



Levelised Cost of  
**Hydrogen**  
Calculator

Powered by LNEG

**LNEG-LCOH**  
**Calculadora do Custo Nivelado do Hidrogénio:**  
**Descrição e Relatório Metodológico**  
Versão 02.2025

Juan C. C. Portillo e Sofia G. Simões

Março 2025



# Contents

<b>Declaração de exoneração de responsabilidade</b>	<b>2</b>
<b>Lista de Símbolos e Acrónimos</b>	<b>2</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>4</b>
1.1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)	4
1.1.1 Laboratório de Energia (LEN)	4
1.1.2 Laboratório de Geologia e Minas (LGM)	4
1.1.3 Laboratórios Acreditados	5
1.1.4 LNEG como contribuidor de ecossistemas de inovação	5
1.2 Unidade de Economia de Recursos (UER)	6
1.3 Objetivo da Ferramenta LNEG-LCOH	6
1.4 Versão	6
1.5 Exclusões	6
1.6 Estrutura do Documento	6
<b>2 Metodologia de Cálculo do Custo do Hidrogénio</b>	<b>7</b>
2.1 O que é o Custo Nivelado do Hidrogénio?	7
2.2 Componentes da Cadeia de Valor Considerados na Ferramenta	7
2.3 Ferramenta LNEG-LCOH: Visão geral	8
2.4 Módulo de Produção de Hidrogénio: <i>H<sub>2</sub> Produção</i>	9
2.4.1 Lista de variáveis do módulo de produção	10
2.5 Módulo de Liquefação: <i>H<sub>2</sub> Liquefação</i>	10
2.5.1 Lista de variáveis do módulo de liquefação	11
2.6 Módulo de Armazenamento de Hidrogénio: <i>H<sub>2</sub> Armazenamento</i>	11
2.6.1 Lista de variáveis do módulo de armazenamento	12
2.7 Distribuição de Hidrogénio - Transporte Rodoviário: <i>H<sub>2</sub> Transporte Rodoviário</i>	12
2.7.1 Lista de variáveis do módulo de transporte rodoviário	13
2.8 Distribuição de Hidrogénio - Gasoduto: <i>H<sub>2</sub> Distribuição Gasoduto</i>	13
2.8.1 Lista de variáveis do módulo de distribuição por gasoduto	14
2.9 Módulo de Estações de Reabastecimento de Hidrogénio: <i>H<sub>2</sub> Reabastecimento</i>	14
2.9.1 Lista de variáveis do módulo H <sub>2</sub> Reabastecimento	15
2.10 Seleção de Módulos Individuais e Cálculo do LCOH	16
<b>3 Caso e Valores de Referência</b>	<b>17</b>
3.1 Valores de Referência	17
<b>4 Exemplos e Comparações</b>	<b>20</b>
4.1 Produção de Hidrogénio: Comparações com a Calculadora LCOH da CE	20
4.2 HRS com Produção Local de Hidrogénio	27
4.3 Produção Centralizada de Hidrogénio e Distribuição via Transporte Rodoviário a várias HRSs	28
4.4 Caso <i>MIBGAS IBHYX Index</i>	31
<b>5 Como Reportar Erros, Falhas, Sugestões e Comentários?</b>	<b>34</b>
5.1 Procedimento e Contactos	34

# Declaração de exoneração de responsabilidade

O objetivo deste documento é apresentar a metodologia implementada para a ferramenta LNEG-LCOH - Calculadora do Custo Nivelado do Hidrogénio.

Os dados valores de referência na Ferramenta LNEG-LCOH são baseados em valores obtidos de diferentes fontes, incluindo contato direto com atores industriais na Europa. Os valores correspondem principalmente ao ano de 2024. Os autores acreditam que os dados provêm de fontes fiáveis, mas não garantem a sua exatidão ou completude. Os valores de referência podem ser atualizados anualmente.

As informações e opiniões contidas neste relatório são da responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente a opinião oficial do LNEG, do Governo Português, ou de qualquer outra instituição portuguesa ou europeia. Nenhuma outra pessoa que atue em seu nome poderá ser responsabilizada pelo uso que possa ser feito da informação nele contida.

Este relatório e a ferramenta aqui descrita foram elaborados no âmbito da Agenda Moving2Neutrality, Projeto 3.3, WP3, "Avaliação técnica e económica de soluções de transporte H<sub>2</sub> para redes HRS & de H<sub>2</sub> líquido", financiado pelo Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). O PRR é um programa implementado a nível nacional, com um período de desenvolvimento até ao final de 2025, cujo objetivo é implementar um conjunto de reformas e investimentos destinados a repor o crescimento económico sustentado após a pandemia, reforçando o objetivo de convergência com o resto da Europa ao longo da próxima década.

Todas as unidades usadas na Ferramenta LNEG-LCOH estão em unidades SI. A unidade monetária é € para a entrada e saída de qualquer módulo.

© Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2025. Reprodução autorizada mediante indicação da fonte. Para qualquer uso ou reprodução de material que não esteja sob os direitos autorais do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, a permissão deve ser solicitada diretamente aos detentores dos direitos autorais.

Cite este documento como:

J.C.C. Portillo, S. Simões, LNEG-LCOH - Calculadora do Custo Nivelado do Hidrogénio: Descrição e Relatório Metodológico, Versão 02.2025. Tech. rep., LNEG (2025). URL <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/4409>



REPÚBLICA  
PORTUGUESA



Financiado pela  
União Europeia  
NextGenerationEU

# Lista de Símbolos

AHP	Produção anual de hidrogénio
AHP <sub>nom</sub>	Produção nominal anual de hidrogénio - conforme especificado pelo fabricante
CAPEX	Despesas de capital
DECEX	Despesas de desmantelamento
H <sub>2</sub>	Hidrogénio
HRS	Estação de abastecimento de hidrogénio
LCOH	Custo nivelado do hidrogénio
LF	Fator de carga da instalação de eletrólise da água
OPEX	Despesas operacionais
OPEX <sub>fix</sub>	Despesas operacionais fixas anuais
OPEX <sub>var</sub>	Despesas operacionais variáveis anuais
PPA	Contrato de Compra de Energia ( <i>Power Purchase Agreement</i> )
PV	Fotovoltaico ( <i>Photovoltaic</i> )
$n$	Ano $n$
$n_{lifetime}$	Último ano de operação dos ativos, ou seja, ano de fim de vida
$r$	Taxa de desconto anual
$r_{degradation}$	Taxa anual de degradação

# 1 Introdução

## 1.1 Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG)

O Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. (LNEG) é uma instituição de investigação, que realiza Ciência nos domínios da Energia, Geologia e Recursos Geológicos com vista à sua aplicação em soluções avançadas que permitam alavancar a Economia Portuguesa. O LNEG está sob tutela do Ministério do Ambiente e Energia de Portugal.

O LNEG, sob o Lema “Construir um futuro mais limpo e melhor”, tem como Missão impulsionar e realizar ações de investigação, de demonstração e transferência de conhecimento, de assistência técnica e tecnológica e de apoio laboratorial dirigidas às empresas, nos domínios da Energia e Geologia (Decreto-Lei nº 129/2014 de 29 de agosto).

A visão da LNEG é ser uma instituição de referência capaz de contribuir com soluções de excelência para uma economia descarbonizada. Os Valores seguidos pelo LNEG focam-se na Excelência, Compromisso, Pessoas e Inovação.

Em 2010, o Laboratório Nacional de Energia e Geologia aderiu aos princípios da Carta Europeia do Investigador e ao Código de Conduta para o recrutamento de investigadores. Em 2013, o LNEG recebeu o direito de utilização do logótipo da *Excellence in Research HR*.

O LNEG está organizado em dois laboratórios principais: o Laboratório de Energia (LEN) e o Laboratório de Geologia e Minas (LGM). Além disso, existe uma unidade de investigação transversal denominada Unidade de Economia de Recursos (UER), e várias unidades de apoio administrativo e de gestão para assegurar o bom funcionamento do LNEG (e.g., Unidade de Gestão Estratégica, Departamento de Gestão e Organização, entre outros).

Alicerçado nos valores da Excelência, Compromisso, Pessoas e Inovação, o LNEG pretende contribuir para a construção de um futuro mais limpo e sustentável.

### 1.1.1 Laboratório de Energia (LEN)

O LEN opera nas áreas de recursos energéticos endógenos renováveis e eficiência energética. Tem a responsabilidade de conhecer o potencial das fontes de energia renováveis e explorar tecnologias inovadoras e estratégicas para apoiar a utilização ótima dos recursos. O conhecimento acumulado da sua atividade de investigação permite-lhe estar permanentemente preparado para apoiar a implementação de políticas públicas e do setor empresarial. O LEN está dividido em três unidades principais:

- Unidade de Bioenergia e Biorefinarias
- Unidade de Energias Renováveis e Eficiência Energética
- Unidade de Materiais para Energia

### 1.1.2 Laboratório de Geologia e Minas (LGM)

O LGM desempenha funções permanentes do Estado no desenvolvimento do conhecimento geocientífico do território emergente, da plataforma continental e das zonas de águas profundas. É também responsável pelo levantamento geológico sistemático dos riscos e recursos geológicos, incluindo os recursos energéticos geotérmicos, o armazenamento geológico, nomeadamente CO<sub>2</sub>, e o património geológico. Desempenha funções do Serviço Geológico Nacional. O conhecimento acumulado da sua atividade de investigação permite-lhe estar permanentemente preparado para apoiar a implementação de políticas públicas e do setor empresarial. O LGM está dividido em quatro unidades principais:

- Unidade de Geologia, Hidrogeologia e Geologia Costeira
- Unidade de Informação Geocientífica
- Unidade de Recursos Minerais e Geofísica
- Unidade de Ciência e Tecnologia Mineral

### 1.1.3 Laboratórios Acreditados

O LNEG conta com três laboratórios acreditados que servem o governo, a indústria e a sociedade:

- Laboratório de Biocombustíveis e Biomassa
- Laboratório de Materiais e Revestimentos
- Laboratório de Energia Solar

### 1.1.4 LNEG como contribuidor de ecossistemas de inovação

O LNEG integra cinco infraestruturas tecnológicas nas quais se estabelece uma estreita cooperação entre parceiros públicos e privados, tirando partido do conhecimento, equipamentos e instalações experimentais complementares existentes. Estas estruturas estão igualmente abertas à cooperação externa. Alguns deles estão listados aqui:

- BBRI – Biomass and Bioenergy Research Infrastructure;
- C4G – Collaboratory for Geosciences;
- INIESC – National Research Infrastructure for Concentrating Solar Energy;
- NZEB LAB – Research Infrastructure on Integration of Solar Energy Systems in Buildings;
- WindScanner – The European WindScanner Facility.

Os Laboratórios Colaborativos (CoLabs) inserem-se numa abordagem recente do Estado Português e o LNEG desenvolve atividades no âmbito dos seguintes CoLabs:

- CoLAB BIOREF - Collaborative Laboratory for Biorefineries;
- HyLAB - Collaborative Laboratory for Green Hydrogen;
- CECOLAB – Collaborative Laboratory Towards Circular Economy; and
- GreenCoLab – Oceano Verde Association.

Os Laboratórios Colaborativos pretendem ter um efeito positivo no emprego qualificado e científico em Portugal através da definição e implementação de agendas de investigação e inovação que visem a criação de valor económico e social.

O LNEG é também o Serviço Geológico de Portugal e é membro efetivo do European Geological Surveys, EuroGeoSurveys. Destaca-se ainda a atividade das três litotecas geridas pelo LNEG, nas quais, para além dos 700 mil metros de sondagens, estão também disponíveis para consulta mais de uma centena de secções geológicas, bem como milhares de amostras, secções finas de rochas e células microfósseis. Estes fornecem informações científicas valiosas a investigadores, estudantes, autoridades locais, organizações e empresas. O LNEG gere também o geoPortal da Energia e Geologia.

O Museu Geológico é também um importante ativo do LNEG, que proporciona visitas públicas regulares ao seu espaço museológico. Estão também disponíveis coleções de referência para consulta e estudo por investigadores, tanto em Portugal como no estrangeiro.

## 1.2 Unidade de Economia de Recursos (UER)

A Unidade de Economia de Recursos (UER) é transversal às áreas de Energia e Geologia do LNEG. Desenvolve atividades de I&D&D e apoio à decisão no setores público e privado em economia de energia e recursos geológicos, visando a neutralidade carbónica e a exploração e utilização sustentável dos recursos. A unidade aplica abordagens analíticas técnico-económicas e sociais nas áreas de (1) Sistemas energéticos sustentáveis, (2) Utilização dos recursos para a produção e consumo de energia, (3) Classificação de depósitos geológicos nacionais e recursos energéticos numa economia global, (4) Impacto económico e social da transição energética, e (5) Economia circular, incluindo a conceção de produtos, serviços, sistemas e modelos de negócios. O UER é a unidade responsável pela criação e manutenção da Ferramenta LNEG-LCOH e serve como interface para utilizadores externos da ferramenta.

## 1.3 Objetivo da Ferramenta LNEG-LCOH

O objetivo da LNEG-LCOH - Calculadora do Custo Nivelado do Hidrogénio (Ferramenta LNEG-LCOH) é fornecer um serviço gratuito para a estimativa rápida de custos em diferentes componentes da cadeia de valor do hidrogénio. A ferramenta está pensada para proporcionar flexibilidade de acordo com as necessidades dos utilizadores e fornecer valores de referência com base nas tendências atuais. Espera-se que a ferramenta evolua ao longo do tempo para considerar mais componentes e satisfazer as necessidades que possam surgir dos utilizadores.

O LNEG contribui ativamente para reduzir o hiato entre a investigação e o mercado, apoiando a inovação. Desenvolve ferramentas de uso público e de alto valor acrescentado para analisar as cadeias de valor e abastecimento associadas ao hidrogénio e acompanha de perto o intercâmbio de ideias desta área emergente.

## 1.4 Versão

A versão atual da ferramenta é identificada como Versão 02.2025. Visite a Seção 5.1 para obter mais informações sobre contatos e como reportar erros ou colocar questões.

Tabela 1.1: Tabela de controlo de versões.

Versão	Ano	Descrição
01.2024	2024	Versão inicial a apresentar a metodologia e a ferramenta.
02.2025	2025	Revisão do texto e adição de exemplos e arquivo excel como anexo dos dados de entrada de referência.

## 1.5 Exclusões

A versão da Ferramenta LNEG-LCOH descrita neste relatório exclui as seguintes variáveis, itens, módulos, conceitos ou dimensões:

- Impostos, subsídios ou incentivos sob qualquer forma.
- Despesas de desmantelamento (DECEX).
- A consideração de outros co- ou subprodutos como o oxigénio nem o seu proveito económico ou outros combustíveis sustentáveis que podem ser produzidos com o uso do hidrogénio verde, por exemplo, óleos vegetais hidrogenados (HVO) ou amoníaco (NH<sub>3</sub>).
- Créditos associados à redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

## 1.6 Estrutura do Documento

Este documento está dividido em seis seções principais. A Seção 1 apresenta uma introdução do LNEG, o objetivo da Ferramenta LNEG-LCOH e o controlo de versões. A Seção 2 apresenta a metodologia geral de cálculo do LCOH e a Ferramenta LNEG-LCOH. A Seção 3 apresenta os valores de referência para um caso de estudo hipotético. A Seção 4 mostra alguns exemplos e comparações com outra ferramenta. A Seção 5 apresenta informações sobre contatos e como reportar erros, falhas, sugestões e comentários.

# 2 Metodologia de Cálculo do Custo do Hidrogénio

Esta seção apresenta a metodologia utilizada para o cálculo do custo nivelado do hidrogénio (LCOH). Começa com a visão geral do LCOH, sua definição e equação, seguido por uma descrição de cada um dos módulos da ferramenta LNEG-LOCH implementada na versão atual.

## 2.1 O que é o Custo Nivelado do Hidrogénio?

O custo nivelado do hidrogénio (LCOH) é um indicador ou métrica que tem sido amplamente aceite para comparar opções de projetos que envolvem hidrogénio ou outros projetos energéticos, o que também serve para avaliar a sua competitividade. É também um método que serve para avaliar as despesas envolvidas em projetos de hidrogénio ao longo de todo o ciclo de vida dos mesmos.

O LCOH permite que decisores de políticas, investidores, atores industriais e outros agentes económicos tomem decisões bem informadas sobre estratégias para a promoção de modelos de negócios de hidrogénio sustentáveis e com boa relação custo-benefício e a consequente alocação de recursos.

O LCOH pode ser definido como uma métrica que relaciona todas as despesas ao longo da vida útil dos ativos de hidrogénio, incluindo despesas de capital ou custos de investimento (CAPEX), os custos operacionais e de manutenção (OPEX) e despesas de desmantelamento (DECEX), com uma produção ou quantidade de referência de hidrogénio. O LCOH considera todas as quantidades (custos e quantidade de hidrogénio) descontadas ao longo do tempo a uma taxa de desconto anual e a sua contribuição desde o início até ao fim da operação, ou seja, toda a vida útil dos ativos.

A seguinte fórmula geral é utilizada na Ferramenta LNEG-LCOH para calcular o custo nivelado do hidrogénio:

$$\text{LCOH} = \frac{\text{CAPEX} + \sum \frac{\text{OPEX}_{\text{fix}} + \text{OPEX}_{\text{var}}}{(1+r)^n}}{\sum \frac{\text{AHP}}{(1+r)^n}} \quad (2.1)$$

onde as novas variáveis são custos operacionais e de manutenção fixos,  $\text{OPEX}_{\text{fix}}$  (por exemplo, mão de obra, custos administrativos ou outros custos não dependentes de variações da quantidade de hidrogénio), custos operacionais e de manutenção variáveis,  $\text{OPEX}_{\text{var}}$  (por exemplo, eletricidade, água para produção de hidrogénio, substituições de *stacks* de eletrolisadores, combustível ou outros custos dependentes da quantidade de hidrogénio produzido, liquefeito, armazenado, transportado ou distribuído), a taxa de desconto,  $r$ , o ano da despesa ou produção,  $n$ , e a quantidade anual produzida, AHP, ou quantidade equivalente de hidrogénio (armazenado, transportado, distribuído). A Equação 2.1 representa a equação geral para o cálculo do LCOH para qualquer um dos módulos implementados na ferramenta. O utilizador deve estar ciente de que na versão atual da ferramenta, os DECEX não são considerados e não estão incluídos na Equação 2.1.

A definição de LCOH adotada e apresentada na Equação 2.1 é equivalente ao Custo Nivelado da Energia ou Eletricidade (LCOE), pelo que a conversão do LCOH expressa em €/kgH<sub>2</sub> poderia ser feita facilmente a €/MWh. Isto permite comparações mais fáceis entre diferentes projetos energéticos para além dos projetos de hidrogénio.

## 2.2 Componentes da Cadeia de Valor Considerados na Ferramenta

O hidrogénio verde é um elemento versátil e promissor no contexto energético português e europeu. O hidrogénio pode ser usado como matéria-prima, como combustível ou como vetor energético. Como matéria-prima, é utilizado em variados processos industriais, muitos associados à indústria química. Como combustível, o hidrogénio pode ser



Figura 2.2: Componentes da cadeia de valor considerados na Ferramenta LNEG-LCOH.

usado em células de combustível para gerar eletricidade, emitindo apenas água como subproduto, o que o torna uma opção limpa e sustentável, ou pode ser usado na produção de outros combustíveis sustentáveis como amoníaco, metanol ou jet fuels, entre outros. Como vetor energético, o hidrogénio permite o armazenamento e transporte de energia, funcionando como uma ponte entre a produção intermitente de energias renováveis, como a solar e a eólica, e a necessidade da procura de energia. Complementarmente, o hidrogénio pode ter um papel estratégico na independência energética de certas regiões.

As cadeias de valor e de abastecimento dependerão consequentemente do uso final e dos modelos de negócio. Na Ferramenta LNEG-LCOH seis componentes foram implementados. Estes são: i) produção de hidrogénio verde, ii) a sua liquefação, iii) o armazenamento, iv) o transporte rodoviário, v) o transporte por gasodutos e vi) a distribuição através de estações de abastecimentos (ver Figura 2.2). Outros usos ou a transformação do hidrogénio em outros combustíveis sustentáveis não foram considerados na versão atual da ferramenta.

## 2.3 Ferramenta LNEG-LCOH: Visão geral

A Ferramenta LNEG-LCOH é compreende seis módulos opcionais. Podem ser utilizados individualmente ou em simultâneo e representam componentes da cadeia de valor do hidrogénio, desde a produção até o transporte e a distribuição em estações de abastecimento de hidrogénio. A cadeia de valor do hidrogénio é muito mais extensa do que os seis componentes implementados na ferramenta. No entanto, restrições de projeto e limitações de tempo são fatores que limitaram o alcance da versão atual da ferramenta.

Os seis módulos da ferramenta são i) H<sub>2</sub> Produção, ii) H<sub>2</sub> Liquefação, iii) H<sub>2</sub> Armazenamento, iv) H<sub>2</sub> Transporte Rodoviário, v) H<sub>2</sub> Distribuição Gasoduto, e vi) H<sub>2</sub> Reabastecimento (HRS). Estes são descritos mais detalhadamente nas secções seguintes.

O Ferramenta LNEG-LCOH fornece valores de referência para cada uma das variáveis usadas em cada um dos módulos na versão atual. Os valores de referência considerados para a produção de H<sub>2</sub> correspondem a uma hipotética central de eletrólise da água de 50 MW. Embora exista a opção de selecionar eletrolisadores alcalinos (ALK) ou de membrana de troca de prótons (PEM) na ferramenta, atualmente um valor médio é mostrado para os custos de CAPEX da instalação de eletrólise. Presume-se que a instalação tenha um sistema de eletrólise tecnologicamente neutro (50% ALK / 50% PEM). Uma abordagem semelhante foi adotada para o *MIBGAS IBHYX Index*. No entanto, o utilizador tem a liberdade de introduzir valores diferentes. Alguns valores de referência para todos os módulos são fornecidos na subsecção seguinte.

Note-se que as palavras “planta” e “instalação” são usadas indistintamente tanto neste documento quanto na ferramenta. Importa referir que todos os valores podem ser introduzidos pelo utilizador ou, se preferir, podem ser usados os valores de referência para todas as variáveis de input (entrada) ou apenas para algumas delas.



**Nota:** Os valores de referência sugeridos são apresentados numa coluna separada para cada campo, com base numa instalação hipotética de produção de hidrogénio de 50 MW. No entanto, os utilizadores podem introduzir os seus próprios dados personalizados, se assim o desejarem, o que permite flexibilidade na sua avaliação e análise.

## 2.4 Módulo de Produção de Hidrogénio: *H<sub>2</sub> Produção*

O módulo de produção  $H_2$  considera uma instalação de eletrólise de água e usa a Equação 2.1 para obter um LCOH para a produção de hidrogénio.

### CAPEX

O CAPEX pode ser introduzido pelo utilizador ou podem ser usados os valores de referência. O valor introduzido pelo utilizador não deve considerar o custo do *stack*, que é calculado internamente usando a entrada de CAPEX pelo utilizador e a percentagem do custo do *stack* em relação ao CAPEX (sem custos iniciais do *stack*). Os custos de substituição do *stack* durante a vida útil da instalação de produção de hidrogénio são considerados OPEX quando aplicados após o início das operações.

### OPEX

O OPEX divide-se em valores anuais fixos e valores anuais variáveis. Os últimos consideram o consumo de eletricidade e água para a instalação de eletrólise, bem como os custos de substituição do *stack* ao longo da vida útil do ativo. Os custos unitários são introduzidos pelo utilizador tanto para a eletricidade como para a água.

Em relação ao consumo de água, o utilizador tem três opções: água da rede pública (Água Doce), água de águas residuais tratadas (Água Residual) e água dessalinizada (Água do Mar). Na versão atual, apenas uma fonte de água pode ser usada de cada vez. Em contraste, a eletricidade pode ser especificada a partir de uma combinação de fontes. São possíveis quatro tipos de fontes: da rede elétrica, solar fotovoltaica, eólica onshore e eólica offshore. Diferentes percentagens e preços podem ser introduzidos pelo utilizador.

Os custos de substituição do *stack* são calculados como uma percentagem do CAPEX (sem *stack*). A percentagem e os valores do CAPEX são inseridos pelo utilizador. Mais detalhes sobre o *stack* são apresentados seguidamente.

### $H_2$ Produção

A produção de hidrogénio é ajustada ao longo do ano e da vida útil de duas formas. A primeira está associada às horas de trabalho reais ao longo de um ano, o que é feito através da aplicação de um fator de carga médio anual (LF). O segundo está associado à degradação do *stack*, um problema conhecido e sobre o qual os fabricantes devem fornecer informações.

Em relação ao fator de carga, a capacidade nominal anual da instalação ( $AHP_{nom}$ ) é multiplicada pelo fator de carga (LF). Este fator de carga reflete o número equivalente de horas que a central trabalha num ano à capacidade nominal (ver Equação 2.2), o qual é sempre inferior a 1, equivalente a 8760 horas/ano.

$$AHP = AHP_{nom} \times LF \quad (2.2)$$

Em termos de degradação do *stack* ao longo do tempo, esta é contabilizada pela redução da quantidade total de hidrogénio produzido após a aplicação do LF. O utilizador indica a taxa de degradação do *stack*, caso contrário, é usado o valor de referência. Deve ser prestada especial atenção à unidade da taxa de degradação, a qual na ferramenta deve ser expressa anualmente e não baseada em cada mil horas. Por outras palavras, todos os anos, incluindo o primeiro, a produção nominal da instalação sofre uma diminuição em relação ao ano anterior numa fração proporcional à taxa de degradação (ver Equação 2.3). O primeiro ano utiliza como referência a produção anual nominal após a aplicação do LF, enquanto que do segundo ano até o fim da vida útil da instalação ( $n_{lifetime}$ ), o valor de referência é o ano anterior. O período de substituição do *stack* é especificado em horas; Uma vez que a ferramenta determina o período de substituição (ou seja, o(s) ano(s) específico(s)), a produção é redefinida naquele ano para os valores do primeiro ano, e a progressão de degradação começa novamente. Uma lista das variáveis

de input (ou entrada) e sua definição, bem como as unidades consideradas por cada uma delas, são descritas na próxima subsecção.

$$\text{AHP}_i = \text{AHP}_{i-1} \times (1 - r_{\text{degradation}}), \quad \text{for } i = 2, 3, 4 \dots n_{\text{lifetime}} \quad (2.3)$$

## 2.4.1 Lista de variáveis do módulo de produção

A Tabela 2.2 apresenta as variáveis consideradas para o módulo de produção, as unidades conforme devem ser introduzidas na ferramenta e descrição.

Tabela 2.2: Variáveis do módulo de produção de hidrogénio.

Nome da Variável [Unidade] e Descrição
Capacidade nominal de electrolisadores [MW].
Vida útil da instalação de electrolisadores [anos].
Taxa de desconto anual [%/ano]: Taxa de desconto anual indicada em percentagem por ano.
Tipo de água de entrada. Opções: FreshWater (água da rede), WasteWater (água residual) ou SeaWater (água do mar).
Tipo de electrolisador. Opções: Electrolisador Alkalino (ALK) ou Electrolisador de Membranas de Permuta Protónica (PEM).
Tempo substituição do stack do electrolisador recomendado pelo fabricante em horas (de operação).
Fator de carga médio anual [fração/ano]: número de horas. operacionais a dividir pelo número total de horas de um ano (8760 h).
Capacidade de produção de H <sub>2</sub> [kgH <sub>2</sub> /h/MW]: capacidade de produção de H <sub>2</sub> [kgH <sub>2</sub> /h/MW] indicada pelo fabricante no datasheet por cada MW de electrolisadores instalados.
Taxa de degradação anual do stack [%/ano]: percentagem de degradação do stack esperado num ano.
CAPEX da instalação de electrólise [€/kW]: valor das despesas de capital da instalação de electrólise da água, expresso em euros por quilowatt de capacidade total de electrólise.
Custo do stack [% CAPEX]: custo do stack expresso em percentagem de CAPEX com valores entre 0 e 100.
OPEX fixo anual [% CAPEX/ano]: despesas operacionais anuais de custos fixos como percentagem de CAPEX por ano.
Consumo de electricidade por kgH <sub>2</sub> [kWh/kgH <sub>2</sub> ]: consumo de electricidade por quilograma de hidrogénio. Esta quantidade é usada para estimar a porção variável do OPEX.
Consumo de água por kgH <sub>2</sub> [l/kgH <sub>2</sub> ]: consumo de água em litros por quilograma de hidrogénio, incluindo perdas. Esta quantidade é usada para estimar a porção variável do OPEX.
Custo unitário da água de rede [€/m <sup>3</sup> ]. Esta quantidade é usada para estimar a porção variável do OPEX.
Custo unitário da água residual [€/m <sup>3</sup> ]. Esta quantidade é usada para estimar a porção variável do OPEX.
Custo unitário da água do mar [€/m <sup>3</sup> ]. Esta quantidade é usada para estimar a porção variável do OPEX.
Uso de electricidade de fonte PV Solar [%]: corresponde à percentagem de fornecimento de electricidade para electrólise proveniente de sistemas de geração solar fotovoltaica com valores entre 0 e 100.
Uso de electricidade de fonte eólica onshore [%]: corresponde à percentagem de fornecimento de electricidade para electrólise proveniente de sistemas de geração eólica onshore com valores entre 0 e 100.
Uso de electricidade de fonte eólica offshore [%]: corresponde à percentagem de fornecimento de electricidade para electrólise proveniente de sistemas de geração eólica offshore com valores entre 0 e 100.
Uso de electricidade da rede [%]: corresponde à percentagem de fornecimento de electricidade para electrólise proveniente da rede elétrica com valores entre 0 e 100.
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar [€/MWh]: custo da produção de electricidade ou preço da electricidade produzida a partir de sistemas de produção solar fotovoltaica.
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore [€/MWh]: custo da produção de electricidade ou preço da electricidade produzida a partir de sistemas de produção de energia eólica onshore.
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore [€/MWh]: custo da produção de electricidade ou preço da electricidade produzida a partir de sistemas de produção de energia eólica offshore.
Custo unitário de electricidade da rede [€/MWh]: preço grossista da electricidade.

## 2.5 Módulo de Liquefação: *H<sub>2</sub> Liquefação*

O módulo H<sub>2</sub> Liquefação considera uma instalação de liquefação e usa a Equação 2.1 para obter um LCOH para a liquefação de hidrogénio.

## CAPEX

O CAPEX pode ser introduzido pelo utilizador ou podem ser usados os valores de referência.

## OPEX

O OPEX divide-se em valores anuais fixos e valores anuais variáveis. Os últimos consideram o consumo de eletricidade. Assume-se que os custos unitários da eletricidade são os mesmos que são especificados para o módulo de produção.

### Valor de H<sub>2</sub> considerado para a LCOH

A instalação de liquefação tem uma capacidade específica em toneladas por dia (t/dia), que o utilizador pode especificar. No entanto, na versão atual da ferramenta é considerada a quantidade de hidrogénio produzida, quando o módulo H<sub>2</sub> Produção é ativado. A suposição subjacente é que os módulos ativos para o cálculo pertencem ao mesmo projeto e, conseqüentemente, o LCOH de cada módulo é calculado como uma contribuição do LCOH total. Desta forma, são asseguradas a "compatibilidade", a "aditividade" e a "comparabilidade" das contribuições dos diferentes módulos ao LCOH total. Se apenas o módulo de H<sub>2</sub> Liquefação for ativado ou selecionado, a quantidade anual de referência de hidrogénio para calcular o LCOH é a capacidade diária da instalação vezes 365 dias vezes a disponibilidade da unidade de liquefação.

### Em relação ao tempo de vida

A vida útil da instalação de liquefação é especificada pelo utilizador e pode ser diferente da especificada no módulo H<sub>2</sub> Produção. Se esses valores forem diferentes, apenas os custos da instalação de liquefação "incorridos" durante a vida útil do módulo H<sub>2</sub> Produção são considerados. Isso pressupõe que o LCOH do projeto completo envolvendo vários módulos seja referenciado à central de produção de hidrogénio.

## 2.5.1 Lista de variáveis do módulo de liquefação

A tabela seguinte apresenta as variáveis consideradas para o módulo de liquefação de hidrogénio, suas unidades e sua descrição.

Tabela 2.3: Variáveis do módulo de liquefação.

Nome da Variável [Unidade] e Descrição
Capacidade da instalação de liquefação em toneladas de hidrogénio por dia.
Vida útil do instalação de liquefação [anos].
Taxa de desconto anual [%/ano]: Taxa de desconto anual indicada em percentagem por ano.
Disponibilidade da instalação de liquefação [%]: número de horas operacionais a dividir pelo número total de horas de um ano (8760 h) expresso em percentagem com valores entre 0 e 100.
CAPEX da instalação de liquefação [M€]: valor total das despesas de capital da central de liquefação expresso em milhões de euros.
OPEX fixo anual [€/ano]: despesas operacionais anuais de custos fixos em euros.
Consumo de electricidade anual [MWh/ano]: consumo total anual de electricidade para a instalação de liquefação. Os projetistas podem exprimir este valor em termos de quilogramas de hidrogénio, podendo então obter-se o valor total da electricidade necessária num ano multiplicando o total de quilogramas de hidrogénio liquefeito num ano pelo consumo unitário de electricidade por quilograma. Esta quantidade é usada para estimar a porção variável do OPEX.

## 2.6 Módulo de Armazenamento de Hidrogénio: H<sub>2</sub> Armazenamento

O módulo H<sub>2</sub> Armazenamento considera dois tipos principais de armazenamento na versão atual da ferramenta. Um é tanques (reservatórios) de alta pressão (acima do solo) e o outro é armazenamento de caverna de sal (subterrâneo). Para obter o LCOH, a Equação 2.1 é usada.

## CAPEX

O CAPEX pode ser introduzido pelo utilizador ou podem ser usados os valores de referência.

## OPEX

Neste módulo, o OPEX anual é simplificado e expresso como uma percentagem da do CAPEX especificado pelo utilizador.

### Valor de H<sub>2</sub> considerado para a LCOH

O sistema de armazenamento tem uma capacidade específica em toneladas de hidrogénio, que o utilizador especifica. No entanto, na versão atual da ferramenta é considerada a quantidade de hidrogénio produzida, quando H<sub>2</sub> Produção é ativado. A suposição subjacente é que os módulos ativos para o cálculo pertencem ao mesmo projeto e, conseqüentemente, o LCOH de cada módulo é calculado como uma contribuição do LCOH total. Desta forma, são asseguradas a "compatibilidade", a "aditividade" e a "comparabilidade" das contribuições LCOH. Se apenas o módulo H<sub>2</sub> Armazenamento for ativado, a quantidade anual de referência de hidrogénio para calcular o LCOH deve ser indicada pelo utilizador.

### Em relação ao tempo de vida

A vida útil do sistema de armazenamento é especificada pelo utilizador e pode ser diferente da especificada no módulo H<sub>2</sub> Produção. Se esses valores forem diferentes, apenas os custos do sistema de armazenamento "incorridos" durante a vida útil do módulo H<sub>2</sub> Produção são considerados. Isso pressupõe que o LCOH do projeto completo envolvendo vários módulos seja referenciado à central de produção de hidrogénio.

## 2.6.1 Lista de variáveis do módulo de armazenamento

A tabela seguinte apresenta as variáveis consideradas para o módulo de armazenamento de hidrogénio, suas unidades e sua descrição.

Tabela 2.4: Variáveis do módulo de armazenamento.

Nome da Variável [Unidade] e Descrição
Capacidade da armazenagem em toneladas de hidrogénio.
Localização da armazenagem: acima do solo (Aboveground) ou subterrâneo (Underground).
Método de armazenagem: Reservatório (Tank - só possível para Aboveground) or Cavernas de sal (SaltCavern - só possível para Underground).
CAPEX do sistema de armazenagem - Reservatórios, tubos e compressores [€/t]: valor das despesas de capital do sistema de armazenagem em euros por tonelada de hidrogénio. Este valor deve considerar tanque, tubos e sistema de compressão.
CAPEX do sistema de armazenagem - cavernas de sal, tubos e compressores [€/t]: valor das despesas de capital do sistema de armazenagem em euros por tonelada de hidrogénio. Este valor deve considerar tanque, tubos e sistema de compressão.
OPEX fixo anual [% CAPEX]: despesas operacionais anuais expressas em percentagem de CAPEX de armazenagem com valores entre 0 e 100.
OPEX fixo anual [% CAPEX]: despesas operacionais anuais expressas em percentagem de CAPEX de armazenagem com valores entre 0 e 100.
Taxa de desconto anual [%/ano]: Taxa de desconto anual indicada em percentagem por ano.
Vida útil do sistema de armazenagem [anos].

## 2.7 Distribuição de Hidrogénio - Transporte Rodoviário: *H<sub>2</sub> Transporte Rodoviário*

O módulo H<sub>2</sub> Transporte Rodoviário considera algumas características do reboque/camião e métricas de desempenho selecionadas. Este módulo permite a especificação do transporte de gases ou líquidos. Para obter o LCOH, a Equação 2.1 é usada.

### CAPEX

O CAPEX pode ser introduzido pelo utilizador ou podem ser usados os valores de referência.

## OPEX

O OPEX divide-se em valores anuais fixos e valores anuais variáveis. O OPEX variável anual considera o consumo de combustível de reboques/camiões.

### Valor de $H_2$ considerado para a LCOH

A quantidade usada para o cálculo do LCOH na versão atual da ferramenta é a quantidade de hidrogénio produzida quando a produção de  $H_2$  é ativada. A suposição subjacente é que os módulos ativos para o cálculo pertencem ao mesmo projeto e, conseqüentemente, o LCOH de cada módulo é calculado como uma contribuição do LCOH total. Desta forma, "compatibilidade", "aditividade" e "comparabilidade" das contribuições da LCOH. Se apenas o módulo  $H_2$  Transporte Rodoviário for ativado, então a quantidade anual de referência de hidrogénio transportado pelos reboques/camiões deverá ser introduzida pelo utilizador.

### Em relação ao tempo de vida

A vida útil dos reboques/camiões é geralmente inferior à das instalações de produção de hidrogénio. Se a vida útil for menor do que a especificada para o módulo  $H_2$  Produção, então há um reinvestimento em um novo reboque/camiões, e apenas os custos dentro da vida útil da produção de  $H_2$  são contabilizados.

## 2.7.1 Lista de variáveis do módulo de transporte rodoviário

A tabela seguinte apresenta as variáveis consideradas para a distribuição de hidrogénio via transporte rodoviário, suas unidades e descrição.

Tabela 2.5: Lista de variáveis do módulo de transporte rodoviário.

Nome da Variável [Unidade] e Descrição
Transporte de $H_2$ em estado : opções "Gás" ou "Líquido".
CAPEX do camião [€/kg $H_2$ ]: valor das despesas de capital, expresso em euros por quilograma de hidrogénio de capacidade de transporte, para um camião.
Capacidade do camião [kg $H_2$ ]: capacidade de transporte de um camião, expressa em quilogramas de hidrogénio.
Número de despachos por dia [viagens/dia]: valor médio das viagens de expedição por dia por camião, expresso em viagens por dia.
OPEX fixo anual [€/kg $H_2$ ]: despesas operacionais fixas anuais expressas em euros por quilograma de hidrogénio transportado.
Consumo de combustível [€/km]: valor médio do consumo de combustível da frota de camiões expresso em euros por quilómetro.
Distância diária média percorrida por camião [km]: distância média diária percorrida da frota de camiões, expressa em quilómetros.
Número médio de camiões por HRS [unidade/HRS]: valor médio de camiões por HRS.
Taxa de desconto anual [%/ano]: Taxa de desconto anual indicada em percentagem por ano.
Vida útil do camião [anos].
Perdas por evaporação [%/dia]: perdas por evaporação de hidrogénio (aplicável apenas ao transporte de hidrogénio líquido).

## 2.8 Distribuição de Hidrogénio - Gasoduto: $H_2$ Distribuição Gasoduto

O módulo  $H_2$  Distribuição Gasoduto considera algumas características do gasoduto e do sistema de compressão para calcular o LCOH. Para obter o LCOH, a Equação 2.1 é usada.

### CAPEX

O CAPEX pode ser introduzido pelo utilizador ou podem ser usados os valores de referência. É desagregado em CAPEX para o gasoduto e o CAPEX associado ao sistema de compressão. Esta desagregação foi feita reconhecendo que o sistema de compressão é um componente de custo importante deste sistema. Na versão atual da ferramenta, apesar do diâmetro do gasoduto ser solicitado, não está envolvido na estimativa de CAPEX. Espera-se que versões futuras considerem esse parâmetro para estimativa interna de CAPEX.

## OPEX

O OPEX é dividido em valores anuais fixos e valores anuais variáveis para ambos o gasoduto e o sistema de compressão. O OPEX anual variável considera o consumo de eletricidade para o sistema de compressão. Os custos unitários de eletricidade são assumidos como sendo os mesmos especificados para o módulo de produção.

### Valor de H<sub>2</sub> considerado para a LCOH

A quantidade utilizada para o cálculo do LCOH na versão atual da ferramenta é considerada como a quantidade de hidrogénio produzido, quando o módulo de produção de H<sub>2</sub> é ativado. A suposição subjacente é que os módulos ativos para o cálculo pertencem ao mesmo projeto e, conseqüentemente, o LCOH de cada módulo é calculado como uma contribuição do LCOH total. Desta forma, são asseguradas a "compatibilidade", a "aditividade" e a "comparabilidade" das contribuições do LCOH. Se apenas o módulo H<sub>2</sub> Distribuição Gasoduto for ativado, então a quantidade anual de referência de hidrogénio transportado pelo gasoduto deverá ser introduzida pelo utilizador.

### Em relação ao tempo de vida

A vida útil dos gasodutos é geralmente muito mais longa do que a vida útil das instalações de eletrólise de água, e os compressores podem ter uma vida útil semelhante ou mais curta do que as centrais de produção de hidrogénio. Conseqüentemente, diferentes tempos de vida útil podem ser inseridos pelo utilizador. Se esses valores forem diferentes, apenas os custos "incorridos" durante a vida útil do módulo de produção de H<sub>2</sub> são considerados. Isso pressupõe que o LCOH do projeto completo envolvendo vários módulos seja referenciado à central de produção de hidrogénio. No caso de sistemas de compressão, se a vida útil for menor do que a especificada para o módulo de produção H<sub>2</sub>, então há um reinvestimento em um novo sistema de compressão, e apenas os anos restantes até atingir a vida útil da produção de H<sub>2</sub> são considerados para custos do LCOH.

### 2.8.1 Lista de variáveis do módulo de distribuição por gasoduto

A tabela seguinte apresenta as variáveis consideradas para a distribuição de hidrogénio via gasodutos, suas unidades e sua descrição.

Tabela 2.6: Variáveis do módulo de distribuição por gasoduto.

Nome da Variável [Unidade] e Descrição
Comprimento do gasoduto [km].
Taxa de desconto anual [%/ano]: Taxa de desconto anual indicada em percentagem por ano.
Vida útil do gasoduto [anos]: pode ser diferente da instalação de eletrólise ou diferente dos ativos em outros módulos.
Vida útil dos compressores [anos]: pode ser diferente do gasoduto, da instalação de eletrólise ou diferente dos ativos em outros módulos.
CAPEX do gasoduto [M€/km]: valor das despesas de capital do gasoduto, expresso em milhões de euros por quilómetro.
CAPEX do sistema de compressão [M€/km]: valor das despesas de capital do sistema de compressão, expresso em milhões de euros por quilómetro.
OPEX fixo anual do gasoduto [% CAPEX]: despesas operacionais anuais de custos fixos do gasoduto expressas em percentagem de CAPEX do gasoduto com valores entre 0 e 100.
OPEX fixo anual do sistema de compressão [% CAPEX]: despesas operacionais anuais de custos fixos do sistema de compressão expressas em percentagem de CAPEX do sistema de compressão com valores entre 0 e 100.
Fator de carga do gasoduto [h]: número de horas operacionais num ano.
Consumo de electricidade anual [MWh/ano]: consumo anual total de eletricidade do sistema de compressão. Esta quantidade é usada para estimar a porção variável do OPEX e já deve considerar o Fator de carga do gasoduto.

## 2.9 Módulo de Estações de Reabastecimento de Hidrogénio: H<sub>2</sub> Reabastecimento

O módulo H<sub>2</sub> Reabastecimento considera dois tipos principais de estações de reabastecimento de hidrogénio (HRS). Um que recebe hidrogénio gasoso e despacha hidrogénio gasoso, e outro que recebe hidrogénio líquido e despacha hidrogénio gasoso. Para obter o LCOH, a Equação 2.1 é usada.

## CAPEX

O CAPEX pode ser introduzido pelo utilizador ou podem ser usados os valores de referência, e é desagregado em CAPEX para o HRS não considerando o sistema de compressão, e o CAPEX associado ao sistema de compressão. Esta desagregação foi feita reconhecendo que o sistema de compressão é um componente de custo importante de um HRS. Porém, o custo do CAPEX total pode ser considerado no CAPEX para o HRS pelo utilizador.

## OPEX

O OPEX divide-se em valores anuais fixos e valores anuais variáveis. Os últimos consideram o consumo de eletricidade para a HRS. Os custos unitários da eletricidade são assumidos como sendo os mesmos especificados para o módulo de produção.

## Valor de H<sub>2</sub> considerado para a LCOH

A HRS tem uma capacidade de expedição média específica em quilogramas por dia, que o utilizador especifica. No entanto, a quantidade utilizada para o cálculo da LCOH na versão atual é considerada a quantidade de hidrogénio produzida, quando o módulo de produção de H<sub>2</sub> é ativado. A suposição subjacente é que os módulos ativos para o cálculo pertencem ao mesmo projeto e, conseqüentemente, o LCOH de cada módulo é calculado como uma contribuição do LCOH total. Desta forma, são asseguradas a "compatibilidade", a "aditividade" e a "comparabilidade" das contribuições do LCOH. Se apenas o módulo de reabastecimento de H<sub>2</sub> for ativado, a quantidade anual de referência de hidrogénio para calcular a LCOH é a capacidade média de despacho em quilogramas por dia indicada pelo utilizador multiplicada pelo número de HRSs vezes 365 dias vezes a disponibilidade das HRSs.

## Em relação ao tempo de vida

O tempo de vida de uma HRS é especificado pelo utilizador e pode ser diferente do especificado nos outros módulos. Se esses valores forem diferentes, apenas os custos do sistema "incorridos" durante a vida útil do módulo de produção H<sub>2</sub> serão considerados. Isso pressupõe que o LCOH de projeto completo envolvendo vários módulos seja referenciado à instalação de produção de hidrogénio. No caso da HRS, se a vida útil for menor do que a especificada para o módulo de produção de H<sub>2</sub>, então há um reinvestimento em uma nova instalação, e apenas os anos restantes até atingir a vida útil da produção de H<sub>2</sub> são considerados para custos do LCOH.

## 2.9.1 Lista de variáveis do módulo H<sub>2</sub> Reabastecimento

A tabela seguinte apresenta as variáveis consideradas para o módulo de estações de abastecimento de hidrogénio, suas unidades e descrição.

Tabela 2.7: Variáveis do módulo H<sub>2</sub> Reabastecimento.

Nome da Variável [Unidade] e Descrição
CAPEX de uma HRS [€/HRS]: valor total das despesas de capital para uma HRS.
CAPEX do sistema de compressão [€/kW]: valor das despesas de capital expresso em euros por quilowatt do sistema de compressão.
Consumo de electricidade [kWh/kgH <sub>2</sub> ]: consumo de eletricidade na HRS expresso em quilowatts-hora por quilograma de hidrogénio.
OPEX fixo anual [€/kgH <sub>2</sub> ]: despesas operacionais anuais expressas em euros por quilograma de hidrogénio dispensado.
Capacidade diária média de despacho [kgH <sub>2</sub> /dia]. Refere-se à quantidade média diária efetiva de hidrogénio dispensado por HRS.
Número de HRS para análise [unidade]: quantidade total de HRS para análise.
Disponibilidade anual da HRS [fração/ano]: número de horas operacionais a dividir pelo número total de horas de um ano (8760 h) expresso em percentagem.
Taxa de desconto anual [%/ano]: Taxa de desconto anual indicada em percentagem por ano.
Número de compressores por HRS [unidade/HRS].
Vida útil da HRS [anos].

## 2.10 Seleção de Módulos Individuais e Cálculo do LCOH

As seções anteriores forneceram uma visão geral do CAPEX, OPEX e a quantidade de hidrogénio usada em cada módulo para o cálculo do LCOH. Como dito anteriormente, os módulos podem ser todos ativados simultaneamente ou podem ser considerados individualmente pelo utilizador. Quando vários módulos são ativados simultaneamente, o módulo de produção de H<sub>2</sub> também deve ser ativado. Tal deve-se ao facto de, para obter um valor aditivo harmonizado dos diferentes componentes LCOH (ou seja, para cada módulo), ser considerada necessária uma quantidade de referência comum de hidrogénio e, neste caso, é a quantidade de hidrogénio produzida. Em contraste, quando apenas um módulo é ativado, a quantidade de hidrogénio usada e descontada usando o termo no denominador da Equação 2.1 é associada a cada módulo individualmente, como explicado anteriormente.

O uso de diferentes tipos de ativos nos módulos traz uma nova questão, que está relacionada aos diferentes tempos de vida dos ativos. Não seria justo considerar, por exemplo, os custos totais durante 50 anos de um gasoduto para o LCOH durante um período de 20 anos de funcionamento de uma central de eletrólise da água. Isso porque os gasodutos poderiam ser usados além dos primeiros 20 anos de operação e o seu proveito económico poderia ser alcançado posteriormente. Neste sentido, apenas os custos incorridos durante a vida útil indicada no módulo de produção de H<sub>2</sub> (quando ativado) são considerados como parte do projeto de hidrogénio. Uma abordagem potencial, a utilizada na ferramenta LNEG-LOCH, é ajustar o CAPEX por um fator que é calculado como a razão entre o tempo de vida da produção de hidrogénio e o tempo de vida do ativo em consideração (vamos supor gasodutos mais uma vez); então, se o tempo de vida do ativo for maior do que a instalação de produção de H<sub>2</sub>, o valor desse fator é menor que um e, conseqüentemente, o CAPEX considerado no cálculo do LCOH é proporcionalmente menor do que as despesas totais de capital para o gasoduto. Neste sentido, considera-se uma estimativa mais justa do LCOH para o projeto específico considerando diferentes componentes da cadeia de valor do hidrogénio. Importa referir que o utilizador deve ter presente que esta não é a única abordagem, mas sim a adotada na versão atual da ferramenta.

## 3 Caso e Valores de Referência

Os valores de referência considerados para a produção de H<sub>2</sub> correspondem a uma hipotética instalação de eletrólise da água de 50 MW. Embora exista a opção de selecionar eletrolisadores alcalinos (ALK) ou de membrana de troca de prótons (PEM) na ferramenta, atualmente um valor médio é mostrado para os custos de CAPEX da instalação de eletrólise. Presume-se que a instalação tenha um sistema de eletrólise tecnologicamente neutro (50% ALK / 50% PEM). No entanto, o utilizador tem a liberdade de introduzir valores diferentes. Alguns valores de referência para todos os módulos são fornecidos na subsecção seguinte.

### 3.1 Valores de Referência

As tabelas nesta seção apresentam os valores de referência para os seis módulos considerados na Ferramenta LNEG-LCOH.

Tabela 3.8: Variáveis para o módulo de produção de hidrogénio e valores de referência.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade de electrolisadores [MW]	50
Vida útil da instalação de electrolisadores [anos]	20
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Tipo de água de entrada	WasteWater
Tipo de electrolisador	ALK
Tempo substituição do stack do electrolisador [horas]	80000
Fator de carga médio anual [fração/ano]	0.6
Capacidade de produção de H <sub>2</sub> [kgH <sub>2</sub> /h/MW]	18
Taxa de degradação anual do stack [%/ano]	1.5
CAPEX da instalação de electrólise [€/kW]	1600
Custo do stack [% CAPEX]	15
OPEX fixo anual [% CAPEX/ano]	2.5
Consumo de electricidade por kgH <sub>2</sub> [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	52.14
Consumo de água por kgH <sub>2</sub> [l/kgH <sub>2</sub> ]	18
Custo unitário da água de rede [€/m <sup>3</sup> ]	3.74
Custo unitário da água residual [€/m <sup>3</sup> ]	3.79
Custo unitário da água do mar [€/m <sup>3</sup> ]	8.83
Uso de electricidade de fonte PV Solar [%]	100
Uso de electricidade de fonte eólica onshore [%]	0
Uso de electricidade de fonte eólica offshore [%]	0
Uso de electricidade da rede [%]	0
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar [€/MWh]	55.14
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade da rede [€/MWh]	0

Tabela 3.9: Variáveis para o módulo de liquefação de hidrogénio e valores de referência.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade da instalação de liquefação [t/dia]	20
Vida útil do instalação de liquefação [anos]	20
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Disponibilidade da instalação de liquefação [%]	98
CAPEX da instalação de liquefação [M€]	105
OPEX fixo anual [€/ano]	3150000
Consumo de electricidade anual [MWh/ano]	11

Tabela 3.10: Variáveis para o módulo de armazenamento de hidrogénio e valores de referência.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade da armazenagem [t]	200
Localização da armazenagem	Acima do solo ou Subterrâneo
Método de armazenagem	Reservatórios
CAPEX do sistema de armazenagem - tanques, tubos e compressores [€/t]	100000
CAPEX do sistema de armazenagem - cavernas de sal, tubos e compressores [€/t]	2500
OPEX fixo anual - Reservatórios [% CAPEX]	2
OPEX fixo anual - Cavernas [% CAPEX]	2
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Vida útil do sistema de armazenagem - Reservatórios [anos]	30
Vida útil do sistema de armazenagem - Cavernas [anos]	60

Tabela 3.11: Variáveis para a distribuição de hidrogénio através do módulo de transporte rodoviário e valores de referência.

Nome da Variável [Unidade]	Valor	Valor
Transporte de H <sub>2</sub> em estado	Gas	Liquid
CAPEX do camião [€/kgH <sub>2</sub> ]	1140	400
Capacidade do camião [kgH <sub>2</sub> ]	1000	4000
Número de despachos por dia [viagem/dia]	1	1
OPEX fixo anual [€/kgH <sub>2</sub> ]	0.06	0.025
Consumo de combustível [€/km]	0.6125	0.6125
Distância diária média percorrida por camião [km]	200	200
Número médio de camiões por HRS [unidade/HRS]	1	0.25
Taxa de desconto anual [%/ano]	6	6
Vida útil do camião [anos]	10	10
Perdas por evaporação [%/dia]	0	1.5

Tabela 3.12: Variáveis para o módulo de distribuição de hidrogénio através de gasodutos e valores de referência.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Comprimento do gasoduto [km]	100
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Vida útil do gasoduto [anos]	40
Vida útil dos compressores [anos]	25
CAPEX do gasoduto [M€/km]	1.5
CAPEX do sistema de compressão [M€/km]	0.18
OPEX fixo anual do gasoduto [% CAPEX]	0.9
OPEX fixo anual do sistema de compressão [% CAPEX]	1.7
Fator de carga do gasoduto [h]	5000
Consumo de electricidade anual [MWh/ano]	13000

Tabela 3.13: Variáveis para o módulo de estações de reabastecimento de hidrogénio.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
CAPEX de uma HRS [€/HRS]	5000000
CAPEX do sistema de compressão [€/kW]	0
Consumo de electricidade [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	3.25
OPEX fixo anual [€/kgH <sub>2</sub> ]	0.5
Capacidade diária média de despacho [kgH <sub>2</sub> /dia]	1000
Número de HRS para análise [unidade]	7
Disponibilidade anual da HRS [%]	98
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Número de compressores por HRS [unidade/HRS]	2
Vida útil da HRS [anos]	20

## 4 Exemplos e Comparações

Esta seção pretende exemplificar brevemente como usar a Ferramenta LNEG-LCOH. São apresentados cinco casos. Os dois primeiros são representados por uma comparação entre a European Commission LCOH Tool e a Ferramenta LNEG-LCOH. O terceiro e o quarto casos exemplificam a utilização de vários módulos. O último caso mostra como o *MIBGAS IBHYX Index* pode ser reproduzido usando a Ferramenta LNEG-LCOH.

### 4.1 Produção de Hidrogénio: Comparações com a Calculadora LCOH da CE

Dois casos foram calculados com o European Commission LCOH Tool e a Ferramenta LNEG-LCOH. Estes correspondem aos valores padrão da European Commission LCOH Tool para os casos a) PV e Eletrolisadores Alcalinos e b) Eólica Terrestre e Eletrolisadores de Membrana de Troca de Protões.

Alguns pressupostos para ambos os casos foram adotados na Ferramenta LNEG-LCOH devido a que a outra ferramenta não inclui dados equivalentes como entrada. Estes foram i) os custos de água foram assumidos como sendo o valor de referência para a água doce, ii) o consumo de água por quilograma de hidrogénio, e iii) o CAPEX foi ajustado para subtrair o custo do *stack* inicial, porque na Ferramenta LNEG-LCOH esse valor é adicionado internamente ao valor do CAPEX introduzido pelo usuário e, conseqüentemente, as percentagens dos custos anuais de OPEX e substituição do *stack* também foram atualizadas. É importante referir que com base na documentação da European Commission LCOH Tool, a capacidade horária da central de eletrólise foi calculada como a capacidade da central em kW dividida pelo consumo de eletricidade por quilograma de hidrogénio.

#### Caso a: PV e eletrolisadores alcalinos

A Figura 4.3 mostra os dados de entrada usando a European Commission LCOH Tool, enquanto a Tabela 4.14 mostra os dados de entrada usados para a Ferramenta LNEG-LCOH.

Os resultados usando a European Commission LCOH Tool e a Ferramenta LNEG-LCOH mostraram LCOH de 6,14 e 6,15 €/kg, respectivamente. A diferença é negligenciável (menos de 0,2 %) e deve-se principalmente às potenciais diferenças nas cifras significativas usadas. A seção de resultados na Ferramenta LNEG-LCOH tem três seções: i) uma que mostra gráficos dinâmicos com as principais informações do LCOH (ver a Figura 4.4), ii) uma seção onde o utilizador pode visualizar um resumo das variáveis de entrada (ver Figura 4.5), e iii) uma seção onde o utilizador pode visualizar um resumo das variáveis de saída (veja a Figura 4.6).

#### Caso b: Energia eólica onshore e eletrolisadores de membrana de troca de prótons

A Figura 4.7 mostra os dados de entrada usando a European Commission LCOH Tool, enquanto a Tabela 4.15 mostra os dados de entrada usados para a Ferramenta LNEG-LCOH.

Os resultados obtidos da European Commission LCOH Tool e da Ferramenta LNEG-LCOH mostram LCOH de 9,90 e 9,50 €/kg, respectivamente. A diferença representa cerca de 4%, o que pode ser devido às considerações para o período exato de substituição do *stack*. Na Ferramenta LNEG-LCOH não houve substituição do *stack* aplicada neste caso porque o ano de substituição é no ano 25, e o fim da vida útil da instalação é de 25 anos. Pressume-se que a substituição do *stack* foi aplicada na European Commission LCOH Tool, o que se traduziria num LCOH mais alto.

Mais uma vez, a seção de resultados da Ferramenta LNEG-LCOH tem três seções: i) uma que apresenta gráficos dinâmicos com as principais informações do LCOH (ver Figura 4.8), ii) uma seção onde o utilizador pode visualizar um resumo das variáveis de entradas (ver Figura 4.9), e iii) uma seção onde o utilizador pode visualizar um resumo das variáveis de saída (veja Figura 4.10).

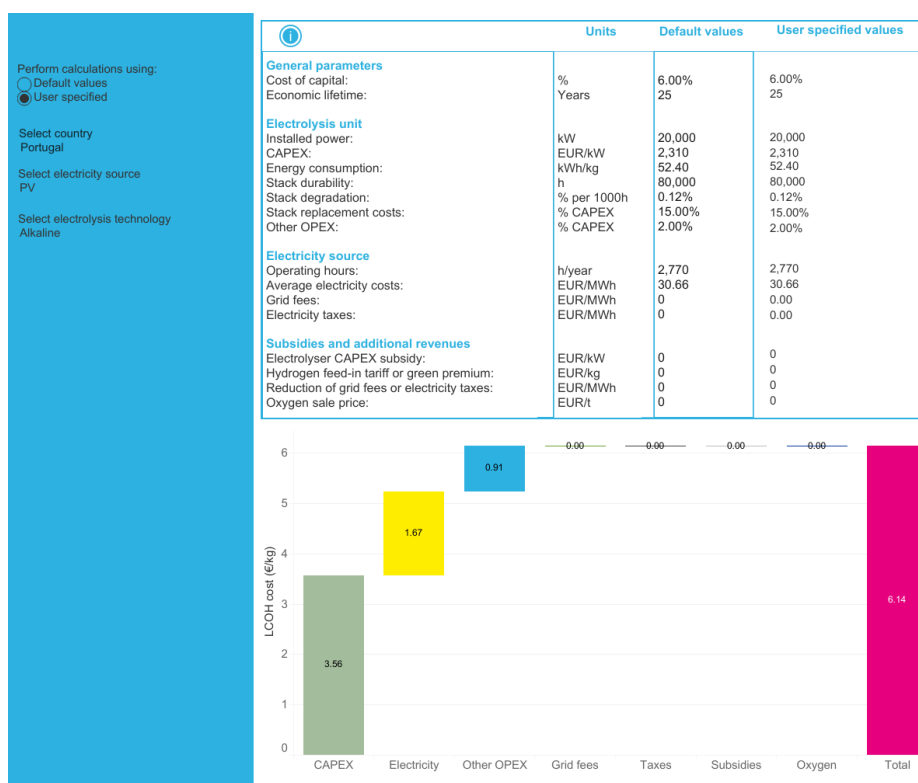


Figura 4.3: Dados de entrada e resultados obtidos para o LCOH para o caso de referência *a* e a European Commission LCOH Tool.

Tabela 4.14: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH e o Caso *a*.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade de electrolisadores [MW]	20
Vida útil da instalação de electrolisadores [anos]	25
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Tipo de água de entrada	FreshWater
Tipo de electrolisador	ALK
Tempo substituição do stack do electrolisador [horas]	80000
Fator de carga médio anual [fração/ano]	0.316
Capacidade de produção de H2 [kg/h/MW]	19.08
Taxa de degradação anual do stack [%/ano]	0.3324
CAPEX da instalação de electrólise [€/kW]	1963.5
Custo do stack [% CAPEX]	17.7
OPEX fixo anual [% CAPEX/ano]	2.35
Consumo de electricidade por kgH <sub>2</sub> [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	52.4
Consumo de água por kgH <sub>2</sub> [l/kgH <sub>2</sub> ]	11
Custo unitário da água de rede [€/m <sup>3</sup> ]	3.74
Custo unitário da água residual [€/m <sup>3</sup> ]	0
Custo unitário da água do mar [€/m <sup>3</sup> ]	0
Uso de electricidade de fonte PV Solar [%]	100
Uso de electricidade de fonte eólica onshore [%]	0
Uso de electricidade de fonte eólica offshore [%]	0
Uso de electricidade da rede [%]	0
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar [€/MWh]	30.66
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade da rede [€/MWh]	0

### 3 Recolher os resultados

Com base nos parâmetros preenchidos, o custo nivelado de hidrogénio (LCOH) é de **6.15 €/kgH<sub>2</sub>**.

Isto significa que cada quilograma de hidrogénio terá um custo de 6.15 euros.



Figura 4.4: Resultado obtido para o LCOH para o caso de referência *a* usando a Ferramenta LNEG-LCOH. A figura mostra a parcela de CAPEX, OPEX fixo, substituição do *stack*, eletricidade, água e custos nivelados de combustível em relação ao total de LCOH.

#### Sumário de parâmetros de entrada

[Esconder Detalhe](#)

#### H: Produção

Capacidade de electrolisadores	20 MW
Vida útil da planta de electrolisadores	25 anos
Taxa de desconto anual	6 %/ano
Tipo de água de entrada	Água doce
Tipo de electrolisador	ALK (Electrolisador Alcalino)
Tempo substituição do stack do electrolisador	80000 horas
Fator de carga médio anual	0.316 -/ano
Capacidade de produção de H <sub>2</sub>	19.08 kgH <sub>2</sub> /h/MW
Taxa de degradação anual do stack	0.3324 %/ano
CAPEX da planta de electrólise	1963.5 €/kW
Custo do stack	17.7 % CAPEX
OPEX fixo anual	2.35 % CAPEX/ano
Consumo de electricidade anual	52.4 kWh/kgH <sub>2</sub>
Consumo de água anual	11 l/kgH <sub>2</sub>
Custo unitário da água de rede	3.74 €/m <sup>3</sup>
Custo unitário da água residual	1 €/m <sup>3</sup>
Custo unitário da água do mar	0 €/m <sup>3</sup>
Uso de electricidade de fonte PV Solar	100 %
Uso de electricidade de fonte eólica onshore	0 %
Uso de electricidade de fonte eólica offshore	0 %
Uso de electricidade da rede	0 %
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar	30.66 €/MWh
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore	0 €/MWh
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore	0 €/MWh
Custo unitário de electricidade da rede	0 €/MWh

Figura 4.5: Resumo das variáveis de entrada apresentado pela Ferramenta LNEG-LCOH após o cálculo do LCOH para o Caso de referência *a*.

**Sumário de resultados**

[Esconder](#) [Detalhe](#)

**H: Produção**

Custo nivelado de hidrogénio (LCOH)	<b>6.15 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição do CAPEX no LCOH	<b>3.54 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição do OPEX fixo no LCOH	<b>0.90 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição da eletricidade no LCOH	<b>1.66 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição da água no LCOH	<b>0.04 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição do combustível no LCOH	<b>0.00 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição da substituição do stack no LCOH	<b>0.00 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição de outros OPEX no LCOH	<b>0.00 €/kgH<sub>2</sub></b>
Valor atual líquido do total de kgH <sub>2</sub>	<b>13061484.21 kgH<sub>2</sub></b>
Valor atual líquido do CAPEX	<b>46220790.00 €</b>
Valor atual líquido do OPEX total	<b>34046999.75 €</b>
Valor atual líquido do OPEX fixo	<b>11797056.31 €</b>
Valor atual líquido dos custos da eletricidade	<b>21694411.89 €</b>
Valor atual líquido dos custos da água	<b>555531.55 €</b>
Valor atual líquido dos custos do combustível	<b>0.00 €</b>
Valor atual líquido dos custos da substituição do stack	<b>0.00 €</b>
Valor atual líquido dos outros OPEX	<b>0.00 €</b>
Valor atual líquido do DECEX	<b>0.00 €</b>
Valor anual de kgH <sub>2</sub>	<b>1056329.86 €/kgH<sub>2</sub></b>
Valor anual do OPEX fixo	<b>922845.00 €/ano</b>
Valor anual dos custos da eletricidade	<b>1697082.65 €/ano</b>
Valor anual dos custos da água	<b>43457.41 €/ano</b>
Valor anual dos custos do combustível	<b>0.00 €/ano</b>
Valor anual de outros OPEX	<b>0.00 €/ano</b>

Figura 4.6: Resumo das variáveis de saída apresentado pela Ferramenta LNEG-LCOH após o cálculo do LCOH para o Caso de referência *a*.

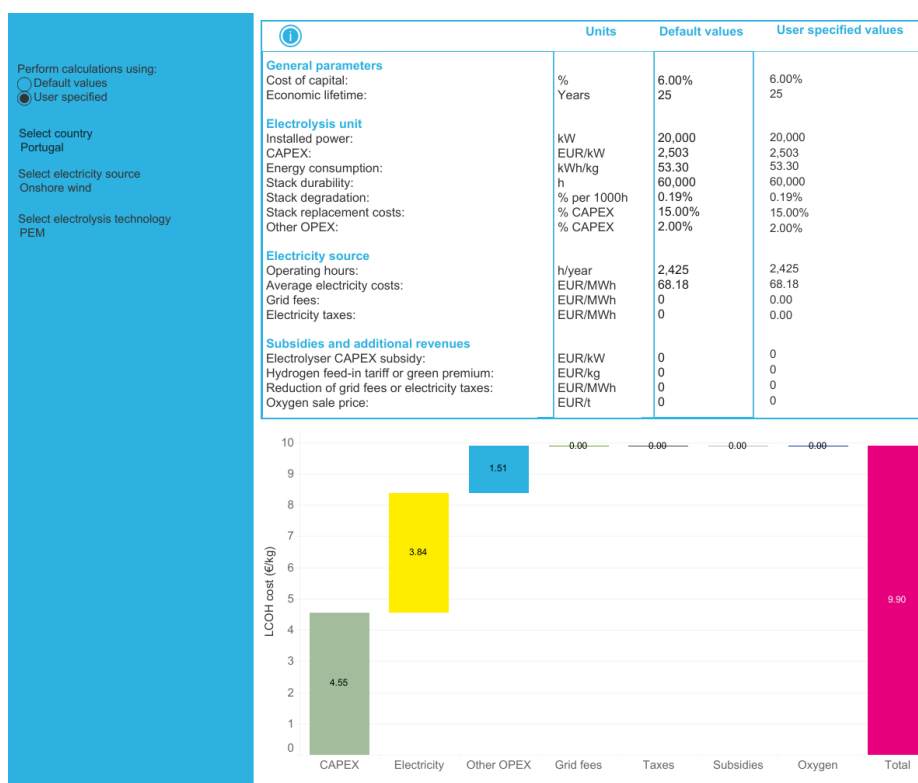


Figura 4.7: Dados de entrada e resultados obtidos para o LCOH para o caso de referência *b* e a European Commission LCOH Tool.

Tabela 4.15: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH e o Caso *b*.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade de electrolisadores [MW]	20
Vida útil da instalação de electrolisadores [anos]	25
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Tipo de água de entrada	FreshWater
Tipo de electrolisador	PEM
Tempo substituição do stack do electrolisador [horas]	60000
Fator de carga médio anual [fração/ano]	0.277
Capacidade de produção de H2 [kg/h/MW]	18.76
Taxa de degradação anual do stack [%/ano]	0.4608
CAPEX da instalação de electrólise [€/kW]	2127.55
Custo do stack [% CAPEX]	17.7
OPEX fixo anual [% CAPEX/ano]	2.35
Consumo de electricidade por kgH <sub>2</sub> [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	53.3
Consumo de água por kgH <sub>2</sub> [l/kgH <sub>2</sub> ]	11
Custo unitário da água de rede [€/m <sup>3</sup> ]	3.74
Custo unitário da água residual [€/m <sup>3</sup> ]	0
Custo unitário da água do mar [€/m <sup>3</sup> ]	0
Uso de electricidade de fonte PV Solar [%]	0
Uso de electricidade de fonte eólica onshore [%]	100
Uso de electricidade de fonte eólica offshore [%]	0
Uso de electricidade da rede [%]	0
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore [€/MWh]	68.18
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade da rede [€/MWh]	0

### 3 Recolher os resultados

Com base nos parâmetros preenchidos, o custo nivelado de hidrogénio (LCOH) é de **9.50 €/kgH<sub>2</sub>**.

Isto significa que cada quilograma de hidrogénio terá um custo de 9.50 euros.

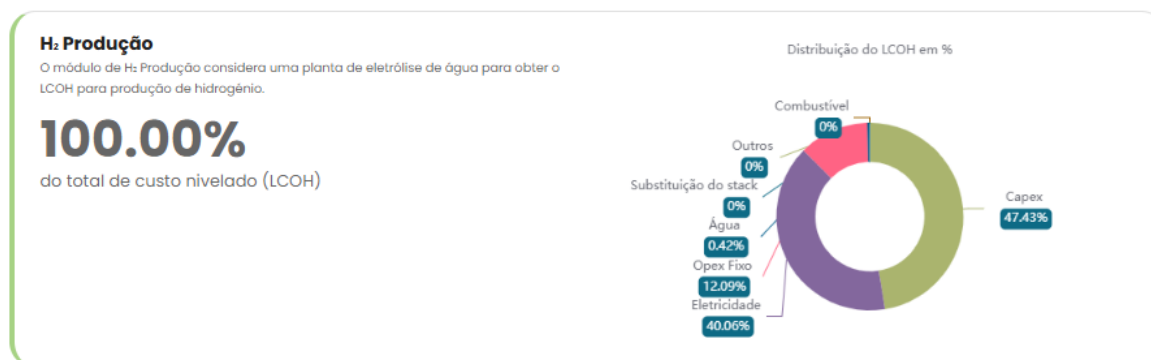


Figura 4.8: Resultado obtido para o LCOH para o caso de referência *b* usando a Ferramenta LNEG-LCOH. A figura mostra a parcela de CAPEX, OPEX fixo, substituição do *stack*, eletricidade, água e custos nivelados de combustível em relação ao total de LCOH.

#### Sumário de parâmetros de entrada

[Esconder Detalhe](#)

#### H<sub>2</sub> Produção

Capacidade de electrolisadores	20 MW
Vida útil da planta de electrolisadores	25 anos
Taxa de desconto anual	6 %/ano
Tipo de água de entrada	Água doce
Tipo de electrolisador	PEM (Electrolisador de Membranas de Permuta Protónica)
Tempo substituição do stack do electrolisador	6000 horas
Fator de carga médio anual	0.277 -/ano
Capacidade de produção de H <sub>2</sub>	18.76 kgH <sub>2</sub> /h/MW
Taxa de degradação anual do stack	0.4608 %/ano
CAPEX da planta de electrólise	2127.55 €/kW
Custo do stack	17.7 % CAPEX
OPEX fixo anual	2.35 % CAPEX/ano
Consumo de electricidade anual	53.3 kWh/kgH <sub>2</sub>
Consumo de água anual	11 l/kgH <sub>2</sub>
Custo unitário da água de rede	3.74 €/m <sup>3</sup>
Custo unitário da água residual	0 €/m <sup>3</sup>
Custo unitário da água do mar	0 €/m <sup>3</sup>
Uso de electricidade de fonte PV Solar	0 %
Uso de electricidade de fonte eólica onshore	100 %
Uso de electricidade de fonte eólica offshore	0 %
Uso de electricidade da rede	0 %
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar	0 €/MWh
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore	68.18 €/MWh
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore	0 €/MWh
Custo unitário de electricidade da rede	0 €/MWh

Figura 4.9: Resumo das variáveis de entrada apresentado pela Ferramenta LNEG-LCOH após o cálculo do LCOH para o Caso de referência *b*.

**Sumário de resultados**

[Esconder Detalhe](#)

**H: Produção**

Custo nivelado de hidrogênio (LCOH)	<b>9.50 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição do CAPEX no LCOH	<b>4.51 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição do OPEX fixo no LCOH	<b>1.15 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição da eletricidade no LCOH	<b>3.81 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição da água no LCOH	<b>0.04 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição do combustível no LCOH	<b>0.00 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição da substituição do stack no LCOH	<b>0.00 €/kgH<sub>2</sub></b>
Contribuição de outros OPEX no LCOH	<b>0.00 €/kgH<sub>2</sub></b>
Valor atual líquido do total de kgH <sub>2</sub>	<b>11114868.96 kgH<sub>2</sub></b>
Valor atual líquido do CAPEX	<b>50082527.00 €</b>
Valor atual líquido do OPEX total	<b>55555211.37 €</b>
Valor atual líquido do OPEX fixo	<b>12782697.82 €</b>
Valor atual líquido dos custos da eletricidade	<b>42293711.63 €</b>
Valor atual líquido dos custos da água	<b>478801.92 €</b>
Valor atual líquido dos custos do combustível	<b>0.00 €</b>
Valor atual líquido dos custos da substituição do stack	<b>0.00 €</b>
Valor atual líquido dos outros OPEX	<b>0.00 €</b>
Valor atual líquido do DECEX	<b>0.00 €</b>
Valor anual de kgH <sub>2</sub>	<b>910430.30 €/kgH<sub>2</sub></b>
Valor anual do OPEX fixo	<b>999948.50 €/ano</b>
Valor anual dos custos da eletricidade	<b>3308498.26 €/ano</b>
Valor anual dos custos da água	<b>37455.10 €/ano</b>
Valor anual dos custos do combustível	<b>0.00 €/ano</b>
Valor anual de outros OPEX	<b>0.00 €/ano</b>

Figura 4.10: Resumo das variáveis de saída apresentado pela Ferramenta LNEG-LCOH após o cálculo do LCOH para o Caso de referência *b*.

## 4.2 HRS com Produção Local de Hidrogénio: Caso H2ProdStoHRS01

Este exemplo diz respeito a um sistema que dispõe de uma unidade local de produção de eletrólise da água de 4 MW, um sistema de armazenamento local ligado a uma estação de abastecimento de hidrogénio (HRS) com uma capacidade máxima de distribuição diária de 1400 kg de hidrogénio, destinado a fornecer hidrogénio a 350 bar para camiões e 700 bar para veículos de passageiros. É necessária uma estimativa do LCOH para todo o sistema. Com isto pode avaliar-se o preço médio mínimo de venda do hidrogénio na HRS por uma vida útil de 20 anos. O hidrogénio está em estado gasoso em todos os componentes do sistema. As entradas consideradas para este exemplo são apresentadas nas Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18. Importa referir que o nome do caso foi concebido para fornecer um nome próprio, e não vem de nenhum outro documento ou referência. Compreende indicadores curtos da fase de produção (H2Prod), armazenamento (Sto) e a indicação de que existe um HRS (HRS01).

Tabela 4.16: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH - módulo H<sub>2</sub> Produção para o Caso H2ProdStoHRS01.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade de electrolisadores [MW]	4
Vida útil da instalação de electrolisadores [anos]	20
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Tipo de água de entrada	WasteWater
Tipo de electrolisador	ALK
Tempo substituição do stack do electrolisador [horas]	80000
Fator de carga médio anual [fração/ano]	0.685
Capacidade de produção de H <sub>2</sub> [kgH <sub>2</sub> /h/MW]	18
Taxa de degradação annual do stack [%/ano]	1.5
CAPEX da instalação de electrólise [€/kW]	1600
Custo do stack [% CAPEX]	15
OPEX fixo anual [% CAPEX/ano]	2.5
Consumo de electricidade por kgH <sub>2</sub> [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	52.14
Consumo de água por kgH <sub>2</sub> [l/kgH <sub>2</sub> ]	18
Custo unitário da água de rede [€/m <sup>3</sup> ]	0
Custo unitário da água residual [€/m <sup>3</sup> ]	3.79
Custo unitário da água do mar [€/m <sup>3</sup> ]	0
Uso de electricidade de fonte PV Solar [%]	50
Uso de electricidade de fonte eólica onshore [%]	50
Uso de electricidade de fonte eólica offshore [%]	0
Uso de electricidade da rede [%]	0
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar [€/MWh]	40.86
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore [€/MWh]	60.42
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade da rede [€/MWh]	0

Tabela 4.17: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH - módulo H<sub>2</sub> Armazenamento para o Caso H2ProdStoHRS01.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade da armazenagem [t]	4.5
Localização da armazenagem	Acima do solo
Método de armazenagem	Reservatório
CAPEX do sistema de armazenagem - tanques, tubos e compressores [€/t]	100000
OPEX fixo anual - Tanques [% CAPEX]	3
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Vida útil do sistema de armazenagem - Reservatórios [anos]	20

O LCOH total calculado pela ferramenta é de 7,07 €/kg. A quota do LCOH total associada à unidade de produção de hidrogénio é de 5,04 €/kg, a quota de LCOH de armazenamento é de 0,13 €/kgH<sub>2</sub> e a quota de LCOH

Tabela 4.18: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH - módulo H<sub>2</sub> Reabastecimento para o Caso H2ProdStoHRS01.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
CAPEX de uma HRS [€/HRS]	4800000
CAPEX do sistema de compressão [€/kW]	0
Consumo de electricidade [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	3.25
OPEX fixo anual [€/kgH <sub>2</sub> ]	0.5
Capacidade diária média de despacho [kgH <sub>2</sub> /dia]	1400
Número de HRS para análise [unidade]	1
Disponibilidade anual da HRS [%]	98
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Número de compressores por HRS [unidade/HRS]	2
Vida útil da HRS [anos]	20

HRS é de 1,90 €/kg. Mais informações podem ser obtidas na Ferramenta LNEG-LCOH. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram exemplos das informações que podem ser extraídas. Os resumos de variáveis de entrada e saída não são reproduzidos neste documento.

### 3 Recolher os resultados

Com base nos parâmetros preenchidos, o custo nivelado de hidrogénio (LCOH) é de **7.07 €/kgH<sub>2</sub>**.

Isto significa que cada quilograma de hidrogénio terá um custo de 7.07 euros.

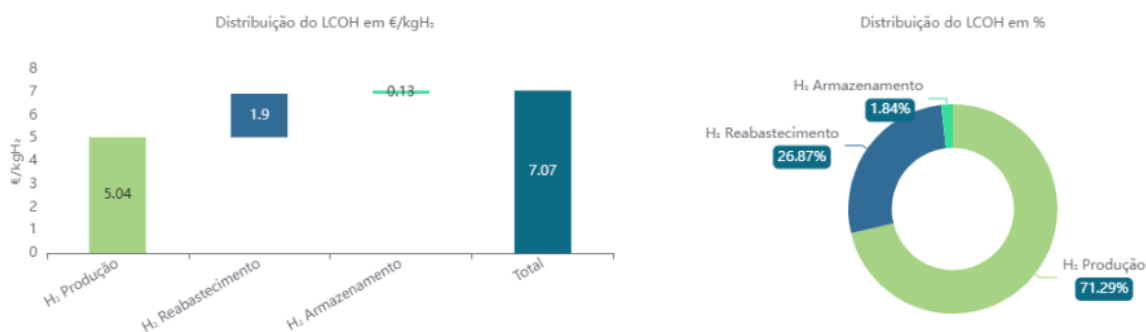


Figura 4.11: Resultado obtido do LCOH para o caso de referência H2ProdStoHRS01 utilizando a Ferramenta LNEG-LCOH. A figura apresenta a contribuição dos diferentes módulos para o LCOH total.

## 4.3 Produção Centralizada de Hidrogénio e Distribuição via Transporte Rodoviário a várias HRSs: Caso H2ProdStoRTHRS07

Este exemplo trata de uma central de produção centralizada de hidrogénio de 25 MW com um sistema de armazenamento local associado que enche reboques com gás comprimido. Os reboques abastecem sete estações de abastecimento de hidrogénio (HRSs) a diferentes distâncias da unidade de produção. Estas HRS têm dois tipos de dispensadores: um que fornece hidrogénio a veículos pesados (camiões) a 350 bar e outro a veículos de passageiros a 700 bar. A vida útil da instalação de produção de hidrogénio e do sistema de armazenamento é de 20 anos, e as HRSs têm uma vida útil de 15 anos. O LCOH deve ser estimado nestas condições. O hidrogénio encontra-se em estado gasoso em toda a cadeia de abastecimento. Importa referir que o nome do caso é concebido para fornecer um nome próprio, e não vem de nenhum outro documento ou referência. Inclui indicadores curtos para a fase de produção (H2Prod), armazenamento (Sto), transporte rodoviário (RT) e a indicação de que existem sete HRSs (HRS07).

Os pressupostos adicionais são os seguintes:

- A capacidade total da central de eletrólise é de 25 MW com um fator de carga de 0,8. O utilizador deve

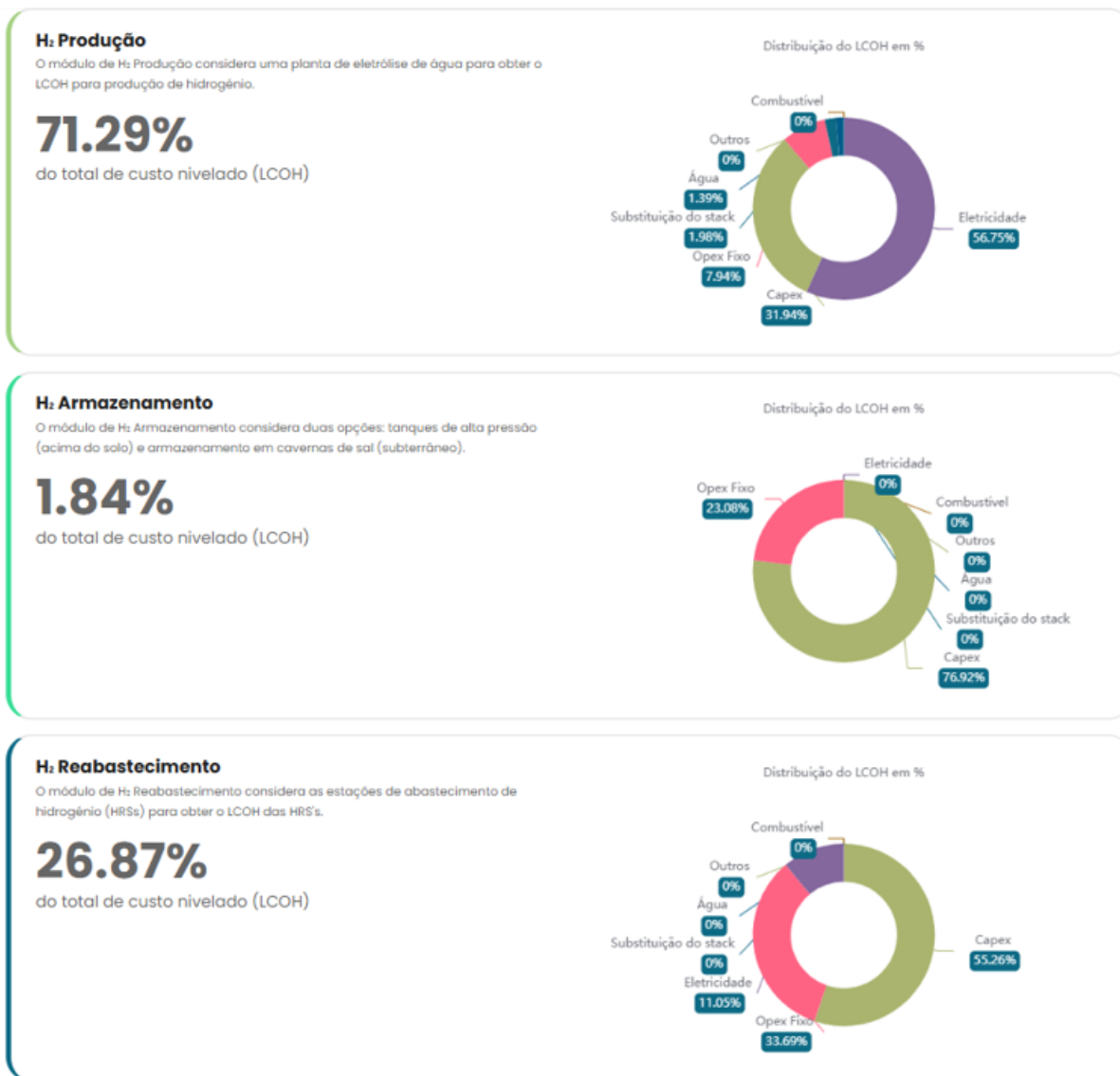


Figura 4.12: Resultado obtido do LCOH para o caso de referência H2ProdStoHRS01 utilizando a Ferramenta LNEG-LCOH. A figura apresenta a distribuição de CAPEX, OPEX fixo, substituição do *stack*, eletricidade, água e custos nivelados de combustível em relação ao LCOH total para todos os módulos calculados.

ter em atenção que a distribuição da fonte de eletricidade envolve uma mistura, incluindo a eletricidade do mercado grossista.

- A capacidade total de armazenamento perto da central de eletrólise de água é de cerca de 15 t de hidrogénio, representando cerca de 1,4 vezes a produção nominal da instalação de eletrólise em um dia.
- O número de reboques/camiões estimado para abastecer as sete HRSs é de 12. As HRSs são consideradas nas distâncias de 100, 200, 300, 400, 500, 600 e 800 km. Trata-se de um caso hipotético. Se a capacidade de cada HRS for de 1400 kgH<sub>2</sub>/dia, então a distância média que cada reboque/camião deve percorrer todos os dias é de cerca de 480 km.

As tabelas 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 apresentam os dados de entrada usados para cada um dos quatro módulos considerados.

Tabela 4.19: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH - módulo H<sub>2</sub> Produção para o Caso H2ProdStoRTHRS07.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade de electrolisadores [MW]	25
Vida útil da instalação de electrolisadores [anos]	20
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Tipo de água de entrada	WasteWater
Tipo de electrolisador	ALK
Tempo substituição do stack do electrolisador [horas]	80000
Fator de carga médio anual [fração/ano]	0.8
Capacidade de produção de H <sub>2</sub> [kgH <sub>2</sub> /h/MW]	18
Taxa de degradação annual do stack [%/ano]	1.5
CAPEX da instalação de electrólise [€/kW]	2000
Custo do stack [% CAPEX]	15
OPEX fixo anual [% CAPEX/ano]	2.5
Consumo de electricidade por kgH <sub>2</sub> [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	52.14
Consumo de água por kgH <sub>2</sub> [l/kgH <sub>2</sub> ]	18
Custo unitário da água de rede [€/m <sup>3</sup> ]	0
Custo unitário da água residual [€/m <sup>3</sup> ]	3.79
Custo unitário da água do mar [€/m <sup>3</sup> ]	8.83
Uso de electricidade de fonte PV Solar [%]	40
Uso de electricidade de fonte eólica onshore [%]	40
Uso de electricidade de fonte eólica offshore [%]	0
Uso de electricidade da rede [%]	20
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar [€/MWh]	40.86
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore [€/MWh]	60.42
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade da rede [€/MWh]	98.1

 Tabela 4.20: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH - módulo H<sub>2</sub> Armazenamento para o Caso H2ProdStoRTHRS07.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade da armazenagem [t]	15
Localização da armazenagem	Acima do solo
Método de armazenagem	Reservatório
CAPEX do sistema de armazenagem - tanques, tubos e compressores [€/t]	100000
OPEX fixo anual - Reservatórios [% CAPEX]	3
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Vida útil do sistema de armazenagem - Tanques [anos]	20

 Tabela 4.21: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH - módulo H<sub>2</sub> Transporte Rodoviário para o Caso H2ProdStoRTHRS07.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Transporte de H <sub>2</sub> em estado	Gas
CAPEX do camião [€/kgH <sub>2</sub> ]	1140
Capacidade do camião [kgH <sub>2</sub> ]	1000
Número de despachos por dia [viagem/dia]	1
OPEX fixo anual [€/kgH <sub>2</sub> ]	0.06
Consumo de combustível [€/km]	0.6125
Distância diária média percorrida por camião [km]	480
Número de quilogramas despachados por viagem [kgH <sub>2</sub> /viagem]	1000
Número médio de camiões por HRS [unidade/HRS]	1.71
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Vida útil do camião [anos]	10

Tabela 4.22: Valores de entrada para a Ferramenta LNEG-LCOH - módulo H<sub>2</sub> Reabastecimento para o Caso H2ProdStoRTHRS07.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
CAPEX de uma HRS [€/HRS]	5000000
CAPEX do sistema de compressão [€/kW]	0
Consumo de electricidade [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	3.25
OPEX fixo anual [€/kgH <sub>2</sub> ]	0.5
Capacidade diária média de despacho [kgH <sub>2</sub> /dia]	1400
Número de HRS para análise [unidade]	7
Disponibilidade anual da HRS [%]	98
Taxa de desconto anual [%/ano]	6
Número de compressores por HRS [unidade/HRS]	2
Vida útil da HRS [anos]	20

O LCOH total calculado pela ferramenta sob as condições é de 8,47 €/kg. A quota do LCOH total associada à unidade de produção de hidrogénio é de 5,71 €/kg, a quota de LCOH de armazenamento é de 0,05 €/kg, a contribuição do transporte rodoviário para o LCOH total é de 1,21 €/kgH<sub>2</sub> e a quota HRS LCOH é de 1,5 €/kg. Mais informações podem ser obtidas da Ferramenta LNEG-LCOH. A Figura 4.13 apresenta os resultados para este caso. Outros resultados podem ser vistos diretamente na ferramenta.

### 3 Recolher os resultados

Com base nos parâmetros preenchidos, o custo nivelado de hidrogénio (LCOH) é de **8.47 €/kgH<sub>2</sub>**.

Isto significa que cada quilograma de hidrogénio terá um custo de 8.47 euros.

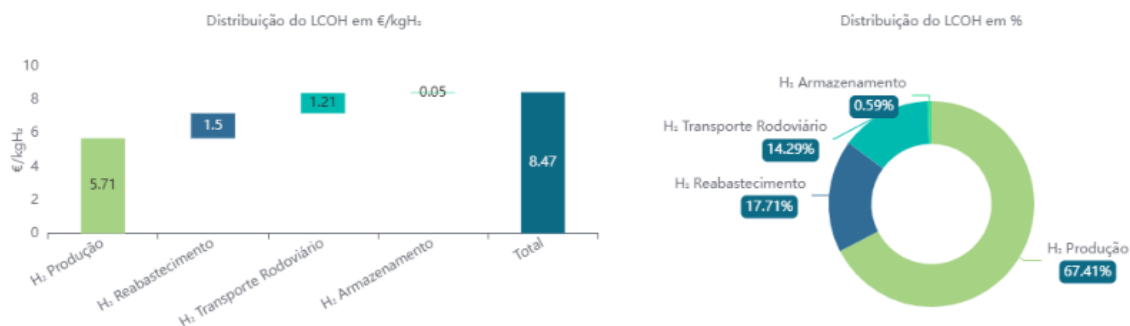


Figura 4.13: Resultado obtido do LCOH para o caso de referência H2ProdStoRTHRS07 utilizando a Ferramenta LNEG-LCOH. A figura apresenta a contribuição dos diferentes módulos para o LCOH total.

## 4.4 Caso MIBGAS IBHYX Index

Esta seção apresenta como estimar o *MIBGAS IBHYX Index* usando a Ferramenta LNEG-LCOH. O *MIBGAS IBHYX Index* é um índice recentemente criado para servir de referência para o preço do hidrogénio verde, e representa o custo nivelado da produção de hidrogénio renovável de acordo com os critérios estabelecidos nos atos delegados para a produção de RFNBO (Combustível Renovável de Origem Não Biológica). O *IBHYX Index* considera uma unidade de eletrólise de 50 MW. A eletricidade é fornecida por duas unidades dedicadas, uma instalação solar fotovoltaica de 75 MW e um parque eólico de 25 MW. Além disso, os contratos de compra de energia (PPA) de fontes renováveis fornecem eletricidade por cerca de 1000 horas por ano. O tempo total de operação da planta de eletrólise num ano é 4500 horas. Uma lista dos parâmetros publicados para calcular o *IBHYX Index* pode ser encontrada no site do índice. O valor mais recente para o índice é mostrado na Figura 4.14.

O procedimento para obter dados equivalentes para entrada na Ferramenta LNEG-LCOH é o seguinte:

- Estimar do custo nivelado da energia (ou eletricidade) LCOE das unidades Solar PV e Eólica dedicadas.
- Obter CAPEX, OPEX e percentagem de substituição do *stack* da instalação de eletrólise.

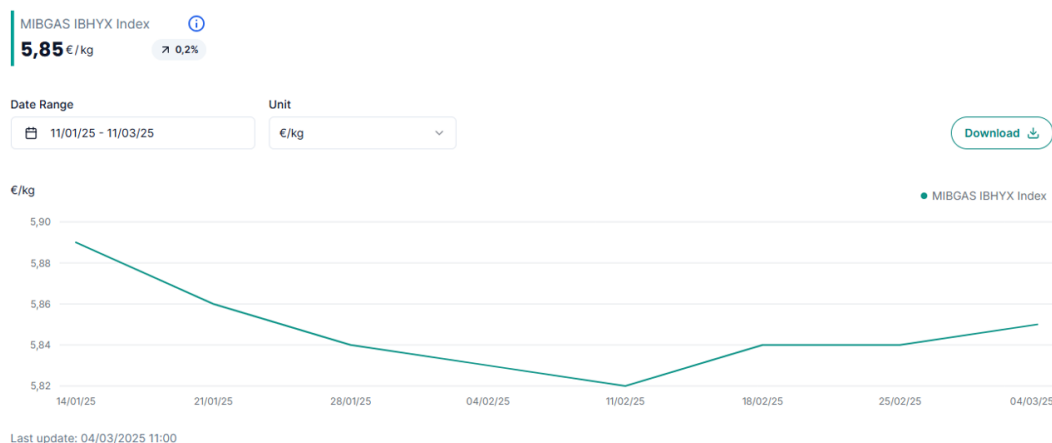


Figura 4.14: *MIBGAS IBHYX Index* acedido a 03/10/2025.

- Selecionar o preço da eletricidade para o PPA.
- Assumir uma taxa de desconto (ou taxa interna de retorno (TIR) ou custo médio ponderado de capital (WACC)).

A Tabela 4.23 apresenta o resumo dos dados de entrada considerados equivalentes para a Ferramenta LNEG-LCOH. Importa referir que apenas o módulo H<sub>2</sub> Produção foi utilizado. Assumiu-se uma taxa de desconto de 8%. Adicionalmente, os dados para a estimativa do LCOE para as unidades solar PV e eólica são apresentados na Tabela 4.24. A estimativa foi feita pelo LNEG.

Tabela 4.23: Valores de input usados para a Ferramenta LNEG-LCOH - Módulo H<sub>2</sub> Produção para o Caso *MIBGAS IBHYX Index*.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade de electrolisadores [MW]	50
Vida útil da instalação de electrolisadores [anos]	25
Taxa de desconto anual [%/ano]	10
Tipo de água de entrada	FreshWater
Tipo de electrolisador	PEM
Tempo substituição do stack do electrolisador [horas]	80000
Fator de carga médio anual [fração/ano]	0.514
Capacidade de produção de H <sub>2</sub> [kg/h/MW]	19
Taxa de degradação anual do stack [%/ano]	0.5400
CAPEX da instalação de electrólise [€/kW]	1360
Custo do stack [% CAPEX]	17.65
OPEX fixo anual [% CAPEX/ano]	4.71
Consumo de electricidade por kgH <sub>2</sub> [kWh/kgH <sub>2</sub> ]	55.5
Consumo de água por kgH <sub>2</sub> [l/kgH <sub>2</sub> ]	11
Custo unitário da água de rede [€/m <sup>3</sup> ]	0
Custo unitário da água residual [€/m <sup>3</sup> ]	0
Custo unitário da água do mar [€/m <sup>3</sup> ]	0
Uso de electricidade de fonte PV Solar [%]	56
Uso de electricidade de fonte eólica onshore [%]	22
Uso de electricidade de fonte eólica offshore [%]	0
Uso de electricidade da rede [%]	22
Custo unitário de electricidade de fonte PV Solar [€/MWh]	49.1
Custo unitário de electricidade de fonte eólica onshore [€/MWh]	58.3
Custo unitário de electricidade de fonte eólica offshore [€/MWh]	0
Custo unitário de electricidade da rede [€/MWh]	66.6

Tabela 4.24: Dados das unidades solares PV e eólicas considerados para a estimativa do LCOE. Os fatores de capacidade para as unidades eólica e solar PV e a taxa de degradação para a instalação solar fotovoltaica foram selecionados pelo LNEG, os outros valores vêm do website do *MIBGAS IBHYX Index*.

Nome da Variável [Unidade]	Valor
Capacidade da unidade Solar PV [MW]	75
Capacidade da unidade eólica [MW]	25
Vida útil para ambas as unidades [anos]	25
Taxa de desconto anual [%/ano]	8
Fator de capacidade unidade Solar PV [-]	0.2
Taxa de degradação da unidade Solar PV plant [%]	0.5 <sup>1</sup>
Fator de capacidade unidade eólica [-]	0.3
CAPEX unidade Solar PV [€/kW]	500
CAPEX unidade eólica [€/kW]	1100
OPEX unidade Solar PV [€/kW-ano]	5
OPEX unidade eólica [€/kW-ano]	50
LCOE unidade Solar PV [€/MWh]	49.1
LCOE unidade eólica [€/MWh]	58.3

<sup>1</sup> <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>

Assumiu-se que os preços do PPA tanto para a energia solar fotovoltaica como para a energia eólica eram 20% mais elevados do que o LCOE calculado para as unidades solares PV e eólicas dedicadas. O preço médio ponderado do PPA é então de 66,6 €/MWh, considerando o pressuposto de 30% da eletricidade proveniente da energia solar fotovoltaica e 70% da eólica com base no site *MIBGAS IBHYX Index*'s.

O resultado obtido a partir da ferramenta LNEG-LCOH é apresentado na Figura 4.15. O valor de 5,86 €/kgH<sub>2</sub> é muito semelhante ao publicado para o índice no dia 04/03/2025 (5,85 €/kgH<sub>2</sub>). No entanto, é importante referir que, uma vez que foram estimados os LCOE para as unidades solares fotovoltaicas e eólicas, bem como os preços da eletricidade dos PPAs, o resultado pode diferir consideravelmente sob outros pressupostos.

### 3 Recolher os resultados

Com base nos parâmetros preenchidos, o custo nivelado de hidrogénio (LCOH) é de **5.86 €/kgH<sub>2</sub>**.

Isto significa que cada quilograma de hidrogénio terá um custo de 5.86 euros.



Figura 4.15: *MIBGAS IBHYX Index* acedido a 03/10/2025.

# 5 Como Reportar Erros, Falhas, Sugestões e Comentários?

Esta seção apresenta o procedimento a ser seguido pelos utilizadores para reportar erros, falhas, fazer sugestões de melhoria e comentários.

## 5.1 Procedimento e Contactos

Para reportar problemas, falhas ou erros associados à ferramenta LNEG-LOCH, fazer qualquer sugestão relacionada a possíveis melhorias ou alterações, ou deixar qualquer comentário (por exemplo, sobre a experiência do utilizador, a facilidade ou dificuldade em usar a ferramenta, feedback geral, dúvidas ou qualquer outro assunto), escreva um e-mail para [lcoh.lneg@lneg.pt](mailto:lcoh.lneg@lneg.pt). Agradecemos que inclua no assunto as palavras "Problema", "Sugestão" ou "Comentário", opcionalmente seguidas de uma breve descrição do tópico ou problema principal.

Título: LNEG-LCOH - Calculadora do Custo Nivelado do Hidrogénio: Descrição e Relatório Metodológico  
Autores: Juan C. C. Portillo and Sofia G. Simões  
Edição: Juan C. C. Portillo  
Data: 10/03/2025  
URL: <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/4409>

© 2025 LNEG. Todos os direitos reservados.

Cite this document as:

J.C.C. Portillo, S.G. Simões, LNEG-LCOH - Calculadora do Custo Nivelado do Hidrogénio: Descrição e Relatório Metodológico, Versão 02.2025. Tech. rep., LNEG (2025). URL <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/4409>.