

# TEORIA DAS OPÇÕES REAIS (TOR) NA AVALIAÇÃO DE INVESTIMENTOS EM PROJETOS DE ENERGIA RENOVÁVEIS

Tarcísio S. Bacelar – [tarcisio.bacelar@gmail.com](mailto:tarcisio.bacelar@gmail.com)

Elielza Moura S. Barbosa – [eliezamsb@gmail.com](mailto:eliezamsb@gmail.com)

Olga C. Vilela – [ocv@ufpe.br](mailto:ocv@ufpe.br)

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear.

Charles U. Carmona – [carmona@ufpe.br](mailto:carmona@ufpe.br)

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Administração

**Resumo.** A Teoria das Opções Reais-TOR é uma abordagem moderna para o tema de investimento de capital. Vem somar às tradicionais metodologias por considerar o valor da incerteza e da flexibilidade gerencial na busca do resultado esperado do investimento. Métodos de fluxo de caixa descontado e análise de sensibilidade não são suficientes para captar o valor associado à flexibilidade, por tratar apenas de fluxos de caixa previstos, descontados a uma taxa constante, considerando ou não o risco durante a vida do projeto. A metodologia TOR mostra-se mais adequada para análises de projetos em temas ainda considerados de natureza ousada para investimentos. O trabalho aborda uma revisão, ao longo desta década (2010 até o presente) das aplicações da Teoria das Opções Reais no Brasil, quando aplicada a projetos na área da geração de energia de fontes renováveis, muito particularmente na geração solar fotovoltaica. Apresenta os tipos de estudos, as metodologias aplicadas e as conclusões obtidas nos principais trabalhos selecionados. Mais especificamente, a metodologia TOR será apresentada como proposta ferramental para análise de investimento, agregando valor à tomada de decisão do investidor, quando da implantação de usinas solar fotovoltaicas (USF). Os estudos analisados mostram a utilidade da metodologia TOR na estimação do valor econômico do projeto, identificando se o melhor momento para o investimento é agora, ou esperar por melhores condições. A viabilidade da aplicação dessa ferramenta, na geração de eletricidade solar, está sendo analisada dentro de projetos de grande porte (~30MW) em execução no Nordeste do Brasil, cujos resultados serão oportunamente divulgados.

**Palavras-chave:** Investimentos em Energia Solar, Teoria das Opções Reais, Modelo Binomial.

## 1. INTRODUÇÃO

Em economia, investimento significa a aplicação de capital na expectativa de um benefício no futuro. Ao analisar uma oportunidade de investimento, o investidor, normalmente, se depara com os três fatores básicos, irreversibilidade, incerteza e momento de investir ou flexibilidade, que determinam a natureza do investimento, conforme explicam Dixit e Pindyck (1992).

As teorias tradicionais de avaliação de investimentos como Fluxo de Caixa Descontado (FCD) são do tipo: “Tudo ou Nada”, ou seja, avalia o investimento sem considerar a possibilidade expandir, retraindo ou deixar expirar o prazo de investimentos planejados. A flexibilidade na gestão do investimento agrega muito mais valor que as variabilidades de juros ou de políticas fiscais. A característica de incerteza, não é privilégio dos “países emergentes”, pode-se afirmar que a humanidade vive num mundo cada vez mais incerto, dado a velocidade da informação e da rapidez de movimentação dos fluxos de capitais.

A “globalização” da economia tem afetado os processos de tomada de decisão no mundo empresarial impondo, portanto, adaptações nas teorias tradicionais de análise de investimentos. Neste contexto, a Teoria de Opções Reais (TOR) se apresenta como uma importante ferramenta de análise de projetos de investimento, no gerenciamento da tomada de decisões e na precificação quantitativa de investimentos e empresas como um todo.

Por outro lado, a recente expansão no Brasil do mercado de geração de eletricidade solar torna urgente a necessidade de ferramentas de avaliação de projetos que possam avaliar e recompensar a percepção gerencial e a flexibilidade resultante.

Com o objetivo de se aplicar o método TOR na análise de projetos de P&D relacionados à geração de eletricidade fotovoltaica e termo solar, em execução no Brasil, apresenta-se um compêndio de informações baseado em uma revisão na produção acadêmica da aplicação da metodologia TOR em projetos na área de Energias Renováveis (ER). A viabilidade da aplicação dessa ferramenta, particularmente na geração de energia Solar Fotovoltaicas (USF), está sendo analisada dentro de projetos em execução no Nordeste do Brasil.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Uma opção representa a liberdade de escolha. A palavra vem do francês antigo e é derivada do Latim, *optio*, *optare*, que significa escolher, desejar. Uma opção é o direito, mas não uma obrigação de realizar um negócio. Uma

opção financeira de compra dá ao seu proprietário o direito, mas não a obrigação, de comprar um ativo subjacente no futuro por um preço fixado hoje. Uma opção financeira de venda dá a seu proprietário o direito, mas não a obrigação, de vender o estoque no futuro por um preço fixado hoje.

Uma opção "real" é uma opção "relacionada às coisas", derivada do Latim *realis*. Real refere-se a ativos fixos, permanentes ou imóveis, em oposição a coisas imaginárias como papéis financeiros.

As incertezas derivam de fontes internas e externas; elas pertencem a várias categorias como: dinâmica do mercado, regulatória, política, variáveis macroeconômicas, capacidades organizacionais, conhecimento e evolução do ambiente competitivo.

## 2.1 A Avaliação de projetos e a metodologia TOR

Habitualmente, a avaliação de investimento é baseada no Fluxo de Caixa Descontado (FCD) com uma taxa de desconto que reflete o risco do negócio. Todos os custos que serão incorridos para criar e manter o ativo são deduzidos e trazidos a valor atual dando origem ao Valor Presente Líquido (VPL) do projeto. O (VPL), em outras palavras, é a diferença entre o valor atual dos fluxos de caixa futuros que o projeto de investimento possa gerar ao longo de sua vida e o custo envolvido na implementação do projeto.

Risco, outra palavra latina, significava no mundo romano antigo "perigo em mar". No contexto das decisões financeiras e de investimento, o risco refere-se à volatilidade dos resultados potenciais. O fato, de que o futuro é desconhecido e incerto, é a base para o valor do dinheiro no tempo: o dinheiro vale hoje mais do que dinheiro, amanhã.

A avaliação da opção também se baseia nos fluxos de caixa esperados, mas os fluxos de caixa são ajustados pelo risco e, em seguida, descontados à taxa livre de risco.

A negociação das primeiras opções de capital teve início em 1973 que coincidiu com a publicação do documento seminal (Black e Scholes, 1973). No artigo, os autores apresentaram uma fórmula matemática que permitiu determinar o preço das opções de compra de ações. A chegada desta fórmula facilitou o crescimento dos mercados de opções e tornou-se a base para a avaliação do prêmio da opção. Esta fórmula, e suas variações, mais tarde, tiveram aplicação ainda mais ampla nos mercados financeiros.

Na verdade, Myers (1981) foi o pioneiro na idealização do conceito de que os investimentos financeiros geram opções reais, argumentando que a avaliação das oportunidades de investimento financeiro usando a abordagem (FCD) tradicional ignora o valor das opções que surgem em projetos de investimentos incertos e arriscados. Uma década depois, o autor levou a análise de opções para o próximo nível, aplicando o conceito para valorizar não apenas os valores mobiliários, mas, também o orçamento corporativo e as decisões de investimento.

Dixit e Pindyck (1988) expandiram ainda mais a noção de opções de crescimento, introduzindo irreversibilidade na equação. Embora esta seja uma característica fundamental de todas as decisões de investimento, a regra (VPL) não reconhece a irreversibilidade como um custo, o custo de oportunidade do investimento e o custo de desistir da flexibilidade ao comprometer os recursos de forma irreversível. Do mesmo modo, deve ser um valor para manter as opções abertas, ou seja, não exercer as opções, ou em atrasar o exercício até que haja mais informações e a incerteza tenha sido resolvida. O conceito foi aprofundado pelos autores e publicado no livro seminal "Investimento sob incerteza", cujo título originalmente proposto foi "A abordagem da opção real para o investimento", (Dixit e Pindyck, 1994). Pouco depois, Trigeorgis (1996) publicou uma revisão abrangente da literatura de opções reais e suas aplicações: "Opções reais: flexibilidade gerencial e estratégia em alocação de recursos".

O método binomial, originalmente proposto por Sharpe et.al. (1978), tornou-se mais conhecido como método (CRR), nome derivado dos autores (Cox, Ross e Rubinstein, 1979), que desenvolveram uma metodologia que permite obter uma aproximação para o movimento geométrico browniano. No modelo binomial, a distribuição de probabilidade do preço do estoque futuro é determinada pelo tamanho do movimento ascendente e do movimento descendentes em cada passo discreto no tempo. O tamanho desses movimentos reflete a volatilidade dos preços. Dependendo do número de etapas, o cone da opção evolui, dando o preço do estoque antecipado em cada nó. A árvore binomial divide o tempo entre agora e a data de validade da opção em intervalos discretos, marcados por nós.

## 2.2 Aplicação da metodologia TOR em Projetos Energéticos

A análise de opções reais avalia e recompensa a percepção gerencial e a flexibilidade resultante. O investimento pode ser retardado até que haja mais informações disponíveis para fornecer melhores informações sobre as condições do mercado. Pode-se alterar a escala de um projeto em andamento, quer fazendo uma redução ou expansão do escopo. Pode-se decidir abandonar um projeto completamente, como também trocar recursos de entrada, ou seja, mudar de uma forma de energia para outra, ou de uma saída de produto para outra. Também se pode decidir estruturar um investimento em um novo projeto importante em etapas incrementais, com uma opção para crescer em cada etapa, ao mesmo tempo em que obtém valiosas informações de mercado e produtos. Essa flexibilidade gerencial tem valor e o valor pode ser determinado usando a Teoria das Opções Reais (TOR).

A metodologia TOR é bastante utilizada por gestores modernos e atende a um vasto espectro de aplicações, como: desenvolvimento de combustível de fonte renovável, como o biodiesel; análise de concessão rodoviária; quantificação de impactos para postergar investimentos em projeto, como de petróleo, por exemplo; viabilidade econômico-financeira de projetos agropecuários; investimentos em mineração de ferro; reflorestamento, etc.

Tendo como foco a aplicação da metodologia TOR em projetos na área de produção de energia de fontes renováveis e intermitentes, como a solar, apresentam-se na Tab. 1 alguns trabalhos referenciais como base para a escolha dessa metodologia a ser seguida na avaliação de projetos, mais especificamente, para geração de eletricidade via Usinas Solar Fotovoltaicas (USF).

**Tabela 1 – Base referencial da aplicação da Teoria de Opções Reais (TOR) em projetos de energias renováveis.**

Ano	Autor	Título
<b>Resumo</b>		
2017	KIM, Kyeongseok; PARK, Hyoungbae e KIM, Hyoungkwan.	<i>Real options analysis for renewable energy investment decisions in developing countries</i>
Apresenta um estudo de caso envolvendo um projeto hidrelétrico na Indonésia, conduzido baseado em opções reais para ajudar investidores a avaliarem projetos de Energia Renovável (ER) com alta volatilidade e risco. Um modelo de opção composto com uma estrutura de árvore binomial foi adotado para representar a natureza seqüencial dos projetos. Conclui que a avaliação econômica tradicional não é adequada para apoiar a tomada de decisões em relação aos investimentos em (ER) por não tratar a volatilidade e flexibilidade e propõe a utilização de opções reais para avaliar investimentos em energia renováveis.		
2017	Gomes, Ana Lucia Costa.	<i>Viabilidade econômica de painéis fotovoltaico na ESTGV - Abordagem através de Opções Reais</i>
Sistematiza a literatura da avaliação de investimentos pelos métodos tradicionais e pelo método das opções reais aplicado a um projeto de investimento em painéis fotovoltaicos no Campus do Instituto Politécnico de Viseu, Portugal (IPV). Apesar de apresentar uma discussão detalhada dos métodos de solução de opções reais, neste trabalho foi aplicado à abordagem das árvores de decisão clássica para a avaliação de implementação de painéis fotovoltaicos no campus Instituto Superior da Tecnologia. O modelo de árvore binomial foi excluído, por exigir informação não possível de obter a partir de dados existentes, como por exemplo, assumir que o valor do ativo segue um movimento browniano geométrico. Concluindo que a instalação de painéis fotovoltaicos no Campus do Instituto Politécnico de Viseu permite, não só a redução dos encargos com a energia elétrica consumida numa instalação, mas também a redução com a potência tomada em horas de ponta.		
2016	LEE, Deok-Joo; KIM, Kyung-Taek	<i>Economic evaluation of renewable energy R&amp;D in the presence of Carbon emission market: Real option approach.</i>
Desenvolve um modelo de opção real que considere não apenas a incerteza dos preços da energia fóssil, mas também a incerteza dos preços crédito de carbono na avaliação do valor econômico da energia nova e renovável, analisado com base em dados sul-coreanos. Utiliza modelo binomial de opção real multidimensional representado pela volatilidade no preço da energia fóssil: carvão betuminoso, antracite, gás natural (GNL) e Petróleo (óleo leve, óleo pesado) e do crédito de carbono: preços negociados no <i>Chicago Climate Exchange (CCX)</i> . Os resultados indicam que: as energias renováveis são mais competitivas em relação ao preço da energia fóssil; O decisor deve selecionar investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para melhorar o retorno das energias renováveis; O valor econômico da energia renovável pode ser aprimorado ainda mais graças P&D.		
2015	Melo, M.B.C.	<i>Avaliação de projetos de investimentos com opções reais: cálculo do valor da opção de um sistema fotovoltaico conectado à rede.</i>
Objetivou uma análise de postergação de investimento em sistema fotovoltaico residencial. Inicialmente, se realizou uma análise de sensibilidade das variáveis isoladamente, cada uma delas recomendava ao investidor diferentes decisões. Avaliação das incertezas múltiplas pela metodologia Copeland e Antikarov (2001), modelo (CA), onde os parâmetros variáveis simulados por Monte Carlo influenciam apenas no VPL. Para determinar o valor das opções reais utilizou-se o modelo de árvore binomial. Concluiu com o indicativo de Investir imediatamente.		
2013	Targiel, Krzyztof.	<i>Valuation of investment projects in the context of sustainable development-Real option approach.</i>
Nesse estudo a solução proposta considera vários aspectos, como os múltiplos critérios, que é especialmente importante no contexto do desenvolvimento sustentável. Utiliza o modelo de Cox, Ross e Rubinstein, modelo (CRR), que é baseado na árvore binomial. Esta abordagem também foi adotada no trabalho de Guthrie (2009), sobre o qual este estudo se baseia. Construir árvore de decisão D-tree, estados do projeto e árvore binomial X-tree. Conclui que dentro do contexto de desenvolvimento sustentável, o aspecto social e ambiental também deve ser considerado.		
2012	Giorgetto, T. M.	<i>Decisão de investimento entre pequenas centrais hidrelétricas e usinas eólicas: Aplicação da teoria de opções reais.</i>
Avalia a tomada de decisão entre investir em Usinas Eólicas ou em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Para determinar o valor das opções reais utilizou-se o modelo de árvore binomial. Conclui-se que a opção de adiar a construção de um desses empreendimentos pode gerar valor para o empreendedor e que, no cenário de queda do preço da energia, a melhor opção é investir em eólicas.		

2012	Noronha, J. C.C.	<i>Investimentos em distribuição de energia elétrica sob incerteza regulatória utilizando opções reais</i>
<p>Discuti os efeitos da regulação <i>price cap</i> sobre incentivos aos investimentos, na presença de irreversibilidade, flexibilidade e incerteza. A opção de investimento foi modelada em tempo contínuo, com o objetivo de estudar o impacto das incertezas da receita regulatória e da energia anual distribuída pela concessionária no valor e no timing do projeto. Conclui que ao efetuar o investimento, o titular da opção de investir estará desistindo da oportunidade de esperar para ver como evoluirão as incertezas do projeto e utilizar esta informação para reavaliar a conveniência e o melhor momento.</p>		
2011	Luna, N. A	<i>Avaliação de empresas utilizando a teoria das opções reais: o caso de uma geradora de energia eólica.</i>
<p>Analisa a viabilidade do projeto de geração eólica na Wind Brasil como atrativo para a AES Corporation através de um estudo de caso de avaliação de um projeto de geração eólica, usado metodologia sugerida por Copeland e Antikarov (2001). Faz uma interessante análise sobre a metodologia TOR, onde constata que as empresas estão utilizando esta metodologia em três categorias: TOR como maneira de pensar - muitas empresas estão adotando o raciocínio das opções reais para estruturar a tomada de decisão, envolvendo uma linguagem comum no tratamento dos problemas sob sua ótica; TOR como ferramenta de análise – diversas empresas se deparam com análise de investimento com flexibilidade bem definida (contrato com cláusula de saída ou renovação, plantas com capacidade de expansão); TOR como processo organizacional - o processo de orçamento de capital está relacionado aos processos gerenciais, tais com a gestão de riscos e avaliação interna de desempenho. Dessa maneira usam a TOR no acompanhamento dos projetos assegurando que as decisões apropriadas estão sendo tomadas ao longo do tempo. De acordo com o autor está havendo uma evolução modesta e silenciosa em diversas empresas na adoção da metodologia TOR. Essas empresas construíram seu conhecimento a partir de fundamentos acadêmicos, utilizaram consultoria e atualmente estão adotando ativamente a metodologia TOR. As empresas que mais utilizam a metodologia TOR operam em setores industriais que lidam com investimentos altos e retornos incertos (biotecnologia, petroquímico e exploração de petróleo).</p>		
2011	Brandão, L. E.; Dyer, J.	<i>Valuing real options projects with correlated uncertainties</i>
<p>Propõe melhorias na metodologia desenvolvida originalmente por Copeland e Antikarov (2001) e fornece um método prático para precificar projeto onde existe flexibilidade na gestão e os riscos correlacionados estão presentes. Quando os mercados são incompletos, como ocorre com muitos projetos e é frequentemente o caso sobre ativos reais quando as empresas estão sujeitas a riscos privados, específicos do projeto, esses riscos não podem ser protegidos. As melhorias estão baseadas no conceito de mercados parcialmente concluídos de Smith e Nau (1995). Segundo o autor o mercado está completo quando todos os riscos podem ser cobertos por negociação. A maioria dos projetos reais "arriscados" pode, na melhor das hipóteses, ser parcialmente negociado. Assim, os métodos precificação de opções fornecem um valor para o projeto e uma estratégia ótima (uma árvore de decisão completa) somente quando os mercados forem completos.</p>		
2010	Brandão, M. C.	<i>Análise dos parâmetros que influenciam a obtenção do valor da flexibilidade por opções reais no setor elétrico.</i>
<p>Análise de investimento para expansão de uma distribuidora de energia elétrica. Avaliação das incertezas múltiplas pela metodologia (CA), Copeland e Antikarov (2001); onde os parâmetros variáveis simulados por Monte Carlo influenciam apenas no VPL, e também de acordo com Herath e Park (2002). As principais fontes de incerteza consideradas no projeto, de acordo com o conhecimento de especialistas, foram as variáveis: demanda, preço final da tarifa de venda de energia da distribuidora e o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC). Para determinar o valor das opções reais utilizou-se o modelo de árvore binomial. Como conclusão afirma que a abordagem consolidada da incerteza utilizada por Copeland e Antikarov (2001) é o método mais usado para definição da volatilidade, por não superestimar as incertezas assim como Herath e Park (2001).</p>		

### 2.3 Avaliação de projetos de energia fotovoltaicas utilizando a metodologia TOR.

A geração de eletricidade solar tem apresentado altos índices de no *mix* de energia em todo o mundo. A produção de energia fotovoltaica (FV) é considerada um mercado emergente, de alto risco e incerteza possuindo barreiras de entrada quando comparado com outros tipos de investimentos mais tradicionais como a produção de hidroeletricidade. A avaliação de investimentos em energia FV em um cenário de custos decrescentes quando analisado pela metodologia TOR agrega valores não mensuráveis pelos métodos tradicionais de investimentos dado a possibilidade de adiamento do investimento quando possível. De acordo com Dixit e Pindyck (1994), a diferença entre o valor da oportunidade de espera de um projeto com flexibilidade é o valor da opção de espera.

Os custos ainda são altos no Brasil, mas, com a melhoria dos ganhos da curva de aprendizagem alcançados pela indústria de equipamentos solares, o investimento pode se tornar viável ao longo do tempo. Usando o método TOR para verificar a viabilidade econômica e financeira de um investimento em energia solar fotovoltaica, consegue-se identificar se o melhor momento para o investimento é agora, ou esperar por melhores condições. Neste ponto é importante apresentar as razões que embasaram a proposição de utilização da metodologia de opções reais para analisar a viabilidade de investimento na produção de energia solar fotovoltaica.

Ao analisar uma oportunidade de investimento em energia FV, como descrito anteriormente, o investidor normalmente se depara com os três fatores básicos que determinam a natureza do investimento:

- **Irreversibilidade:** O custo inicial do investimento é ao menos parcialmente perdido. Não se pode recuperar este investimento inicial, caso haja mudança de ideia quanto à decisão de investir; Custos de mobilização, terreno, projetos, equipamentos serão de difícil recuperação após o início do empreendimento.
- **Incerteza:** Quanto aos benefícios futuros do investimento. Na melhor das hipóteses se pode calcular as probabilidades dos resultados possíveis que podem gerar retornos maiores ou menores para o investimento;
- **Flexibilidade:** Há uma certa liberdade do investidor em alterar o que foi planejado. O dinamismo do mercado e a flexibilidade gerencial na avaliação de projetos de investimento (que está relacionada com a aparição de novas informações) podem alterar o cenário definido originalmente, como por exemplo: diferir o projeto, expandi-lo, prorrogá-lo ou abandoná-lo. Quando exercitadas de forma ótima, todas estas opções proporcionam flexibilidade gerencial que aumenta o valor do projeto.

A decisão de entrar em novos mercados emergentes envolve considerável risco e incerteza, e é provável que dê um (VPL) negativo em uma análise tradicional de fluxo de caixa descontado. No entanto, este investimento inicial também estabelece as bases para a futura expansão do mercado, se a entrada inicial for bem-sucedida. Assim, o investimento inicial fornece à empresa a opção de crescer e a possibilita de participar em futuro potencial mercado, criado pelo estabelecimento da primeira opção, que será incluída na avaliação original do projeto. Exemplos práticos incluem o investimento em infraestrutura de tecnologia da informação, projetos de P&D e investimentos em energia renováveis notadamente os que utilizam tecnologias fotovoltaicas.

A incerteza é um dos fatores determinantes na análise de projetos de investimento em novas tecnologias, particularmente, aos relacionados com a energia solar, já que se incluem num contexto de subida de preços da energia elétrica, de restrições de carácter ambiental, imaturidade regulatória, indústria nacional ainda em desenvolvimento e preço decrescente de equipamentos.

As principais fontes de incerteza a ser consideradas, no setor de energia, de acordo com os especialistas, são: demanda, da tarifa de venda de energia e a taxa de remuneração de investimentos regulatória (Custo médio ponderado de capital-WACC, calculado pela Agência Nacional e Energia Elétrica-ANEEL). Outras fontes de incertezas, porém, devem ser investigadas principalmente em se tratando de investimento no mercado de energia sustentável e mais especificamente no de fotovoltaico por ser um mercado novo e em crescimento no Brasil. Essas fontes de incertezas são: mercado, operacional, crédito, tecnológico, econômico e legal.

Através das planilhas de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) do projeto, se identifica as variáveis com incerteza e suas distribuições de probabilidades que melhor as representem e em seguida, se realiza uma simulação através do método de Monte Carlo, considerando a abordagem consolidada da incerteza. O desvio padrão da distribuição dos possíveis (VPLs) representa o risco do projeto que será usado no modelo da árvore binomial.

Após a determinação das possíveis flexibilidades aplicadas ao projeto, deve-se distribuí-las ao longo tempo definindo uma árvore de eventos que fornece ao tomador de decisão a ideia de quais são as possibilidades futuras para o projeto em análise. Portanto, nesta etapa, é possível definir quais são as decisões ótimas a fim de maximizar o retorno do investimento, tendo em vista os valores observados em cada ramificação da árvore de eventos. Uma boa estratégia é definir o investimento em três fases: curto, médio e longo prazo. Sendo que cada fase é diretamente ligada à anterior, ou seja, investir no curto prazo dá o direito de investir no médio prazo, e por consequência o investimento no médio prazo, dá o direito de investimento no longo prazo.

Finalmente calcula-se o valor da opção considerando as diversas flexibilidades sendo o valor da opção adicionado ao (VPL) do projeto.

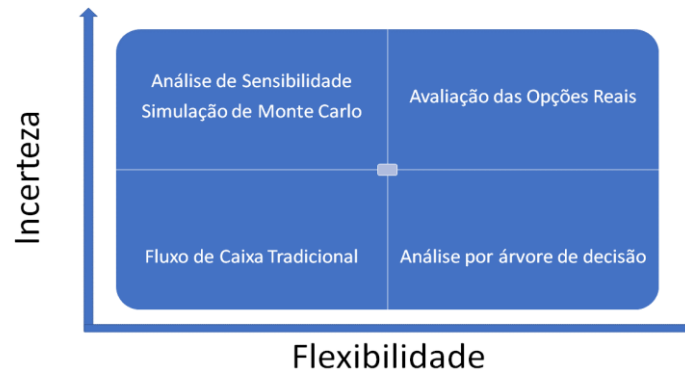
### 3. Metodologia para análise de investimento em energia FV usando a TOR

No mundo real, o ambiente de investimento em energia (FV) perpassa diversos estágios de incerteza e flexibilidade que possibilita a utilização de diversos métodos de análises os quais não são excludentes como mostra o diagrama da Fig.1, A incerteza é uma característica que pode afetar os valores do projeto e a opção de investir, pois, pode estar associada às variáveis relevantes, como o preço do produto, os custos das matérias-primas, a taxa de juro, a taxa de câmbio, as políticas governamentais, entre outros. Nesta situação, a análise do projeto de investimento deve incorporá-las.

A flexibilidade é a opção que o gestor possui para reagir a eventos incertos. Para um projeto que apresente baixos graus de incerteza e flexibilidade, o método mais adequado seria o FCD.

Considerando que investimento em energia (FV) possui componentes com alto grau de incertezas (juros, preços da venda de energia) e se encontra inserido em um mercado competitivo, exigindo do gestor um alto grau de flexibilidade, o método de Opções Reais vem se mostrando como o mais promissor. Vale ressaltar que a avaliação do investimento em energia (FV) deve se iniciar tendo presente o valor proporcionado pelos métodos tradicionais e, posteriormente, avaliar as flexibilidades existentes.

A análise de opções reais captura o valor das flexibilidades, o que os métodos tradicionais de avaliação de investimentos não conseguem fazer. Métodos de fluxo de caixa descontado e análise de sensibilidade não são suficientes para captar o valor associado à flexibilidade, pois eles tratam apenas de fluxos de caixa previstos, descontados a uma taxa constante, considerando ou não o risco durante a vida do projeto.

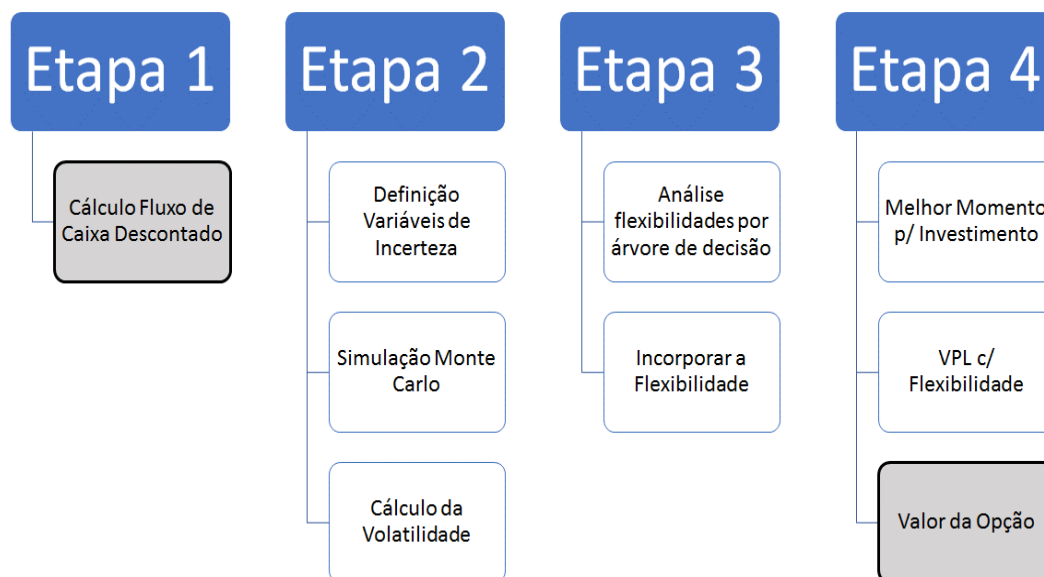


Fonte: adaptado de Copeland e Antikarov (2001)

Figura 1- Métodos de avaliação de investimentos em função da flexibilidade e incerteza.

Um diagrama esquemático da metodologia TOR é apresentado na Fig.2, onde:

- A primeira etapa consiste em lançar mão de métodos tradicionais de avaliação de investimento já difundidos no ambiente de avaliação de negócios.
- A segunda etapa aborda as incertezas causais do projeto como demanda, preço, entre outros. Estas relações podem ser facilmente modeladas nesta fase, com o uso da Simulação de Monte Carlo (SMC). É também obtida, nesta fase, a volatilidade total do projeto, também através da SMC onde a volatilidade é obtida pelo desvio padrão da distribuição dos possíveis VPL.
- Na terceira etapa se define as possíveis flexibilidades a serem modeladas. Esta análise pode ser realizada por árvore de decisão que busca incorporar a incerteza e a flexibilidade gerencial dentro de um modelo teórico, estruturando um problema de decisão através do mapeamento de todas as alternativas possíveis de ações gerenciais, por ordem de probabilidade de ocorrência. Portanto, é nesta fase que a flexibilidade é identificada e incorporada ao projeto.
- Na quarta e última etapa se determina o valor da opção real usando-se o modelo binomial, proposto por Cox, Ross e Rubinstein (1979). É o modelo analítico em tempo discreto e visualmente mais simples e intuitivo para a avaliação do preço da opção.



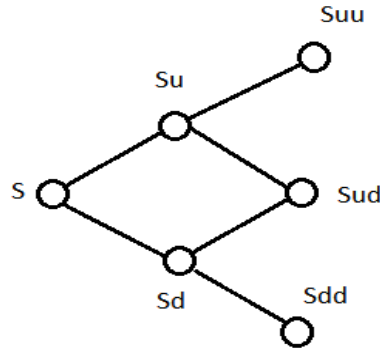
Fonte: adaptado de Copeland e Antikarov (2001)

Figura 2- Esquema demonstrativo da metodologia proposta

Segundo Hull (2009), a árvore binomial é uma técnica muito conhecida e pode ser representado por um diagrama como o da Fig.3, que apresenta os diferentes caminhos que podem ser seguidos pelo preço do ativo-objeto durante a vida da opção (projeto). O modelo está baseado na construção de uma árvore binomial, na qual, em cada período, o preço do ativo-objeto (S) poderá assumir uma de duas alternativas de valor: (Su), definido como o valor ascendente do

ativo-objeto no tempo (t), onde (u) é a taxa contínua de crescimento do preço do ativo-objeto ou (Sd), valor descendente do ativo-objeto em (t), onde (d) é a taxa contínua de redução do preço do ativo-objeto.

A Fig. 3 apresenta uma árvore de dois passos onde o preço do ativo-objeto (S) pode subir numa taxa dada pela Eq. (1) ou descer numa taxa dada pela Eq. (2). No primeiro passo, se obtém (Su), valor ascendente do ativo-objeto em t=1, o ou (Sd) valor descendente do ativo-objeto em t=1.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 3- Árvore binomial

Para calcular o valor de um projeto, pode-se utilizar a fórmula para precificação passo-a-passo, assumindo então que o valor de um projeto se move para cima ou para baixo em pontos discretos no tempo. Estas fórmulas descritas nas equações Eq. (1) e Eq. (2), dependem da volatilidade ( $\sigma$ ) do valor do ativo objeto, e do número (n) de intervalos até a expiração no período tempo (T).

$$u = e^{\sigma \sqrt{\frac{T}{n}}} \quad (1)$$

$$d = e^{-\sigma \sqrt{\frac{T}{n}}} = 1/u \quad (2)$$

O valor do fluxo de caixa descontado estendido, agora incluindo a opção de flexibilidade, será uma função do valor projeto em caso de aumento e diminuição, com suas respectivas probabilidades, descontados pela taxa livre de risco para obtenção do preço de exercício da opção.

Para um número de períodos maior que apenas 1 (um), os fatores (u) e (d) passam a ser elevados ao número de subidas ou descidas e multiplicados entre si.

O valor inicial do ativo é (S) e que no final do período ele poderá ter valor (Su), em caso de aumento com uma probabilidade (p) ou (Sd), no caso de uma diminuição, com probabilidade (1-p), sendo (p) determinado pela Eq.(3) e a taxa livre de risco pela Eq.(4).

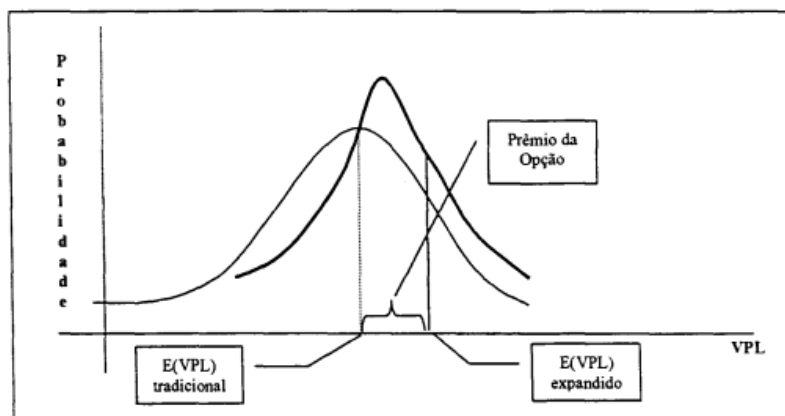
$$p = \left[ \frac{e^r - d}{u - d} \right] \quad (3)$$

$$\frac{p \cdot s_u + (1 - p) \cdot s_d}{s} = e^r \quad (4)$$

A premissa básica adotada pelo modelo é a de “não-arbitragem”, ou seja, o mercado ajusta-se às eventuais oportunidades de arbitragem (retorno sem risco). Portanto o valor esperado ajustado pela metodologia TOR será Eq.(5).

$$E(\text{VPL}_{\text{expandido}}) = E(\text{VPL}_{\text{tradicional}}) + \text{Prêmio da Opção} \quad (5)$$

A Fig.4 ilustra a assimetria causada pela flexibilidade gerencial sobre a distribuição dos resultados. A distribuição em pontilhado é referente à avaliação sem considerar a flexibilidade gerencial. Já a distribuição em negrito refere-se à avaliação considerando a flexibilidade gerencial. Nota-se que a flexibilidade gerencial modifica a curva de distribuição, aumentando o valor esperado do projeto. Este gráfico é outra forma de ilustrar a mudança de posição do cone da incerteza.



Fonte :Trigeorgis (1998, pag.123)

Figura 4- Valor Presente Líquido (VPL) esperado expandido

#### 4. Comentários Finais

Este trabalho apresenta uma revisão, ao longo desta década, das aplicações da Teoria das Opções Reais no Brasil, quando aplicada na área da geração de energia de fontes renováveis, muito particularmente na geração solar fotovoltaica. Objetivou conhecer os tipos de estudos, as metodologias aplicadas e as conclusões obtidas nos principais trabalhos selecionados.

Por se tratar de um tema ainda pouco explorado na área de negócio, cabe a academia sua desmistificação considerando que o tema é fácil de explicar, mas difícil de definir.

De acordo com os autores dos trabalhos apresentados na Tab. 1, destacam-se algumas conclusões fundamentais para o prosseguimento dos estudos na área:

- A avaliação econômica tradicional, pelo método do Fluxo de Caixa Descontado, não é adequada para apoiar a tomada de decisões em relação aos investimentos em energia renovável, por não tratar sua volatilidade e flexibilidade;
- As energias renováveis serão mais competitivas em relação ao preço da energia fóssil. O decisor deve selecionar investimentos em P&D para melhorar o retorno das energias renováveis;
- Dentro do contexto de desenvolvimento sustentável, o aspecto social e ambiental também deve ser considerado à análise, pois agregam valor;
- Apesar do seu apelo teórico, a complexidade matemática dos métodos de avaliação de opções reais tem limitado a utilização dessa abordagem;
- Está havendo uma evolução modesta e silenciosa em diversas empresas na adoção da metodologia TOR. Essas empresas construíram seu conhecimento a partir de fundamentos acadêmicos, utilizaram consultoria e atualmente estão adotando ativamente a metodologia TOR. As empresas que mais utilizam a metodologia TOR operam em setores industriais que lidam com investimentos altos e retornos incertos (biotecnologia, petroquímico e exploração de petróleo);
- O mercado é considerado completo quando todos os riscos a que está exposto podem ser mitigados por negociações. A maioria dos projetos reais "arriscados" podem, na melhor das hipóteses, ser parcialmente negociados. Assim, os métodos de precificação de opções fornecem um valor para o projeto e uma estratégia ótima (uma árvore de decisão completa) somente quando esses mercados forem completos.
- A abordagem consolidada para o tratamento da incerteza utilizada por Copeland e Antikarov (2001) é o método mais usado, por não superestimar como ocorre no método de Herath e Park (2002)

#### REFERÊNCIAS

- Baldwin e Clark, B.J., 1994. Capital-Budgeting Systems and Capabilities Investments in U.S. Companies After the Second World War. *Business History Review* 68:73
- Black, Fischer; Scholes, Myron. The pricing of options and corporate liabilities. *Journal of political economy*, v. 81, n. 3, p. 637-654, 1973.
- Brandão, Marina Carvalho. Análise dos parâmetros que influenciam a obtenção do valor da flexibilidade por opções reais no setor elétrico. 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá.
- Brandão, Luiz E., Dyer, J. S., 2011. Valuing real options projects with correlated uncertainties. *Journal of Real Options*, v. 1, n. 1, p. 18-32.
- Copeland, TE, Antikarov, V., 2001. *Opções Reais: Um Novo Paradigma para Reinventar a Avaliação de Investimentos*. Rio de Janeiro: Campus, 2001
- Copeland, TE, Antikarov, V., 2002. *Opções reais: um novo paradigma para reinventar a avaliação de investimentos*. Rio de Janeiro: Campus, 2002. 368 p
- Copeland T.E, Antikarov V., 2003. *Real options: a practitioner's guide*. New York: Texere.



- Costa, A.L.G., 2017. Viabilidade Econômica de Painéis Fotovoltaicos na ESTGV - A Abordagem através de Opções Reais. Dissertação de Mestrado-Escola Superior de Tecnologia e Gestão de VISEU – Portugal.
- Cox, J.C., Ross, S.A. e Rubinstein, M., 1979. Option Pricing: A Simplified Approach. *Journal of Financial Economics* 7:229.
- Dixit, A.K. e Pindyck, R.S. 1994. *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press, 1994.
- Fenolio, L. M. da S., 2008. Aplicação da teoria de opções reais na avaliação de pequena central hidrelétrica.
- Giorgetto, T. M., 2012. Decisão de investimento entre pequenas centrais hidrelétrica e usinas eólicas: aplicação da teoria de opções reais. Tese de Doutorado Escola de Economia de São Paulo (CDU 336.764.2).
- Gomes, Ana Lúcia Costa. Viabilidade econômica de painéis fotovoltaicos na ESTGV: A abordagem através de opções reais. 2017. Tese de Doutorado.
- Guthrie, G., 2009. *Real Options in Theory and Practice*. Oxford University Press, Oxford 2009.
- Hayes, R.H. e Abernathy, W.J., 1980. Managing Our Way to Economic Decline,” *Harvard Business Review*, Sept.–Oct. pp. 67–77;
- Herath, H. S. B. e Park, C. S. 2001. Real options valuation and its relationship to Bayesian decision-making methods. *The Engineering Economist*, v. 46, n. 1, p. 1-32, 2001.
- Herath, H. S. B. e Park, C. S. 2002. Multi-stage capital investment opportunities as compound real options. *The Engineering Economist* v. 47 n.1.
- Hull, J. C., 2008. *Options, Futures and Other Derivatives*, 7 ed, Prentice Hall, London.
- Kester, W.C., 1978. Today’s Options for Tomorrow’s Growth,” *Harvard Business Review*, March–April 18, 1984. W.F. Sharpe, Investments. Prentice Hall, 1978
- Kim, K., Park, H. e KIM, H., 2017. Real options analysis for renewable energy investment decisions in developing countries.
- Krzyztof, T., 2013. Valuation of investment projects in the context of sustainable development-Real option approach. University of Economics in Katowice Katowice, Poland.
- HULL, John C. *Fundamento dos mercados futuros e de opções*. São Paulo: BM&FBOVESPA – Bolsa de Valores, Mercadorias e Futuros, 2009.
- Lee, D.-Joo., KIM, Kyung.T., 2016. Economic Evaluation of Renewable Energy R&D in the Presence of Carbon Emission Market: Real Option Approach. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2016.
- Luna, N. A., 2011. Avaliação de empresas utilizando a teoria das opções reais: o caso de uma geradora de energia eólica. 2011.
- Mechlin, G., G. e Berg, D. 1980. Evaluating Research, ROI Is Not Enough. *Harvard Business Review* Jan.–Feb., 1980, 93–99.
- Melo, M.B.C. de; Avaliação de projetos de investimentos com opções reais: cálculo do valor da opção de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Dissertação Mestrado – PUC-Rio (CDD: 658)
- Merton, R.C., 1978. Theory of Rational Option Pricing. *Bell Journal of Economics and Management Science* 4:141, 1973; W.F. Sharpe, Investments. Prentice Hall, 1978.
- Miller, L. T.; PARK, C. S., 2002. Decision making under uncertainty – Real options to the rescue? *The Engineering Economist* v. 47 n.2, 2002.
- Myers, S.C., 1977., Determinants of Corporate Borrowing,” *Journal of Financial Economics* 5:147, 1977.14.
- Noronha, J. C. C., 2012. Investimentos em Distribuição de Energia Elétrica sob Incerteza Regulatória utilizando Opções Reais. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Itajubá.
- Pindyck, N.S., 1988<sup>a</sup>. Irreversible Investment, Capacity Choice and the Value of the Firm, *American Economic Review* 79:969.
- Porter, M. P., M., 1992. Capital Disadvantage: America’s Failing Capital Investment System. *Harvard Business Review*, Sept.–Oct. 65, 1; C.Y.
- Sharp, William F.; Alexander, Gordon J.; BAILEY, Jeffrey V. Investments. 1999. Prentice Hall, v. 1028, p. 19, 1978.
- Souza, A. P., 2017. Aplicação da Teoria de Opções Reais na Análise de Investimento em Geração de Energia Elétrica a partir de Madeira de Eucalipto. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação. PPGEFL.TD-075/2017, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF, 113p.
- Smith, James E.; Nau, Robert F. Valuing risky projects: Option pricing theory and decision analysis. *Management science*, v. 41, n. 5, p. 795-816, 1995.
- Targiel, K. S.2013. Valuation of investment projects in the context of sustainable development: Real option approach. In: *Sustainable Technologies (WCST), 2013 World Congress on. IEEE, 2013. p. 90-94.*
- Teixeira, R.E.B.2017. Avaliação de um projeto de infraestrutura de recarga para carro elétrico utilizando uma modelagem por opções reais, Tese de Doutorado. PUC-Rio. 2017.
- Trigeorgis, L.,1996. *Real Options-Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*. MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
- Trigeorgis, Lenos. Multi-stage real options: The cases of information technology infrastructure and international bank expansion. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, v. 38, n. 3, p. 675-692, 1998.
- Trzaskalik, T.,1988. *Multiobjective Analysis in Dynamic Environment*, Publisher of The Karol Adamiecki University of Economics in Katowice, Katowice 1988.
- Kester, W.C., 1978. Today’s Options for Tomorrow’s Growth. *Harvard Business Review*, March–April 18, 1984. W.F.

## **EVALUATION OF RENEWABLE ENERGY PROJECTS USING REAL OPTIONS THEORY (TOR)**

**Abstract.** *The Theory of Real Options-TOR is a modern approach to the theme of capital investment. The TOR adds to the traditional methodologies by considering the value of the uncertainty and managerial flexibility in the pursuit of the expected result of the investment. Discounted cash flow methods and sensitivity analysis are not sufficient to capture the value associated with the flexibility for treat only of cash flows, discounted at a constant rate, considering the risk during the life of the project. The objective of this article is to analyze the suitability of TOR for analyses of projects on themes considered of relative risk and uncertainty in the investment. A review of the application of TOR in the field of energy generation from renewable sources in Brazil, throughout this decade, will be discussed. Particularly, solar photovoltaic generation will be emphasized. The article introduces the types of studies, applied methodologies and findings obtained in selected major works. Specific aim of this article is to present the TOR as a proposed investment analysis tool, adding value to the investor's decision, for the implementation of solar photovoltaic plants. The results show the usefulness of the methodology of TOR as a suitable estimation of economic value for solar photovoltaic generation projects, identifying proper time of investment decisions. The feasibility of TOR, in the generation of solar electricity, will be utilized in large projects (~ 30MW) currently taking place in the northeast of Brazil.*

**Key words:** *Investments in Solar Energy, the theory of real options, Binomial Model.*