda (ver figura 1).



**Figura 1:** Tipos de Oferta e os tipos de ajuste necessários.

Fonte: [World Bank \(2010\)](#).

A outra premissa se refere à competição no mercado. Como não há, no presente momento, competidor para emissão de CERs num modelo de moeda digital baseado na *blockchain* no Brasil, nossa modelagem será feita assumindo um monopólio (futuros estudos deverão relaxar essa premissa). É importante salientar que o monopólio é referente apenas ao CER baseado na *blockchain*, isso não significa que não haverá concorrência entre empresas para garantirem o direito de emití-lo. Isso apenas significa que o CER que estamos propondo seria o único desse tipo no mercado.

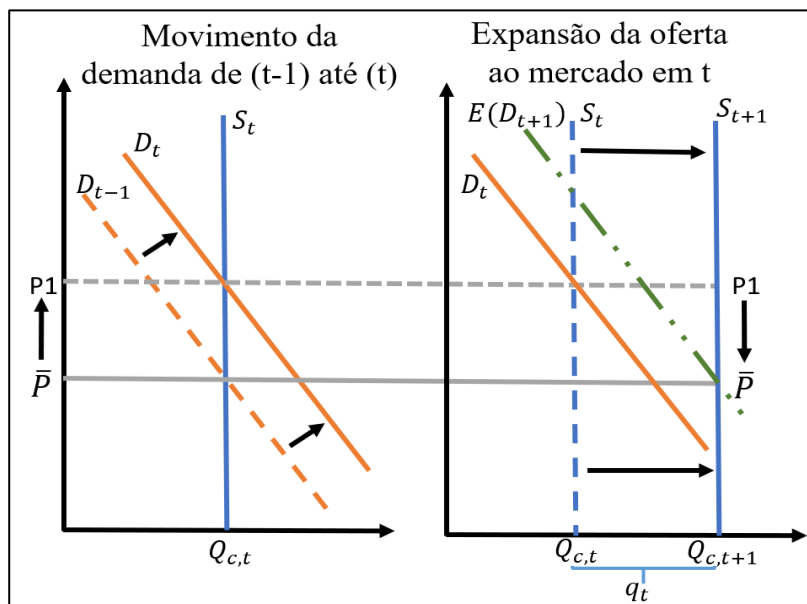
Desta forma, há quatro problemas-chave a serem resolvidos com o modelo desenvolvido neste estudo: o primeiro é a quantidade de moeda que deve ser emitidas a cada mês  $q_t$  e adicionada ao estoque de moeda em circulação no mercado  $Q_c$ ; o segundo é a quantidade de moeda a ser criada em cada leilão, porém adicionada a um estoque de moedas *fora de circulação*  $Q_e$ ; e o terceiro é o espaçamento de tempo entre

um leilão e outro para a renovação de  $Q_e$ .

Como visto,  $q_t$  será uma função da demanda mensal.  $Q_e$  é o resultado do acúmulo de emissões públicas  $q_t$ .  $Q_e$  diminuirá de acordo com demanda acumulada e de tempos em tempos sua quantidade será renovada através de leilões. Finalmente, o período de tempo entre leilões ( $T$ ) é estipulado para se situar entre 12 e 36 meses, sendo que 24 meses seria o tempo esperado entre cada novo leilão. Quando, dentro dessa janela de tempo, o estoque de moedas fora de circulação  $Q_e$  atingir um nível crítico, um novo leilão é iniciado e esse estoque é renovado instantaneamente a um novo nível.

### Comportamento da Oferta

Como previsto no modelo, o incremento da oferta de moedas em circulação se dará em choques mensais. Assim, pode-se deduzir que, num primeiro momento, que a oferta se comporta de forma infinitamente inelástica. Isto é, a quantidade de moedas em circulação se inicia num ponto fixo e cada movimento da demanda gera um ajuste apenas no preço. Após um mês de demanda flutuante com oferta fixa, haverá um ajuste na quantidade de moeda ofertada ao mercado (ver figura 2). Essa ação significa que uma quantidade  $q$  será deduzida do estoque  $Q_e$  de CERs e será disponibilizada ao mercado. Como visto, o tamanho de  $q$  será uma função da expectativa da demanda futura do próximo mês  $E(D_{t+1})$ . Isto é, uma nova quantidade de moedas  $q$  é ofertada ao mercado com o objetivo de manter o preço num nível próximo ao preço-alvo ( $\bar{P}$ ). Essa emissão é baseada nos dados obtidos através da simulação de demanda esperada, que será discutida na próxima seção.



**Figura 2:** Expansão da oferta baseada de CERs.

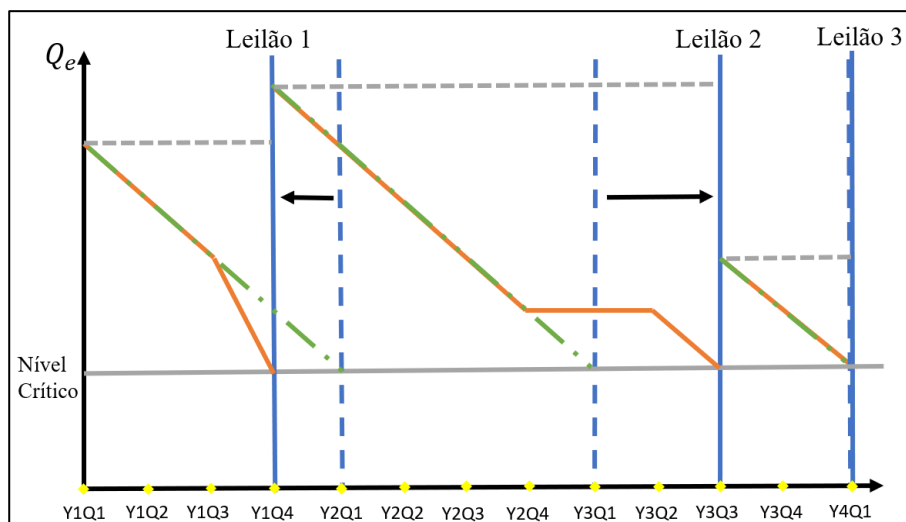
**Fonte:** Própria.

Num primeiro momento, de  $t-1$  até  $t$ , ocorre uma expansão da demanda, levando o preço a se distanciar de  $\bar{P}$ . Com a expansão da oferta baseada na estimativa de demanda futura, o preço tende a retornar ao nível de equilíbrio  $\bar{P}$ .

Esses ajustes sazonais de quantidade em função da demanda esperada são o cerne do modelo e ocorrerão



todo mês. Contudo, é importante lembrar que a cada emissão  $q$ , o estoque  $Q_e$  diminui. Assim, dependendo do acumulado dos valores de  $q$ , pode ser necessário adiantar um leilão, para renovar o estoque de  $Q_e$ , ou atrasar um leilão, se o estoque  $Q_e$  não for completamente consumido dentro de um tempo esperado  $E(T)$  de dois anos, devido a uma demanda muito baixa (ver figura 3).



**Figura 3:** Exemplos de cenários de adiantamento e atraso de leilões

**Fonte:** Própria.

Na figura estão ilustradas as três possibilidades (adiantar, adiar ou manter o leilão) previstas no modelo. O leilão 1 foi adiantado em um trimestre, uma vez que a demanda foi maior do que o previsto, fazendo  $Q_e$  alcançar o nível crítico antes do esperado. Já no leilão 2 foi exercida a opção de adiar, uma vez que a demanda estacionou antes de chegar no nível crítico. Como, o leilão ocorreu muito próximo da data esperada para o leilão seguinte, apenas uma pequena quantidade de moedas foi criada, em comparação aos leilões anteriores. Finalmente, no leilão 3 ocorreu de  $Q_e$  alcançar o nível crítico durante o período esperado. Assim, não foi exercida nem a opção de adiantar, nem a de atrasar o leilão.

### Modelagem da Demanda

A indústria de CERs baseados na *blockchain* foi modelada como um monopólio. Isto é, existe apenas um ofertante deste produto no mercado. Como visto, a oferta desse produto será controlada por um protocolo inteligente com o fim de evitar grandes desvalorizações de preço. O preço de cada CER pode ser calculado de acordo com a função inversa da demanda, que se dá por:

$$P_{(t)} = X_{(t)} \times D[Q_{(t)}]$$

(1)

Onde  $P(t)$  é o preço de cada CER no tempo  $t$ ,  $Q(t)$  é a oferta de moeda em tempo  $t$  e,  $X(t)$  representa um choque multiplicativo da demanda. Por fim,  $D(t)$  é uma função diferenciável com  $D' < 0$ . Essa é a variável a ser modelada e que representa a incerteza do modelo. Assumimos que a demanda evolui como um movimento geométrico browniano (MGB), satisfazendo a seguinte equação diferencial estocástica:

$$dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t$$

(2)

Onde  $W_t$  é um movimento browniano padrão ou processo de Wiener. O *drift* ou retorno esperado é representado por  $\mu$  e  $\sigma$  é a volatilidade. Vale ressaltar que os valores de  $\mu$  e  $\sigma$  são constantes. Assim, para qualquer valor inicial  $S_0$  a equação tem a seguinte solução analítica:

$$S_t = S_0 \exp \left( \left( \mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) t + \sigma W_t \right)$$

(3)

Onde  $S_t$  é uma variável aleatória com distribuição log-normal, valor esperado  $E(S_t) = S_0 \cdot e^{\mu t}$ , e variância  $Var(S_t) = (e^{2\mu + \sigma^2})(e^{\sigma^2} - 1)$ .

É importante notar que no MGB os ativos modelados podem assumir valores muito expressivos, uma vez que crescem de forma exponencial com uma distribuição log-normal (Brennan & Schwartz, 1985; Dixit & Pindyck, 1994). Embora isso possa ser um fator negativo para algumas modelagens, isso não é verdade para este trabalho. Ao contrário, nossa modelagem espera justamente um comportamento típico de uma distribuição log-normal. Isto é, a maior concentração de valores se dará próxima ao valor esperado, porém, em alguns cenários (com frequência menor), os valores apresentarão um crescimento explosivo.

### Simulação com software @Risk

Tanto a quantidade de moedas que devem ser emitidas a cada mês ( $q_t$ ) quanto o espaçamento de tempo e a quantidade de moeda a ser criada a cada leilão ( $Q_e$ ) foram simuladas utilizando o método de simulação de Monte Carlo, seguindo os seguintes parâmetros: *drift* anual  $\mu = 2$ ; volatilidade anual  $\sigma = 25\%$ ; e valor inicial = 100. Essa simulação mostrará como resultado densidade probabilísticas que representam uma aplicação da solução analítica apresentada na equação 3. Para fins de modelagem, foi utilizada a seguinte fórmula para o cálculo dos valores futuros da demanda via o software @Risk:

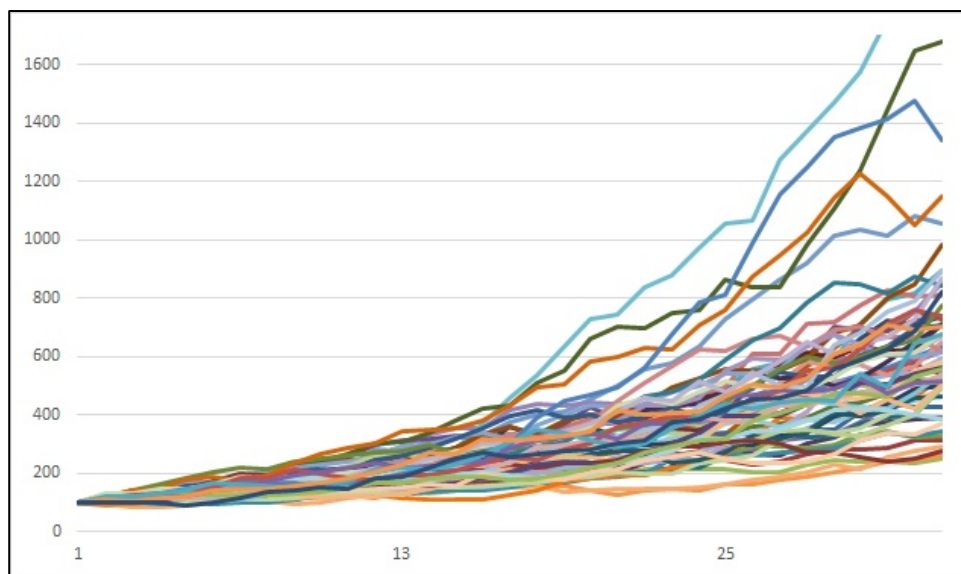
$$V_{t+1} = V_t e^{RiskNormal\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\Delta t, \sigma\sqrt{\Delta t}\right)}$$

(4)

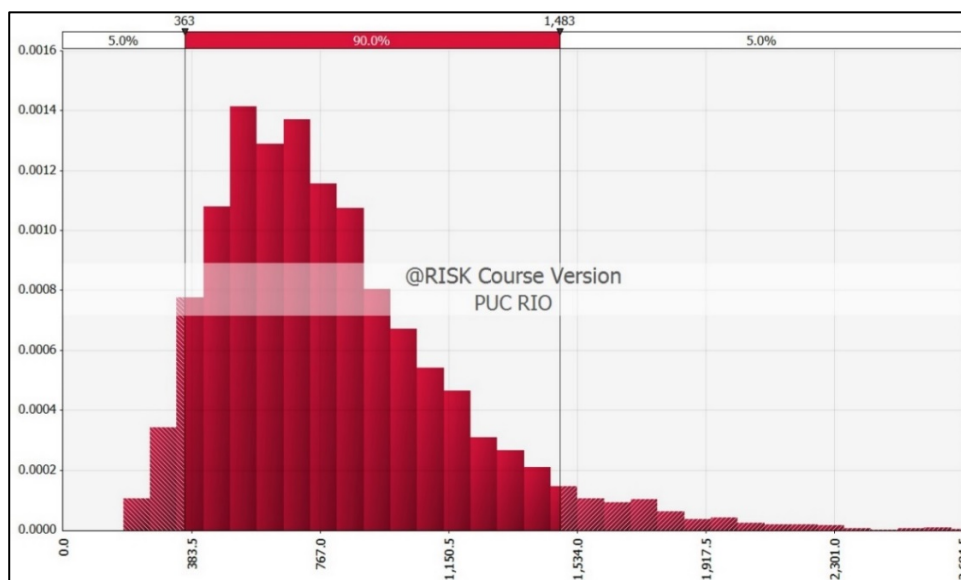
Onde  $\mu$  é o *drift*,  $\sigma$  a volatilidade, e  $t$  o tempo (em meses).

Primeiramente, foi feita uma amostra de 60 simulações do movimento estocástico da demanda abrangendo um período de 36 meses (figura 4). Pode-se ver pela ilustração que os valores ficaram em sua maioria entre 200 e 1000, porém haverá alguns casos de crescimento explosivo. Para maior precisão, fizemos a mesma simulação com dez mil iterações (figura 5). O resultado mostra que 90% dos valores ficam entre 363 e 1483, com valor mínimo de 180 e máximo de 3048; além disso, apenas cerca de 20% dos valores ultrapassa a marca de 1050.





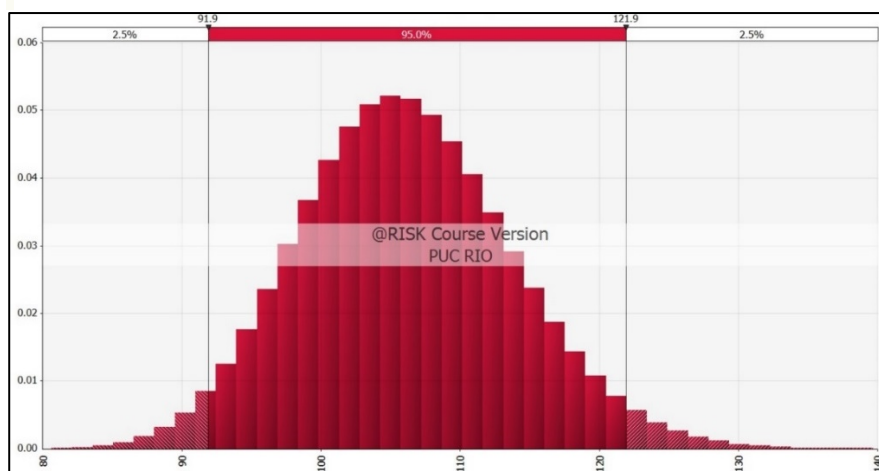
**Figura 4:** Simulação do movimento estocástico da demanda (t = 36 meses; 60 iterações).  
**Fonte:** Própria.



**Figura 5.** Densidade probabilística do valor da demanda no mês 36  
**Fonte:** Própria.

### Simulação do valor da demanda no mês seguinte

Para simular a demanda do mês seguinte, tomamos como partida um valor inicial de 100 e calculamos a densidade probabilística dos possíveis valores dessa demanda (figura 5). A média obtida foi de 106,13 (a forma analítica de obtê-la seria  $100 \cdot e^{0.0595}$ ; 100 representando o valor inicial e 0.0595 sendo o valor do *drift* mensal), e o desvio padrão foi aproximadamente 7,66 (a forma analítica de obtê-lo seria  $106,13 \times 0.0722$ ; sendo o último valor representante da volatilidade mensal). Por fim, a simulação indica que, com um intervalo de confiança de 95%, podemos esperar um valor de demanda entre 91,6 e 121,9 no segundo mês.



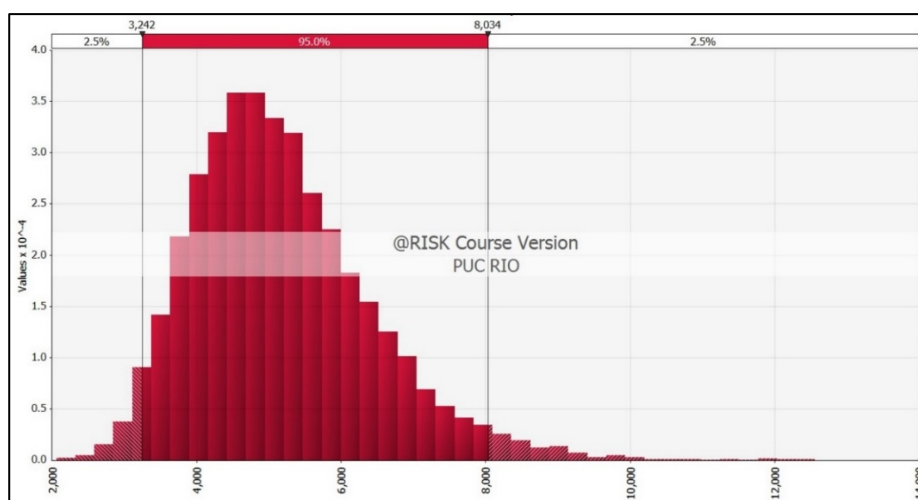
**Figura 6:** Densidade probabilística do Valor da Demanda no mês 2  
**Fonte:** Própria.

O processo acima não se restringe à demanda apenas do mês 2; ele pode ser repetido para gerar a previsão de cada mês seguinte. Basta seguir a equação 4, substituindo  $V_t$  (cujo valor é 100 no caso acima) pelo valor obtido a cada novo mês  $t$ .

Com o passar do tempo, haverá um acúmulo de dados que servirá para obter melhores estimativas dos parâmetros de volatilidade e *drift*. Assim, os valores podem ser atualizados a cada iteração, contribuindo para um ganho contínuo de precisão do modelo.

### Simulação do Acumulado da Demanda em 24 Meses

De forma semelhante, realizamos a simulação do acumulado da demanda em 24 meses (que constitui o tempo médio esperado para realização de cada leilão). Com esse valor de  $T$  já é possível observar que a densidade probabilística passa a seguir o característico formato da distribuição log-normal. A média obtida foi de 5.168 e o desvio padrão foi cerca de 1.226. Assim, pode-se esperar um valor de demanda acumulada situado entre 3.242 e 8.034 num período de 24 meses, utilizando um intervalo de confiança de 95%.



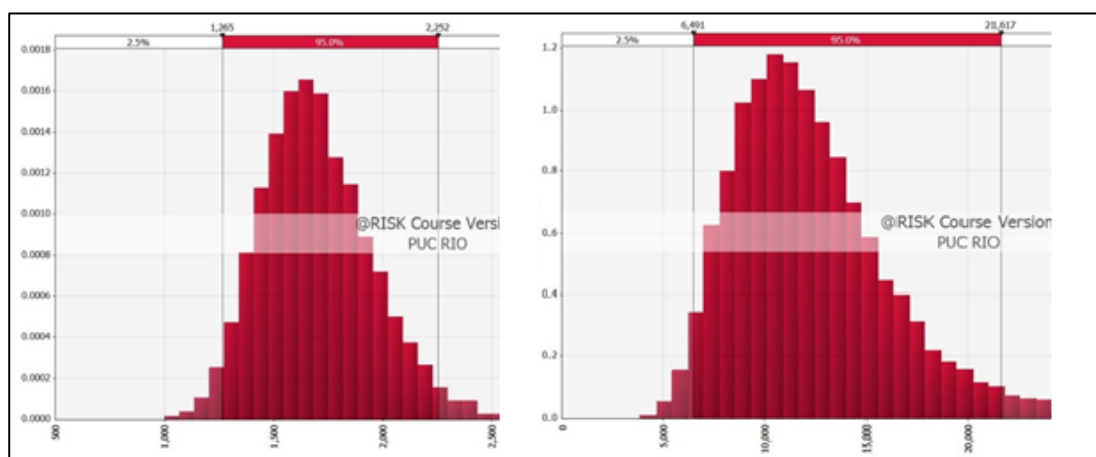
**Figura 7:** Densidade probabilística do acumulado da demanda em  $T=24$  meses  
**Fonte:** Própria.

Sabendo-se que  $T=24$  meses é o tempo esperado para realização de um novo leilão e que a média da demanda acumulada nesse tempo tem um valor de 5.168, o modelo passará a assumir esse valor como  $Q_e$ ; isto é, a quantidade de moedas a serem leiloadas (e criadas) num período médio de 24 meses.

### Cenários de Demanda em 12 e 36 Meses

Tendo como base o contorno de  $T$  entre 12 e 36 meses, pode-se simular a densidade probabilística de  $D$  nos limites desse contorno; isto é, em  $T=12$  e  $T=36$ . Essa simulação informará sobre a probabilidade de a demanda acumulada extrapolar o valor de 5.168 unidades, ou ficar muito abaixo desse valor. Conforme a figura 7, vê-se que a probabilidade do valor extrapolar 5.168 em  $T=12$  é mínima. A demanda acumulada em  $T=12$  meses se situará entre 1.265 e 2.252, considerando um intervalo de confiança de 95%, e sua média é de 1.699,67. Assim, há menos de 1% de probabilidade de a demanda ultrapassar o valor de 2.400, o que ainda está muito abaixo do valor de 5.168 unidades, que é o número de moedas criadas no leilão no mês 1. Em  $T=36$ , a preocupação é que a demanda não atinja o valor de 5.168 e “sobrem” moedas no mercado. A simulação mostra que esse cenário também é improvável. O resultado mostra uma demanda acumulada entre 6.491 e 21.617, baseando-se num intervalo de confiança de 95%, e sua média está em 12.250,99. Por fim, a probabilidade de a demanda não alcançar o valor de 5.168 também é menor do que 1%.

76



**Figura 8:** Densidade probabilística do acumulado da demanda em  $T=12$  meses e  $T=36$  meses

Fonte: Própria.

A partir dos dados obtidos nas simulações, pode-se concluir que, com os parâmetros utilizados de *drift* e volatilidade, a quantidade de 5.168 moedas emitidas seria um valor adequado a ser emitido. Conclui-se também que uma janela entre 12 e 36 meses para realização de um novo leilão oferece um tempo bastante confortável para toda a demanda de moedas ser consumida. A tabela 1 resume os resultados obtidos com as simulações do acumulado da demanda.

Estatísticas	T = 12 meses	T = 24 meses	T = 36 meses
Média	1699,67	5168,05	12250,99
Mediana	1675,65	5006,35	11654,47
Mínimo	998,90	2058,27	3864,54
Máximo	3731,80	12558,28	35114,27
Desvio padrão	256,27	1226,66	3868,10
< 25%	1519,70	4286,79	9485,30
< 75%	1855,53	5864,97	14319,73

**Tabela 1:** Estatísticas do acumulado da demanda em T = 12, 24 e 36 meses

**Fonte:** Própria.

## Cálculos de Valor

### Valor Presente Líquido

O valor presente líquido do projeto (VPL) será:

$$VLP = -I + \sum_{i=t}^T \frac{Q_e \times p}{(1+k)^{T-t}}$$

(4)

Onde  $I$  é o investimento;  $Q_e$  é a quantidade total de moedas emitidas;  $T$  é o tempo até que o estoque de moedas seja reduzido a zero;  $p$  é o preço; e  $k$  é o custo de capital.

Se for assumido zero de investimento, um preço fixo de \$100 e um custo de capital de 10% ao ano, o resultado é um VPL de \$427.107,40.

### Maximização do Retorno

A equação de valor para que maximiza o retorno, considerando a quantidade e o preço no momento atual versus sua expectativa no momento futuro é:

$$\max_{qt} \left( V_t = q_t \times p + E_T \left( \sum_{i=t}^T \frac{q_t \times p}{(1+k)^{r-t}} \right) \right)$$

(5)

Onde:  $V_t$  é o valor total no tempo  $t$ ;  $q_t$  é a quantidade emitida;  $p$  é o preço;  $E_t$  é o valor esperado no tempo  $T$  (no qual todo o estoque de moeda leiloadada se esgota); e  $k$  é o custo de capital.

### Cálculo do Valor da Opção de Adiar o Leilão

Por fim, modelou-se a possibilidade de um adiamento de até 4 trimestres (1 ano) do próximo leilão, caso a demanda não tenha atingido o patamar do valor esperado. Para isso, utilizou-se com base o modelo de árvore binomial de Cox, Ross & Rubinstein (1979) uma modificação realizada no software DPL com a inclusão dos seguintes parâmetros: volatilidade trimestral = 12,5% (baseada no comportamento dos CERs); valor inicial e valor de strike = \$324.200 (referente a uma quantidade acumulada que atingiu apenas o 5º percentil do valor esperado em dois anos; e custo de capital de 2,41% no trimestre. Na simulação, o tempo foi dividido em períodos discretos de comprimento  $\Delta t$  e foi assumido que em cada período, o valor do ativo  $S$  move-se ou para cima ou para baixo segundo as constantes proporcionais  $\mu$  e  $d$ , respectivamente.

78

$$\mu = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}$$

(6)

$$d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}$$

(7)

Onde  $\sigma$  é a volatilidade e  $\Delta t$  é o período representado pela variação de tempo.

Já as probabilidades de subida ou descida são repensados por  $P_s$  e  $P_d$ , que são definidos nas equações 8 e 9.

$$P_s = \frac{((1 + Rf) - d)}{u - d}$$

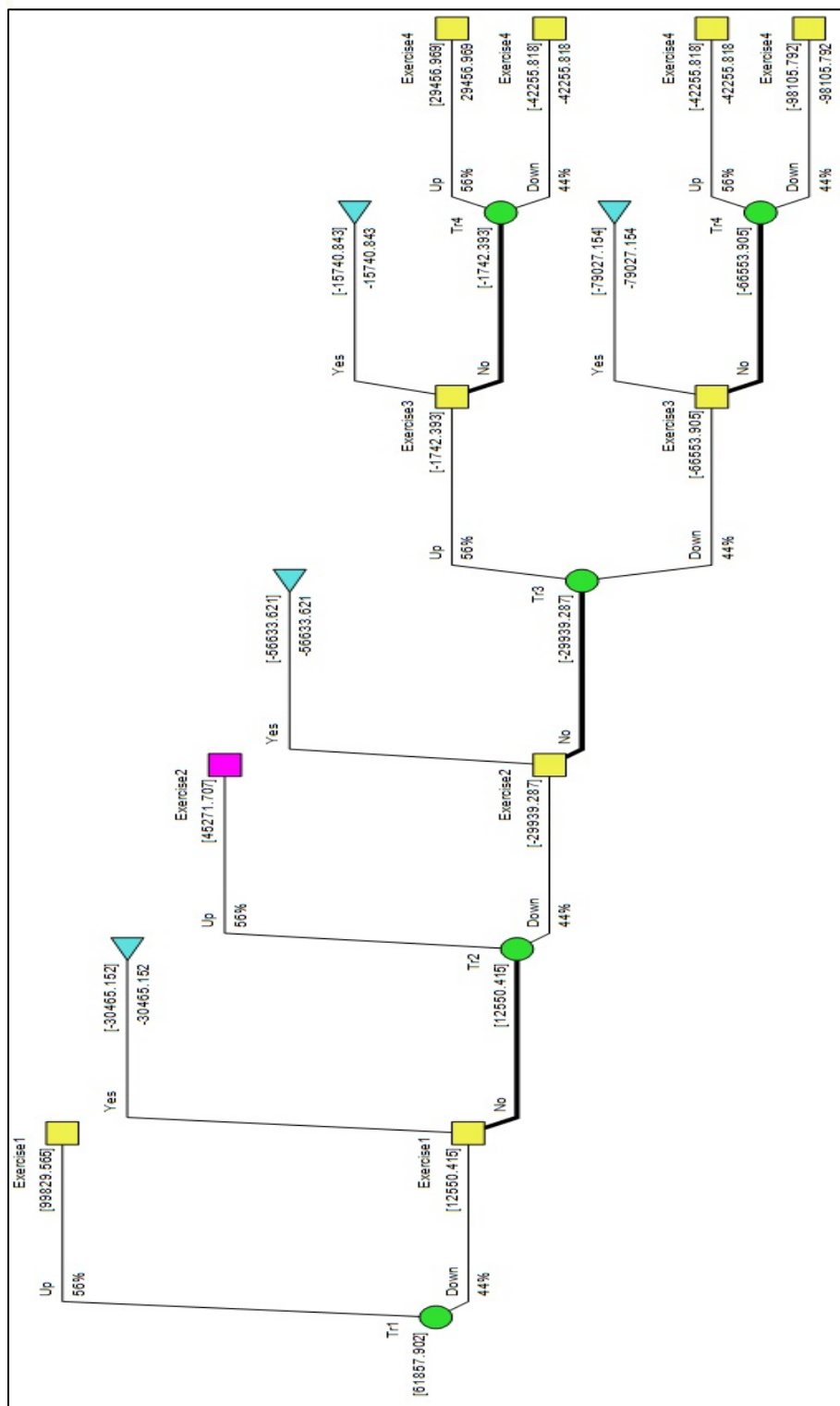
(8)

$$P_d = 1 - P_s$$

(9)

Deve-se levar em conta que estes modelos pressupõem que o mercado não tem tendência, que o modelo ignora os custos da transação, que o modelo não considera a inflação, e considera que o mercado é eficiente. Considerou-se  $Rf$  como sendo 10% ao ano. O resultado da modelagem acusou um valor positivo de \$61.857,90. Isso ocorre porque a demanda evolui como um MGB de *drift* ( $\mu$ ) positivo. Logo, por definição, o valor esperado do ativo  $E(S_t) = s_0 \cdot e^{\mu t}$  num tempo futuro é maior do que seu valor esperado num tempo presente.

A figura 9 mostra que mesmo nos nós inferiores, existe a probabilidade de uma recuperação de valor caso se adie o leilão em 4 trimestres.



**Figura 9:** Árvore de decisão com opção de adiar o leilão

Fonte: Própria.

A figura 10 aponta para o exercício da opção de adiar em 100%. Por fim, a figura 11 demonstra, à esquerda, o valor de exercício da opção de adiar em cada trimestre e, à direita, a probabilidade acumulada do exercício da opção de adiar (há uma probabilidade de cerca de 78% de que a opção de adiar venha a ter valor positivo).



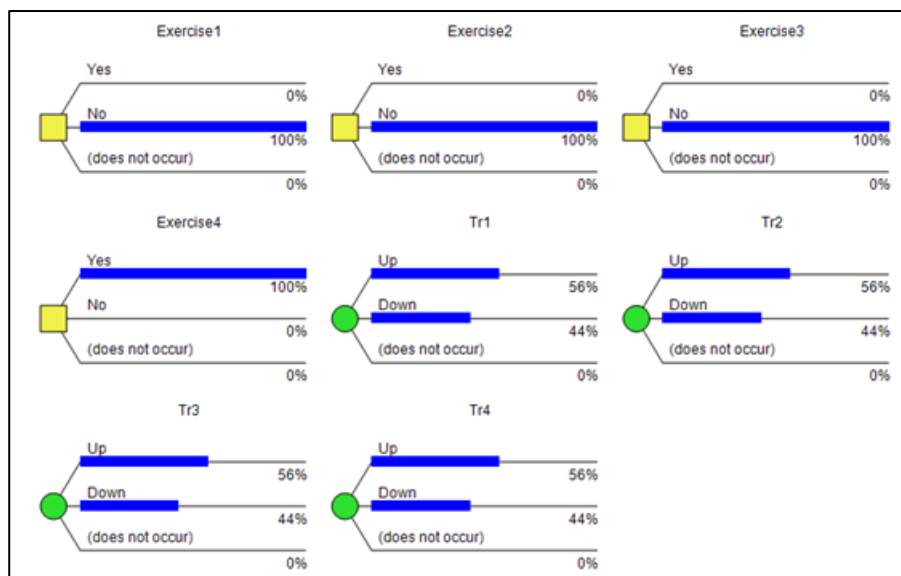


Figura 10: Opção em adiar 100% dos casos  
Fonte: Própria.



Figura 11: Valor de exercício da opção de adiar em cada trimestre e a probabilidade acumulada do exercício da opção de adiar  
Fonte: Própria.

## Conclusões

Como resultado, pode-se perceber que o aparato teórico pode ser extremamente útil para a comercialização bem-sucedida de CERs baseadas na *blockchain*, de modo que ambos o ofertante e o consumidor final possam desfrutar das vantagens competitivas oferecidas pela tecnologia *blockchain*, minimizando-se o problema histórico da volatilidade de certificados de energia renováveis.

É importante notar que esse é apenas um primeiro passo, e que serão necessários modelos mais sofisticados no futuro para dar conta do máximo de variáveis possíveis que podem influenciar essa

modelagem, sejam endógenos ou exógenos. Contudo, uma vez funcional, tal modelagem pode ser utilizada não apenas para CERs, como também para outros tipos de produtos com características similares. Isso inclui qualquer moeda digital no qual o controle inflacionário é importante, permitindo a manutenção da sua estabilidade por longos períodos, assim mantendo a confiança por parte do público em geral.

A utilização da função valor para maximização do retorno, considerando a quantidade e o preço no momento atual versus sua expectativa no momento futuro, contribuiu para entender a dinâmica de funcionamento e constitui um passo importante para futuras inovações metodológicas concernentes a esse problema. Por fim, notou-se que levando em consideração os parâmetros adotados, o VPL deste projeto é positivo. Por meio do processo de adiar o leilão, percebeu-se um aumento real do VPL com uma conseguinte valorização por parte dos demandantes.

Para estudos futuros, sugere-se a aplicação da modelagem de Poisson como forma de integrar o processo de explosão de preços para se avaliar momentos que são típicos do mercado em questão (alta volatilidade). Sugere-se também relaxar o pressuposto do monopólio, uma vez que o aparecimento de competição é bastante plausível. Finalmente, para o aperfeiçoamento da modelagem, sugere-se o aprofundamento com a aplicação de modelos ainda mais sofisticados de processos estocásticos e de teoria dos jogos (e.g., probabilidades Bayesianas e *algorithmic mechanism design*; Nisan, & Ronen, 2001).

### Referências Bibliográficas

Birol, F. (2010). **World energy outlook 2010**. OECD/IE International Energy Agency. Disponível em: < <http://www.oecd.org/berlin/46389140.pdf> > Acesso em 28/07/17.

Brennan, M. J.; Schwartz, E. S. (1985). Evaluating natural resource investments. **Journal of business**, 58(2), 135-157.

Brito, J.; Castillo, A. (2013) Bitcoin: A Primer for Policymakers. **Policy: A Journal of Public Policy and Ideas**, 29(4), 3-12.

Catalini, C., & Gans, J. S. (2016). **Some simple economics of the blockchain**. National Bureau of Economic Research.

Copeland, T.; Antikarov, V. (2001). **Real options: A Practitioners Guide**. 1<sup>st</sup> Ed. Texere: New York.

Copeland, T.; Tufano, P. (2004). A real-world way to manage real options. **Harvard business review**, 82(3), 90-99.

Cox, J. C.; Ross, S. A.; Rubinstein, M. (1979). Option pricing: A simplified approach. **Journal of Financial Economics**, 7(3), 229-263.

Coulon, M., Khazaei, J., & Powell, W. B. (2015). SMART-SREC: A stochastic model of the New Jersey solar renewable energy certificate market. **Journal of Environmental Economics and Management**, 73, 13-31.

Davidson, S., De Filippi, P., & Potts, J. (2016). **Economics of Blockchain**. **Public Choice Conference**, May 2016, Fort Lauderdale, United States. Proceedings of Public Choice Conference, 2016.

Dixit, A. K.; Pindyck, R. S. (1994) **Investment under uncertainty**. Princeton: Princeton university press.

Extance, A. (2015). Bitcoin and Beyond. **Nature**, 526(7571), 21-23.

Harris, M.; Raviv, A. (1998). Allocation Mechanisms and the Design of Auctions. **Econometrica**, 49(6), 1477-1499.

Hurlburt, G. F.; Bojanova, I. (2014) **Bitcoin: Benefit or Curse?** **IT Professional**, 16(3), 10-15.

Kemna, A. G. (1993). Case studies on real options. **Financial Management**, 22(3), 259-270.

- Klemperer, P. (1999). Auction Theory: A guide to the literature. **Journal of Economic Surveys**, 13(3), 227-286.
- Krishna, V. (2002). **Auction Theory**. San Diego: Academic Press.
- Little, E. M (2014). Bitcoin. **The Investment Lawyer**, 21(5), 22-26.
- Lohmann, L. (2010). **Neoliberalism and the calculable world: The rise of carbon trading. The Rise and Fall of Neoliberalism**, Zed Books, London and New York, p. 77-93.
- Mathews, J. A. (2008). How carbon credits could drive the emergence of renewable energies. **Energy Policy**, 36(10), 3633-3639.
- Mackenzie, D. (2007). Finding the ratchet: the political economy of carbon trading. **Post Autistic Economics Review**, 42, 8-17.
- Maftai, L. (2014). Bitcoin—Between Legal and Informal. **CES Working Papers**, 6(3), 53-59.
- Makowski, L., & Mezzetti, C. (1994). Bayesian and weakly robust first best mechanisms: characterizations. **Journal of Economic Theory**, 64(2), 500-519.
- Mas-Colell, A. & Whinston, M. D.; Green, J. R. (1995). **Microeconomic theory**. Vol. 1. New York: Oxford university press.
- Maskin, E.; Riley, J. (2003). Uniqueness of Equilibrium in Sealed High-Bid Auctions. **Games and Economic Behavior**, 45(2), 395-409.
- Milgrom, P. (2000) Putting auction theory to work: The simultaneous ascending auction. **Journal of Political Economy**, 108(2), 245-272.
- Milgrom, P. & Weber R. J. A. (1982). Theory of Auctions and Competitive Bidding. **Econometrica**, 50(5), 1089-1122.
- Myers, S. C. (1977). Determinants of corporate borrowing. **Journal of financial economics**, 5(2), 147-175.
- Myerson, R. B. (1981). Optimal auction design. **Mathematics of operations research**, 6(1), 58-73.
- Negurita, O. (2014). Bitcoin—Between Legal and Financial Performance. **Contemporary Readings in Law and Social Justice**, 6(1), 242-248.
- Nisan, N., & Ronen, A. (2001). Algorithmic mechanism design. **Games and Economic Behavior**, 35(1), 166-196.
- Ølnes, S., Ubacht, J., & Janssen, M. (2017). Blockchain in government: Benefits and implications of distributed ledger technology for information sharing. **Government Information Quarterly**, 34(3), 355-364.
- Oppenheimer, P. H. (2002). A critique of using real options pricing models in valuing real estate projects and contracts. **Briefings in Real Estate Finance**, 2(3), 221-233.
- Riley, J. G.; Samuelson. W. F (1981). **Optimal Auctions**. *A.E.R.*, 71(3), 381-92.
- Singer, S., Denruyter, J. P., & Yener, D. (2017). The energy report: 100% renewable energy by 2050. In **Towards 100% Renewable Energy** (pp. 379-383). Springer, Cham
- Smit, H. T.; Trigeorgis, L. (2006). Real options and games: Competition, alliances and other applications of valuation and strategy. **Review of Financial Economics**, 15(2), 95-112.
- Thomson Reuters (2016). *Point Carbon Website*. Disponível em: <<http://financial.thomsonreuters.com/en/products/tools-applications/trading-investment-tools/eikon-trading-software/energy-trading/point-carbon.html>>, Acesso em 18/11/16.
- Trigeorgis, L. (1996). **Real options: Managerial flexibility and strategy in resource allocation**. MIT press.

Trigeorgis, L. (1993). The nature of option interactions and the valuation of investments with multiple real options. **Journal of Finance and Quantitative Analysis**, 28(1), 1-20.

Trigeorgis, L. (2007). Opções reais e interações com a flexibilidade financeira. **Revista de Administração de Empresas**, 47(3), 95-120.

Wara, M. (2007). Is the global carbon market working?. **Nature**, 445(7128), 595.

World Bank. (2010). **The World Integrated Trade Solution**. Disponível em: <  
<http://wits.worldbank.org/wits/wits/witshelp/Welcome.htm>> Acesso em 18/11/16.