

## **GRUPO DE ESTUDO COMERCIALIZAÇÃO, ECONOMIA E REGULAÇÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCR**

# **ANÁLISE DE OPÇÕES REAIS PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO NORDESTE DO BRASIL: QUANTIFICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS E TIMING DAS DECISÕES**

Eduardo Sodré<sup>1</sup>, Antonio Perrelli<sup>2</sup>, Luana Gaspar<sup>3</sup>

1 - Escola Politécnica de Pernambuco (POLI), Universidade de Pernambuco (UPE)

2 – Eletrobras Chesf, 3 – PSR Energy Consulting

### **RESUMO**

Com o avanço dos compromissos globais de descarbonização, o hidrogênio verde produzido com eletricidade renovável de baixo custo, passou a atrair atenção de grandes investidores. A União Europeia tem se destacado com políticas como o CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) e os regramentos dos RFNBOs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin), que visam aplicar taxas de carbono equivalentes aos produtos importados, promovendo práticas industriais mais limpas em escala global. Nesse contexto, o Nordeste do Brasil se destaca como uma região estratégica para a produção de hidrogênio verde. A região possui a maior participação de energia renovável no país, superando facilmente o critério europeu de 90%, o que favorece tanto a exportação de hidrogênio quanto a descarbonização dos produtos brasileiros destinados à Europa. Nesse cenário incerto, a Análise de Opções Reais (ROA – Real Options Analysis) torna-se uma ferramenta essencial, pois ela permite quantificar opções estratégicas em ambientes voláteis, oferecendo flexibilidade para decidir quando investir, expandir ou recuar, à medida que o futuro se torna mais previsível. Este trabalho aplica a Análise de Opções Reais à produção de hidrogênio verde no nordeste do Brasil, demonstrando que a “OR de Escala” juntamente com a “OR de Aprendizagem”, é a análise mais adequada para a quantificação das estratégias e o timing das decisões para produção de hidrogênio verde no Nordeste do Brasil.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Hidrogênio Verde; Nordeste; Opções Reais

## **1. INTRODUÇÃO**

Considerando-se o futuro energético mundial, o hidrogênio verde é um elemento-chave para alcançar emissões net-zero da indústria pesada e do setor de transportes, principalmente nos países europeus. Com o avanço dos compromissos governamentais de descarbonização ao redor do mundo, o hidrogênio verde com base em eletricidade renovável de baixo custo começou a atrair atenção de grandes grupos investidores.

Notadamente, a Europa instituiu o Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) que é uma iniciativa política projetada para garantir que os bens importados para a UE (União Europeia) estejam sujeitos a uma taxa de carbono equivalente ao imposto de carbono que existe sobre os produtos fabricados na Europa, nivelando assim o campo de jogo para as indústrias da UE e encorajando práticas de produção mais limpas em todo o mundo. Vale ressaltar que Europa institui também o regramento dos RFNBOs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) no ano de 2023 através dos Delegated Acts 2023/1184 e 2023/1185. Os RFNBOs referem-se aos combustíveis (carriers de energia) produzidos a partir de fontes de energia renováveis, mas não derivados de materiais biológicos.

Neste cenário de transição energética mundial, o Brasil se posiciona de forma favorável para produção de hidrogênio renovável, pois a região Nordeste possui os melhores índices de irradiação e de ventos do mundo, podendo viabilizar o hidrogênio na pauta de exportações brasileiras nos próximos anos, e também viabilizar a descarbonização dos produtos brasileiros exportados para a Europa.

Recentemente o Governo Brasileiro aprovou as Leis Nº 14.948/2024 e Nº 14.990/2024 estabelecendo o Marco Legal do Hidrogênio. Neste sentido as Leis aprovadas apresentam os seguintes pontos mais importantes: a) Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC) com créditos fiscais de 18 bilhões de reais a serem concedidos através de um procedimento concorrencial; b) estabelecimento do Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH2); e c) o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro);

Com todo esse novo nicho de negócios para o setor de energia, os responsáveis pelas decisões corporativas enfrentam desafios crescentes. A análise financeira dos novos negócios passa a se basear menos nos fundamentos tradicionais e mais nas expectativas em relação ao futuro. Quanto mais incerto esse futuro, mais as técnicas tradicionais de análise financeira tornam-se insuficientes (mas não dispensáveis). Esse cenário de grandes incertezas em relação ao futuro e a um mercado de grande concorrência internacional são as melhores condições para a aplicação da Análise de Opções Reais (ROA – Real Options Analysis).

A ROA não é uma substituição às técnicas tradicionais de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) determinístico e/ou estocástico, mas antes, é sim uma complementação dessas técnicas. De forma resumida pode-se dizer que a ROA considera as opções estratégicas criadas por determinados projetos em situações de incerteza, além da flexibilidade gerencial em executar ou desistir dessas opções em momentos específicos, à medida que a incerteza se torna mais clara com o tempo. Pode-se tentar também explicar de forma resumida a ROA como uma quantificação das estratégias empresariais. Quando essas estratégias são quantificadas a empresa tem dois ganhos: 1) dissemina-se de forma organizada o conhecimento estratégico dentro da empresa; e 2) registra-se de forma racional a experiência dos altos administradores na gestão de projetos altamente estratégicos em ambientes incertos. Ou seja, muito mais do que uma análise técnica sofisticada, a ROA é antes de tudo, uma tentativa de organização quantitativa e racional das estratégias empresariais em novos ambientes de negócios com alta incerteza.

Vale ressaltar que vários setores da economia no Brasil e no mundo já utilizam regularmente a ROA. Entre esses casos podem-se citar investimentos em TI para o desenvolvimento de um novo software, definição de prioridades para estratégias de e-commerce, desenvolvimento e pesquisa na indústria farmacêutica e na indústria de exploração de petróleo e gás, valoração de startups na Internet, etc [1, 2, 3].

Uma das melhores definições do que na verdade consiste a ROA, é a definição do Professor Johnathan Mun [1].

*“The new economy provides a challenge for the corporate decision-maker. Corporate valuation may no longer depend on traditional fundamentals but rather on future expectations. Investment strategies with high risks and uncertainty or irreversible corporate decisions coupled with managerial flexibility provide the best candidates for real options. [...] **real options analysis is indeed a new way of thinking rather than simply the application of advanced analytical procedures.**” [1].*

Deve-se ressaltar que esta definição foi escrita há 20 anos atrás, quando muitos setores econômicos estavam sofrendo suas dores com o crescimento da competição internacional advinda da globalização mundial. É claro que os analistas financeiros dos setores de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil nunca tiveram a necessidade de adotar a ROA em suas análises. São setores que não justificam o tempo e a energia gastos com este tipo de análise, visto que as incertezas são facilmente tratáveis dentro do escopo da metodologia da Teoria do Portfólio Moderno e visto também que não sofrem forte concorrência internacional. O que não é o caso do setor econômico de produção de H<sub>2</sub>.

Tendo sido apresentados os argumentos de que a ROA não é uma substituição às técnicas tradicionais de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) e à Teoria do Portfólio Moderna, mas sim uma extensão destas para cenários de mais alta complexidade. E tendo sido apresentada também a definição de que a ROA é na verdade uma nova maneira de pensar e quantificar a estratégia, em vez de simplesmente a aplicação de procedimentos analíticos avançados, este trabalho tem como objetivo principal exemplificar o uso da ROA na análise de um investimento à produção de hidrogênio renovável no nordeste do Brasil.

O trabalho fará uma Análise de Opções Reais demonstrando que a Opção Real (OR) de Escala juntamente com a OR de Aprendizagem e as OR's de Abandono e Adiamento, levando-se em consideração as ameaças futuras de competidores é a análise mais adequada para a quantificação das estratégias e o timing das decisões para produção de Hidrogênio Renovável no Nordeste do Brasil. Os cálculos da análise de Opções Reais da viabilidade técnico-econômica deste trabalho foram realizada utilizando-se de programação em Python.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2 estão descritas as bases da Análise de Opções Reais com uma revisão bibliográfica das aplicações práticas ao redor do mundo; na seção 3 é apresentado um panorama do futuro da produção de hidrogênio verde no nordeste e do marco regulatório do hidrogênio no Brasil; na seção 4 está apresentada

a formulação do modelo proposto, conjuntamente com o estudo de caso e seus resultados; e a seção 5 apresenta a conclusão do estudo com sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros sobre o tema.

## 2. ANÁLISE DE OPÇÕES REAIS

A Análise de Opções Reais (Real Options Analysis – ROA) é uma abordagem que utiliza conceitos do setor financeiro, especialmente derivativos e opções, para avaliar decisões de investimento em ativos reais, levando-se em conta a flexibilidade gerencial diante das incertezas. Essa abordagem é especialmente útil em setores como o de hidrogênio verde (H2V), que envolvem grande volatilidade de variáveis econômicas, tecnológicas e regulatórias. No contexto do Nordeste do Brasil, a ROA pode oferecer uma estrutura mais adequada para a avaliação de investimentos do que métodos tradicionais como o Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), pois permite considerar a possibilidade de adiar, expandir, redimensionar ou até mesmo abandonar projetos à medida que novas informações se tornam disponíveis.

A capacidade das organizações em inovar ou promover sua expansão está diretamente associada à implementação de novos projetos de investimento. De forma geral, esses projetos são submetidos a um processo de análise de viabilidade de investimento, cujo objetivo principal é mensurar sua viabilidade tecno-econômica e sua rentabilidade esperada. As empresas têm por objetivo aumentar o valor do capital investido sem perder de vista os riscos envolvidos advindos dos novos investimentos e eventuais fracassos na execução dessas iniciativas. A ocorrência de equívocos durante o processo de análise de viabilidade e durante o processo de operação e expansão pode resultar em perdas expressivas e, em casos extremos, comprometer a continuidade operacional da organização.

Dentre os métodos clássicos de análise de investimentos, destacam-se o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR), os quais buscam identificar os projetos que geram valor para a empresa com base em critérios financeiros previamente estabelecidos. No entanto, tais modelos partem da premissa de que as condições iniciais dos projetos permanecem inalteradas ao longo de seu ciclo de vida. Essa limitação motivou o surgimento da Análise das Opções Reais, que introduz maior flexibilidade à análise ao incorporar elementos estocásticos e adaptativos, condizentes com as incertezas e as mudanças características do ambiente empresarial.

A Análise de Opções Reais permite, por exemplo, avaliar a vantagem de adiar um investimento até que as condições de mercado estejam mais claras; a possibilidade de iniciar o projeto em escala reduzida e expandi-lo com o tempo; ou ainda a decisão de abandonar um projeto, caso o cenário se torne economicamente inviável. Também permite simular mudanças tecnológicas ao longo do tempo ou a entrada em novos mercados a partir da infraestrutura instalada. Para isso, utilizam-se modelos financeiros como o Black-Scholes adaptado, árvores binomiais para decisões sequenciais, simulações de Monte Carlo combinadas com árvores de decisão, e processos estocásticos para modelar a evolução de variáveis como o preço da energia ou do carbono [1, 2].

A Figura 1 apresenta a ideia básica de para que casos de análise de investimentos é importante a abordagem das Opções Reais.

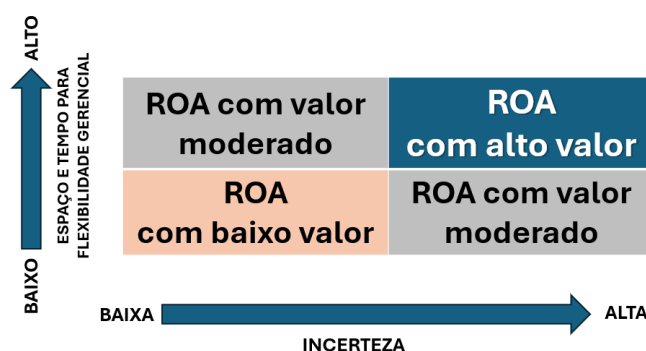
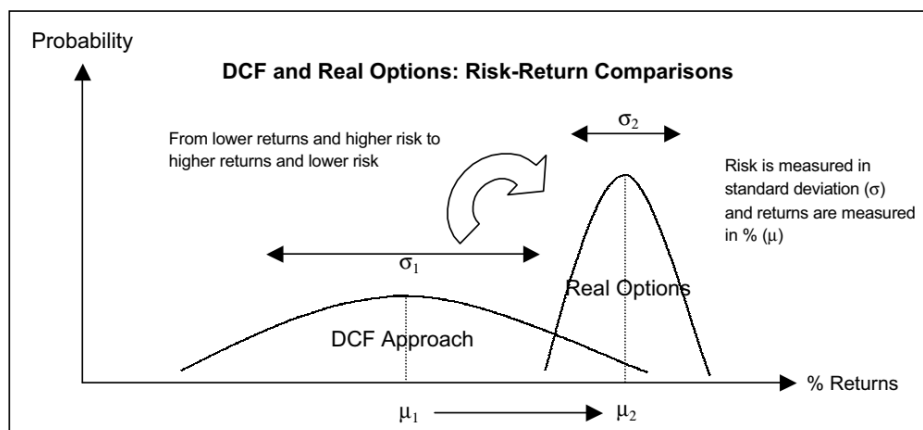


Figura 1 - Valor da ROA: Cenários de Incerteza e Capacidade de Reagir. Baseado em [2].

O problema da ROA se assemelha a um modelo de otimização dinâmica, onde a **função objetivo** é maximizar o valor presente líquido (VPL). As **variáveis de controle** são: as opções reais disponíveis (flexibilidades gerenciais), que determinam quando e como agir. Como em todo problema de otimização existem as **restrições** (físicas (recursos), regulatórias, ambientais e éticas) e as **incertezas**. Em essência, a análise de OR estrutura-se como um processo decisório que equilibra oportunidades de criação de valor com adversidades imprevisíveis, analogamente a outros problemas de otimização sob incerteza [2].

A Figura 2 apresenta de forma didática a vantagem conceitual do uso da Análise de Opções Reais (Real Options Analysis – ROA) em comparação com o método tradicional de Fluxo de Caixa Descontado (FCD) na avaliação de projetos sob incerteza — como é o caso de uma planta de hidrogênio verde.



**Figura 2. - Análise de Opções Reais versus Fluxo de Caixa Descontado Estocástico. Baseado em [1].**

No eixo horizontal da Figura 2 tem-se os retornos esperados (%Returns), representados por  $\mu$  ( $\mu_i$ ), enquanto o eixo vertical mostra a probabilidade desses retornos ocorrerem. O risco é representado pelo desvio padrão dos retornos, simbolizado por  $\sigma$  (sigma). Quanto maior o  $\sigma$ , maior a incerteza ou variabilidade dos resultados possíveis. O gráfico apresenta duas distribuições de probabilidade. A primeira, chamada “DCF Approach”, está centrada em um retorno esperado mais baixo ( $\mu_1$ ) e tem uma forma mais espalhada, indicando maior risco ( $\sigma_1$ ). Isso reflete o funcionamento típico do método de FCD estocástico. O método FCD estocástico não considera a possibilidade de adaptação ou mudanças na estratégia ao longo do tempo. Como consequência, o FCD pode subestimar o valor de projetos em ambientes incertos e superestimar os riscos envolvidos.

A segunda distribuição, chamada “Real Options”, está deslocada para a direita, com retorno esperado mais alto ( $\mu_2$ ) e menor dispersão, ou seja, menor risco ( $\sigma_2$ ). Isso representa o valor da flexibilidade gerencial, ou seja, a capacidade de tomar decisões ao longo do tempo conforme as incertezas são melhor entendidas e “resolvidas”. A ROA leva em conta que os gestores podem, por exemplo, adiar um investimento, expandir a produção, se a demanda aumentar ou trocar de tecnologia se os preços caírem. Essa visão dinâmica do investimento resulta em maior valor estimado e menor risco percebido.

A seta entre as duas curvas indica essa mudança conceitual: ao passar do FCD estocástico para as Opções Reais, sai-se de um cenário de retornos mais baixos e riscos mais altos para outro de retornos mais altos e riscos mais baixos. Isso ocorre porque se passa a considerar as opções estratégicas disponíveis no futuro, e não apenas um caminho fixo e irreversível.

Essa abordagem é especialmente relevante para análise de projetos de hidrogênio verde, pois estes enfrentam diversas incertezas — como preço da energia elétrica, demanda futura, políticas de incentivo e precificação do carbono. A análise por Opções Reais permite capturar o valor estratégico de decisões como esperar, expandir ou até abandonar o projeto, conforme o cenário evolui. Assim, as decisões de investimento se tornam mais robustas e adaptáveis.

As Opções Reais normalmente mais utilizadas estão apresentadas na Tabela 1 [1, 2].

**Tabela 1 – Opções Reais mais comuns**

| Tipo                     | Definição                                                                   | Exemplo                                                              |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Opção de Adiar</b>    | Escolha de adiar um investimento até obter mais informações.                | Uma mineradora aguarda o aumento do preço do metal antes de extrair. |
| <b>Opção de Expansão</b> | Capacidade de ampliar o investimento se as condições forem favoráveis.      | Uma startup de tecnologia aumenta a produção se a demanda crescer.   |
| <b>Opção de Abandono</b> | Direito de encerrar um projeto antecipadamente para reduzir perdas.         | Um poço de petróleo é fechado se os preços caírem demais.            |
| <b>Opção de Troca</b>    | Possibilidade de alterar insumos, produtos ou operações conforme o mercado. | Uma fábrica troca carvão por energia solar se os custos mudarem.     |

A BP, uma empresa multinacional britânica de petróleo e gás com sede em Londres, pode ser tomada como exemplo para exemplificar de forma clara os benefícios do “*real-options thinking*”. Entre 1990 e 1996, a BP aumentou seu valor de mercado de US\$ 18 bilhões para US\$ 30 bilhões, representando um retorno total aos acionistas de 167%, em um setor maduro e em um cenário de queda nos tamanhos dos reservatórios e no aumento da volatilidade nos preços do petróleo e do gás, cenários este bem diferente dos tempos de expansão das décadas de 70 e início dos 80’s. A BP seguiu o manual da ROA para garantir um alto retorno de investimento e, ao mesmo tempo, se proteger contra os riscos de um mercado incerto e ultra competitivo [3].

Outra referência bastante interessante em relação à aplicação prática da ROA é o estudo [4], que desenvolve uma estrutura integrada que combina Programação Linear Inteira Mista (MILP) e Análise de Opções Reais (ROA) para otimizar a infraestrutura de transporte de hidrogênio no estado americano do Wyoming, considerando a incerteza da demanda. A análise avalia novos gasodutos de hidrogênio, gasodutos reutilizados de gás natural e transporte por caminhões, demonstrando que gasodutos de grande diâmetro são mais eficazes para longas distâncias, enquanto caminhões são mais adequados para rotas curtas. Gasodutos reutilizados oferecem benefícios intermediários, mas enfrentam limitações de capacidade. A ROA revela que uma estratégia de investimento em fases — começando com gasodutos menores (36 polegadas) e incorporando caminhões e infraestrutura reutilizada conforme a demanda cresce — proporciona flexibilidade e eficiência de custo ideais. Essa abordagem gerencia efetivamente a incerteza da demanda em cenários de baixo crescimento e alto crescimento, minimizando riscos financeiros. A metodologia integrada MILP-ROA oferece a formuladores de políticas e investidores uma ferramenta robusta para tomada de decisão no desenvolvimento de infraestrutura de hidrogênio adaptável, crucial para a transição a sistemas energéticos sustentáveis. O estudo de caso de Wyoming destaca como o planejamento estratégico de infraestrutura usando ROA pode equilibrar viabilidade econômica com a necessidade de redes de hidrogênio escaláveis e resilientes em mercados emergentes.

O trabalho de Fabianek, Glensk e Madlener [5] analisa a viabilidade econômica de investir em usinas de energia renovável para hidrogênio (Power-to-Hydrogen, P2H) na Alemanha e na Califórnia, utilizando a Análise de Opções Reais. O foco da análise é a mistura de hidrogênio verde nas redes de gás natural, tratando os preços do gás natural como uma incerteza-chave. Os resultados mostram que as usinas P2H com eletrolisadores PEM (Proton Exchange Membrane) atualmente não são rentáveis em ambas as regiões. O estudo conclui que medidas políticas mais robustas — como impostos mais altos sobre carbono, obrigatoriedade de mistura de hidrogênio ou tarifas feed-in — são essenciais para tornar a produção de hidrogênio verde economicamente atrativa. Estratégias de investimento sequencial oferecem flexibilidade em mercados incertos, mas a rentabilidade depende de melhorias significativas nas condições regulatórias e de mercado.

No caso específico do Nordeste brasileiro, onde há um alinhamento entre potencial de eletricidade renovável, infraestrutura e interesse governamental, a ROA surge como uma ferramenta essencial para estruturar decisões de investimento com base em uma visão mais dinâmica, estratégica e realista.

É importante lembrar aqui que na gestão da estratégia empresarial várias companhias já possuem uma “expertise” bastante consolidada. Mas normalmente isso está nas “cabeças” de alguns poucos especialistas da Alta Administração. Se a estratégia é colocada no papel e quantificada, através da metodologia ROA, todo o corpo funcional da empresa, e não somente o alto escalão começa a adquirir o conhecimento da gestão estratégica. Um ganho muito importante de se utilizar ROA é exatamente criar muitas mais cabeças pensantes dentro da empresa [6].

### 3. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE E MARCO LEGAL NO BRASIL

O setor energético mundial está passando por uma transformação tecnológica, tornando-se mais sustentável e limpo. O hidrogênio verde por ser um “carrier” de energia muito promissor e sustentável, está atraindo atenção significativa à medida que o mundo busca fazer a transição para uma economia de baixo carbono. Produzido por meio da eletrólise da água usando fontes de energia renováveis, como energia solar ou eólica, o hidrogênio verde tem o potencial de revolucionar várias indústrias, incluindo setores, tais como, fertilizantes, siderurgia, fabricação de cimento e o setor de transportes.

A produção de hidrogênio verde depende diretamente da eletrólise da água com uso de energia renovável, e o Nordeste brasileiro se destaca nesse cenário por sua abundância em recursos eólicos e solares, combinada com uma boa infraestrutura portuária, como nos portos de Pecém (CE), Suape (PE). Além disso, a região tem atraído projetos-piloto e acordos de cooperação internacional, o que reforça seu potencial estratégico. Entretanto, os investimentos ainda enfrentam diversas incertezas, como os preços futuros da energia elétrica, o custo e a maturidade das tecnologias de

eletrólise, a demanda internacional por hidrogênio ou seus derivados (como amônia ou metanol verdes), as políticas de precificação de carbono e os incentivos governamentais.

Por exemplo, na produção de aço, o hidrogênio pode substituir o carvão de coque para a redução do minério de ferro, eliminando efetivamente as emissões de CO<sub>2</sub> do processo. No Setor de Transporte: o hidrogênio verde pode ser usado como combustível em veículos movidos a célula de combustível, incluindo não apenas carros, mas também ônibus, caminhões, navios e até aviões, principalmente em países que não possuem matriz elétrica renovável. No setor de construção o hidrogênio verde pode ser misturado com gás natural e usado para aquecer edifícios residenciais e comerciais, reduzindo a pegada de carbono. E no setor agrícola o hidrogênio pode ser usado para produzir amônia, que é um ingrediente chave em muitos fertilizantes, reduzindo assim o impacto ambiental da produção agrícola mundial [7].

Vários países assumiram compromissos substanciais para o avanço da tecnologia de hidrogênio verde, incorporando-a em suas políticas energéticas e estabelecendo metas ambiciosas para a produção e utilização de hidrogênio. Por exemplo, a União Europeia traçou uma ampla estratégia de hidrogênio, com o objetivo de instalar 40 gigawatts (GW) de capacidade de eletrolisadores até 2030. Da mesma forma, países como Austrália, Japão e Coreia do Sul introduziram “roadmaps” de hidrogênio, prometendo apoio para o desenvolvimento de uma economia de hidrogênio [8].

No mercado de consumo de hidrogênio verde no Brasil, há expectativas de que nas próximas décadas a demanda seja crescente e até supere o volume exportado, com destaque para a descarbonização do setor de transportes rodoviários, metalurgia, aplicações de aquecimento industrial e fertilizantes. Estimativas apontam para um mercado brasileiro de até 20 bilhões de dólares por ano em 2040, dos quais apenas 6 bilhões seriam oriundos da exportação [8].

O panorama em evolução dos aspectos regulatórios sobre o H<sub>2</sub> no Brasil reflete o compromisso do país com a transição energética sustentável, equilibrando o crescimento econômico com a responsabilidade ambiental. Uma estrutura regulatória clara e estruturada é essencial para fomentar investimentos e inovação no setor energético. Neste contexto, o Brasil está desenvolvendo políticas e regulamentos que visam aumentar a eficiência do mercado e promover soluções de energia limpa.

A Lei N.º 14.948, promulgada em 2 de agosto de 2024, estabelece o Marco Regulatório do Hidrogênio no Brasil e traz como pontos principais 3 definições legais para o Brasil em relação ao Hidrogênio: a) Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (HBEC); b) Hidrogênio Renovável; e c) Hidrogênio Verde. Para os fins desta Lei e sua regulamentação, considera-se hidrogênio de baixa emissão de carbono aquele que possui emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa), de acordo com análise do ciclo de vida, com valor inicial menor ou igual a 7 kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub> (sete quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de hidrogênio produzido). Deve-se enfatizar que as legislações europeias, através dos Atos Delegados 2023/1184 e 2023/1185, descrevem regras detalhadas sobre a definição de hidrogênio renovável para garantir que o hidrogênio seja produzido a partir de fontes de energia renováveis e seja de origem não biológica, com uma pegada de carbono abaixo de 3 kgCO<sub>2</sub>e/kgH<sub>2</sub>. No Brasil, o limite máximo permitido é de 7 kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub>, o que está em contraste direto com as regulamentações internacionais. O valor mais alto estabelecido no Brasil visa apoiar a produção de hidrogênio através do gás natural e da matéria biológica.

O Hidrogênio Renovável é um subconjunto dentro do HBEC, incluindo hidrogênio produzido a partir de biomassa, etanol e outros biocombustíveis, bem como hidrogênio eletrolítico, produzido por eletrólise da água, utilizando energias renováveis, como solar, eólica, hidráulica, biomassa, etanol, biogás, biometano, gases de aterro e geotérmica. O que está em franca contradição com a definição Europeia dos RFNBO's (Renewable Fuels of Non-Biological Origin). O Hidrogênio Verde é o hidrogênio produzido por eletrólise da água, utilizando fontes de energia renováveis, como aquelas previstas na definição de hidrogênio renovável.

A Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024, também estabeleceu o Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio (SBCH<sub>2</sub>) e exigiu que a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) forneça mecanismos para interoperabilidade e harmonização com padrões internacionais de certificação de hidrogênio. Podendo também a ANP estabelecer regras para o reconhecimento de certificados para hidrogênio e seus derivados que estejam sujeitos à importação. É importante lembrar que, sob as regras europeias, um produtor brasileiro de H<sub>2</sub> não está autorizado a reivindicar emissões negativas comprando créditos de carbono no mercado regulado brasileiro.

A LEI nº 14.948, de 2 de agosto de 2024, também estabeleceu o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro), com o objetivo de promover o desenvolvimento tecnológico e industrial, aumentar a competitividade e agregar valor às cadeias de produção nacionais relacionadas ao hidrogênio de baixa emissão de carbono. Entre os principais benefícios do Rehidro, destaca-se a suspensão de alguns impostos e taxas. Esses incentivos serão válidos por cinco anos a partir de 1º de janeiro de 2025. Além dos produtores de HBEC, empresas que operam em atividades como embalagem, armazenamento, transporte, distribuição ou comercialização de hidrogênio

de baixa emissão de carbono, bem como aquelas dedicadas à geração de eletricidade renovável ou à produção de biocombustíveis (etanol, biogás ou biometano), podem qualificar-se conjuntamente para o Rehidro. Toda a cadeia produtiva de H<sub>2</sub>, desde origens biológicas até gás natural, pode receber incentivos fiscais e tributários no Brasil.

Há outra Lei importante para o Marco Regulatório do Hidrogênio no Brasil. Trata-se da Lei nº 14.990, de 27 de setembro de 2024. Ela estabelece o PHBC (Programa de Hidrogênio de Baixo Carbono), que visa conceder crédito fiscal na produção e consumo de hidrogênio de baixa emissão de carbono ( $\leq 7 \text{ kgCO}_2\text{eq/kgH}_2$ ) e seus derivados produzidos em território nacional. O valor do crédito fiscal e as empresas beneficiárias serão decididos por meio de um processo competitivo. O procedimento competitivo observará, no mínimo, como critério para julgamento das propostas, o menor valor de crédito por unidade de medida do produto. Este procedimento competitivo pode prever também, entre outras hipóteses, prioridade a projetos que: a) prevejam a menor intensidade de emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa) do hidrogênio produzido ou consumido; e b) tenham maior potencial de adensamento da cadeia de valor nacional.

O crédito fiscal total que pode ser concedido entre 2028 e 2032 será de R\$ 18,3 bilhões. Os limites anuais de crédito serão: R\$ 1,7 bilhão em 2028; R\$ 2,9 bilhões em 2029; R\$ 4,2 bilhões em 2030; R\$ 4,5 bilhões em 2031; e R\$ 5 bilhões em 2032. Se o dinheiro não for utilizado em um desses anos, poderá ser realocado nos anos seguintes até 2032. O Governo definirá o montante de créditos fiscais que podem ser concedidos e esses valores devem estar previstos no projeto de lei orçamentária anual enviado pelo Poder Executivo federal ao Congresso Nacional.

#### 4. MODELO PROPOSTO E ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste trabalho resume-se, de forma simplificada, numa planta de produção de H<sub>2</sub> Verde localizada no porto de SUAPE em Pernambuco com o objetivo de exportação para a Europa do H<sub>2</sub>V e também para uso interno no Brasil na siderurgia e na conversão em amônia. Os investimentos previstos totalizam 1 bilhão de dólares (USD) e podem acontecer de forma escalonada. O problema é definir esse escalonamento na quantidade e no tempo, ou seja, o investidor começa com uma planta de quantos MW e em que momento? E depois desse primeiro investimento como essa planta vai crescer?

Claro está que as respostas para estas questões vão depender de como a demanda por H<sub>2</sub> Verde vai se desenrolar no mundo e no Brasil. Todavia caso o investidor possa se preparar antecipadamente com um plano estratégico atualizado em base mensal, com quantificações de VPL (Valor Presente Líquido) bastante bem definidas, todo o processo de tomada de decisões se torna muito mais assertivo e a transmissão do conhecimento dentro da empresa também é favorecida.

O estudo de caso trata de duas alternativas: a) Alternativa-1, com análise de FCD estocástico; e b) Alternativa-2 com Análise de Opções Reais.

##### **Alternativa-1**

A ideia da **Alternativa-1** é começar já operando uma planta grande em 2029, dado que o investidor vai ter que tomar a decisão de investimento/FID (Final Investment Decision) em 2026. O FID assinala a passagem da etapa de planejamento e análise de riscos para a implementação prática, implicando a alocação substancial de recursos financeiros e o início das fases de construção e operação. E após o FID, dadas as circunstâncias atuais dos fornecedores de eletrolizadores mundiais, é razoável supor que toda a planta somente estará pronta para operação em janeiro de 2029.

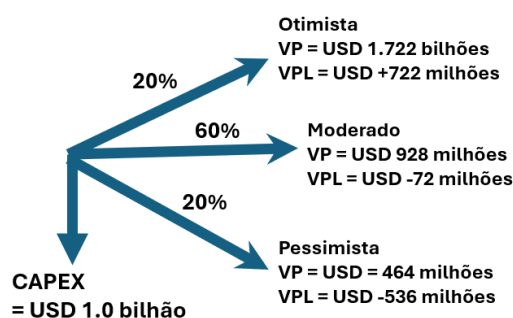
Premissas para o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) para **Alternativa-1** (baseado em [9]):

- Potência do Eletrolizador: 500 MW
- Capacidade de Produção: 87600 tonnes H<sub>2</sub> /ano (assumindo 24 horas de operação e 50 kWh/kg de eficiência)
- Investimento (CAPEX): USD 1 bilhão
- Ano inicial de produção: 2029
- Vida útil do projeto: 20 anos
- Receitas anuais: USD 150 milhões (1.7 USD/H<sub>2</sub>kg)
- Custos operacionais anuais: USD 10 milhões
- Taxa de desconto (WACC): 14% a.a.
- Valor residual: desprezado

Para as suposições acima o VPL para **Alternativa-1** é: USD -72 milhões, ou seja, negativo. Para as premissas acima a decisão agora em 2026 é não realizar o investimento.

Mas pode-se considerar então a modelagem estocástica de algumas incertezas trabalhando-as através dos 3 seguintes cenários: 1) Cenário Otimista, com receitas anuais de USD 270 milhões e com probabilidade de 20%; 2) Cenário

Moderado com receitas anuais de USD 150 milhões e com probabilidade de 60%; e 3) Cenário Pessimista com receitas anuais de USD 80 milhões e com probabilidade de 20%. A Figura 3 apresenta os dados dessa avaliação estocástica de cenários.



**Figura 3 – Alternativa-1: Cenários Otimista, Moderado e Pessimista.**

Considerando-se estes 3 Cenários (Figura 3) pode-se aferir que não é viável a empresa implantar a produção de hidrogênio, pois o Valor Esperado do VPL é igual a  $VE[VPL] = (920 \cdot 0.2) + (-72 \cdot 0.6) + (-536 \cdot 0.2) = \text{USD } -6.5 \text{ milhões}$ .

Assim, pela análise tradicional do FCD estocástico, a decisão da empresa seria de não investir na planta de produção de hidrogênio. Mas deve-se considerar a opção de começar uma planta de produção pequena com algum offtaker e depois, caso o mercado de H2V amadureça, pode-se rapidamente fazer uma expansão da planta. Ou seja, existe uma “OR de Aprendizagem” com expansão sequencial que deve ser quantificada. Os cálculos com essa Opção Real estão apresentados na **Alternativa-2** abaixo.

## Alternativa-2

A ideia da **Alternativa-2** é começar operando uma planta pequena em 2029 com a opção de crescimento nos anos vindouros até o limite da absorção do H2V pelos mercados europeu e/ou internos.

Premissas para o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) para **Alternativa-2**:

- Potência do Eletrolizador: 100 MW
- Capacidade de Produção: 17520 tonnes H2 /ano (assumindo 24 horas de operação e 50 kWh/kg de eficiência)
- Investimento (CAPEX): USD 200 milhões
- Ano inicial de produção: 2029
- Vida útil do projeto: 20 anos
- Receitas iniciais anuais: USD 30 milhões (1.7 USD/H2kg)
- Custos operacionais anuais: USD 2 milhões
- Taxa de desconto (WACC): 14% a.a.
- Valor residual: desprezado
- Expansão da Planta em 2033 para mais 200 MW, totalizando 300 MW; e considerando que as receitas anuais passarão a ser de USD 130 milhões a partir de janeiro de 2034 até o final de 2053.

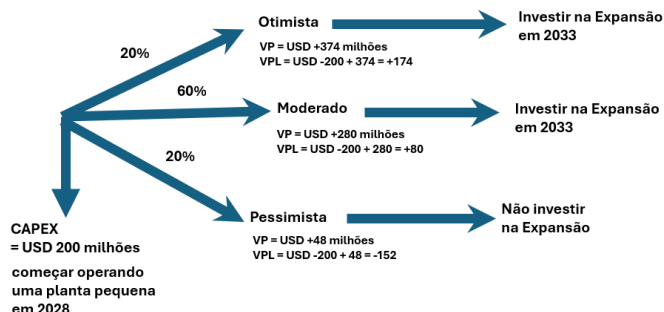
Em relação à uma solução para que a empresa possa fazer expansões rápidas da planta de produção de hidrogênio, sugere-se criar uma opção estratégica com o fornecedor do eletrolizador. Em vez de ter que esperar mais de três anos até que um novo eletrolizador possa ser adquirido, sem saber como a demanda vai se desenvolver nesse intervalo, a empresa pode criar um contrato específico com a cláusula de taxa de penalidade de saída (penalty exit fee). Ou seja, a empresa decide pagar um determinado valor ao fabricante para poder ter a opção de receber o eletrolizador num prazo de 12 meses a partir do exercício da opção. A empresa não precisa entrar numa lista de clientes comuns e ficar esperando três anos para receber o eletrolizador. A empresa passa a ser incluída numa lista de clientes preferenciais do fornecedor do eletrolizador e se não precisar do equipamento no período de quatro anos, ela tem que pagar uma multa por abandono, equivalente a uma determinada porcentagem do valor do eletrolizador. Essa multa por abandono (penalty exit fee) pode também ser escalonada com diferentes valores de abandono em diferentes períodos de tempo.

Em essência, foi criada uma “OR de Abandono” no contrato de compra/venda com o fornecedor do eletrolizador, pela qual sua empresa tem o direito de não comprar o equipamento caso as circunstâncias sejam desfavoráveis, mas se protegendo para obter o eletrolizador a qualquer momento, caso haja necessidade. O preço do prêmio da opção é o preço da multa por abandono (penalty exit fee). Ao incorporar insights da ROA ao problema, a empresa otimiza a sua estratégia de uma forma clara, objetiva, prática e quantificável.



A ideia da **Alternativa-2** é mostrar que a “OR de Expansão” é válida, pois, embora o Valor Esperado do VPL (VE[VPL]) do primeiro investimento na **Alternativa-2** seja negativo (VPL = USD -14 milhões), haverá uma compensação do investimento opcional na expansão.

Será considerado também na **Alternativa-2** que as incertezas das receitas anuais sejam modeladas através dos 3 seguintes cenários: 1) Cenário Otimista, com receitas anuais de USD 54 milhões e com probabilidade de 20%; 2) Cenário Moderado com receitas anuais de USD 30 milhões e com probabilidade de 60%; e 3) Cenário Pessimista com receitas anuais de USD 16 milhões e com probabilidade de 20%. Conforme Figura 4.



**Figura 4. – Alternativa-2: Cenários Otimista, Moderado e Pessimista; e Decisão de Expansão.**

Para esses 3 cenários da **Alternativa-2** temos os seguintes Valores Presentes (VP): 1) Cenário Otimista com VP = USD 374 milhões; 2) Cenário Moderado com VP = USD 280 milhões; e 3) Cenário Pessimista com VP = USD 48 milhões.

O Valor Esperado do VPL (Valor Presente líquido) da **Alternativa-2**, ou seja, investir numa expansão em 2033 para mais 200 MW, totalizando 300 MW a partir de janeiro de 2034 é calculado então da seguinte forma:

$$VE[VPL] = (174 * 0.2) + (80 * 0.6) + (-152 * 0.2)$$

$$VE[VPL] = USD + 52.4 \text{ milhões}$$

A ideia da “OR de Expansão” é, caso os cenários não se apresentem como “otimistas”, a expansão não é realizada. É fácil ver que o direito de investir na expansão da produção (mas não a obrigação), tem valor positivo, pois o investidor racional somente vai exercer a opção da expansão se for revelado, após o pequeno primeiro investimento, que o VPL é positivo. Pode-se considerar que a “OR de Expansão”, esperando que a evolução do mercado revele mais informações com menos incertezas, é uma “Opção de Aprendizagem”. Os ganhos potenciais de conhecimento podem significar: 1) redução da incerteza nos preços do H2V, energia e câmbio; 2) melhor visibilidade sobre a regulação europeia (CBAM); 3) acesso a tecnologias mais eficientes ou baratas (eletrolise, armazenamento); e 4) aprendizado com projetos-piloto ou plantas menores.

A ROA é uma das mais poderosas abordagens em projetos inovadores como o de hidrogênio verde. Ela representa o ganho potencial de conhecimento (sobre custos, tecnologias, mercado, regulação, etc.) ao esperar antes de tomar decisões cujas reversões sejam muito onerosas.

## 5. CONCLUSÕES

No estudo de caso apresentado, observou-se que a introdução de flexibilidades gerenciais por meio da Análise de Opções Reais (ROA) permite não apenas mitigar riscos, mas também capturar oportunidades estratégicas em projetos de elevada incerteza, como é o caso da produção de hidrogênio verde no Nordeste do Brasil. A comparação entre os cenários de decisão baseados exclusivamente em Fluxo de Caixa Descontado (FCD) estocástico e aqueles que incorporam opções gerenciais — tais como o adiamento do investimento, a expansão escalonada da capacidade produtiva e o abandono mediante condições adversas — revelou que a abordagem tradicional tende a subestimar o valor de projetos inovadores em ambientes voláteis. Em contraste, a ROA permite quantificar o valor da flexibilidade e da aprendizagem ao longo do tempo, tornando possível uma gestão mais robusta e adaptativa.

Nesse contexto, torna-se relevante aprofundar estudos que integrem múltiplas opções reais em cadeias produtivas interligadas, como a do hidrogênio verde associado à produção de amônia e fertilizantes, com vistas a quantificar sinergias e ganhos de coordenação estratégica. Além disso, a incorporação de variáveis regulatórias estocásticas, notadamente aquelas relacionadas ao mecanismo europeu de ajuste de carbono nas fronteiras (CBAM), pode refinar os modelos de avaliação e apoiar decisões mais alinhadas ao ambiente regulatório internacional. A integração da ROA com

modelos de inovação tecnológica também se apresenta promissora, especialmente para capturar os efeitos de novas rotas tecnológicas de eletrólise e armazenamento de hidrogênio, cujo avanço pode alterar significativamente o perfil de risco-retorno dos empreendimentos.

Por fim, destaca-se a necessidade de desenvolver abordagens aplicáveis a estruturas cooperativas de investimento, como consórcios regionais, de modo a permitir a alocação eficiente de opções reais compartilhadas entre agentes distintos. A evolução do marco legal brasileiro sobre o hidrogênio e os incentivos fiscais associados também deve ser tratada como fonte relevante de incerteza e, portanto, incorporada aos modelos de ROA. Esses desdobramentos metodológicos ampliam o potencial da análise estratégica e contribuem para o amadurecimento técnico do setor de hidrogênio verde no Brasil, promovendo uma base mais sólida para a tomada de decisão em um contexto de transição energética global.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] - Johnathan Mun, “Real Options Analysis - Tools and Techniques for Valuing Strategic Investments and Decisions”. Publisher: Wiley; 2nd edition, November 4, 2005.
- [2] - Marco Antonio Guimarães Dias, “Análise de Investimentos com Opções Reais - Teoria e Prática com Aplicações em Petróleo e Outros Setores: Conceitos Básicos e Opções Reais em Tempo Discreto (Volume 1)”, Editora Interciência, 1ª edição, 2014.
- [3] - Keith J. Leslie and Max P. Michaels, “The real power of real options - change the way you create value: The case for applying options thinking to any strategic situation”, McKinsey Quarterly, 1997, Number 3.
- [4] - Saksham Timalisina, Chengyi Zhang, Danish Kumar, and Eugene Holubnyak, “Optimizing hydrogen transportation infrastructure and supply chain under uncertainty: An integrated mixed integer linear programming and real options analysis”, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 111, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.336>
- [5] - Paul Fabianek, Barbara Glensk, and Reinhard Madlener, “A sequential real options analysis for renewable power-to-hydrogen plants for Germany and California”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 192, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114159>
- [6] - Michael A. Hitt, R. Duane Ireland and Robert E. Hoskisson, “Strategic Management: Competitiveness & Globalization: Concepts and Cases”, Cengage Learning, 12th edition, January 14, 2016.
- [7] - IRENA, Green hydrogen for industry: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022.
- [8] - McKinsey & Company, “Green Hydrogen: an opportunity to create sustainable wealth in Brazil and the world”, 2021, Article. Acessado em (<https://www.mckinsey.com/br/en/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo> )
- [9] - Eduardo Sodré, et al., “Análise de Risco da Viabilidade Técnico-Econômica de um Empreendimento de Produção de Hidrogênio Verde no Sistema Nordeste”, XXVII SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 26 a 29 de novembro de 2023 – CICB, Brasília-DF.

## DADOS BIOGRÁFICOS



**Eduardo de Aguiar Sodré** - Tem experiência na área de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Trabalhou na Eletrobrás Chesf e na Neoenergia Pernambuco, tendo enfrentado diversos desafios de engenharia e finanças na área de energias renováveis, regulação da geração e hidrogênio. Realizou também vários trabalhos nas áreas de planejamento da expansão da transmissão e expansão da geração. É professor da POLI - UPE desde 2008. Possui Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande em 2006. Site pessoal: [eduardo-sodre.eng.br](http://eduardo-sodre.eng.br). Site profissional: [arnepy.com](http://arnepy.com).

**Antonio Perrelli** - Economista da Eletrobras Chesf. Especialista em Finanças Corporativas (IBMEC) e Doutor em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial (SENAI CIMATEC) com foco em Plantas Híbridas de Energia. Profissional certificado CNPI (Certificado Nacional do Profissional de Investimentos).

**Luana Gaspar** – Head de Descarbonização na PSR Energy Consulting desde julho de 2020. BSc em Engenharia Química (UFRJ) e MSc em Engenharia Elétrica (PUC-Rio), com experiência profissional em: gerenciamento de projetos no setor de energia; desenvolvimento de planos para a descarbonização industrial e do transporte; análise de mercado para tecnologias de baixo carbono; cálculo de custo de produção de combustíveis renováveis em diferentes regiões do Brasil; projeção de crescimento de demanda elétrica com eletrificação do transporte e da indústria e produção de hidrogênio verde; estudos de sistemas de certificação de hidrogênio e energia elétrica renovável; desenvolvimento de ferramentas analíticas para projeto de produção de hidrogênio verde e de geração de energia heliotérmica; e outros.