



NOTA TÉCNICA

MANUAL METODOLÓGICO: Ferramenta de avaliação técnico-econômica da produção de SAF no Brasil – Rotas HEFA e ATJ

JUNHO DE 2026



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Imagens da Capa

1. Divulgação livre. Obtida em freepik.com

Coordenação Executiva

Angela Oliveira da Costa

Coordenação Técnica

Angela Oliveira da Costa

Rachel Martins Henriques

Rafael Barros Araujo

Equipe Técnica

Arthur Cortez Pires de Campos

Juliana Pereira Targueta

Mariana Côrte da Silva (Estagiária)

Paula Isabel da Costa Barbosa

Rachel Martins Henriques

Rafael Barros Araujo

Rafael Belém Lavrador

Técnica em Secretariado

Raquel Lopes Couto

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário-Executivo

Gustavo Cerqueira Ataíde

Secretário de Energia Elétrica

João Daniel de Andrade Cascalho

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Ana Paula Lima Vieira Bittencourt

Secretário de Transição Energética e Planejamento VAGO

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Renato Cabral Dias Dutra

<http://www.mme.gov.br>

Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Thiago Ivanoski Teixeira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Carlos Eduardo Cabral Carvalho

<http://www.epe.gov.br>



VALOR PÚBLICO

A EPE REALIZA ESTUDOS E PESQUISAS PARA SUBSIDIAR A FORMULAÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DA POLÍTICA E DO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO BRASILEIRO.

A FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE SAF NO BRASIL, DESENVOLVIDA PELA EPE, AUXILIA AGENTES PÚBLICOS E PRIVADOS A TOMAR DECISÕES EMBASADAS PARA FORTALECIMENTO E EXPANSÃO DA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SUSTENTÁVEIS DE AVIAÇÃO NO PAÍS.

NO SEU PAPEL DE DIRIMIR ASSIMETRIAS DE INFORMAÇÃO, A EPE SE COLOCA, ATRAVÉS DESSA FERRAMENTA, COMO ALAVANCADORA DO DESENVOLVIMENTO DESSE NOVO MERCADO, AUMENTANDO A SUSTENTABILIDADE DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E AUXILIANDO O BRASIL A SE POSICIONAR COMO REFERÊNCIA INTERNACIONAL PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.



AVISO

A FERRAMENTA PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE SAF NO BRASIL, DESENVOLVIDA PELA EPE, TEM COMO OBJETIVOS SUBSIDIAR O PLANEJAMENTO ENERGÉTICO NACIONAL E APOIAR AGENTES PRIVADOS E PÚBLICOS COM ESTUDOS PROSPECTIVOS. QUAISQUER RESULTADOS GERADOS POR ESTA FERRAMENTA DEVEM SER ENTENDIDOS COMO VALORES PRELIMINARES.

LOGO, QUAISQUER DECISÕES DE ENCAMINHAMENTO (COMO FORMULAÇÕES DE POLÍTICAS PÚBLICAS, DEFINIÇÕES DE DIRETRIZES ESTRATÉGICAS, DECISÕES DE INVESTIMENTO OU DE ESTRATÉGIAS DE NEGÓCIO ETC.) SÃO DE RESPONSABILIDADE DE OUTRAS INSTITUIÇÕES PÚBLICAS E PRIVADAS.

A EPE SE EXIME DE QUALQUER RESPONSABILIDADE POR QUAISQUER AÇÕES E TOMADAS DE DECISÃO QUE POSSAM SER REALIZADAS POR AGENTES ECONÔMICOS OU QUALQUER PESSOA COM BASE NOS RESULTADOS DESTA FERRAMENTA.

A EPE DEVE SER CITADA COMO FONTE PARA A PUBLICAÇÃO DE QUAISQUER RESULTADOS DERIVADOS DO USO DESTA FERRAMENTA.

- **Identificação do Documento e Revisões**



Área de estudo

Diretoria de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (DPG)
Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis (SDB)

Estudo

Revisão	Data de emissão	Descrição
RO		Publicação Original

■ Sumário

1. Introdução.....	3
1.1. Motivação	3
1.2. Lógica geral da ferramenta	4
1.3. Guia de uso da ferramenta	5
2. Modelagem de Processo	9
2.1. Diagrama de blocos	9
2.2. Inventário de entradas e saídas	10
3. Cálculo do Preço Mínimo de Viabilidade do SAF e inclusão do Prêmio ao Produtor.....	12
3.1. Parâmetros característicos da planta	12
3.2. Custos de capital totais (CAPEX).....	13
3.3. Custos de operação anuais (OPEX)	15
3.4. Receitas Anuais.....	16
3.5. Fluxo de caixa descontado pela taxa de custo médio de capital	17
3.6. Prêmio ao produtor	19
4. Cálculo da intensidade de carbono.....	20
4.1. Métodos de cálculo.....	21
5. Referências.....	24
Anexo A – Propriedades físico-químicas consideradas para conversões de unidades	26

■ Figuras

Figura 1 - Representação esquemática dos fluxos de entrada e saída dos modelos implementados.	4
Figura 2 - Implementação dos modelos na ferramenta.	5
Figura 3 - Aba de interface básica em formato não expandido.	6
Figura 4 - Aba de interface básica com opções detalhadas de entrada expandidas.	7
Figura 5 - Aba de interface básica com opções detalhas de resultados expandidas.	7
Figura 6 - Aba "Parâmetros Econômicos e Financeiros". A mesma lógica se aplica a para a aba "Parâmetros Técnicos"	8
Figura 7 - Diagrama de blocos simplificado do processo HEFA.....	10
Figura 8 - Diagrama de blocos simplificado do processo ATJ.....	10
Figura 9 - Correlação entre o CAPEX e a Capacidade Nominal (inclui produção de SAF, diesel verde e bioNafta) para plantas HEFA.	14
Figura 10 - Correlação entre o CAPEX e a Capacidade Nominal (inclui produção de SAF, diesel verde e bioNafta) para plantas ATJ.....	14

■ Tabelas

Tabela 1 - Abas de trabalho da ferramenta desenvolvida.	6
Tabela 2 - Referências consideradas para a conceituação dos diagramas de bloco das rotas HEFA e ATJ.	9
Tabela 3 - Valores típicos de consumo e produção em plantas do tipo HEFA e ATJ.	11
Tabela 4 - Correlações utilizadas para estimativa do CAPEX.	13
Tabela 5 - Valores considerados para estimativa dos custos fixos de operação.	15
Tabela 6 - Valores <i>default</i> utilizados para custos de insumos e utilidades e para custo de tratamento de água residual.	16
Tabela 7 - Valores <i>default</i> utilizados para preços de venda dos coprodutos.	17
Tabela 8 - Parâmetros de fluxo de caixa considerados e valores <i>default</i> estabelecidos para cada um.	17
Tabela 9 - Métodos implementados para cálculo de IC do ACV do SAF.	22
Tabela 10 - Métodos implementados para cálculo de IC final de SAF de acordo com o mercado simulado.	22
Tabela 11 - Valores utilizados para carga ambiental das entradas do volume de controle para o método de cálculo “ACV valores médios Brasil”	23
Tabela 12 - Intensidades de carbono dos equivalentes fósseis para os produtos.	23

1. Introdução

1.1. Motivação

O transporte aéreo, que representa cerca de 2,5 % das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao uso de energia (IEA, 2025), constitui um segmento especialmente complexo para descarbonização devido aos desafios técnicos associados à eletrificação de aeronaves comerciais. O uso de combustíveis líquidos renováveis e de baixa intensidade de carbono, denominados “combustíveis sustentáveis de aviação” (SAF), se destaca como uma das poucas alternativas efetivas para redução de emissões desse segmento em curto e médio prazos.

A aviação comercial pode ser analisada sob duas óticas distintas: voos nacionais e internacionais. No âmbito internacional, a descarbonização do transporte aéreo é regida por um mecanismo global denominado CORSIA¹, coordenado pela OACI², no qual foi elaborado um cronograma progressivo de redução de intensidade de carbono dos voos que deve ser mandatoriamente implementado pelas companhias aéreas dos países aderentes a partir de 2027. Já no âmbito nacional, o Brasil instituiu, em outubro de 2024, o programa ProBioQAV por meio da Lei do Combustível do Futuro (Lei n° 14.993 de 2024), que também estabelece um cronograma mandatário de redução de emissões, chegando a 10% em 2037. Assim, espera-se que a demanda por SAF aumente nas próximas décadas, tanto no âmbito nacional quanto internacional.

Entretanto, a capacidade global instalada para produção de SAF se restringe, hoje, a 8,3 Mm³ / ano (EPE, 2025a), significativamente aquém das necessidades estabelecidas pelos programas. O Brasil se notabiliza como uma potência agrícola, tendo um alto volume disponível de matérias-primas renováveis que podem ser destinadas à produção de SAF, como óleos vegetais, gorduras animais e etanol. Nesse sentido, a produção desses combustíveis no território nacional poderia representar uma significativa oportunidade de negócio, aproveitando-se de vantagens competitivas do país em um mercado global. Em especial, duas rotas produtivas se destacam como oportunidades para implementação imediata: a rota HEFA³, que converte diretamente óleos e gorduras em SAF, e a rota ATJ⁴, baseada na conversão de etanol em SAF.

Nesse contexto, a EPE desenvolveu uma ferramenta para avaliação da viabilidade do SAF produzido no Brasil através dessas rotas, utilizando óleo de soja (com ou sem incorporação de sebo bovino) e etanol (1G, de cana ou milho), respectivamente. Dessa forma, dentro do âmbito das suas atribuições de dirimir a assimetria de informações e auxiliar na formulação de políticas públicas, a EPE disponibiliza à sociedade uma ferramenta única que leva em conta aspectos intrínsecos da realidade brasileira, avaliando a competitividade do país nesse promissor mercado emergente.

¹ Sigla do inglês para “Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation”.

² Sigla para Organização da Aviação Civil Internacional

³ Sigla do inglês “Hydroprocessed Esters and Fatty Acids”.

⁴ Sigla do inglês “Alcohol to jet”.

1.2. Lógica geral da ferramenta

O objetivo principal desta ferramenta é analisar a produção de SAF do ponto de vista econômico, visando a determinação do preço mínimo de viabilidade do biocombustível. A partir desse cálculo, a ferramenta permite também a inclusão de detalhamentos acerca do modelo de negócios implementado, de forma a obter uma análise de fluxo de caixa completa para uma planta produtora.

De maneira geral, foram implementados dois modelos complementares: (i) um modelo financeiro baseado na adoção de uma metodologia de fluxo de caixa descontado (DCF⁵), resultando em parâmetros como Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) do empreendimento; e (ii) um modelo de intensidade de carbono (IC), resultando na IC calculada para o biocombustível produzido de acordo com o mercado visado⁶. A Figura 1 resume os parâmetros de entrada necessários e os parâmetros de saída principais obtidos por cada modelo.

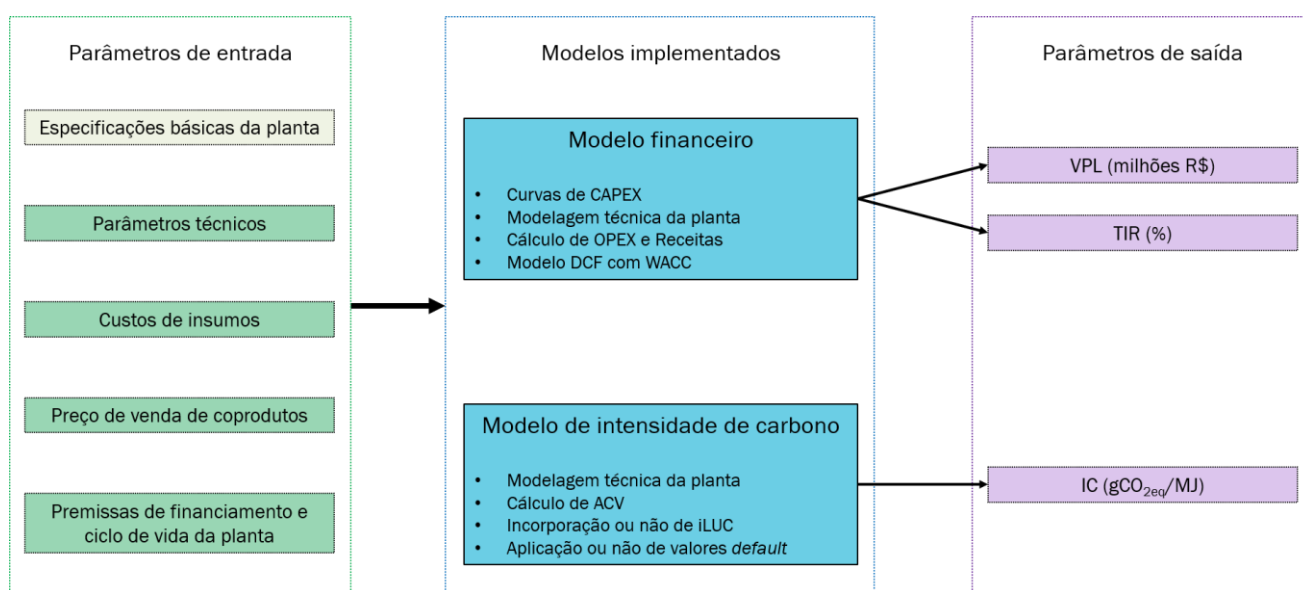


Figura 1 - Representação esquemática dos fluxos de entrada e saída dos modelos implementados.

Fonte: Elaboração própria

Nota: As especificações básicas da planta constituem os únicos parâmetros de preenchimento obrigatório pelo usuário para funcionamento da ferramenta. Os demais parâmetros são pré-preenchidos com valores *default*, que podem ou não ser alterados pelo usuário conforme lhe for conveniente.

O modelo DCF é implementado em duas instâncias distintas na ferramenta. Em um primeiro momento, o modelo financeiro é utilizado para calcular o preço mínimo de viabilidade do SAF produzido, ou seja, o preço necessário para que o VPL do projeto seja igual a zero. Resumidamente, esse valor consiste no preço mínimo de venda do combustível necessário para que a planta recupere o custo de operação e remunere o capital investido para sua construção.

⁵ Sigla do inglês para “Discounted cash flow”

⁶ O modelo desenvolvido replica as premissas adotadas em cada programa para cálculo da IC, conforme detalhado na seção 4, com o interesse de analisar a competitividade do combustível produzido nos mercados visados. Não faz parte do escopo deste trabalho discutir a pertinência dos aspectos metodológicos do cálculo de IC do SAF.

O usuário pode, então, informar um valor de prêmio ao produtor a ser considerado e outras especificações do modelo de negócios. A ferramenta, então, implementa o modelo DCF uma segunda vez, calculando, nesse caso, os valores efetivos de VPL e TIR do projeto a partir do prêmio definido. É também nesse momento que o modelo de intensidade de carbono é aplicado, resultando em um detalhamento do custo de redução de emissões a ser pago pelo consumidor em cada mercado a partir do modelo de negócios definido. A Figura 2 detalha o uso dos modelos na ferramenta.

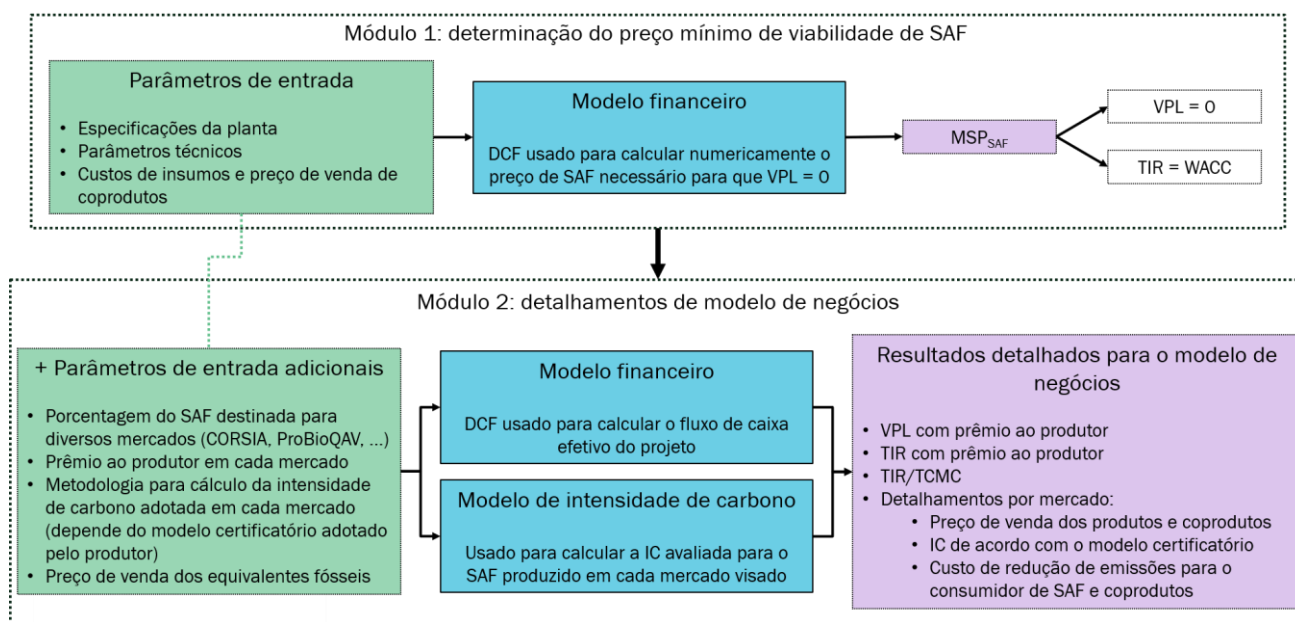


Figura 2 - Implementação dos modelos na ferramenta.

Fonte: Elaboração própria

1.3. Guia de uso da ferramenta

A ferramenta foi dividida em seis abas de trabalho, listadas na Tabela 1, nas quais o usuário insere os parâmetros de entrada necessários e pode avaliar os resultados dos modelos implementados, conforme descrito nas Figura 1 e Figura 2.

A aba de interface básica consiste na aba principal da ferramenta. Nela, o usuário insere as especificações básicas da planta e os detalhes de seu modelo de negócios e executa a simulação desejada. Os principais resultados, incluindo detalhes por mercado, são também apresentados nessa aba.

Os demais parâmetros de entrada podem ser modificados nas abas “Par. Econômicos e financeiros” e “Parâmetros técnicos”.

As interfaces de algumas das abas são apresentadas nas Figura 3, Figura 4, Figura 5 e Figura 6, para ilustrar o funcionamento da ferramenta.

Tabela 1 - Abas de trabalho da ferramenta desenvolvida.

Aba	Função	Descrição
Apresentação	-	É aba de capa da ferramenta, contém diagramas esquemáticos para auxiliar no uso correto do produto.
Interface Básica	Inserção de Dados de Entrada Apresentação de Resultados	É a aba de uso principal da ferramenta. Nela, o usuário insere os dados básicos de detalhamento tecnológico da planta a ser simulada, além de informações sobre o modelo de negócios adotado. Após pressionar o botão calcular, é nesta aba também que são apresentados os principais resultados: preço mínimo de viabilidade, informações de projeto, detalhamento do custo de abatimento de carbono.
Par. Econômicos e financeiros	Inserção de Dados de Entrada	Nesta aba, o usuário tem a opção de alterar os parâmetros econômicos e financeiros considerados na simulação. Estes parâmetros são pré-preenchidos, de forma que o usuário só tem necessidade de informá-los caso tenha informações próprias detalhadas.
Parâmetros técnicos	Inserção de Dados de Entrada	Aba similar à anterior, porém dedicada aos parâmetros técnicos de processo da planta.
Resultados detalhados	Apresentação de Resultados	Nesta aba, o usuário tem acesso aos valores detalhados calculados para o fluxo de caixa ano a ano do empreendimento simulado.
Histórico de Cálculos	-	As simulações realizadas são salvas nesta aba, que permite ao usuário exportar seus resultados em formato .xlsx

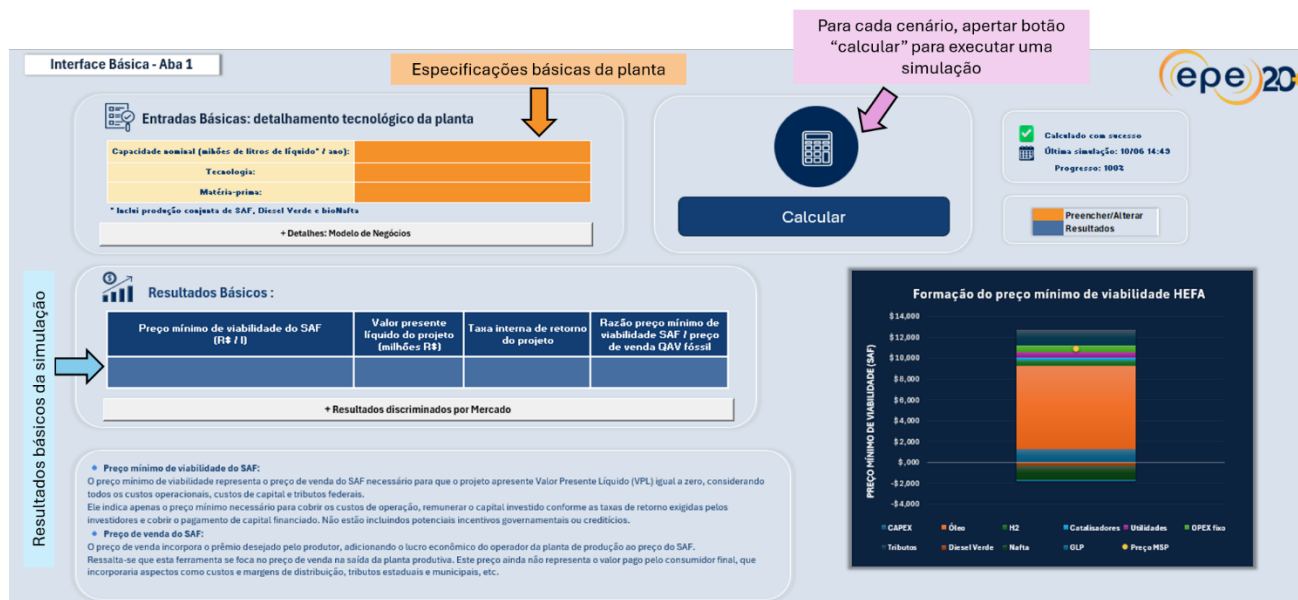


Figura 3 - Aba de interface básica em formato não expandido.

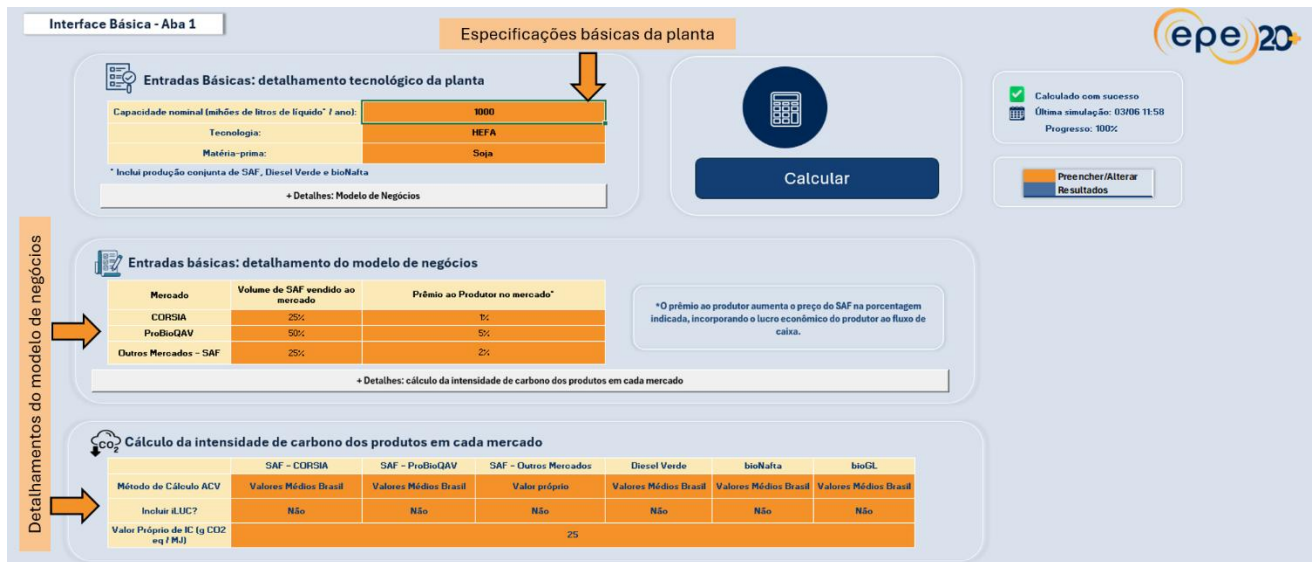


Figura 4 - Aba de interface básica com opções detalhadas de entrada expandidas.

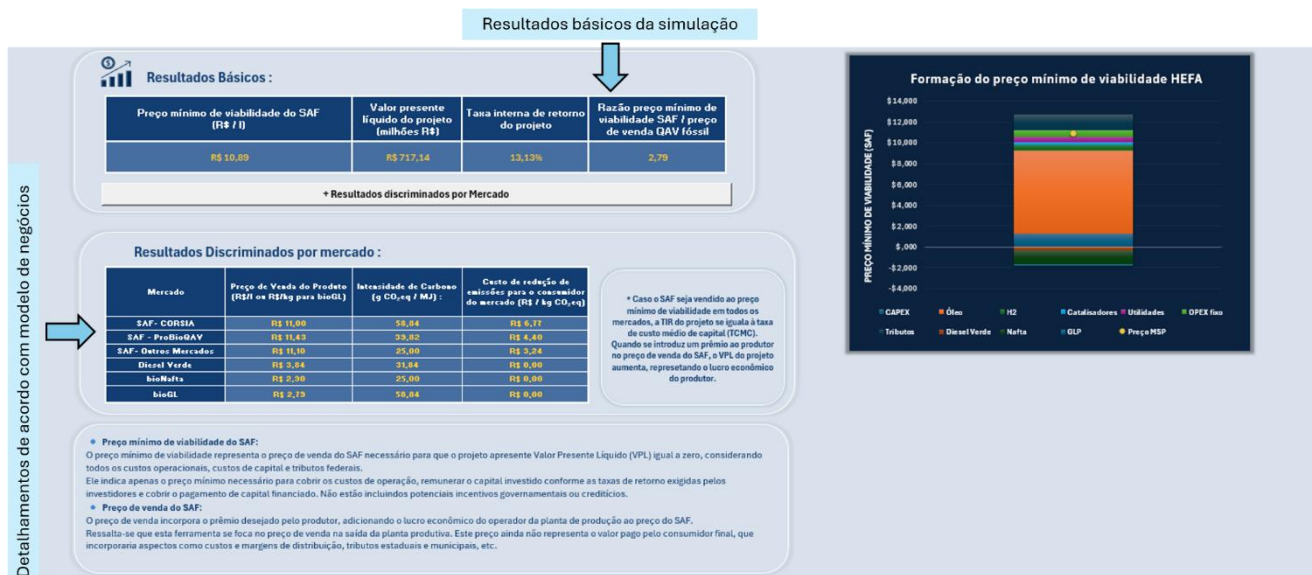


Figura 5 - Aba de interface básica com opções detalhas de resultados expandidas.

Parâmetros Econômicos e Financeiros- Aba 2 epe 20+

Parâmetros ajustáveis com pré-preenchimento default

BLOCO A — Custos Variáveis

Preço de compra de insumos	
Óleo de soja (R\$/L)	R\$ 4,86
Sebo bovino (R\$/L)	R\$ 5,16
Hidrogênio (R\$/kg)	R\$ 10,57
Elettricidade (R\$/kWh)	R\$ 0,13
Cavaco de madeira (R\$/kg)	R\$ 0,47
Gás natural (R\$/kg)	R\$ 5,03
Catalisadores para HEFA - média (R\$/g)	R\$ 1,37
Catalisadores para ATJ - média (R\$/g)	R\$ 0,12
Etanol (R\$/L)	R\$ 2,47

BLOCO C — Receitas com coprodutos

Preço de Venda dos Coprodutos	
Diesel Verde (R\$/L)	R\$ 3,84
bioNafta (R\$/L)	R\$ 2,90
bioGL (R\$/kg)	R\$ 2,79

① Após aplicar cenário, volte a interface básica para calcular o preço mínimo de viabilidade do SAF.

Aplicar Cenário

Restaurar valores iniciais

BLOCO B — Premissas de financiamento e processo

Tempo de operação da planta (anos)	20
Porcentagem do CAPEX financiado	60%
Taxa de juros financiamento	12,36%
Taxa de desconto equity	15,00%

BLOCO D - Preços de referência dos equivalentes fósseis

QAV (R\$/l)	R\$ 3,90
Diesel (R\$/l)	R\$ 3,84
Nafta (R\$/l)	R\$ 2,90
GLP (R\$/kg)	R\$ 2,79

Cenário CAPEX:

Caso Base

✓ Valores iniciais restaurados
 📅 Último cenário: 29/05 12:22
 Progresso: 100%

+ Cronograma de construção e start-up

+ Cronograma de gastos

Após modificar os parâmetros conforme desejado, clicar em aplicar cenário e retornar à aba "interface básica" para executar simulação.

Figura 6 - Aba "Parâmetros Econômicos e Financeiros". A mesma lógica se aplica para a aba "Parâmetros Técnicos".

2. Modelagem de Processo

2.1. Diagrama de blocos

A modelagem dos processos foi realizada de maneira simplificada através de diagramas de bloco, com foco nos fluxos mássicos e energéticos de entrada e saída da planta produtiva, representada de maneira global. As Figura 7 e Figura 8 apresentam os diagramas de blocos considerados para os processos HEFA e ATJ, respectivamente, presumindo unidades autônomas de produção⁷. Ressalta-se que tais diagramas, assim como os valores numéricos designados para cada corrente (seção 2.2), se basearam em uma extensa revisão de literatura de artigos científicos e relatórios institucionais (Tabela 2) que realizaram a modelagem técnica rigorosa dos processos.

Tabela 2 - Referências consideradas para a conceituação dos diagramas de bloco das rotas HEFA e ATJ.

Rota	Referências
HEFA	Aburto et al. (2025); Klein et al. (2018); Martinez-Hernandez et al. (2019); Mousavi-Avval & Shah (2021); Ng et al, (2021); Pavlenko et al. (2019); Tanzil et al. (2021); Tao, Milbrandt, et al. (2017b); Wang (2016, 2019)
ATJ	Aburto et al. (2025); Akter et al. (2024); Crawford et al. (2016); Han et al. (2017); Hong et al. (2025); Klein et al. (2018); Marreco (2022) ; Ng et al. (2021); Pavlenko et al. (2019); Tanzil et al. (2021); Tao, Markham, et al. (2017a); Teixeira et al. (2024); Yao et al. (2017)

Fonte: Elaboração própria

⁷ Unidades autônomas são entendidas como unidades não integradas a plantas produtoras de matéria-prima.

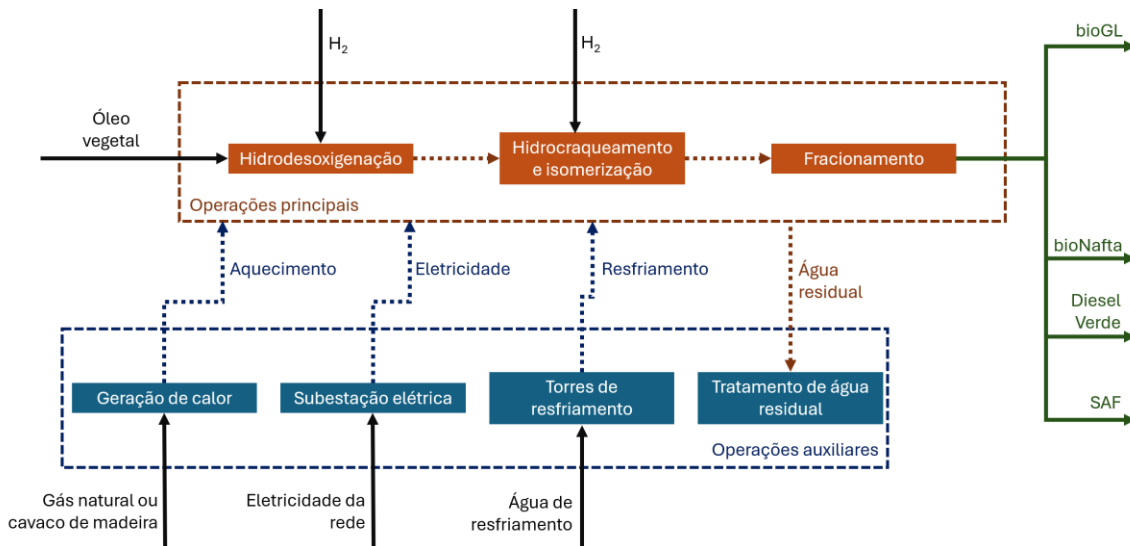


Figura 7 - Diagrama de blocos simplificado do processo HEFA.

Fonte: Elaboração própria

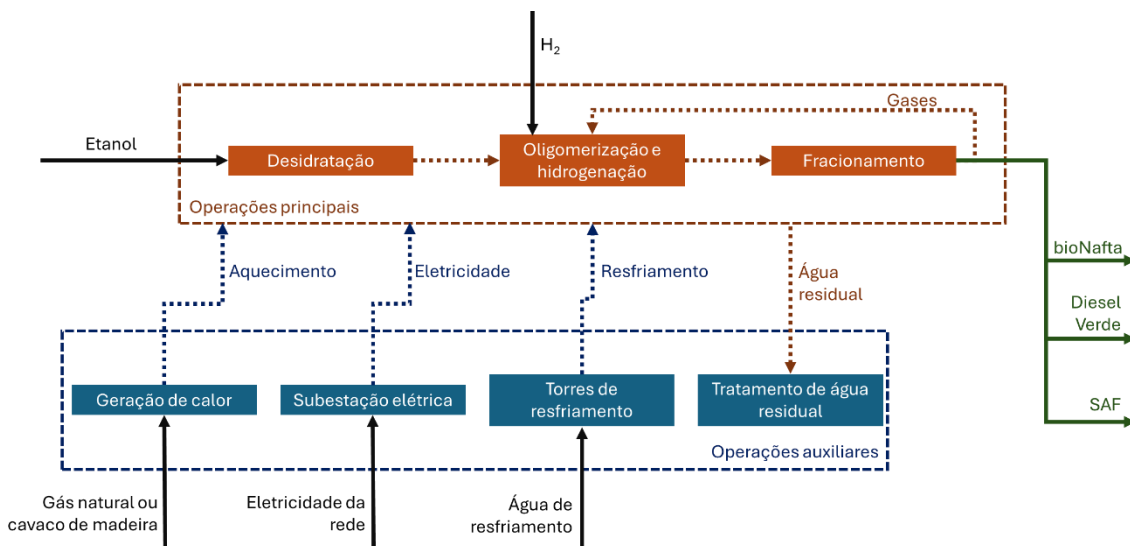


Figura 8 - Diagrama de blocos simplificado do processo ATJ.

Fonte: Elaboração própria

2.2. Inventário de entradas e saídas

Para cada uma das plantas modeladas nos estudos referenciados na Tabela 2, foram levantadas as quantidades de insumos (óleos e gorduras, etanol, hidrogênio e catalisadores) e utilidades (eletricidade, calor e água de resfriamento) consumidas, de coprodutos (diesel verde, bioNafta e bioGL) produzidos e de resíduos gerados (água para tratamento). A partir disso, um inventário típico de entradas e saídas para as tecnologias HEFA e ATJ foi obtido baseando-se na média dos valores reportados em cada estudo, conforme apresentado na Tabela 3. Ressalta-se que nem todos os artigos considerados disponibilizaram todos os parâmetros incluídos no inventário, de forma que cada parâmetro foi calculado utilizando somente os valores efetivamente reportados na literatura. Além disso, a composição de saída do produto líquido se baseou somente nos artigos que consideraram a nafta como principal coproduto, configuração que privilegia SAF em detrimento de diesel verde.

Em casos em que outras propriedades físico-químicas dos produtos envolvidos foram necessárias para conversões de unidade, utilizou-se os fatores apresentados no Anexo A.

Tabela 3 - Valores típicos de consumo e produção em plantas do tipo HEFA e ATJ.

	HEFA	ATJ
Insumos e utilidades		
Óleos e gorduras (l/l comb. líquido)*	1,062	-
Etanol (l/l comb. líquido)	-	1,805
Hidrogênio (kg/l comb. líquido)*	0,033	0,016
Catalisadores (g/l comb. líquido)**	0,118	1,764
Eletricidade (kWh/l comb. líquido)	0,058	0,186
Calor (MJ/l comb. líquido)	2,511	2,036
Água de resfriamento (l/ l comb. líquido)	3,20	6,02
Produtos		
SAF (% comb. líquido)*	65%	75%
Diesel Verde (% comb. líquido)*	5%	6%
bioNafta (% comb. líquido)*	30%	19%
bioGL (l/l comb líquido)*	0,0375	-
Resíduo		
Água residual (l/l comb. líquido)***	0,080	0,699

Fonte: Elaboração própria

Nota 1: Todos os valores consideram a quantidade total de combustível líquido produzida, o que inclui as correntes de SAF, Diesel Verde e bioNafta.

*Nota 2: Os consumos de óleo, hidrogênio e a composição da cesta de combustíveis produzida para a rota HEFA podem se modificar no caso de utilização de sebo bovino como matéria-prima, pois o inventário considera somente modelagens que utilizam óleo vegetal.

**Nota 3: A quantidade de catalisadores compreende o total requerido em todas as etapas dos processos, o que inclui diferentes tipos de catalisadores, que não foram individualmente discriminados.

*** Nota 4: Para o caso da rota ATJ, a produção de água residual foi ajustada de acordo com o balanço de massa da planta referência. O mesmo não foi feito para HEFA, pois essa rota produz também gases residuais na forma de CO, CO2 etc.

A quantidade de gás natural ou de cavaco de madeira necessários para suprir as demandas de calor das plantas são calculadas considerando eficiências de caldeira de 94,5 % e 89,0 %, respectivamente⁸ (VAKKILAINEN, 2017).

Finalmente, é importante ressaltar que a ferramenta disponibilizada utiliza os valores obtidos neste inventário de entradas e saídas como valores *default* para cálculo do preço mínimo de venda de SAF. Entretanto, o usuário pode alterá-los conforme lhe convier, de forma a aproximar as simulações realizadas para situações particulares reais.

⁸ Naturalmente, é possível utilizar outros recursos energéticos para o fornecimento de calor na planta. Entretanto, nesta ferramenta foram implementados dados de processo e custo somente para Gás Natural e Cavaco de Madeira.

3. Cálculo do Preço Mínimo de Viabilidade do SAF e inclusão do Prêmio ao Produtor

O preço mínimo de viabilidade do SAF (MSP⁹) é definido como o preço mínimo de venda do combustível necessário para suprir os custos operacionais de funcionamento da planta e remunerar adequadamente o capital investido. Nesta ferramenta, o MSP é calculado a partir da modelagem do fluxo de caixa descontado da planta. Para tanto, são inicialmente calculados o custo total de capital requerido (CAPEX) e o custo de operação por litro de combustível (OPEX), tomando como base os parâmetros característicos do empreendimento definidos pelo usuário.

3.1. Parâmetros característicos da planta

Para realizar o cálculo do preço mínimo de viabilidade do SAF, é necessário inicialmente definir as características básicas da planta produtiva considerada na simulação. Nesta ferramenta, quatro parâmetros-chave são utilizados para caracterizar o empreendimento a ser avaliado:

- a. **Rota produtiva:** o usuário pode escolher entre a rota HEFA e ATJ, conforme descrito na seção 2.1;
- b. **Matéria-prima utilizada:** apesar de não alterar o processo industrial modelado, a origem da matéria-prima interfere no cálculo da intensidade de carbono do combustível produzido, conforme especificado na seção 4, e pode alterar seu custo.
 - i. **Rota HEFA:** o usuário pode escolher entre utilizar óleo de soja puro ou contendo até 30% (base mássica) de sebo bovino. Dentro dessa faixa, espera-se que o processo industrial seja semelhante, independentemente da matéria-prima. Entretanto, ressalta-se que a inclusão de sebo bovino pode gerar resultados menos precisos porque pode modificar os consumos de óleo e hidrogênio e a composição da cesta de combustíveis produzida (Tabela 3).
 - ii. **Rota ATJ:** o usuário pode escolher entre utilizar etanol de primeira geração oriundo de cana-de-açúcar ou de milho de segunda safra.
- c. **Capacidade nominal da planta:** consiste na capacidade máxima de produção do empreendimento, determinada pelo projeto dos equipamentos. A capacidade nominal deve ser definida na unidade de milhões de litros de combustível líquido produzidos por ano, o que agrega a produção somada de SAF, diesel verde e bioNafta.
- d. **Fator de utilização (FUT):** consiste na produção efetiva média da planta em seu ciclo de vida, considerando paradas para manutenção e outras paradas operacionais. O FUT deve ser definido como uma porcentagem da capacidade nominal da planta. Caso não se conheça o valor de FUT, recomenda-se a utilização do fator *default* de 90%.

Uma vez definidos os 4 parâmetros operacionais, a ferramenta executa o cálculo do MSP. A seguir, são detalhados os métodos utilizados em cada etapa do cálculo.

⁹ Sigla do inglês para “Minimum selling price”

3.2. Custos de capital totais (CAPEX)

Para a estimativa dos custos de capital da planta, foram desenvolvidas correlações entre o CAPEX total requerido pelas tecnologias HEFA e ATJ e a capacidade nominal das plantas, incluindo a produção somada de SAF, diesel verde e bioNafta. As correlações foram obtidas utilizando dados anonimizados fornecidos pelo BNDES¹⁰ referentes a solicitações de financiamento para projetos no Brasil, oriundos da chamada pública “Planos de Negócios para investimentos em combustíveis de aviação e navegação de baixo carbono”, de 2024. Dessa maneira, se baseiam em projetos reais planejados para construção no Brasil.

No caso da tecnologia HEFA, foram utilizados dados provenientes de 7 projetos de larga escala submetidos à chamada pública, incluindo capacidades nominais variando entre 50 milhões de litros por ano e 1 bilhão de litros por ano. Já para a tecnologia ATJ, outros 7 projetos submetidos à chamada foram utilizados, com capacidades nominais variando entre 64 milhões de litros por ano e 950 milhões de litros por ano. Recomenda-se, assim, que a ferramenta seja utilizada dentro desses limites de capacidade, sob risco de erros na estimativa de CAPEX caso contrário.

Os dados foram correlacionados utilizando fatores de potência, de acordo com as metodologias mais usuais aplicadas para representar economias de escala em plantas industriais. A forma geral da correlação é exemplificada na equação abaixo:

$$CAPEX = C_r * S^f$$

Onde C_r e f são parâmetros ajustáveis na regressão e S representa a capacidade nominal da planta.

Por se tratar de um processo com maturidade tecnológica mais elevada, a rota HEFA apresentou menor dispersão para os dados considerados na regressão. Por esse motivo, **espera-se que a acurácia da correlação obtida seja maior para HEFA do que para ATJ**. Baseando-se no Sistema de Classificação para Estimativas de Custo da Associação para Avanço da Engenharia de Custos (AACE, 2016) e nos dados utilizados, foram estimadas as faixas de erro prováveis das correlações obtidas. Assim, foram disponibilizados para o usuário três casos para cálculo de CAPEX na ferramenta: caso base (*default*), caso otimista e caso pessimista¹¹, conforme especificado na Tabela 4. As Figura 9 e Figura 10 apresentam as correlações de CAPEX obtidas.

Tabela 4 – Correlações utilizadas para estimativa do CAPEX.

Cenário	HEFA	ATJ
Cenário base	$CAPEX = 22,928 * S^{0,7950}$	$CAPEX = 83,434 * S^{0,6294}$
Cenário otimista	$CAPEX = 0,7 * CAPEX_{base}$	$CAPEX = 0,6 * CAPEX_{base}$
Cenário pessimista	$CAPEX = 1,4 * CAPEX_{base}$	$CAPEX = 1,6 * CAPEX_{base}$

Fonte: Elaboração própria

¹⁰ Solicitou-se ao BNDES detalhamento sobre os projetos submetidos à proposta, os quais foram fornecidos de maneira anonimizada, restringindo-se o acesso somente aos valores de CAPEX reportados.

¹¹ No caso otimista, usa-se o menor CAPEX com incremento da capacidade nominal. No pessimista, ao contrário.

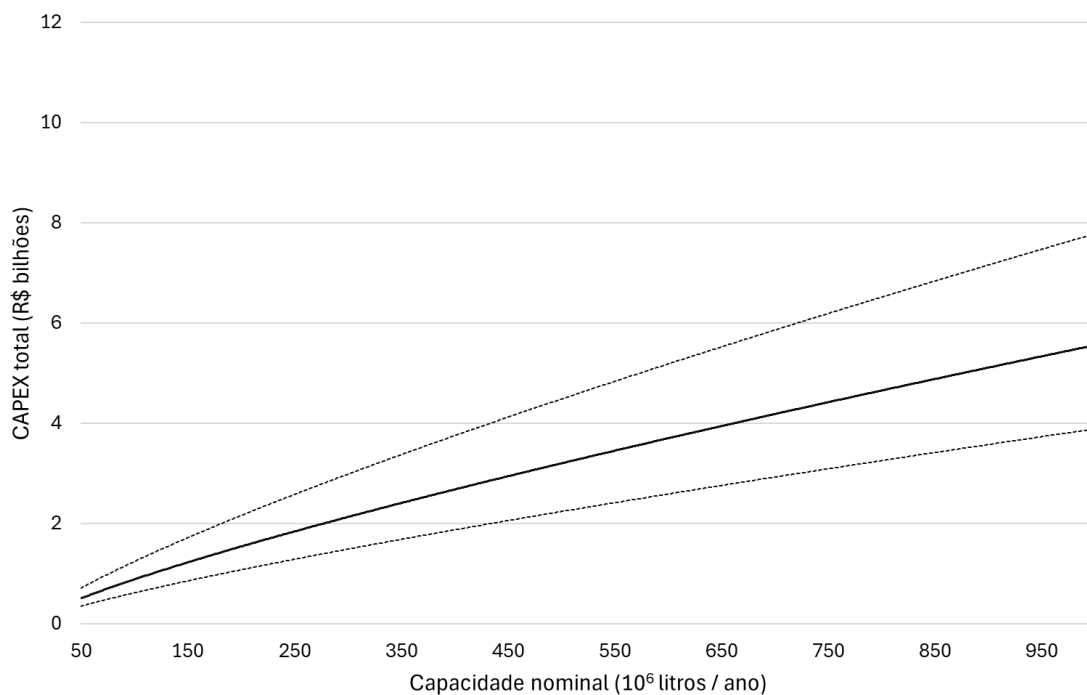


Figura 9 - Correlação entre o CAPEX e a Capacidade Nominal (inclui produção de SAF, diesel verde e bioNafta) para plantas HEFA.

Fonte: Elaboração própria

Nota: A linha sólida corresponde ao caso *default* utilizado na ferramenta, enquanto as linhas tracejadas indicam os valores adotados nas estimativas otimista e pessimista.

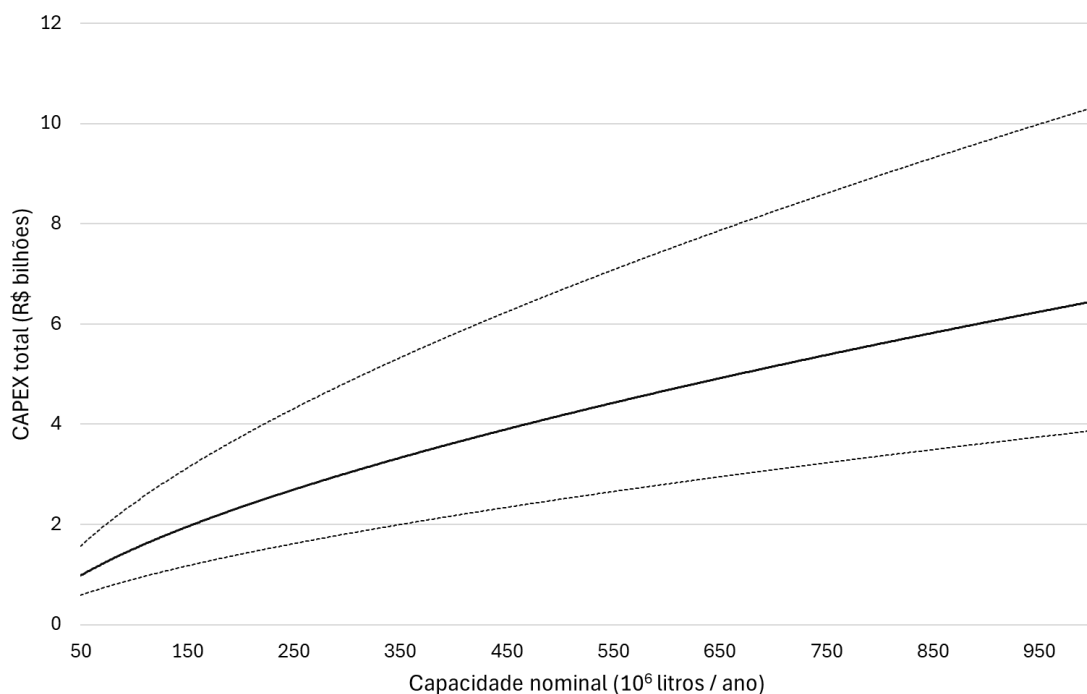


Figura 10 - Correlação entre o CAPEX e a Capacidade Nominal (inclui produção de SAF, diesel verde e bioNafta) para plantas ATJ.

Fonte: Elaboração própria

Nota: A linha sólida corresponde ao caso *default* utilizado na ferramenta, enquanto as linhas tracejadas indicam os valores adotados nas estimativas otimista e pessimista.

3.3. Custos de operação anuais (OPEX)

Os custos de operação da planta são divididos entre custos fixos e custos variáveis.

Os custos fixos de operação são aqueles que independem da quantidade de combustível efetivamente produzida. Nesta ferramenta, os custos fixos são divididos em três categorias: custos de manutenção, custos de mão de obra e outros custos fixos. A magnitude desses custos é consequência direta do tamanho da planta simulada. Por esse motivo, os custos fixos de operação (em R\$/ano) são estimados como percentuais do CAPEX total do empreendimento, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores considerados para estimativa dos custos fixos de operação.

Categoria de custo	Percentual do CAPEX
Custos de mão de obra	2,0 %
Custos de manutenção	3,0 %
Seguros, impostos e outros custos fixos	1,5 %

Fonte: Elaboração própria com base nos valores observados nos artigos revisados e na expertise interna da EPE.

Os custos variáveis de operação, por sua vez, são aqueles que dependem da quantidade de combustível efetivamente produzida. Em suma, correspondem aos custos associados aos insumos e utilidades consumidos pela planta, previamente especificados no inventário de entradas e saídas do empreendimento (Tabela 3). Para o cálculo do OPEX variável, é necessário que o usuário defina o preço desses insumos. A ferramenta contém valores *default* preenchidos para eles, conforme especificado na Tabela 6. Porém, **recomenda-se fortemente que o usuário atualize tais valores com preços próprios**, especialmente para o custo da matéria-prima (etanol ou óleo de soja), insumos altamente impactantes no preço mínimo de viabilidade do SAF e cujo preço pode variar significativamente por serem *commodities*. Ressalta-se que os preços utilizados representam os valores pagos por consumidores industriais.

Tabela 6 – Valores *default* utilizados para custos de insumos e utilidades e para custo de tratamento de água residual.

Insumo	Valor <i>default</i>	Unidade	Fonte
Óleo de soja	R\$ 4,86	R\$ / litro	Média dos preços entre 2023 e 2025 no porto de Paranaguá (Abiove - comunicação pessoal)
Sebo bovino	R\$ 5,16	R\$ / litro	Média dos preços entre 2023 e 2025 entregue em São Paulo (ABISA)
Etanol	R\$ 2,47	R\$ / litro	Média dos preços na usina entre 2023 e 2025 (CEPEA ESALQ USP)
Hidrogênio	R\$ 10,57	R\$ / kg	Custo do hidrogênio fóssil produzido <i>in situ</i> (PUC Rio e CNI – comunicação pessoal)
Eletricidade	R\$ 0,13	R\$ / kWh	Média dos preços no mercado livre entre 2023 e 2025 (CCEE)*
Gás natural	R\$ 5,03	R\$ / kg	Média dos preços ao consumidor industrial entre 2023 e agosto de 2025 (MME)
Cavaco de madeira	R\$ 0,47	R\$ / kg	Média dos preços entre janeiro de 2024 e janeiro de 2025 (IFAG)
Catalisadores (HEFA)**	R\$ 1,37	R\$ / g	Média de valores identificados nos artigos revisados (Tabela 1)
Catalisadores (ATJ)**	R\$ 0,12	R\$ / g	Média de valores identificados nos artigos revisados (Tabela 1)
Água para resfriamento***	R\$ 4,09	R\$ / m ³	Média no Brasil em 2020 (IBGE e ANA)
Tratamento de água residual***	R\$ 8,64	R\$ / m ³	Sinnott & Towler (2020)

Fonte: Elaboração própria

*Nota 1: A formação do custo de eletricidade para o consumidor industrial é complexa e depende de fatores altamente específicos do negócio. O preço avaliado neste documento deve ser entendido como mera referência de ordem de grandeza.

**Nota 2: O preço considerado é o preço médio dos catalisadores utilizados no processo, incluindo os diferentes tipos de catalisador, que não foram individualmente discriminados.

***Nota 3: Valores não-editáveis na ferramenta.

3.4. Receitas Anuais

De maneira similar ao cálculo dos custos de operação variáveis, as receitas por litro de combustível líquido produzido são calculadas a partir da determinação do valor de venda dos diferentes produtos gerados, de acordo com o inventário de entradas e saídas do empreendimento (Tabela 3). Os valores *default* considerados na ferramenta, passíveis de modificação pelo usuário, estão listados na Tabela 7. Especificamente, o preço de venda de SAF não é definido pelo usuário, por consistir precisamente no preço mínimo de viabilidade calculado pela ferramenta, como descrito na seção seguinte.

Os valores *default* utilizados na ferramenta consideram a paridade do preço de venda dos coprodutos da planta com os equivalentes fósseis. Ou seja, por *default* a ferramenta aloca todo o ônus econômico da planta produtiva no produto principal (SAF). Se trata de uma premissa conservadora que assume que o mercado de combustíveis de aviação seria o único disposto a

remunerar a redução de emissões ocasionada pelo biorrefino. Caso o usuário deseje modificar tal premissa, basta modificar o valor de venda dos coprodutos de forma a adicionar um prêmio em relação aos equivalentes fósseis.

Tabela 7 – Valores default utilizados para preços de venda dos coprodutos.

Insumo	Valor default	Unidade	Fonte
Diesel Verde	R\$ 3,84	R\$ / litro	Paridade com o preço médio do equivalente fóssil na refinaria entre 2023 e 2025 (EPE com base em dados da ANP)
bioNafta	R\$ 2,90	R\$ / litro	
bioGL	R\$ 2,79	R\$ / kg	

Fonte: Elaboração própria

3.5. Fluxo de caixa descontado pela taxa de custo médio de capital

Uma vez definidos os valores de CAPEX, OPEX e receitas, o fluxo financeiro (despesas e receitas) do empreendimento é descrito ano a ano para todo o período de vida esperado da planta. O preço mínimo de viabilidade é então calculado através do método de fluxo de caixa descontado pela taxa de custo médio de capital.

A Tabela 8 apresenta os parâmetros de fluxo de caixa modificáveis na ferramenta e os respectivos valores default utilizados, obtidos a partir da revisão de literatura e expertise técnica dos funcionários da EPE. O usuário possui a liberdade de alterar tais parâmetros como lhe convier, o que permite avaliar situações particulares ou a influência de cada variável no preço mínimo de viabilidade de SAF calculado.

Tabela 8 – Parâmetros de fluxo de caixa considerados e valores default estabelecidos para cada um.

Parâmetro	Valor default	Unidade
Tempo de operação da planta	20	anos
Tempo de construção da planta	3	anos
Tempo de atraso na construção	0	meses adicionais
Cronograma financeiro da construção	8 % / 60 % / 32 %	% do CAPEX por ano
Tempo de <i>start-up</i> da planta	6	meses
Receita durante o <i>start-up</i>	75 %	% da receita de operação
Custo variável durante <i>start-up</i>	75 %	% do OPEX variável de operação
Custo fixo durante <i>start-up</i>	100 %	% do OPEX fixo de operação
Porcentagem de CAPEX financiado	60 %	% do CAPEX
Porcentagem de CAPEX por <i>equity</i>	40 %	% do CAPEX
Taxa de juros do financiamento*	12,36 %	% ao ano
Taxa de desconto do <i>equity</i> **	15,00 %	% ao ano

Fonte: Elaboração própria

*Nota 1: Taxa de juros calculada considerando a linha de financiamento BNDES Finem – Meio Ambiente – Biorrefinarias, supondo inflação de 3% a.a.

**Nota 2: A taxa de desconto do *equity* equivale ao custo de capital próprio. A estimativa utilizada neste documento tem como base a taxa SELIC durante o ano de 2025.

O objetivo do cálculo é determinar o preço de SAF necessário para que o valor presente líquido (VPL) do empreendimento seja igual a zero (ou seja, que o empreendimento se pague em termos de OPEX e CAPEX). A cada ano, são computados os gastos totais e as receitas totais da planta, gerando um valor de fluxo de caixa livre (calculado subtraindo a despesa total da receita total). Esses valores são então convertidos em valor presente, e o VPL é calculado a partir da seguinte equação:

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + WACC)^t}$$

Onde n corresponde ao tempo de vida total do empreendimento, FC_t corresponde ao valor do fluxo de caixa livre do ano t , e $WACC$ se refere à taxa de custo médio de capital¹². A $WACC$ é calculada a partir da seguinte equação:

$$WACC = \frac{CAPEX_d}{CAPEX} R_d(1 - I) + \frac{CAPEX_e}{CAPEX} R_e$$

Onde os índices d e e se referem, respectivamente, ao capital de dívida (financiado) e ao capital de *equity*, R corresponde à taxa de juros ou de desconto considerada para cada capital e I corresponde à porcentagem total aplicada de tributos sobre o lucro da planta, descontados a depreciação, os juros e os tributos sobre faturamento bruto.

O cálculo realizado no simulador determina numericamente o valor do preço de venda de SAF que zera o VPL do empreendimento. Em outras palavras, é possível interpretar que o cálculo determina o preço de venda necessário para que a taxa interna de retorno (TIR) do empreendimento se iguale à $WACC$.

O tempo de vida total da planta é definido como a soma do tempo de construção e de operação. O ciclo de vida de uma planta de produção de SAF é dividido em três grandes momentos: Construção, *Start-up* e Operação.

No período de construção, considera-se somente despesas relativas ao CAPEX, sem receitas associadas. As despesas são distribuídas a cada ano de construção de acordo com o cronograma definido pelo usuário. É também possível definir um tempo de atraso da construção para avaliar o impacto desse parâmetro no MSP. Nesse caso, o atraso é adicionado como um período posterior à construção no qual não são consideradas despesas nem receitas.

O período de *start-up* consiste no primeiro ano de operação da planta. O tempo de *start-up* corresponde ao início da operação, no qual a produção total costuma ser menor que a capacidade total devido à necessidade de aprendizagem operacional. As despesas de OPEX variável e OPEX fixo e as receitas associadas ao período de *start-up* são definidas a partir de porcentagens definidas pelo usuário, que se referem às despesas e receitas da planta operando em condições plenas.

¹² Sigla do inglês para “*Weighted average capital cost*”. De maneira conceitual, a $WACC$ corresponde à taxa de desconto equivalente aplicada sobre os valores de fluxo de caixa que permite o pagamento da dívida financiada (já considerando o abatimento dos juros no cálculo do imposto de renda pago pelo empreendimento) e a remuneração requerida pelo investidor de *equity*.

O período de operação corresponde aos anos subsequentes até o fim de vida do empreendimento. Nesses anos, as despesas de OPEX variável e fixo e as receitas são calculadas de acordo com a produção efetiva da planta. Nesse período, é também necessário calcular as despesas relativas aos tributos pagos pela unidade produtiva. No Brasil, há dois grupos de tributos que devem ser considerados: tributos incidentes sobre o faturamento total da planta (PIS e COFINS¹³) e tributos incidentes sobre o lucro líquido do empreendimento (IRPJ e CSLL¹⁴). O valor de pagamento do PIS e COFINS representa 9,25 % das receitas totais e é calculado diretamente. Já para cálculo do IRPJ e CSLL, calcula-se inicialmente os lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização (EBITDA¹⁵) subtraindo as despesas de OPEX das receitas totais. Durante os 10 primeiros anos de operação, são descontados desse valor parcelas referentes à depreciação, que é calculada usando o método linear. Além disso, desconta-se também os valores referentes ao PIS e COFINS do EBITDA. Sobre o valor resultante, é então aplicado o percentual fixo de 34 % para cálculo do IRPJ e CSLL¹⁶.

Finalmente, o valor residual de venda para a infraestrutura, que corresponde ao valor esperado de revenda dos equipamentos ao final da vida útil da planta, foi considerado zero nesta ferramenta.

3.6. Prêmio ao produtor

Após a determinação do MSP, a ferramenta permite ao usuário inserir um valor correspondente ao prêmio ao produtor, informado como uma porcentagem do MSP. Tal valor aumenta o preço de venda do SAF pela porcentagem informada. A ferramenta, então, atualiza o fluxo de caixa descontado para considerar esse parâmetro, o que resultará em um VPL positivo para o empreendimento. Esse valor representa a totalidade do ganho econômico previsto para o produtor no cenário simulado.

Para considerar a possibilidade de modelos de negócio multimercado, o usuário deve definir o prêmio ao produtor em cada mercado visado (CORSIA, ProBioQAV e Outros Mercados – SAF). Isso permite analisar cenários em que diferentes atores estejam mais ou menos dispostos a remunerar ganhos de emissões.

¹³ PIS: Programa de Integração Social; COFINS: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social.

¹⁴ IRPJ: Imposto de Renda de Pessoa Jurídica; CSLL: Contribuição Social sobre Lucro Líquido.

¹⁵ Sigla do inglês para “*Earnings before interests, taxes, depreciation and amortization*”.

¹⁶ Na realidade, os juros referentes à parcela financiada do empreendimento também são subtraídos do EBITDA para calcular o valor base de incidência do IRPJ e CSLL. No método aplicado nesta ferramenta, entretanto, o desconto dos juros está implícito no valor da taxa de desconto aplicada (WACC). Por esse motivo, esses tributos são calculados desconsiderando o abatimento de juros.

4. Cálculo da intensidade de carbono

O mercado emergente de SAF se organiza a partir dos esforços internacionais para redução das emissões de GEE do segmento aéreo. Por esse motivo, diversas políticas e programas que fomentam a promoção desses combustíveis se baseiam em mandatos ou incentivos que têm na intensidade de carbono (IC) um parâmetro central. É o caso, por exemplo, do CORSIA, no âmbito internacional, e do ProBioQAV, no âmbito nacional. Em ambos os programas, são determinados mandatos de redução de emissões ao invés de mandatos volumétricos, como tradicionalmente se organiza o mercado de outros biocombustíveis. Por esse motivo, combustíveis de aviação com menor intensidade de carbono tendem a possuir vantagens competitivas, uma vez que geram a mesma redução de emissões com volumes menores.

A intensidade de carbono de um combustível é uma medida da quantidade de emissões de GEE associadas à sua produção, transporte e uso final. Na maioria dos programas e políticas, ela é avaliada na unidade de gramas de CO₂ equivalentes por megajoule (gCO₂eq/MJ). Seu cálculo se baseia em metodologias de análise de ciclo de vida (ACV), que estimam o impacto das emissões de gases de efeito estufa emitidos em toda a cadeia de valor do combustível.

Diversas abordagens de ACV têm sido propostas para estabelecer a IC do SAF produzido a partir das rotas HEFA e ATJ. Um ponto especialmente sensível do cálculo consiste na inclusão ou não da mudança de uso indireto da terra (iLUC¹⁷), sendo esse parâmetro incorporado em alguns programas e não incorporado em outros. Diferenças metodológicas incorrem em valores significativamente distintos de IC em muitos casos, o que pode impactar diretamente a competitividade e viabilidade econômica do combustível. Por isso, abordagens qualitativas de nível de risco de iLUC já estão sendo implementadas como alternativa aos modelos que tentam quantificar esse impacto.

Nesta ferramenta, é permitido ao usuário escolher entre métodos distintos para cálculo da IC do combustível produzido, de forma a avaliar a sua viabilidade em diferentes mercados e condições de certificação. É também permitido ao usuário informar um valor próprio de intensidade de carbono para os combustíveis, no caso em que se conheça esse valor. Como o valor de intensidade de carbono é alocado energeticamente, o mesmo valor (em gCO₂eq/MJ) será considerado para todos os coprodutos no caso de seleção de uso de valor próprio.

Para considerar a possibilidade de modelos de negócio multimercado, o usuário pode especificar o método de cálculo adotado em três diferentes mercados de venda simultâneos: CORSIA, ProBioQAV e Outros Mercados – SAF.

¹⁷ Sigla do inglês para “*Indirect land use change*”. O conceito de iLUC está associado à ideia de que a utilização de matérias-primas agrícolas como soja, cana e milho para fins energéticos levaria à diminuição da oferta de produtos alimentares associados, com risco de compensação através de remoção de vegetação nativa para plantação em outra localidade geográfica. Entretanto, os impactos efetivos desses mecanismos indiretos não são diretamente aferíveis, o que faz com que o cálculo das emissões de iLUC se dê usualmente através de modelagens econômicas altamente sensíveis às premissas iniciais. Por esse motivo, a prática de adotar valores numéricos para representar o impacto do iLUC na intensidade de carbono de combustíveis é questionável. Assim, a adoção do iLUC na metodologia de determinação da IC não é consensual, havendo programas que o fazem e outros que não.

4.1. Métodos de cálculo

Para avaliar a viabilidade da produção de SAF no Brasil, é necessário separar sua aplicação no mercado internacional, condicionado pelas regras estabelecidas pelo CORSIA, e no mercado nacional, condicionado pelas regras que serão estabelecidas para o ProBioQAV¹⁸.

No CORSIA, a intensidade de carbono de um combustível é determinada a partir de uma estrutura certificatória. Quaisquer produtores de combustível necessitam se certificar cumprindo os requisitos básicos do programa para adesão.

A partir disso, todos os produtores estão automaticamente submetidos à valores pré-estabelecidos de IC que dependem da rota produtiva utilizada. Esses valores, nomeados “valores *default*”, são oriundos de análises de ciclo de vida baseadas em premissas conservadoras de condições de produção, de forma que usualmente penalizam a intensidade de carbono de combustíveis que adotem práticas produtivas de menor impacto. Por esse motivo, os produtores possuem a opção de certificar seu processo produtivo em termos de consumos reais de insumos e utilidades. Tal certificação abrange aspectos que vão desde a fase agrícola até a industrial, comprovando intensidades de carbono reais aos combustíveis gerados. Nesse caso, os valores utilizados são nomeados “valores reais” (do inglês *actual value*) e substituem os “valores *default*” pré-estabelecidos

No âmbito do CORSIA, também são estabelecidos valores de iLUC para diferentes matérias-primas, que se somam aos valores de IC determinados em ACV para que se obtenha o valor final. As certificações de ciclo de vida não modificam o valor de iLUC. Porém, produtores podem também optar por certificar a matéria-prima como de “baixo risco de mudança do uso da terra”, removendo os valores de iLUC da intensidade de carbono de seu combustível.

O método de cálculo do ProBioQAV, por sua vez, ainda não está estabelecido, mas é provável que se baseie fortemente na metodologia estabelecida pela Política Nacional dos Biocombustíveis (RenovaBio). Nesse caso, a metodologia se baseia diretamente nos valores reais certificados pelo produtor¹⁹. Ademais, o RenovaBio não inclui valores de iLUC.

De forma a representar essas diversas condições de mercado, diferentes metodologias de cálculo de IC foram implementadas nesta ferramenta.

O cálculo da IC final do combustível é realizado em duas etapas: o cálculo do valor de IC correspondente ao ACV do combustível e a inclusão de valores de iLUC quando necessário. Para o cálculo de ACV, foram estabelecidos três métodos de cálculo possíveis, conforme apresentado na Tabela 9. A ferramenta seleciona o método de cálculo ACV e adiciona ou não os valores de iLUC de acordo com o caso definido pelo usuário, conforme apresentado na Tabela 10. Por *default*, a ferramenta pré-seleciona o método “Valores Médios Brasil” sem a inclusão de iLUC para o programa ProBioQAV e o método “CORSIA default” com a inclusão de iLUC para o programa CORSIA.

¹⁸ Até a publicação desta nota técnica, o detalhamento metodológico de cálculo de IC para o ProBioQAV ainda está em aberto.

¹⁹ De acordo com a minuta do decreto disponibilizada na consulta pública MME n° 204/2025, o produtor que obtiver certificação no âmbito dos programas da OACI poderá validá-la para uso no ProBioQAV.

Na metodologia ACV “CORSIA *default*”, adota-se os valores *default* estabelecidos no programa para as rotas HEFA e ATJ com matérias-primas brasileiras. Nas metodologias “valores médios Brasil”, o inventário de entradas e saídas (Tabela 3) é utilizado para cálculo da IC média efetiva dos combustíveis produzidos no Brasil. Os valores de carga ambiental de cada insumo são apresentados na Tabela 11, e uma alocação energética é estabelecida para cada produto, de forma que a intensidade de carbono é a mesma para SAF, diesel verde, bioNafta e bioGL. Por fim, a intensidade de carbono referência dos equivalentes fósseis é apresentada na Tabela 12. Ela é utilizada para o cálculo do custo de redução das emissões associada a cada combustível.

Tabela 9 - Métodos implementados para cálculo de IC do ACV do SAF.

Método	Metodologia
CORSIA <i>default</i>	Utiliza os valores <i>default</i> mais recentes (junho de 2025) (ICAO, 2025). As rotas implementadas para o ACV na ferramenta são: “2.9: HEFA – soybean oilseed”, “4.13 ATJ Sugarcane Standalone” e “4.14 ATJ Corn Grain Standalone”.
CORSIA valores médios Brasil	Utiliza os valores calculados por metodologia ACV baseados em intensidades de carbono médias brasileiras para etanol ou óleo de soja (somente óleo de soja certificado com valores de emissão).
ProBioQAV valores médios Brasil	Utiliza os valores calculados por metodologia ACV baseados em intensidades de carbono médias brasileiras para etanol ou óleo de soja (inclui óleo de soja certificado com valores de emissão e não certificado, sobre o qual são aplicados valores de IC penalizados).

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 - Métodos implementados para cálculo de IC final de SAF de acordo com o mercado simulado.

Mercado	Método	ACV	iLUC*	Caso simulado
CORSIA	(1)	CORSIA <i>default</i>	CORSIA <i>default</i>	Aderência ao CORSIA sem certificações adicionais.
	(2)	CORSIA <i>default</i>	Não incluído	Aderência ao CORSIA com certificação “ <i>low LUC risk</i> ”.
	(3)	CORSIA valores médios Brasil	CORSIA <i>default</i>	Aderência ao CORSIA, utilizando valores médios Brasil para representar “valores reais”.
	(4)	CORSIA valores médios Brasil	Não incluído	Aderência ao CORSIA, utilizando valores médios Brasil para representar “valores reais” e com certificação “ <i>low LUC risk</i> ”.
ProBioQAV	(5)	ProBioQAV valores médios Brasil	Não incluído	Aderência ao ProBioQAV utilizando valores médios Brasil.

Fonte: Elaboração própria

*Nota: para o valor de iLUC, foram utilizadas as seguintes matérias-primas, de acordo com os valores mais recentes reportados pela OACI: “8.2 HEFA: Brazil Soybean oilseed”, “10.15 ATJ: Brazil Sugarcane Standalone” e “10.29 ATJ: Brazil Corn Grain Sequential Cropping”.

Tabela 11 – Valores utilizados para carga ambiental das entradas do volume de controle para o método de cálculo “ACV valores médios Brasil”

Insumo	Valor	Unidade	Fonte
Óleo de soja (com certificado de emissão)	0,573	kg CO _{2eq} / kg óleo	EPE – cálculos realizados na RenovaCalc com valores médios brasileiros
Óleo de soja (sem certificado de emissão)	1,324	kg CO _{2eq} / kg óleo	EPE – cálculos realizados na RenovaCalc com valores médios brasileiros
Sebo bovino	0,043	kg CO _{2eq} / kg sebo	EPE – cálculos realizados na RenovaCalc com valores médios brasileiros
Etanol Cana de Açúcar	0,02132	kg CO _{2eq} / MJ	EPE – cálculos realizados na RenovaCalc com valores médios brasileiros
Etanol Milho 2ª safra	0,02034	kg CO _{2eq} / MJ	EPE – cálculos realizados na RenovaCalc com valores médios brasileiros
Hidrogênio fóssil	10,7	kg CO _{2eq} / kg H ₂	Ecoinvent: “Hydrogen Production SMR – Rest of the World”
Eletricidade Brasil	59,9	kg CO _{2eq} / MWh	(EPE, 2025b)
Calor (Gás Natural)	0,0757	kg CO _{2eq} / MJ	Ecoinvent: “Heat Production Industrial Furnace – Rest of the World”
Calor (Cavaco de Madeira)	0,00935	kg CO _{2eq} / MJ	Ecoinvent: “Heat Production at Furnace Hardwood Chips from forest”
Catalisadores (HEFA)	0,1324	kg CO _{2eq} / g	*
Catalisadores (ATJ)	0,0034	kg CO _{2eq} / g	**
Água de resfriamento	0,0014	kg CO _{2eq} / kg make-up	***

Fonte: Elaboração própria

*Nota 1: para catalisadores HEFA, considerou-se catalisadores de Níquel-Molibdênio para a etapa de hidrodessoxigenação e catalisadores de Platina para o craqueamento. Como referência, utilizou-se valores do Ecoinvent para: “Aluminum Oxide South America”, “Market for Nickel – Global”, “Market for Molybdenum – Global” e “Market for Platinum – Global”

**Nota 2: para catalisadores ATJ, considerou-se o catalisador médio sendo composto por Níquel. Utilizou-se valores do Ecoinvent para: “Aluminum Oxide South America” e “Market for Nickel – Global”

***Nota 3: para a água de resfriamento, considera-se o valor médio requerido de eletricidade para circulação da água de make-up, baseado em Li & Flynn (2021) e Schulze et al. (2019).

Tabela 12 – Intensidades de carbono dos equivalentes fósseis para os produtos.

Combustível fóssil	IC (g CO _{2eq} / MJ)	Fonte
Querosene de Aviação	89,0	Valor adotado no CORSIA
Óleo Diesel	86,5	Valor adotado no Renovabio
Nafta	87,4	Valor adotado no Renovabio para gasolina
GLP	76,0	WLPGA & LPE Exceptional Energy (2023)

Fonte: Elaboração própria

5. Referências

- AACE. **Prática Recomendada nº 18R-97: Sistema de classificação para estimativa de custos - conforme aplicado à engenharia, contratação e construção para processos industriais.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: www.aacei.org.
- ABURTO, Jorge; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Elías; CASTILLO-LANDERO, Arick. Is Sustainable Aviation Fuel Production Through Hydroprocessing of Esters and Fatty Acids (HEFA) and Alcohol-to-Jet (ATJ) Technologies Feasible in Mexico? **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 17, n. 4, 2025. DOI: 10.3390/su17041584.
- AKTER, Hosne Ara; MASUM, Farhad Hossain; DWIVEDI, Puneet. Life cycle emissions and unit production cost of sustainable aviation fuel from logging residues in Georgia, United States. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 228, 2024. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120611.
- CRAWFORD, Jordan T.; SHAN, Chin Wei; BUDSBERG, Erik; MORGAN, Hannah; BURA, Renata; GUSTAFSON, Rick. Hydrocarbon bio-jet fuel from bioconversion of poplar biomass: Techno-economic assessment. **Biotechnology for Biofuels**, [S. l.], v. 9, n. 1, 2016. DOI: 10.1186/s13068-016-0545-7.
- EPE. **Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil e sinergia com o diesel verde.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-e-sinergia-com-o-diesel-verde>. Acesso em: 28 jan. 2026a.
- EPE. **Balanco Energético Nacional - Relatório Síntese.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 2 fev. 2026b.
- HAN, Jeongwoo; TAO, Ling; WANG, Michael. Well-to-wake analysis of ethanol-to-jet and sugar-to-jet pathways. **Biotechnology for Biofuels**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2017. DOI: 10.1186/s13068-017-0698-z.
- HONG, Jinpeng; CHEN, Bo; WANG, Tiejun; ZHAO, Xuebing. A promising technical route for converting lignocellulose to bio-jet fuels based on bioconversion of biomass and coupling of aqueous ethanol: A techno-economic assessment. **Fuel**, [S. l.], v. 381, 2025. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133670.
- ICAO. **CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels.** [s.l.: s.n.].
- IEA. **Aviation.** 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>. Acesso em: 28 jan. 2026.
- KLEIN, Bruno Colling; CHAGAS, Mateus Ferreira; JUNQUEIRA, Tassia Lopes; REZENDE, Mylene Cristina Alves Ferreira; CARDOSO, Terezinha de Fátima; CAVALETT, Otavio; BONOMI, Antonio. Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. **Applied Energy**, [S. l.], v. 209, p. 290–305, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.079.
- LI, Shuo; FLYNN, M. R. **Cooling tower plume abatement and plume modeling: a review.** **Environmental Fluid Mechanics** Springer Science and Business Media B.V., , 2021. DOI: 10.1007/s10652-021-09790-w.
- MARRECO, J. **Análise Econômica de Diferentes Rotas de Produção de Combustíveis Sustentáveis de Aviação.** [s.l.: s.n.].
- MARTINEZ-HERNANDEZ, Elias; RAMÍREZ-VERDUZCO, Luis Felipe; AMEZCUA-ALLIERI, Myriam A.; ABURTO, Jorge. Process simulation and techno-economic analysis of bio-jet fuel and green diesel production – Minimum selling prices. **Chemical Engineering Research and Design**, [S. l.], v. 146, p. 60–70, 2019. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.03.042.
- MOUSAVI-AVVAL, Seyed Hashem; SHAH, Ajay. Techno-economic analysis of hydroprocessed renewable jet fuel production from pennycress oilseed. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 149, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111340.
- NG, Kok Siew; FAROOQ, Danial; YANG, Aidong. **Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production.** **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd., , 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111502.
- PAVLENKO, Nikita; SEARLE, Stephanie; CHRISTENSEN, Adam. **The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union.** [s.l.: s.n.].
- SCHULZE, Christine; THIEDE, Sebastian; HERRMANN, Christoph. Life Cycle Assessment of Industrial Cooling Towers. *Em: Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management*. [s.l.]: Springer, 2019. p. 135–146. DOI: 10.1007/978-3-319-92237-9_15.
- SINNOTT, Ray; TOWLER, Gavin. Costing and Project Evaluation. *Em: Chemical Engineering Design*. [s.l.]: Elsevier, 2020. p. 275–369. DOI: 10.1016/b978-0-08-102599-4.00006-0.
- TANZIL, Abid H.; BRANDT, Kristin; WOLCOTT, Michael; ZHANG, Xiao; GARCIA-PEREZ, Manuel. Strategic assessment of sustainable aviation fuel production technologies: Yield improvement and cost reduction opportunities. **Biomass and Bioenergy**, [S. l.], v. 145, 2021. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105942.

TAO, Ling; MARKHAM, Jennifer N.; HAQ, Zia; BIDDY, Mary J. Techno-economic analysis for upgrading the biomass-derived ethanol-to-jet blendstocks. **Green Chemistry**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 1082–1101, 2017. a. DOI: 10.1039/c6gc02800d.

TAO, Ling; MILBRANDT, Anelia; ZHANG, Yanan; WANG, Wei Cheng. Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel. **Biotechnology for Biofuels**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2017. b. DOI: 10.1186/s13068-017-0945-3.

TEIXEIRA, Adryena T.; DA SILVA, Amanda C. M.; CAVALCANTE, Raquel M.; YOUNG, André F. Process simulation and economic evaluation of the Alcohol-to-Jet production of sustainable aviation fuel in the Brazilian context. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 319, 2024. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118947.

VAKKILAINEN, Esa Kari. Boiler Processes. *Em: Steam Generation from Biomass*. [s.l.] : Elsevier, 2017. p. 57–86. DOI: 10.1016/b978-0-12-804389-9.00003-4.

WANG, Wei Cheng. Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing Hydro-processed Renewable Jet fuel from Jatropha. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 95, p. 63–73, 2016. DOI: 10.1016/j.renene.2016.03.107.

WANG, Wei Cheng. Techno-economic analysis for evaluating the potential feedstocks for producing hydro-processed renewable jet fuel in Taiwan. **Energy**, [S. l.], v. 179, p. 771–783, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.04.181.

WLPGA; LPE EXCEPTIONAL ENERGY. **Carbon Intensities, Renewable and Fossil Liquid Gases, LPG & DME**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://online.fliphtml5.com/addge/peyi/#p=2>. Acesso em: 4 fev. 2026.

YAO, Guolin; STAPLES, Mark D.; MALINA, Robert; TYNER, Wallace E. Stochastic techno-economic analysis of alcohol-to-jet fuel production. **Biotechnology for Biofuels**, [S. l.], v. 10, n. 1, 2017. DOI: 10.1186/s13068-017-0702-7.

Anexo A – Propriedades físico-químicas consideradas para conversões de unidades

Propriedade	Unidade	Substância	Valor	Fonte
Densidade	kg/l	Óleo de Soja	0,9216	Inmetro
		Sebo bovino	0,905	Campestre
		QAV	0,799	ANP
		Etanol hidratado	0,809	ANP
		Diesel	0,840	ANP
		Nafta	0,702	ANP
		GLP	0,552	ANP
		Gás natural úmido	$7,4 \cdot 10^{-4}$	ANP
Poder calorífico inferior	MJ/kg	QAV	43,51	ANP
		Etanol hidratado	26,36	ANP
		Diesel	42,26	ANP
		Nafta	44,48	ANP
		GLP	46,45	ANP
		Gás natural úmido	41,55	ANP
		Cavaco de madeira	16,12	Borges (2015)