Projeto

Apoio à Indústria para Processos de Descarbonização via Hidrogênio de Baixo Carbono

Projeto: Euroclima+ Apoio à Estruturação de Mecanismos para uma Estratégia Industrial de Desenvolvimento Sustentável no Brasil (Ação 6)

Projeto de Pesquisa para

e

Manual do Modelo de Avaliação Técnica e Econômica de Projetos de Produção de Hidrogênio a Partir da Reforma do Etanol

Coordenação:
Eloy Fernandez y Fernandez
Edmar de Almeida

Dezembro de 2025

Sumário

1 Manual de operação 4

2 Premissas 4

2.1 Informações Relevantes sobre os combustíveis utilizados no modelo 4

2.2 Tabela de Fatores de Conversão para Energia 5

2.3 Intensidade de Carbono da Produção do Hidrogênio Musgo 5

2.4 Tabela de constantes dos modelos de vazão de gasodutos 5

2.5 Tabela de propriedades físicas do CO2 5

2.6 Tabela de propriedades físicas de outros componentes 5

3 Premissas de densidade e viscosidade do dióxido de carbono (CO2) 5

4 Dados de Entrada 6

4.1 Tipo de Cálculo do Modelo 6

4.2 Unidade do Preço do Hidrogênio 6

4.3 Vida Útil do Projeto 6

4.4 Imposto de Renda 7

4.5 Remuneração do Capital 7

4.6 Produção de Hidrogênio 7

4.7 CAPEX do Sistema de Reforma a Vapor do Etanol 7

4.8 Custos dos Principais Insumos 8

4.9 OPEX do Sistema de Reforma a Vapor do Etanol 8

4.10 Custo do Carbono 8

4.11 Capacidade de Captura de Carbono 8

4.12 CAPEX do Sistema de Captura de Carbono 9

4.13 OPEX do Sistema de Captura de Carbono 9

4.14 Transporte de CO2 9

4.15 CAPEX do Gasoduto de CO2 10

4.16 OPEX do Gasoduto de CO2 10

4.17 Estocagem de CO2 10

5 Fluxo de caixa 10

6 Resultados 11

1. Manual de operação

Este manual tem o objetivo de auxiliar o usuário na operação do software de avaliação técnico-econômica para simulação do fluxo de caixa de projetos de hidrogênio musgo (H2M), oferecido pela Confederação Nacional da Industria no âmbito do Hidrogênio Sustentável como vetor de descarbonização e desenvolvimento sustentável para a industrial brasileira. Para dúvidas ou sugestões acerca do modelo econômico oferecido, entre em contato com o Instituto de Energia da PUC-Rio através do endereço eletrônico iepuc@puc-rio.br .

O software foi desenvolvido com a premissa de produção para comercialização do hidrogênio musgo, obtido por meio da reforma a vapor do etanol, com a opção de reduzir a pegada de carbono ainda mais através de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS). A partir dos dados de entrada, o software simula, o fluxo de insumos e o fluxo de caixa do projeto de geração de hidrogênio. São apresentados os indicadores: Custo Nivelado do Hidrogênio (também chamado de preço de break-even) e a Intensidade de Carbono do hidrogênio musgo produzido.

Com formato Excel, o software possui 5 páginas: (1) Premissas; (2) Premissas de densidade e viscosidade do dióxido de carbono (CO2) capturado e armazenado; (3) Dados de Entrada; (4) Fluxo de caixa; e (5) Resultados. As informações para realização da simulação são inseridas nas páginas (1) Premissas e (3) Dados de Entrada. Para sinalizar os dados que não devem ser alterados pelo usuário nessas páginas, foi adotado a seguinte código de cor: células com fonte em vermelho não devem ser alteradas pelo usuário, pois contém fórmulas. Além disso, as células nas demais páginas também não devem ser alteradas.

A seguir, são apresentados os aspectos e objetivos de cada página que compõe o software de avaliação econômica para projetos de hidrogênio musgo.

2. Premissas

A página Premissas tem como objetivo apresentar as propriedades físicas e químicas dos combustíveis e dos elementos utilizados na simulação. Ela é composta por seis seções, porém apenas uma delas pode ser editada pelo usuário. Nas demais seções, embora seja possível modificar as células cuja cor da fonte não seja vermelha sem comprometer a funcionalidade do modelo, a alteração dos valores não é recomendada, a menos que haja justificativa técnica e conhecimento prévio sobre o impacto dessas modificações no funcionamento do modelo.

2.1 Informações Relevantes sobre os combustíveis utilizados no modelo

Esta seção é a única que pode ser alterada pelo usuário, caso assim seja desejado. Essa seção apresenta as características dos combustíveis levados em consideração no modelo, tais como: Densidade, Poder calorífico inferior e Intensidade de Carbono.

2.2 Tabela de Fatores de Conversão para Energia

Esta seção apresenta as relações entre as unidades de energia em Joule, Quilowatt-hora, Quilocaloria e BTU.

2.3 Intensidade de Carbono da Produção do Hidrogênio Musgo

Esta seção calcula a intensidade de carbono da produção de hidrogênio musgo com base no consumo específico de etanol e em sua intensidade de carbono, além de considerar a quantidade de emissões evitadas quando aplicado o processo de captura e armazenamento de carbono (CCS).

2.4 Tabela de constantes dos modelos de vazão de gasodutos

Esta seção apresenta as constantes utilizadas nas fórmulas de cálculo de vazão de gasodutos para transporte de CO2, de acordo com os modelos adotados (Panhandle-B e IGT).

2.5 Tabela de propriedades físicas do CO2

Esta seção apresenta as propriedades físicas do CO2, tais como Viscosidade e Densidade na condição de temperatura (31º Celsius) e pressão (74 Bar) de referência, além da massa molar do CO2. Essas informações são utilizadas nas fórmulas de cálculo de vazão de gasodutos para transporte de CO2.

2.6 Tabela de propriedades físicas de outros componentes

Esta seção apresenta as propriedades físicas de outros componentes utilizados no modelo, tais como a constante dos gases ideias, massa molar do ar, constante do ar, temperatura e pressão de referência, entre outros. Essas informações são utilizadas nas fórmulas de cálculo de vazão de gasodutos para transporte de CO2.

3. Premissas de densidade e viscosidade do dióxido de carbono (CO2)

A página Premissas de Densidade e Viscosidade do CO2 apresenta os valores físico-químicos utilizados pelo modelo para estimar o comportamento do dióxido de carbono capturado e destinado ao transporte e armazenamento. Nessa página são disponibilizadas tabelas com a densidade e a viscosidade do CO2 em diferentes condições de temperatura e pressão, permitindo ao modelo representar adequadamente as propriedades do fluido ao longo do sistema de transporte (gasoduto). Esses parâmetros são utilizados automaticamente nos cálculos de escoamento de CO2 e não devem ser alterados pelo usuário.

4. Dados de Entrada

A página Dados de Entrada define a configuração de produção de hidrogênio musgo para a realidade de cada usuário. Ela contém dezessete seções, todas editáveis pelo usuário. A página dispõe de três colunas: (A) nome da variável; (B) valor da variável; e (C) unidade de medida. Depois de preencher os valores na coluna B (exceto as células em vermelho), o usuário deve clicar no botão localizado na célula E1 (escrito "Clique para Calcular") para calcular o break-even do hidrogênio musgo. A seguir, cada uma das etapas é explicada em detalhes.

4.1 Tipo de Cálculo do Modelo

Esta seção define o comportamento geral do modelo. Na linha 3, o usuário deve escolher o tipo de hidrogênio a ser produzido: "Musgo" ou "Musgo com CCS". A seleção de hidrogênio "Musgo" oculta automaticamente todas as linhas relacionadas ao sistema de captura, transporte e estocagem de carbono.

Na linha 4, o usuário seleciona o tipo de cálculo: Análise de Sensibilidade (que varia duas entradas simultaneamente, gerando uma matriz de resultados) ou Cálculo Individual (que realiza apenas uma simulação do custo nivelado do hidrogênio, demostrando a sua composição). Caso seja escolhida a opção Análise de Sensibilidade, o usuário deve preencher as linhas 5 a 12. Nelas são definidas: quais serão as Variáveis 1 e 2 da análise (linhas 5 e 9, respectivamente); o Valor Inicial (primeiro valor testado); o Valor Final (último valor testado); e o Espaçamento (incremento aplicado sucessivamente a partir do valor inicial para gerar os valores intermediários).

4.2 Unidade do Preço do Hidrogênio

Nesta seção (linhas 13 a 16), são definidas as unidades em que o preço do hidrogênio será apresentado. O usuário deve selecionar a Unidade Monetária ('Dólares' ou 'Reais') e a Unidade Volumétrica do Hidrogênio (kg, MMBtu, m^3 equivalente de gás natural, litro equivalente de diesel, entre outras). Caso a Unidade Monetária escolhida seja 'Reais', é necessário informar a taxa de câmbio (R$/US$). Importante destacar que o modelo sempre realiza os cálculos do break-even do hidrogênio em dólares por quilograma (US$/kg), convertendo o valor apenas ao final na página de Resultados para as unidades escolhidas pelo usuário.

4.3 Vida Útil do Projeto

Essa seção (linhas 17 a 21) define os parâmetros temporais do projeto, os quais determinam o horizonte do fluxo de caixa. Devem ser selecionados: o Ano de Início do Projeto, o Período de Investimento (número de anos necessários para a construção da planta) e o Período de Operação (anos de operação comercial).

O modelo possui uma restrição temporal: a soma do período de investimento e do período de operação não pode exceder 40 anos. Na linha 21, apresenta-se o Ano Final do Fluxo de Caixa (coluna B) e o limite máximo permitido (coluna C) para checagem.

Além disso, a quantidade de anos definida para o período de investimento influencia diretamente o perfil de desembolso do CAPEX. Adota-se a premissa de que o CAPEX é distribuído uniformemente ao longo dos anos do período de investimento. Por exemplo, se forem selecionados quatro anos de investimento, o CAPEX será alocado em parcelas de 25% ao ano.

4.4 Imposto de Renda

Nesta seção (linhas 22 a 24), são definidos os parâmetros fiscais que impactam a tributação das receitas do projeto. Devem ser estabelecidas as alíquotas do Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ) e da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL). No modelo, a alíquota total de imposto de renda corresponde à soma do IRPJ com a CSLL, sendo aplicada diretamente sobre o EBIT (Lucro Antes dos Juros e Impostos) no fluxo de caixa.

4.5 Remuneração do Capital

Nesta seção (linhas 25 e 26), é definido o custo de capital utilizado para descontar fluxos e calcular VPL/TIR. Como referência para a TIR desejada é utilizado o Custo Médio Ponderado de Capital (WACC) — percentual anual usado como taxa de desconto.

4.6 Produção de Hidrogênio

Esta seção (linhas 27 a 30) define os parâmetros técnicos da planta: a capacidade instalada de produção (em toneladas de H2 por ano) e o nível de utilização dessa capacidade (também conhecido como fator de operação). A multiplicação desses dois parâmetros determina a produção efetiva anual de hidrogênio. Enquanto a capacidade instalada é utilizada no cálculo do CAPEX, a produção efetiva de H2 é empregada no cálculo do OPEX e das receitas projetadas no fluxo de caixa

4.7 CAPEX do Sistema de Reforma a Vapor do Etanol

Nesta seção (linhas 31 a 35) é definido o CAPEX associado ao processo de produção de hidrogênio por reforma a vapor do Etanol. Na linha 32, o usuário deve selecionar entre duas opções: ‘CAPEX Sugerido pelo Modelo’ ou ‘CAPEX inserido pelo Usuário’. Em outras palavras, o usuário pode optar por utilizar a estimativa de CAPEX gerada pelas equações internas do modelo ou inserir sua própria estimativa.

Caso seja escolhida a opção ‘CAPEX inserido pelo Usuário’, o valor correspondente deve ser informado na linha 34 (coluna B), sempre em dólares, de acordo com a capacidade instalada selecionada. Ressalta-se que o modelo utiliza exclusivamente valores em dólares para o cálculo do CAPEX.

4.8 Custos dos Principais Insumos

Está seção (linhas 36 a 40) define os preços unitários dos principais insumos diretos: Custo do Gás Natural (US$/m³) – usado somente em caso de utilização do sistema de captura do CO2 –, Custo da energia elétrica (US$/kWh), Custo da água (US$/litro) e Custo do Etanol (US$/litro). Estes valores servem para compor o OPEX operacional do sistema de reforma a vapor e do sistema de captura e armazenamento de carbono.

4.9 OPEX do Sistema de Reforma a Vapor do Etanol

Nesta seção (linhas 41 a 46) são determinados os consumos específicos dos principais insumos, bem como o componente referente a outros custos operacionais. Devem ser definidos os consumos específicos de: etanol (litros de etanol /kg H_2), energia elétrica (kWh/kg H_2) e água (litros/kg H_2). O valor do OPEX dos principais insumos é calculado pela multiplicação de três componentes: consumo específico, custo do insumo e produção efetiva de H2 (em quilogramas). Já o OPEX associado a outros custos operacionais é determinado como um percentual do CAPEX. A soma desses dois valores corresponde ao OPEX total (resultado calculado na linha 46). Ressalta-se que todos os valores de OPEX estão expressos em dólares por ano.

4.10 Custo do Carbono

Nesta seção (linhas 47 a 51) é determinada a receita proveniente da venda de créditos de carbono (linha 51, coluna B). A premissa adotada é que, se o hidrogênio apresentar menor intensidade de carbono em relação ao combustível que substitui, poderá ser emitido créditos de carbono proporcionais às emissões evitadas. Caso o hidrogênio tenha maior intensidade de carbono, será necessário adquirir créditos de carbono, gerando uma despesa.

Para isso, o usuário deve definir: o custo do carbono (US$/tonelada de CO_2), o combustível a ser substituído ("Gás Natural", "Óleo Combustível", "GLP", "Diesel B (B15)" ou "Eletricidade") e a alíquota de imposto aplicável sobre as receitas provenientes da venda de créditos de carbono. Ressalta-se que as intensidades de carbono dos combustíveis estão disponíveis na página de Premissas e podem ser ajustadas pelo usuário, se necessário.

4.11 Capacidade de Captura de Carbono

Nesta seção (linhas 52 a 57) são definidos os parâmetros técnicos do sistema de captura de carbono. A linha 53 indica a quantidade de CO2 disponível para captura com base na quantidade de gás natural utilizada na reforma a vapor. Na linha 54, o usuário deve definir o percentual de captura dessa quantidade de CO2 disponível. A linha 55 calcula a capacidade instalada necessária para que a planta de captura consiga capturar a quantidade de CO2 definida na linha 54. Na linha 56, o usuário informa o fator de operação, também chamado de capacidade de utilização, da planta de captura. Com essas informações, a linha 57 calcula a captura efetiva de CO2 do projeto.

4.12 CAPEX do Sistema de Captura de Carbono

Nesta seção (linhas 58 a 62) é definido o CAPEX associado ao processo de captura de CO2. Na linha 59, o usuário deve selecionar entre duas opções: 'CAPEX Sugerido pelo Modelo' ou 'CAPEX inserido pelo Usuário'. Em outras palavras, o usuário pode optar por utilizar a estimativa de CAPEX gerada pelas equações internas do modelo ou inserir sua própria estimativa.

Caso seja escolhida a opção 'CAPEX inserido pelo Usuário', o valor correspondente deve ser informado na linha 61 (coluna B), sempre em dólares, de acordo com a capacidade instalada selecionada. Ressalta-se que o modelo utiliza exclusivamente valores em dólares para o cálculo do CAPEX.

4.13 OPEX do Sistema de Captura de Carbono

Nesta seção (linhas 63 a 67) são determinados os consumos específicos dos principais insumos, bem como o componente referente a outros custos operacionais do sistema de captura de carbono. Devem ser definidos os consumos específicos de: gás natural (m^3 GN/tonelada de CO2) e energia elétrica (kWh/ tonelada de CO2). O valor do OPEX dos principais insumos é calculado pela multiplicação de três componentes: consumo específico, custo do insumo (determinado na seção 8) e captura efetiva de CO2. Já o OPEX associado a outros custos operacionais do sistema de captura é determinado como um percentual do CAPEX. A soma desses dois valores corresponde ao OPEX total do sistema de captura de carbono (resultado calculado na linha 67). Ressalta-se que todos os valores de OPEX estão expressos em dólares por ano.

4.14 Transporte de CO2

Nesta seção (linhas 68 a 82) são definidos os parâmetros técnicos do transporte de CO2. O usuário deve informar o gradiente de perda de pressão do duto, a pressão final no ponto de saída, a distância do gasoduto, a temperatura média de operação, a diferença de elevação (cotas) entre os pontos de entrada e saída e o comprimento equivalente das perdas de carga localizadas. Com base nessas informações, o modelo calcula o diâmetro necessário do duto para atender às especificações definidas pelo usuário. Vale destacar que há limites para os valores de pressão final e distância do duto, associados ao limite máximo de 200 bar no ponto inicial (entrada) do gasoduto. Esses limites estão estacados na coluna C das respectivas linhas.

Ressalta-se ainda que, nas linhas 81 e 82, são apresentados dois testes de validação das premissas inseridas. O primeiro verifica a velocidade do fluido (CO2), que deve ser menor ou igual a 50% da velocidade de erosão; valores superiores indicam risco de erosão acelerada do duto, sugerindo a necessidade de revisão dos parâmetros técnicos. O segundo é o teste de número de Reynolds: no modelo Panhandle-B, a faixa válida é de 4 a 40 milhões, enquanto no modelo IGT são aceitos valores superiores a 40 mil. O modelo seleciona automaticamente o método de cálculo de vazão mais adequado com base no resultado do teste de Reynolds, não cabendo ao usuário a escolha do método de cálculo de vazão.

4.15 CAPEX do Gasoduto de CO2

Nesta seção (linhas 83 a 85) é definido o Capex do sistema de transporte do CO2 capturado. Para isso, o usuário, na linha 84, deve determinar o custo do duto por metro-polegada, colocando o valor em dólares. A partir dessa informação, o modelo calcula (na linha 85) o Capex do sistema de transporte com base no diâmetro e no comprimento estabelecidos na seção anterior.

4.16 OPEX do Gasoduto de CO2

Nesta seção (linhas 86 a 94) é definido o custo de operação e manutenção do sistema de transporte de CO2. O OPEX é dividido em duas parcelas: o custo de compressão do gás e os demais custos operacionais. Para calcular o custo de compressão, o usuário deve informar a pressão na qual o CO2 está disponível antes de entrar no gasoduto (linha 87 - "Pressão disponível do CO2 a montante do ponto de entrada do Gasoduto") e indicar o rendimento energético de compressão para eletricidade (linha 89). Com base nessas informações e utilizando o custo da energia elétrica definido na Seção 8, o modelo calcula o custo operacional do compressor. O usuário também deve definir os outros custos operacionais como uma proporção do CAPEX do sistema de transporte (linha 92). A soma desses dois valores corresponde ao OPEX total (resultado calculado na linha 94). Ressalta-se que todos os valores de OPEX estão expressos em dólares por ano.

4.17 Estocagem de CO2

Nesta seção (linhas 95 a 100), o usuário define os principais parâmetros relacionados ao armazenamento geológico do CO2 capturado ao longo da vida útil do projeto. Inicialmente, o modelo calcula automaticamente a capacidade total de estocagem necessária, com base na captura anual de CO2 e nos anos de operação da planta, respeitando o intervalo permitido (entre 15 e 200 milhões de toneladas).

Em seguida, o usuário deve selecionar a localização do armazenamento (em terra ou no mar), o tipo de formação geológica que receberá o CO2 (aquíferos salinos ou campos depletados de óleo e gás) e a existência de infraestrutura prévia disponível no local (com ou sem poços legados). Ressalta-se que, no caso de aquíferos salinos, o modelo seleciona automaticamente a opção "sem poços legados".

Com essas informações, o modelo calcula o preço de break-even adicional da estocagem por quilograma de hidrogênio produzido. Assim, o custo de armazenagem não entra no fluxo de caixa do projeto, mas é estimado como um acréscimo ao custo nivelado total do hidrogênio musgo, representando o custo nivelado extra decorrente da etapa de estocagem.

5. Fluxo de caixa

A página Fluxo de Caixa apresenta a simulação da produção de hidrogênio musgo ao longo do período de vida útil selecionado (na página Dados de Entrada). Ela é composta por três seções,

nenhuma das quais deve ser alterada pelo usuário: (1) Fluxos de Caixa; (2) Conferência da Taxa Interna de Retorno (TIR) e do Valor Presente Líquido (VPL); e (3) Resultado Parcial do Preço de Break-even.

O fluxo de caixa é apresentado em dólares e inclui receitas, custos, impostos e investimentos, sendo o horizonte temporal determinado na página Dados de Entrada (vida útil do projeto).

A seção de Conferência da TIR e do VPL funciona como um artifício de cálculo, já que o modelo determina o preço de break-even do hidrogênio musgo por meio da função 'Atingir Meta' (Goal Seek), que ajusta o valor até que o VPL seja igual a zero. Em outras palavras, o custo nivelado do hidrogênio musgo (ou seja, seu preço de break-even) corresponde ao valor que, para a remuneração do capital (TIR) desejada, resulta em VPL igual a zero.

A seção de Resultado Parcial do Preço de Break-even apresenta a decomposição desse preço em dólares por quilos de hidrogênio.

6. Resultados

A página Resultado pode apresentar dois tipos de resultados, dependendo da seleção do Tipo de Cálculo ('Análise de Sensibilidade' ou 'Cálculo Individual') feita na página Dados de Entrada. Quando a opção 'Cálculo Individual' é escolhida, a página Resultado exibe o preço de break-even do hidrogênio e sua decomposição: CAPEX, OPEX (tanto da Reforma a Vapor do Etanol quanto do CCS), impostos e receita com a venda de créditos de carbono. Também é apresentado o Custo Total do CCS por tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) capturado.

Quando selecionada a opção "Análise de Sensibilidade", a página Resultado apresenta apenas o preço de break-even do hidrogênio, sem detalhar sua decomposição. Esse preço é mostrado para cada combinação das variáveis 1 e 2 da análise de sensibilidade (selecionadas na página Dados de Entrada), em que as linhas representam as variações da variável 1 e as colunas representam as variações da variável 2.

Ressalta-se que na página Resultados os valores são apresentados na unidade de monetária e volumétrica selecionadas pelo usuário na página Dados de Entrada. A unidade de medida no qual os dados são apresentados está exposta na célula A1.