

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DE ENERGIA

Proposta de um plano de segurança para a produção de
Hidrogênio verde no CH₂V

Acsa dos Santos Martins

Março de 2025
Itajubá, Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DE ENERGIA

Acsa dos Santos Martins

Proposta de um plano de segurança para a produção de
Hidrogênio verde no CH₂V

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia de Energia**.

Área de Concentração: Planejamento e Gestão de Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Jamil Haddad

Coorientador: Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni

Março de 2025
Itajubá, Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA DE ENERGIA

Acsa dos Santos Martins

Proposta de um plano de segurança para a produção de
Hidrogênio verde no CH₂V

Dissertação Proposta de um plano de segurança para a produção de Hidrogênio verde no CH₂V por banca examinadora em 28 de março de 2025, conferindo o título de **Mestre em Engenharia de Energia**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jamil Haddad (Orientador)

Prof. Dr. Edson da Costa Bortoni (Coorientador)

Prof. Dr. Roberto Akira Yamachita (Interno)

Prof. Dra. Gilze Belém Chaves Borges (Externo)

Março de 2025

Itajubá, Minas Gerais

À minha família, cujo apoio incondicional e valores de dedicação e resiliência inspiram cada passo da minha jornada. Aos meus colegas e mentores, por compartilharem conhecimento e motivação na busca por um futuro energético mais seguro e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus.

Às minhas filhas, Maria Flor e Bella, por serem minha maior motivação, e aos meus pais, Mônica e Martins, pelo suporte e por serem minha rede de apoio.

Aos meus irmãos, pelo incentivo constante, e à minha colega Lúcia Garrido, pelo apoio e companheirismo ao longo dessa jornada.

Meu agradecimento aos meus orientadores, professores Jamil Haddad, Edson da Costa Bortoni e Márcia Baldissera, pela oportunidade e orientações. Também estendo minha gratidão a todos os professores do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Energia e aos colegas do Centro de Eficiência Energética (Excen) cujos conhecimentos e comprometimentos foram fundamentais para minha formação.

À *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), Agência de Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável que, por meio do financiamento ao Centro de Hidrogênio Verde (CH2V) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

“Se você conhece o inimigo e conhece a si mesmo, não precisa temer o resultado de cem batalhas. Se... conheces a ti mesmo, mas não conheces o inimigo, para cada vitória ganha sofrerás também uma derrota. Caso não conheça nem o inimigo nem a si mesmo, perderá todas as batalhas”

Sun Tzu, A arte da guerra, 1519 e 1520

RESUMO

A crescente demanda global por energia e a urgência em controlar as emissões poluentes têm impulsionado a busca por soluções alinhadas ao desenvolvimento sustentável. Nos últimos anos, a transição ambiental e energética se tornou um tópico central na agenda internacional, visando garantir um futuro verde e sustentável. Cumprir as metas do Acordo de Paris requer que as emissões se reduzam a zero em torno de 2050. Essa tendência impulsiona várias nações a adotarem estratégias de transformação em seus setores energéticos, industriais, agropecuária e de infraestrutura, rumo à neutralidade climática. Para atingir esses objetivos e descarbonizar o sistema energético global, é essencial adotar amplamente fontes renováveis e reduzir a emissão de carbono em setores como transporte e indústria. O hidrogênio emerge como uma solução potencial para facilitar a descarbonização, uma vez que pode armazenar e liberar energia em grande escala sem gerar emissões de dióxido de carbono (CO₂) durante a combustão. O hidrogênio desempenha um papel vital na descarbonização de indústrias intensivas em energia, incluindo transporte aéreo, marítimo, siderúrgicas e químicas, bem como realinha relações geopolíticas e econômicas globais. O Brasil, com suas condições climáticas favoráveis à geração de energia renovável, está bem posicionado para ser um importante exportador de hidrogênio de baixo carbono. Embora a produção de hidrogênio no país esteja atualmente ligada a setores com alta emissão de CO₂, o governo planeja investir na produção de hidrogênio verde (H₂V) à medida que os custos diminuem e as energias renováveis se tornem mais prevalentes. No entanto, a segurança é um aspecto crítico nessa jornada. A natureza altamente inflamável do hidrogênio exige medidas de precaução para minimizar os riscos. A adoção de normas como a ISO 22734:2019 pode estabelecer diretrizes para práticas seguras na produção e uso do hidrogênio. Considerações logísticas, como produção centralizada ou distribuída, e a promoção de pesquisa, desenvolvimento e inovação são cruciais para tornar o Brasil um participante significativo na economia do hidrogênio. Este estudo aborda as normas de segurança e a proposta de um plano de segurança para a produção de hidrogênio de uma planta de hidrogênio verde de uma universidade brasileira, contribuindo para a adoção segura e eficaz do hidrogênio em sua matriz energética.

Palavras-Chave: Transição energética, segurança, hidrogênio, normas de segurança, plano de segurança.

ABSTRACT

The growing global demand for energy and the urgency to control polluting emissions have driven the search for solutions aligned with sustainable development. In recent years, the environmental and energy transition has become a central topic on the international agenda, aiming to ensure a green and sustainable future. Fulfilling the goals of the Paris Agreement requires emissions to peak in the next decade and subsequently reach net-zero around 2050. This trend propels several nations to adopt transformation strategies in their energy, industrial, and infrastructure sectors towards climate neutrality. To achieve these objectives and decarbonize the global energy system, it is essential to widely adopt renewable sources and reduce carbon emissions in sectors such as transportation and industry. Hydrogen emerges as a potential solution to make possible decarbonization, as it can store and release energy on a large scale without generating carbon dioxide (CO₂) emissions during combustion. Hydrogen plays a vital role in decarbonizing energy-intensive industries, including aviation, maritime, steel, and chemical, as well as realigning global geopolitical and economic relationships. Brazil, with its favorable climate conditions for renewable energy generation, is well-positioned to be a significant exporter of low-carbon hydrogen. Although hydrogen production in the country is currently tied to sectors with high CO₂ emissions, the government plans to invest in green hydrogen (H₂V) production as costs decrease and renewable energies become more prevalent. However, safety is a critical aspect of this journey. The highly flammable nature of hydrogen requires precautionary measures to minimize risks. The adoption of standards like ISO 22734:2019 can establish guidelines for safe practices in hydrogen production and use. Logistic considerations, such as centralized or distributed production, and the promotion of research, development, and innovation can turn Brazil a significant participant in the hydrogen economy. This study address safety standards and propose a safety plan for a hydrogen laboratory in a Brazilian university, contributing to the safe and effective adoption of hydrogen in its energy matrix.

Keywords: Energy transition, safety, hydrogen, safety standards, safety plan.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Projetos de H ₂ V no Brasil	20
Figura 2.2 - Classificação por cores do hidrogênio.....	211
Figura 2.3 – Zonas de risco para pessoas	42
Figura 2.4 – Zonas de perigo para edificações	42
Figura 2.5 – Esquema simples do jato expandido e subexpandido	45
Figura 2.6 – Componentes esquemáticos de uma estação de abastecimento de hidrogênio	58
Figura 3.1 – Fluxograma – Metodologia	65
Figura 4.1 – Componentes esquemáticos de uma produção de hidrogênio do CH ₂ V	66
Figura 4.2 – Cenário esquemático utilizado para a simulação da planta de eletrólise do CH ₂ V	71
Figura 4.3 – Desenho técnico do tanque de armazenamento de 900 bar.....	72
Figura 4.4 – Tanque 900 bar simulado com o ANSYS Geometry	72
Figura 4.5 – Malha do tanque 900 bar, ANSYS mesh	73
Figura 4.6 – Gráfico temperatura máxima	74
Figura 4.7 – Distância mínima de segurança para prevenir fatalidades, danos graves para pessoas e qualquer tipo de dano, pressão por distância.....	75
Figura 4.8 – Distância mínima de segurança para evitar danos em edifícios, pressão por distância.....	76
Figura 4.9 – Distância entre a base Samu e a planta CH ₂ V	80
Figura 4.10 – Distância entre a Planta CH ₂ V e o Hospital de Clinicas de Itajubá.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades do hidrogênio	22
Tabela 2.2 – Dados de queima de radiação	48
Tabela 2.3 – Exemplo de critérios de danos por fluxo de calor radiante	48
Tabela 2.4 – Exemplo de critérios de danos por fluxo de calor radiante para estruturas e equipamentos.....	48
Tabela 2.5 – Efeitos fisiológicos do esgotamento de oxigênio	49
Tabela 2.6 – Danos a seres humanos, estruturas e equipamentos causados por eventos de sobrepressão	50
Tabela 2.7 – Vulnerabilidades de Segurança e Métodos de Avaliação de Riscos	56
Tabela 2.8 – Probabilidade e consequência.....	57
Tabela 2.9 – Verificação do plano de segurança	58
Tabela 2.10 – Detalhamento de segurança dos equipamentos da planta.....	60
Tabela 2.11 – Detalhamento de segurança dos equipamentos da planta.....	61
Tabela 4.1 – Detalhamento de segurança dos equipamentos da planta de produção do CH ₂ V	69
Tabela 4.2 – Etapas de procedimentos da planta de produção de hidrogênio do CH ₂ V.....	70
Tabela 4.3 – Resultados do raio de distância de segurança para pessoas.....	75
Tabela 4.4 – Zonas de perigo para edificações.....	76
Tabela 4.5 – Resultados dos intervalos de distância	77

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 Parâmetro de Regime de escoamento.....	45
Equação 2.2 Pressão Crítica entre Regimes Subexpandido e Expandido.....	46
Equação 2.3 Densidade na Saída do Bico.....	46
Equação 2.4 Número de Mach na Saída.....	47
Equação 2.5 Temperatura e Velocidade do Som na Saída.....	47
Equação 2.6 Velocidade do Escoamento.....	47
Equação 2.7 Densidade do Ar Ambiente.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas.

BLEVE - Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (Explosão por expansão de líquido em ebulição).

CFD - Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional).

CH₂V - Centro de Hidrogênio Verde (UNIFEI).

CNG - Compressed Natural Gas (Gás Natural Comprimido).

DNV - Det Norske Veritas (empresa de certificação e risco industrial).

EFC - Engenharia de Fatores Críticos (ou Elementos Fundamentais Críticos) – depende do contexto.

ESD - Emergency Shutdown (Desligamento de Emergência).

FMEA - Failure Modes and Effects Analysis (Análise de Modos de Falha e Efeitos).

HAZOP - Hazard and Operability Study (Estudo de Perigos e Operabilidade).

H₂ - Hidrogênio (símbolo químico).

H₂V - Hidrogênio Verde.

IEC - International Electrotechnical Commission.

ISV - Identificação de Vulnerabilidades de Segurança.

ISO - International Organization for Standardization.

LFL - Lower Flammability Limit (Limite Inferior de Inflamabilidade).

Mpa – Megapascal.

NFPA - National Fire Protection Association.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico.

PEM - Proton Exchange Membrane (Membrana de Troca de Prótons).

PPE - Personal Protective Equipment (Equipamentos de Proteção Individual - EPI).

QRA - Quantitative Risk Assessment (Avaliação Quantitativa de Risco).

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá.

VCA - Válvula de Controle de Alívio (ou Alívio de Pressão).

ZEE - Zona de Explosão Estimada.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	16
1.2. Objetivos gerais	16
1.3. Objetivos específicos	16
1.4. Justificativa.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Contextualização	18
2.2. Brasil e o hidrogênio	19
2.3. Propriedades do hidrogênio	20
2.4. Segurança de hidrogênio.....	23
2.4.1. Prevenção a combustão	31
2.4.2. Autoignição.....	33
2.4.3. Vedações	34
2.4.4. Tubulações, conexões e juntas	35
2.4.5. Ventilação	36
2.4.6. Cuidados com a rede elétrica	36
2.4.7. Procedimentos em caso de fuga de hidrogênio	37
2.4.8. Dispositivos de segurança.....	38
2.4.9. Avaliação de risco	39
2.4.10. Diretrizes para instalação e uso interno de equipamentos com H2	42
2.4.12. Perigos de incêndio de jato de hidrogênio	43
2.4.13. Efeitos térmicos	49
2.4.14. Asfixia	49
2.4.15. Sobrepressão	50
2.5. Modelagem de CFD para segurança de hidrogênio em tanques de alta pressão	51
2.6. Proposta de um plano de segurança baseadas no Painel Europeu de Segurança de Hidrogênio (EHSP).....	52
2.6.1. Metodologia	53
2.6.2. Itens importantes para configurar um plano de segurança.....	53
2.6.3. Construção de um plano de segurança	54
2.6.4. Métodos para identificação de vulnerabilidades de segurança, perigos e avaliação de risco	55
2.6.5. Lista de verificação do plano de segurança	57
2.6.6. Exemplo de um plano de segurança	58
3. METODOLOGIA	62
4. RESULTADOS.....	66
4.1. Plano de segurança	66
4.1.1. Avaliação de risco.....	66
4.2. Simulação CFD	70
4.2.1. Detalhamento das simulações.....	72
4.3. Distância de segurança.....	77
4.4. Emergência.....	79
5. CONCLUSÃO	81

6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS	84

1. INTRODUÇÃO

A demanda global por energia continua a aumentar, e há uma pressão cada vez maior para controlar as emissões de CO₂. Isso torna maior a busca por soluções compatíveis com o desenvolvimento sustentável. Nos últimos anos, a transição ambiental e energética se tornou um tema central na agenda internacional, visando garantir um futuro verde e sustentável. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019), para cumprir as metas do Acordo de Paris, as emissões precisam atingir o pico na próxima década e, em seguida, diminuir até atingir zero por volta de 2050. Muitos países anunciaram estratégias para promover transformações profundas nos setores de energia, indústria e infraestrutura como parte dessa corrida em direção à neutralidade climática.

O Acordo de Paris estabeleceu metas (VERA *et al*, 2024), para limitar o aumento da temperatura global e reduzir as emissões de gases poluentes. Para atingir essas metas e alcançar a descarbonização do sistema energético mundial, é necessário implementar uma quantidade significativa de fontes renováveis de energia e descarbonizar setores como transporte e indústria em larga escala.

O conceito de desenvolvimento sustentável busca satisfazer as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2019) identificou o hidrogênio como um vetor que pode facilitar a descarbonização, pois é capaz de armazenar e fornecer grandes quantidades de energia, sem gerar emissões de dióxido de carbono (CO₂) durante a combustão. O hidrogênio desempenha um papel importante na descarbonização de indústrias intensivas em energia, como transporte aéreo e marítimo, além das indústrias siderúrgica e química. Seu uso crescente também pode ter implicações geopolíticas, redesenhando as relações energéticas, econômicas, sociais e de segurança em todo o mundo.

O Brasil tem uma posição privilegiada para se tornar um grande exportador de hidrogênio de baixo carbono devido às suas condições climáticas favoráveis para a geração de energia eólica, solar, biomassas e hídrica. Atualmente, a produção de hidrogênio no Brasil está concentrada nos setores de petróleo (refino e indústria) e fertilizantes (amônia), que utilizam processos, com alta emissão de CO₂. O país segue a tendência global de produção de hidrogênio por meio da reforma de gás natural, também conhecido como hidrogênio cinza.

Como estratégia de transição, o governo brasileiro planeja inicialmente investir no hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), utilizando tecnologias de redução de emissões que podem ser aplicadas

em todo o sistema de energia. Com a diminuição dos custos de produção e o aumento do uso de energia renovável, espera-se que a produção de hidrogênio verde (H_2V) também aumente.

O mercado de hidrogênio está em crescimento devido a políticas energéticas pós-pandemia e à aceleração da transição energética global. O hidrogênio tem potencial como portador para armazenamento de energia renovável. Vários países, como EUA, Japão, Austrália e Coreia do Sul, têm implementado estratégias e metas para impulsionar o uso e desenvolvimento do hidrogênio em diversos setores, essas iniciativas visam reduzir os custos, promover a descarbonização e impulsionar a competição e integração dos mercados. O hidrogênio desempenha um papel importante na transição para um sistema energético mais sustentável.

O hidrogênio é reconhecido como um excelente vetor energético devido às suas propriedades únicas. É o elemento mais simples e leve da tabela periódica, com um número atômico de 1. Sua forma molecular mais comum é H_2 , constituindo um gás incolor, inodoro e não tóxico. No entanto, apesar de ser considerado um combustível limpo, é extremamente inflamável. Surpreendentemente, o hidrogênio requer apenas 15 vezes menos energia para iniciar uma ignição em comparação ao gás natural. Além disso, a faixa de concentrações no ar na qual o hidrogênio é inflamável, com uma chama invisível ao olho humano, é 10 vezes maior do que a da gasolina (EPE, 2021).

Sua natureza altamente inflamável demanda uma atenção cuidadosa para minimizar os riscos associados. Com o uso de classificações padronizadas, como as fornecidas pela ISO 22734:2019, é possível estabelecer diretrizes e práticas seguras para a produção e utilização responsável do hidrogênio, contribuindo para a transição para uma matriz energética mais sustentável e de baixo carbono.

A segurança é um aspecto fundamental a ser considerado no desenvolvimento e uso do hidrogênio como vetor energético. Para que o Brasil se torne um ator relevante na Economia do Hidrogênio, é necessário investir em pesquisa, desenvolvimento e inovação, além de estabelecer normas e regulamentos de segurança. No entanto, a segurança é um desafio a ser superado. Devido à sua leveza e à necessidade de aumentar a densidade energética. Isso requer altas pressões para armazenamento no estado gasoso ou criogenia para armazenamento no estado líquido. As tecnologias de armazenamento por adsorção também apresentam requisitos específicos de baixas temperaturas e altas pressões. Além disso, o hidrogênio é um gás explosivo, o que afeta a percepção de risco.

No que diz respeito à logística, a decisão entre produção centralizada ou distribuída do

hidrogênio pode contornar a falta de uma rede de transporte e distribuição. Eletrolisadores ou reformadores podem ser instalados próximos aos locais de consumo. No entanto, o modelo de negócio e a viabilidade econômica devem ser determinados pelo mercado. A segurança é um elemento-chave no desenvolvimento. É necessário estabelecer normas, regulamentos e padrões de segurança adequados para garantir a implementação segura e eficaz do hidrogênio como parte da matriz energética.

Esse trabalho apresenta normas de segurança de hidrogênio implementadas no mundo, propõe a elaboração de um plano de segurança para o laboratório Centro de Hidrogênio Verde (CH2V), localizado dentro da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

1.1. Objetivos

Contribuições para a criação de um plano de segurança para aplicações de hidrogênio verde tem como objetivo desenvolver uma metodologia abrangente, com aplicação específica no Centro de Hidrogênio Verde (CH2V) da UNIFEI.

1.2. Objetivos gerais

O objetivo das contribuições para um plano de segurança para a produção de Hidrogênio verde no CH2V é assegurar a prevenção ou redução de riscos e perigos durante os projetos de produção de hidrogênio verde no CH2V. O plano visa garantir a segurança das pessoas, do patrimônio e do ambiente. Isso inclui a identificação e mitigação de riscos para evitar lesões, danos ao patrimônio e impactos ambientais. Contribuições implementado no CH2V de forma eficaz, considerando aspectos técnicos para garantir a segurança em todas as etapas do projeto.

1.3. Objetivos específicos

Após estudar boa parte das referências que incluem as características do hidrogênio, normas de segurança, referências sobre planos de segurança e conhecer as instalações do CH2V, foram realizados testes por meio da tecnologia de simulação em 3D, levantamento de dados quantitativos para incluir num possível plano de segurança e desenvolver um documento para possíveis publicações. Foram realizadas análises utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

Entre os objetivos específicos pode-se citar:

- Estudar a características do hidrogênio;
- Estudar as principais normas de segurança de hidrogênio nacionais e

internacionais;

- Estudar como se faz um plano de segurança;
- Identificar o cenário as instalações do CH₂V;
- Elaborar um plano de segurança;
- Fazer simulações CFD; e
- Entregar um plano de segurança do CH₂V, em forma de documento.

1.4. Justificativa

A implementação de um plano de segurança para projetos de hidrogênio verde é importante devido às propriedades únicas desse elemento químico e aos riscos envolvidos em seu manuseio e armazenamento. O hidrogênio é inflamável e apresenta desafios de segurança em várias etapas de seu ciclo. Embora a produção sustentável de hidrogênio verde seja viável por meio da eletrólise da água com energia renovável, seu manuseio requer cuidados devido às suas moléculas pequenas que podem causar vazamentos ao enfraquecer materiais de contenção.

Com a ampla faixa de inflamabilidade e baixa energia de ignição, aumentam os riscos, especialmente considerando sua baixa densidade que exige altas pressões de armazenamento. Isso destaca a importância de medidas de segurança rigorosas, conforme apontado pela Norma ISO 22734. A fragilização por hidrogênio, danos a materiais usados em equipamentos, reforça a necessidade de escolha de materiais resistentes e sistemas de monitoramento. A prevenção de acidentes, a proteção ambiental e a conformidade regulamentar são fundamentais e um plano de segurança bem estruturado aborda essas áreas.

A implementação do plano cria uma cultura de segurança, conscientizando sobre riscos e promovendo práticas responsáveis. Com a crescente atenção à segurança e sustentabilidade, um plano sólido também atrai investimentos, fortalecendo a credibilidade do projeto. A experiência internacional, como a do Painel Europeu de Segurança de Hidrogênio (EHSP), contribui para garantir a segurança de todas as partes envolvidas e proteger o ambiente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, faz-se uma revisão de referências que introduz o conceito de hidrogênio verde e destaca o potencial brasileiro na sua produção. Em seguida, explora-se as características do hidrogênio. A análise da segurança associada ao hidrogênio é detalhada, incluindo tópicos como prevenção de combustão, autoignição, vedações, tubulações e cuidados elétricos. Também são consideradas medidas em caso de vazamento e a importância dos dispositivos de segurança. Finalmente, contribuições para um plano de segurança, fundamentada nas diretrizes do Painel Europeu de Segurança de Hidrogênio (EHSP), é apresentada.

2.1. Contextualização

A maior fonte energética do mundo é o petróleo, seguida do carvão e do gás natural, fontes fósseis e liberadores de gases poluentes. Esses meios de gerar energia são hoje os mais baratos e de maior facilidade de domínio humano, porém pesquisas mostram o fracasso que estes causaram, também na camada de ozônio. A População mundial está aumentando, assim como a necessidade de locomoção também. Com o aumento do preço do combustível e preocupações ambientais, a comunidade internacional de pesquisa e planejamento energético estudam e analisam meios mais eficientes e menos poluentes para substituir o petróleo (Pamucar *et al.*, 2021).

Novas formas mais limpas de gerar energia são uma das soluções para o futuro do planeta. Planejamentos que consideram os impactos ambientais estão ganhando cada vez mais importância. O aumento de energias renováveis vem como critério para colaboração de cada país para um bem em comum de todo planeta. Desenvolver e gerar hidrogênio através de fontes renováveis, novos projetos de conscientização e aplicação dessas energias é uma solução. O hidrogênio é uma alternativa de combustível verde e um vetor para a geração de energia. No entanto, desafios como a segurança, o armazenamento e o transporte dificultam um avanço mais rápido na sua produção. (Pamucar *et al.*, 2021).

Energias térmicas e fósseis são as principais fontes que abastecem e sustentam o planeta, porém, com o passar do tempo, esses recursos se tornaram poluentes, tornando-se uns dos principais causadores do aquecimento global. Com foco na preservação das matérias-primas, na desaceleração do efeito estufa e na qualidade de vida humana, vêm sendo desenvolvidas diferentes formas de geração de energia. Essa nova geração busca ser mais sustentável e menos poluente. As chamadas energias renováveis procuram meios mais limpos e com menor impacto ambiental. Entre elas, destacam-se a energia solar, eólica e hídrica, que

utilizam recursos naturais inesgotáveis como o sol, o vento e a água para a produção de energia. A necessidade para substituir combustíveis fósseis por combustíveis menos poluentes, levou a população mundial ao aumento de interesse pelo hidrogênio. O hidrogênio é um gás altamente inflamável e pode ser utilizado como combustível devido ao seu elevado potencial energético. (Adeel *et al.*, 2019).

A extração ou geração de hidrogênio por meio da eletrólise é realizada com o uso de um eletrolisador, tornando o hidrogênio tão limpo quanto a fonte de eletricidade utilizada no processo. Como a maioria das tecnologias de conversão de energia está consumindo os combustíveis fósseis, no entanto, a célula a combustível de hidrogênio tem se destacado com uma tecnologia promissora que evita a combustão de gases de efeito estufa. Historicamente, a denominação hidrogênio verde foi utilizada exclusivamente para o hidrogênio produzido por eletrólise utilizando fontes de energia renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica. A generalização para outras fontes renováveis levou à denominação hidrogênio renovável e a inclusão de fontes não renováveis, criou-se o termo hidrogênio de baixo carbono.

2.2. Brasil e o hidrogênio

O Brasil está em uma posição destacada para se tornar um grande exportador de hidrogênio de baixo carbono, devido às suas condições climáticas favoráveis para a geração de eletricidade a partir de fontes eólicas, solares e hidrelétricas. Atualmente, a produção de hidrogênio no Brasil está concentrada principalmente nos setores de petróleo (refino e indústria) e fertilizantes (amônia). Em 2021, foram anunciados diversos projetos de P&D em escala piloto, bem como projetos em escala industrial, entre os quais se destacam os hubs localizados no porto de Pecém (Ceará), porto de Suape (Pernambuco) e porto de Açu (Rio de Janeiro), este último em estudo de viabilidade técnica e econômica. O mapa do potencial técnico para produção de hidrogênio verde no Brasil está apresentado na Figura 2.1. O país segue a tendência global de produzir hidrogênio por meio da reforma de gás natural, conhecido como hidrogênio cinza. Como estratégia de transição, o governo brasileiro planeja investir inicialmente em hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis com captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), visando reduzir as emissões em todo o sistema de energia. À medida que as fontes de energia renovável, como a solar e a eólica, se tornam mais acessíveis, ou seja, com custos mais baixos, maior disponibilidade tecnológica e incentivos governamentais, espera-se um aumento significativo na produção de hidrogênio verde. (H₂V) (IPEA, 2022).



Figura 2.1 - Projetos de H₂V no Brasil
Fonte: EPE (2024)

As capacidades de armazenamento de energia do hidrogênio são significativas, permitindo sua aplicação em diversos setores, como na produção de amônia e metanol, no refino de petróleo, na siderurgia, na indústria alimentícia, na fabricação de semicondutores e na geração de energia. Segundo a *Global Hydrogen Review* (2022), a demanda global por hidrogênio puro (H₂) deve crescer, chegando a 73,8 milhões de toneladas. No entanto, a produção atual de hidrogênio, em grande parte baseada em combustíveis fósseis, contribui com aproximadamente 830 milhões de toneladas de emissões de CO₂ anualmente (IPEA, 2022).

As condições favoráveis do Brasil e o crescente interesse na produção de hidrogênio de baixo carbono, juntamente com as tendências globais favoráveis à sua adoção, posicionam o país como um possível grande *player* na emergente economia do hidrogênio. Países de todo o mundo estão buscando o hidrogênio de baixo carbono para substituir os combustíveis fósseis. Alemanha, Austrália e Chile são proeminentes, enquanto a China é um grande produtor com ambições para o hidrogênio verde (IPEA, 2022).

2.3. Propriedades do hidrogênio

O hidrogênio é um elemento químico encontrado no universo em grande quantidade. Da família 1, é representado pela sigla H na tabela periódica. Sua característica física é um gás sem cor, sem cheiro e sem sabor, porém um gás inflamável. Para obtenção desse gás é necessário extrair-lo de outros componentes. A sua forma de extração rotula o hidrogênio por cores: preto, marrom, cinza, rosa, azul e verde, como pode ser observado na Figura 2.2, descrição da forma como é produzido o hidrogênio em escala das cores. O hidrogênio preto e marrom refere-se

ao hidrogênio produzido a partir de carvão. Azul e cinza são fornecidos como os produzidos a partir de gás natural, sem e com captura de carbono, respectivamente. Finalmente, o hidrogênio verde refere-se ao método de produção de hidrogênio sem emissão de CO₂. É produzido por eletrólise da água usando fontes de energia renováveis, como solar, eólica, hídrica geotérmica (Ravi, 2018).

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio preto	Produzido de carvão mineral (antracito) sem CCUS
	Hidrogênio marrom	Produzido de carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio cinza	Produzido do gás natural sem CCUS
	Hidrogênio azul	Produzido a partir de gás natural (eventualmente, também a partir de outros combustíveis fósseis) com CCUS
	Hidrogênio verde	Produzido a partir de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar) via eletrólise da água
	Hidrogênio branco	Hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio turquesa	Produzido por craqueamento térmico do metano, sem gerar CO ₂
	Hidrogênio musgo	Produzido de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS, através de reformas catalíticas, gaseificação ou biodigestão anaeróbica
	Hidrogênio amarelo	Produzido a partir da rede elétrica, composta por diversas fontes

Figura 2.2 – Classificação por cores do hidrogênio

Fonte: Adaptado de Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio (EPE, 2022)

O hidrogênio exige cuidados específicos no seu manuseio e armazenamento. Isso se deve ao fato de suas moléculas serem extremamente pequenas, o que permite que o gás se difunda e enfraqueça alguns metais utilizados em sua contenção, como aço e níquel. Como resultado dessa fragilização, vazamentos podem ocorrer, representando um potencial risco para a segurança e a integridade dos sistemas envolvidos (McCarty *et al.*, 1981).

Em relação à inflamabilidade, o hidrogênio é um gás altamente inflamável, com uma ampla faixa de inflamabilidade que se estende entre 4 % e 75 % por volume. Além disso, apresenta uma energia de ignição relativamente baixa, avaliada em 0,02 milijoules (McCarty *et al.*, 1981). Devido à sua baixa densidade, o hidrogênio requer altas pressões para ser armazenado em quantidades suficientes para aplicações práticas, sendo comum a utilização de pressões na faixa de 200 a 1000 bar. Essa combinação de inflamabilidade e a alta pressão de armazenamento é responsável por uma grande parcela dos riscos associados ao uso do hidrogênio, requerendo medidas rigorosas de segurança para prevenir acidentes (Projeto de Norma ISO 22734, Anexo B).

Ao utilizar hidrogênio em diversas aplicações industriais e tecnológicas, é fundamental adotar medidas de segurança adequadas, tais como a seleção adequada de materiais resistentes à fragilização e ao ataque do gás, além da implementação de sistemas de monitoramento e controle de vazamentos. O conhecimento detalhado sobre os riscos associados ao hidrogênio e o cumprimento das normas de segurança são para garantir a utilização segura e eficiente desse valioso recurso energético (McCarty *et al.*, 1981; Cramer e Covino, 2003). A Tabela 2.1 é uma adaptação da *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) apresenta as propriedades do hidrogênio.¹

Tabela 2.1 – Propriedades do hidrogênio

Propriedades	Unidades SI
Fórmula química	H ₂
Peso molecular	2.016 g/mol
Saúde	01
Classificação NFPA	Inflamabilidade ² : 4
Classificação DOT	2.1
Lista de listas EPA	Não
Pressão de vapor a -423 °F (-252,8 °C)	101,283 kPa
Densidade do gás no ponto de ebulição e 1 atm	1,331 kg/m ³
Gravidade específica do gás a 32 °F e 1 atm (ar=1)	0,0696
Volume específico do gás a 70 °F (21,1 °C) e 1 atm	11,99 m ³ /kg
Peso específico do líquido no ponto de ebulição e 1 atm	0,0710
Densidade do líquido no ponto de ebulição e 1 atm	67,76 kg/m ³
Ponto de ebulição a 14,69 psia (101,283 kPa)	-252,8 °C
Ponto de fusão a 14,69 psia (101,283 kPa)	-259,2 °C
Temperatura crítica ³	-239,9 °C
Pressão crítica	1296,212 kPa, abs
Densidade crítica	30,12 kg/m ³
Ponto triplo ⁴	-259,3°C
Calor latente de fusão no ponto triplo	58,09 kJ/kg
Calor latente de vaporização no ponto de ebulição	446,0 kJ/kg
Calor específico do gás a 70 °F (21,1 °C) e 1 atm	Cp: 14,34 kJ/(kg)(°C)
Razão de calores específicos	1.42
Solubilidade em água vol/vol a 60 °F (15,6 °C)	0,019
Limites de inflamabilidade ⁵ no ar	4 % a 75 %
Temperatura de autoignição ⁶	Aproximadamente 500 °C (932 °F)

Fonte: (Rivkin, *et al.*, 2015)

¹ *Saúde 0*: Grau de risco à saúde segundo o sistema NFPA, sendo 0 o menor risco.

² *Inflamabilidade 4*: Grau máximo na escala NFPA indicando alta facilidade de combustão.

³ *Temperatura, pressão e densidade críticas*: Parâmetros que definem as condições para a liquefação e armazenamento seguro do hidrogênio.

⁴ *Ponto triplo*: Condição em que o hidrogênio pode existir simultaneamente nos estados sólido, líquido e gasoso.

⁵ *Limites de inflamabilidade*: Faixa percentual de concentração no ar em que o hidrogênio pode inflamar.

⁶ *Temperatura de autoignição*: Temperatura na qual o hidrogênio pega fogo sem necessidade de ignição externa.

Está estipulado que misturas de hidrogênio/azoto com mais de 5,7 % em volume de H_2 , e misturas de hidrogênio/hélio ou hidrogênio/argônio com mais de 2,9 % em volume de H_2 , são consideradas combustíveis. Os valores indicados são teóricos e mais conservadores, não devendo ser utilizados para classificar uma mistura gasosa segundo os regulamentos. Os valores reais dos limiares de combustibilidade, identificados por meio de experimentos, indicam um teor de hidrogênio ligeiramente superior nas misturas de hidrogênio com gases inertes (Linde, 2019).

2.4. Segurança de hidrogênio

A segurança no contexto do uso e manipulação do hidrogênio é uma preocupação, uma vez que o hidrogênio é altamente inflamável e pode representar riscos significativos se não forem tomadas as devidas precauções. Diversos estudos e normas têm sido desenvolvidos para garantir a segurança em todas as etapas da cadeia do hidrogênio, desde a produção até o consumo final. Ao longo dos anos, várias organizações e instituições têm se dedicado a compreender e mitigar os riscos associados ao hidrogênio. Isso resultou na criação de métodos e procedimentos de segurança específicos para lidar com o hidrogênio em diferentes contextos, como armazenamento, transporte, distribuição e uso (Leprich, 2021).

Normas e diretrizes internacionais, como a ISO 26142 e a NFPA 2, estabelecem padrões essenciais para o manuseio seguro do hidrogênio em diversas aplicações. A ISO 26142 especifica os requisitos para sistemas de detecção de vazamentos, incluindo critérios de sensibilidade, confiabilidade e posicionamento dos detectores, prevenindo acidentes causados por vazamentos invisíveis e altamente inflamáveis. Já a NFPA 2 fornece diretrizes abrangentes para o armazenamento, manuseio e uso seguro do hidrogênio, abordando desde a seleção de materiais compatíveis até o projeto de sistemas de segurança e a instalação de dispositivos como válvulas de alívio de pressão, fundamentais para evitar acidentes por sobre pressão.

A análise de risco desempenha um papel na segurança do hidrogênio. Métodos como a Avaliação Quantitativa de Risco (QRA) e a Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) são utilizados para identificar e quantificar os riscos associados a diferentes cenários de operação. A segurança do hidrogênio é uma área de pesquisa em constante evolução. Com o desenvolvimento contínuo de tecnologias de produção, armazenamento e uso de hidrogênio, manter-se atualizado com as mais recentes informações e recomendações de segurança.

É provável que seja necessária uma análise detalhada de lacunas para determinar até que ponto os padrões existentes são apropriados para uso com tecnologias de gás hidrogênio ou se

alguma revisão específica do hidrogênio precisaria ser realizada. Da mesma forma, a consulta às partes interessadas seria necessária para determinar quais padrões internacionais específicos de hidrogênio precisariam ser adotados no mercado para ajudar a facilitar o desenvolvimento de uma indústria de hidrogênio (Bruce *et al*, 2018).

O hidrogênio pode causar asfixia quando inalado em concentrações elevadas, pois desloca o oxigênio do ar. Por isso, não deve ser permitida a permanência de pessoas em ambientes com altas concentrações de hidrogênio, principalmente devido ao risco de explosão. Por essa razão, o uso de proteção respiratória não é considerado necessário durante o trabalho com hidrogênio. Além disso, o hidrogênio criogênico, seja no estado líquido ou gasoso recém-evaporado, pode causar queimaduras por congelamento se entrar em contato com a pele. O mesmo risco ocorre ao tocar qualquer tubo ou equipamento não isolado que contenha hidrogênio líquido. (Linde, 2019).

Segundo Linde (2019), o manuseio de gases liquefeitos criogênicos, o hidrogênio não se apresenta como um perigo para o ambiente. O gás de exaustão resultante da combustão do hidrogênio é a água e não o dióxido de carbono ou a fuligem.

Os códigos e normas da NFPA (*National Fire Protection Association*) desempenham um papel fundamental em garantir a segurança, eficiência e conformidade em diversas áreas. Desde a construção de edifícios até os processos industriais, desde os serviços de emergência até o design de sistemas, cada aspecto do ambiente construído e dos processos industriais é abordado por essas diretrizes abrangentes. A seguir, tem-se algumas das principais normas mundiais sobre segurança de hidrogênio:

Publicações ASTM - Sociedade Americana de Testes e Materiais, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959.

- ASTM E84, Método de Teste Padrão para Características de Combustão Superficial de Materiais de Construção, 2018. Esta norma trata da avaliação do comportamento dos materiais de construção quando expostos ao fogo, principalmente a propagação da chama na superfície. No contexto do hidrogênio, essa norma é relevante para avaliar os materiais usados em ambientes onde o hidrogênio é armazenado ou manuseado, pois o hidrogênio é altamente inflamável e pode causar incêndios severos. Entender como os materiais reagem ao fogo ajuda a garantir que construções, tubulações, revestimentos e equipamentos usados nesses locais sejam seguros e minimizem a propagação de fogo em caso de vazamentos e ignição do hidrogênio.

- ASTM E136, Método de Teste Padrão para Comportamento de Materiais em um Forno de Tubo Vertical a 750°C, 2016^a. Essa norma avalia se os materiais resistem à combustão ou derretimento quando submetidos a altas temperaturas (750°C), simulando condições de incêndio severo. No caso do hidrogênio, esse teste é importante para validar a segurança dos materiais e componentes que fazem parte do sistema de armazenamento e transporte do gás, pois, em situações de incêndio, é crucial que esses materiais não colapsem ou falhem rapidamente, evitando assim vazamentos maiores e acidentes mais graves.
- ASTM E1529, Determinação dos Efeitos de Grandes Incêndios de Piscina de Hidrocarbonetos em Elementos e Conjuntos Estruturais, 2016e1.
- ASTM E1591, Guia Padrão para Dados para Modelos de Incêndio, 2013.
- ASTM E2652, Método de Teste Padrão para Comportamento de Materiais em um Forno de Tubo com Estabilizador de Fluxo de Ar em Forma de Cone, a 750°C, 2016. Essa norma descreve um método para avaliar como materiais se comportam quando expostos a um fluxo controlado de ar quente em formato de cone, a uma temperatura de 750°C. Diferentemente do teste vertical padrão (como o ASTM E136), este método simula uma exposição mais dinâmica e localizada ao fogo, o que pode representar melhor situações reais de incêndio em equipamentos e tubulações. No contexto do hidrogênio, esta norma é importante para testar materiais usados em componentes críticos que podem ser expostos a chamas e calor intenso durante um vazamento ou incêndio, garantindo que esses materiais tenham resistência adequada para prevenir falhas estruturais que poderiam agravar o acidente.
- ASTM E2965, Método de Teste Padrão para Determinação de Baixos Níveis de Taxa de Liberação de Calor para Materiais e Produtos Usando um Calorímetro de Consumo de Oxigênio, 2017.

Publicações CGA - Associação de Gases Comprimidos, 14501 George Carter Way, Suite 103, Chantilly, VA 20151-2923:

- CGA C-7, Guia para Classificação e Rotulagem de Gases Comprimidos, 2014;
- CGA G-5.5, Sistemas de Ventilação de Hidrogênio, 2014;
- CGA P-1, Manuseio Seguro de Gases Comprimidos em Recipientes, 2015;
- CGA S-1.1, Padrões de Dispositivos de Alívio de Pressão - Parte 1 - Cilindros para Gases Comprimidos, 2011;

- CGA S-1.2, Padrões de Dispositivos de Alívio de Pressão - Parte 2 - Tanques de Carga e Portáteis para Gases Comprimidos, 2009; e
- CGA S-1.3, Padrões de Dispositivos de Alívio de Pressão - Parte 3 - Recipientes de Armazenamento Estacionários para Gases Comprimidos, 2008.

A UN GTR regulamento internacional desenvolvido no âmbito do Fórum Mundial para a Harmonização de Regulamentos de Veículos (WP.29) da Comissão Econômica para a Europa das Nações Unidas (UNECE).

- O GTR N° 13 define requisitos de desempenho e procedimentos de teste para sistemas de armazenamento de hidrogênio comprimido, dispositivos de fechamento de alta pressão, válvulas de alívio de pressão e sistemas de entrega de combustível. Seu objetivo é reduzir os riscos de incêndio, explosão ou choque elétrico em veículos movidos a hidrogênio, tanto durante operações normais quanto após colisões.

Publicações do Grupo CSA - Grupo CSA, 8501 *East Pleasant Valley Road*, Cleveland, OH 44131.

- CSA B51, Código de Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações de Pressão, 2014;
- ANSI/CSA FC 1, Tecnologias de Células a Combustível - Parte 3-100: Sistemas de Energia de Células a Combustível Estacionárias - Segurança, 2014;
- ANSI/CSA América FC 3, Sistemas de Energia de Células a Combustível Portáteis, 2004; e
- ANSI/CSA HGV 4.3, Métodos de Teste para Avaliação de Parâmetros de Abastecimento de Hidrogênio, 2016.

Publicações da SAE – Sociedade de Engenheiros Automotivos, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096, www.SAE.org.

- SAE J2579, Padrão para Sistemas de Combustível em Veículos de Células a Combustível e Outros Veículos a Hidrogênio, 2018;
- SAE J2600, Dispositivos de Conexão de Abastecimento de Hidrogênio Comprimido na Superfície, 2015;
- Publicações da UL. *Underwriters Laboratories, Inc.*, 333 Pfingsten Road, Northbrook, IL 60062-2096;
- UL 263, Testes de Incêndio de Construção e Materiais de Construção, 2018. Essa

norma estabelece procedimentos para testar a resistência ao fogo de elementos construtivos, como paredes, lajes, vigas e outros materiais usados em edificações. O objetivo é avaliar quanto tempo esses materiais conseguem manter sua integridade estrutural e limitar a propagação do fogo durante um incêndio. No contexto do hidrogênio, que é um gás altamente inflamável, a UL 263 é fundamental para garantir que os ambientes onde o hidrogênio é armazenado ou manuseado tenham construções que resistam ao fogo por um período suficiente para permitir evacuação e controle do incidente, minimizando danos e riscos à segurança.

- ANSI/UL 723, Testes de Características de Combustão de Superfície de Materiais de Construção, 2018.

Publicações do Governo dos EUA:

- Serviço de Impressão do Governo dos EUA, Washington, DC 20402. Esse órgão é responsável pela publicação oficial dos regulamentos federais dos EUA, incluindo normas e regras sobre o manuseio, transporte e armazenamento de gases perigosos como o hidrogênio. Essas publicações fornecem o arcabouço legal para garantir a segurança em todas as etapas do uso do hidrogênio.
- Título 29, Código de Regulamentos Federais, Parte 910.1000. Título 49, Código de Regulamentos Federais, Partes 100-199; Estes títulos abrangem regulamentos relacionados à segurança ocupacional (Título 29) e transporte de materiais perigosos (Título 49). São referências fundamentais para o manuseio seguro do hidrogênio, garantindo que as práticas e equipamentos estejam em conformidade com as exigências legais para proteger trabalhadores e o público.

Outras Publicações:

- Dicionário *Collegiate Merriam-Webster*, 11ª edição, Merriam Webster, Inc., Springfield, MA, 2003. Essa publicação serve como uma fonte confiável para definições técnicas e científicas, assegurando que termos relacionados ao hidrogênio e suas aplicações sejam compreendidos corretamente, evitando ambiguidades nos documentos técnicos.
- Regulamento Técnico Global das Nações Unidas nº 13, Regulamento técnico global sobre veículos a hidrogênio e células a combustível, 2013.

Referências NFPA:

- NFPA 1, Código de Incêndio, edição de 2018;

- NFPA 13, Padrão para Instalação de Sistemas de *Sprinklers*, edição de 2019;
- NFPA 13D, Padrão para Instalação de Sistemas de Sprinklers em Residências Unifamiliares e de Dois Andares, edição de 2019;
- NFPA 30, Código de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis, edição de 2018;
- NFPA 30A, Código para Instalações de Abastecimento de Combustível para Veículos e Garagens de Reparo, edição de 2018;
- NFPA 45, Padrão de Proteção contra Incêndio para Laboratórios que Utilizam Produtos Químicos, edição de 2019;
- NFPA 52, Código de Sistemas de Combustível de Gás Natural para Veículos, edição de 2019;
- NFPA 54, Código Nacional de Gás Combustível, edição de 2018;
- NFPA 55, Códigos de Gases Comprimidos e Fluidos Criogênicos, edição de 2020;
- NFPA 56, Padrão para Prevenção de Incêndio e Explosão Durante a Limpeza e Purga de Sistemas de Tubulação de Gases Inflamáveis.
- NFPA 318, Padrão para a Proteção de Instalações de Fabricação de Semicondutores, edição de 2018;
- NFPA 400, Código de Materiais Perigosos, edição de 2019;
- NFPA 801, Padrão de Proteção contra Incêndio para Instalações que Manuseiam Materiais Radioativos, edição de 2019;
- NFPA 820, Padrão de Proteção contra Incêndio em Instalações de Tratamento e Coleta de Águas Residuais, edição de 2020;
- NFPA 853, Padrão para a Instalação de Sistemas Estacionários de Energia de Células a Combustível, edição de 2015; e
- NFPA 921, Guia para Investigações de Incêndio e Explosão, edição de 2017.

A **IEC** (*International Electrotechnical Commission*) é a **Comissão Eletrotécnica Internacional**, uma organização internacional responsável pela elaboração de normas técnicas para todas as tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas:

- IEC 61010-1:2010 — Equipamentos e requisitos para segurança, incluindo classificação de inflamabilidade.
- IEC 60695-11-20 — Classificação 5V para resistência à propagação da chama em gabinetes plásticos.

- IEC 60695-11-10 — Classificações HB e V para resistência à combustão de materiais plásticos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que é o órgão responsável pela normalização técnica no Brasil.

- ABNT NBR ISO 14687-2:2018 — Determinação da composição do gás natural, incluindo C1 a C5 e hidrogênio.
- ABNT NBR 15358:2017 — Segurança de máquinas — Equipamentos elétricos de máquinas — Regras gerais.
- ABNT NBR IEC 60079-10-1:2014 — Atmosferas explosivas — Classificação de áreas de risco por gases explosivos.
- ABNT NBR ISO 19880-1:2018 — Hidrogênio comprimido e misturado com gás natural — Métodos de análise para determinação de impurezas.

DIN EN Norma europeia:

- DIN EN 1127-1 — Segurança contra explosões, prevenção e proteção.
- DIN EN 60079-10 — Atmosferas explosivas — Classificação de áreas perigosas.

ISO Internacionais - (*International Organization for Standardization*) é uma organização internacional independente que desenvolve e publica padrões técnicos e normas relacionadas a diversas indústrias e campos de atividade.

- ISO 16110-1:2007 Geradores de Hidrogênio utilizando tecnologias de processamento de combustível - Part 1: Segurança;
- ISO 16110-2:2010 Geradores de Hidrogênio utilizando tecnologias de processamento de combustível - Part 2: Métodos de teste para desempenho;
- ISO 26142:2010. Aparelho de detecção de hidrogênio. Aplicações Estacionárias
- ISO 14687:2019. Qualidade do combustível de hidrogênio - Especificação do produto;
- ISO 22734:2019. Geradores de hidrogênio utilizando eletrólise da água - Aplicações industriais, comerciais e residenciais;
- ISO/TR 15916:2015. Considerações básicas para a segurança dos sistemas de hidrogênio;
- ISO/TS 19883:2017. Segurança de sistemas de absorção por oscilação para separação e purificação do hidrogênio;
- ISO 22734-1 – Geradores de hidrogênio usando processo de eletrólise de água

- parte 1: Aplicações industriais e comerciais;
- ISO 22734-2 – Geradores de hidrogênio usando água no processo de eletrólise - Parte 2: Aplicações residenciais.
 - ISO 1182 — Métodos para determinação da inflamabilidade de materiais não plásticos.
 - ISO/DIS 14687 -Qualidade do combustível hidrogênio – Especificação do produto;
 - ISO/DIS 22734 - Geradores de hidrogênio usando o processo de eletrólise da água – Aplicações industriais, comerciais e residenciais;
 - ISO 14687-1:1999 - Combustível de hidrogênio – Especificação do produto – Parte 1: Todas as aplicações, exceto célula de combustível de membrana de troca de prótons (PEM) para veículos rodoviários;
 - ISO 14687-2:2012 - Combustível de hidrogênio – Especificação do produto – Parte 2: Aplicações de células de combustível de membrana de troca de prótons (PEM) para veículos rodoviários;
 - ISO 14687-3:2014 -Combustível de hidrogênio – Especificação do produto – Parte 3: Aplicações de célula de combustível de membrana de troca de prótons (PEM) para aparelhos estacionários;
 - ISO 16110-1:2007 -Geradores de hidrogênio usando tecnologias de processamento de combustível - Parte 1: Segurança;
 - ISO 16110-2:2010- Geradores de hidrogênio usando tecnologias de processamento de combustível - Parte 2: Métodos de teste para desempenho;
 - ISO/TS 19883:2017 -Segurança de sistemas de adsorção por oscilação de pressão para separação e purificação de hidrogênio;
 - ISO 22734-1:2008 -Geradores de hidrogênio usando o processo de eletrólise da água – Parte 1: Aplicações industriais e comerciais; e
 - ISO 22734-2:2011 -Geradores de hidrogênio usando o processo de eletrólise da água – Parte 2: Aplicações residenciais.

A norma IEC - (*International Electrotechnical Commission*) é uma organização internacional que desenvolve e publica padrões globais para tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas:

- IEC EN 60079-10 Aparelhos elétricos para atmosferas explosivas por gás.

Classificação de áreas perigosas;

- IEC/EN 60079-14 Aparelhos elétricos para atmosferas explosivas por gás. Requisitos para a instalação de equipamentos elétricos;
- IEC/EN 60079-17 Aparelhos elétricos para atmosferas explosivas por gás. Classificação de áreas perigosas. Inspeção e Manutenção; e
- IEC/EN 60079-19 Aparelhos elétricos para atmosferas explosivas por gás. Reparo.

NBR ISO/TR 15916 – (Norma Regulamentadora). São normas estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) do Brasil para garantir a segurança e saúde no ambiente de trabalho.

- NR 10 – Segurança em instalações e serviços em eletricidade, com diretrizes sobre áreas classificadas e atmosferas explosivas.
- NR 13 – Segurança na operação de caldeiras e vasos de pressão, abrangendo controle de risco em processos que envolvem hidrogênio. IEC EN 60079-10 Aparelhos elétricos para atmosferas explosivas por gás. Classificação de áreas perigosas.

2.4.1. Prevenção a combustão

A combinação de hidrogênio com um agente oxidante pode levar a uma queima explosiva, resultando em aumento súbito de pressão e liberação de calor destrutivo, especialmente se ocorrer em um ambiente fechado. Para evitar a propagação do fogo, a cláusula 9 da IEC 61010-1:2010 exige que equipamentos como o gabinete gerador de hidrogênio, materiais isolantes térmicos e paredes adjacentes possuam classificação de inflamabilidade com fixação adesiva. De acordo com a ISO 1182, materiais não plásticos devem apresentar uma classificação que impeça a aceleração da combustão após a remoção da fonte de ignição. No caso dos gabinetes plásticos que envolvem fontes de combustão, eles devem atender à classificação 5V, conforme a norma IEC 60695-11-20, que avalia a capacidade do material em resistir à propagação da chama em testes específicos. Já os demais gabinetes plásticos, fabricados segundo a IEC 60695-11-10, devem cumprir as classificações HB e V: a classificação HB indica que o material tem uma taxa de queima lenta quando a chama é aplicada horizontalmente, enquanto a classificação V avalia a resistência do material à propagação da chama em direção vertical, com níveis que vão de V-0 (mais resistente) a V-2 (menos resistente). (Projeto de Norma ISO 22734, Tópico 1.1.1.1 - Resistência ao Fogo).

No Brasil, as normas técnicas relacionadas à prevenção da combustão de hidrogênio, ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Alguns dos documentos relevantes podem incluir:

A ABNT NBR ISO 14687-2:2018 trata da determinação da composição do gás natural, incluindo a concentração dos hidrocarbonetos leves classificados de C1 a C5, que correspondem aos primeiros cinco hidrocarbonetos da série alifática: metano (C1), etano (C2), propano (C3), butano (C4) e pentano (C5). Essa norma também aborda a medição da concentração de hidrogênio no gás natural, assim como a densidade de energia do gás. O controle dessas concentrações é essencial para garantir a qualidade do gás e sua segurança no uso industrial e comercial.

ABNT NBR 15358:2017 - Segurança de máquinas — Equipamentos elétricos de máquinas — Parte 1: Regras gerais;

ABNT NBR IEC 60079-10-1:2014 - Atmosferas explosivas — Parte 10-1: Classificação de áreas — Explosões de gás; e

ABNT NBR ISO 19880-1:2018 - Hidrogênio Comprimido, Líquido e Misturado com Gás Natural ou Gás Natural Comprimido (CNG) — Métodos de Análise — Parte 1: Determinação de Impurezas.

Essas normas podem abordar diferentes aspectos da prevenção, importante salientar que nenhuma é específica para hidrogênio, como armazenamento seguro, manuseio adequado e regulamentações para instalações e equipamentos que lidam com hidrogênio.

Para evitar riscos de atmosferas explosivas em áreas internas e externas onde centrais e instalações de hidrogênio estão presentes, é importante classificar esses espaços de acordo com regulamentos como DIN EN 1127-1, DIN EN 60079-10 ou outros aplicáveis (Linde 2019). Essa classificação orienta as precauções necessárias para prevenir a ignição. Algumas recomendações gerais devem ser seguidas:

- Utilizar equipamentos elétricos à prova de explosão ou evitar seu uso;
- Realizar atividades com fogo, como soldagem, corte ou desbaste, somente em áreas livres de hidrogênio. A verificação deve ser feita com um explosímetro e nunca utilizando chama aberta;
- Ao trabalhar com fogo, estar ciente de que faíscas resultantes podem ser projetadas a até 10 metros de distância do ponto de origem.

2.4.2. Autoignição

Durante processo de autoignição do hidrogênio, que é o fenômeno no qual o gás se inflama espontaneamente quando a mistura de hidrogênio e oxigênio atinge uma determinada temperatura crítica, sem a necessidade de uma fonte externa de ignição, como chama ou faísca. Essa temperatura crítica varia com base na pressão e na proporção da mistura de gases. Segundo McCarty (2024), a temperatura de autoignição do hidrogênio em condições normais de pressão e temperatura é de aproximadamente 585 graus Celsius (1085 graus Fahrenheit). No entanto, essa temperatura pode variar significativamente dependendo das condições específicas do ambiente, para que os materiais não entrem em contato direto com o oxigênio. Isso requer que a temperatura de autoignição na atmosfera de oxigênio seja significativamente maior do que a temperatura máxima de operação. Isso é definido pelo Anexo A da ISO/TR 15916. É importante seguir padrões semelhantes aos indicados pela IEC/TR 60877 para tubulações e recipientes, levando em consideração fatores como pressão, temperatura, materiais e partículas transportadas pelo fluxo. Essas práticas visam garantir a segurança na manipulação e instalação de equipamentos industriais. Além disso, o hidrogênio possui uma chama invisível, tornando necessário o uso de detectores de chamas para identificar vazamentos.

Para garantir a segurança nas instalações de hidrogênio, é necessário evitar a formação de misturas explosivas. Tais misturas podem ser deflagradas por calor gerado por atrito, partículas de ferrugem ou até mesmo pelo aquecimento do gás ao fluir rapidamente para uma área cheia de ar. Para prevenir a entrada de ar e oxigênio nas instalações, é necessário eliminar ligações com sistemas contendo esses elementos. Compressores de hidrogênio devem ser equipados com alarmes de baixa pressão e oxigênio para evitar misturas explosivas. Quando for necessário combinar hidrogênio com ar ou oxigênio para processos técnicos, precauções estritas devem ser adotadas, como manter pressão e concentração ideais e evitar fontes de faíscas. Antes de operar instalações de hidrogênio, o ar deve ser removido por meio de bomba de vácuo ou purga, sendo a purga com nitrogênio a opção mais segura, alcançando teores de oxigênio inferiores a 1 % vol (Linde, 2019).

Em casos de soldagem usando misturas de gases, o ar também deve ser eliminado através da purga para evitar explosões. Durante a desativação das instalações, o hidrogênio precisa ser eliminado por meio de bomba de vácuo ou purga, reduzindo seu teor para 1 % vol. antes da abertura. É vital desligar cuidadosamente o hidrogênio de elementos sob pressão, considerando válvulas e procedimentos adequados para garantir a segurança. Atenção aos detalhes em todas as etapas é fundamental, considerando que as rotas de fuga devem ser

cuidadosamente verificadas, pois nem sempre válvulas abertas são totalmente permeáveis, assim como válvulas fechadas nem sempre são completamente herméticas.

Segundo a norma 16110-1:2010, quando o ar principal sob pressão for misturado com o fornecimento de combustível, devem ser providos meios efetivos para evitar que o ar adentre a tubulação de combustível, ou que o combustível adentre o fornecimento de ar. O fornecimento de ar e combustível deve ser controlado para assegurar o fluxo de ar antes da ignição e evitar que o combustível entre em cada queimador até que o fornecimento de ar esteja disponível e, no caso de falha do ventilador de ar, desligar o fornecimento de combustível.

A documentação técnica precisa incluir instruções para instalação, garantindo que não haja fontes de ignição nas áreas classificadas como perigosas. O equipamento elétrico deve ser apropriado para essas áreas, o aquecimento deve estar controlado, e controladas as temperaturas de superfície. Medidas para eliminar cargas elétricas estáticas e suprimir reações inflamáveis devem ser tomadas.

2.4.3. Vedações

Os equipamentos instalados em áreas classificadas devem obedecer aos requisitos de proteção estabelecidos pelas normas IEC 60079-0, IEC 60079 e IEC/IEEE 60079-30-1. A norma IEC 60079-0 estabelece os requisitos gerais de segurança para equipamentos elétricos destinados ao uso em atmosferas explosivas, abrangendo critérios relacionados à construção, ensaios, marcação e documentação. Já a IEC 60079, de maneira mais ampla, corresponde a uma série de normas divididas em diversas partes, cada uma abordando métodos específicos de proteção, como segurança intrínseca (parte 11), invólucros à prova de explosão (parte 1), pressurização (parte 2), entre outros. Assim, enquanto a IEC 60079-0 define os requisitos gerais, as demais partes da série detalham medidas específicas conforme a técnica de proteção adotada.

A norma IEC/IEEE 60079-30-1, por sua vez, trata especificamente de sistemas de aquecimento elétrico de superfícies utilizados em atmosferas explosivas, estabelecendo requisitos para o projeto, seleção, instalação e manutenção desses sistemas.

Para garantir a segurança nesses ambientes, são empregados métodos passivos, como a restrição de fluxo, utilização de juntas fixadas e a promoção de ventilação natural, que limitam o acúmulo de gases inflamáveis. Complementarmente, métodos ativos, como o controle automatizado de fluxo e a detecção de concentrações de gás hidrogênio, são essenciais para acionar medidas de proteção de forma tempestiva. O objetivo central dessas estratégias é evitar a formação de atmosferas explosivas, mantendo a concentração de hidrogênio abaixo de 1% em

volume no interior dos gabinetes, exceto nos casos de volumes destinados especificamente à diluição. Dessa forma, assegura-se a integridade dos equipamentos e a segurança operacional, prevenindo eventos críticos relacionados à ignição de misturas inflamáveis.

Mediante uma temperatura ambiente, os materiais metálicos comuns como, por exemplo, aço, cobre, latão, alumínio, são adequados para o hidrogênio. Alguns tipos de aço podem ser danificados pelo hidrogênio sob determinadas circunstâncias, por exemplo, quando estão presentes falhas de produção (fissuras, revestimentos). É por isso que os materiais utilizados em instalações de hidrogênio têm de ser selecionados por peritos familiarizados com as condições de funcionamento específicas.

O hidrogênio é um gás muito flexível, as ínfimas moléculas conseguem introduzir-se em materiais ou pequenas fissuras que seriam impermeáveis a outros gases. Não deverão ser utilizados materiais fundidos para o hidrogênio já que a sua porosidade pode ser uma causa de fugas. Devido à sua baixa temperatura, o hidrogênio pode provocar a fragilização da borracha, dos plásticos e do aço carbono. Por este motivo, a ductilidade destes materiais pode ser substancialmente reduzida. É por este motivo que estes materiais não são adequados para serem usados em instalações de H₂. (Linde, 2019).

2.4.4. Tubulações, conexões e juntas

A conformidade com o padrão de tubulação da ISO 15649 é necessária para tubulações e juntas do processo, exceto para tubulações poliméricas ou elastoméricas permitidas para fluidos inflamáveis. Superfícies internas da tubulação devem ser limpas cuidadosamente, removendo obstruções e rebarbas nas extremidades. O uso de roscas em conformidade com a ISO 15649 é exigido para partes rosqueadas conectadas externamente ao gerador de hidrogênio. Tubulações e juntas poliméricas ou elastoméricas devem ser adequadas para suportar temperatura, pressão e exposição química, com baixa permeação e ventilação adequada no gabinete se usado para fluidos inflamáveis. É importante proteger essas tubulações contra danos mecânicos com blindagem quando necessário. (Projeto de Norma ISO 22734, Tópico 1.1.1.5 - Tubulações, Conexões e Juntas).

As conexões de tubos em instalações de hidrogênio devem ser soldadas permanentemente ou fixadas por brasagem, especialmente em tubulações subterrâneas ou de difícil acesso. Em casos de ligações separáveis, é recomendável utilizar tipos de flanges que ofereçam alta impermeabilidade, dando preferência a encaixes de compressão. A detecção de vazamentos em instalações de hidrogênio deve ser conduzida inicialmente com gases não inflamáveis, como nitrogênio ou hélio. Somente após reparar todas as fugas identificadas é que

o teste de vazamento com hidrogênio à pressão de operação deve ser realizado. Uma instalação com vazamentos identificados não é segura e requer despressurização, purga e reparo adequados (Linde, 2019).

2.4.5. Ventilação

A ventilação adequada é necessária para evitar condições perigosas relacionadas ao hidrogênio e oxigênio. As instruções de instalação devem especificar se o oxigênio deve ser ventilado dentro ou fora de um recinto. A ventilação ao ar livre requer detalhes completos sobre métodos aceitáveis e o uso de linhas de ventilação projetadas de acordo com as normas ISO/TR 15916 ou similares. Se o oxigênio for ventilado internamente, ele deve ser diluído até uma fração de volume inferior a 23,5 % antes de ser expelido do recinto, e uma etiqueta de aviso sobre a presença de oxigênio deve ser afixada. Para ventilação mecânica, devem ser previstos meios de detecção de ventilação insuficiente para desligar o gerador de hidrogênio. (Projeto de Norma ISO 22734, Tópico 1.1.1.5 - Tubulações, Conexões e Juntas).

Para prevenir a formação de atmosferas explosivas tanto em espaços interiores quanto exteriores, medidas importantes devem ser adotadas nas instalações de hidrogênio. Construir as centrais de hidrogênio em áreas bem ventiladas e garantir a estanqueidade das instalações são estratégias fundamentais. Idealmente, as instalações devem ser localizadas ao ar livre de forma que qualquer vazamento de hidrogênio ocorra com segurança na atmosfera. Caso isso não seja viável, pelo menos o armazenamento de hidrogênio deve ser feito externamente. As saídas de exaustão de válvulas de segurança ou bombas de vácuo devem ser direcionadas para o exterior, evitando locais inadequados (Linde, 2019).

As áreas internas de instalação de hidrogênio tenham sistemas eficientes de ventilação, seja natural ou artificial. A concentração de hidrogênio no ambiente pode ser monitorada por um sistema de alerta, como um explosímetro. Em espaços pequenos, como caixas de mistura de gás e dispositivos de medição de hidrogênio, é essencial garantir a estanqueidade dessas estruturas, utilizando conexões permanentes.

2.4.6. Cuidados com a rede elétrica

Segundo a ISO 22734:2019, que está sendo analisada pela ABNT, os requisitos para a operação segura e uso de geradores de hidrogênio, incluindo as condições operacionais, consumo de energia, especificações de fornecimento de água e requisitos de ventilação para oxigênio e hidrogênio, o fabricante deve especificar os requisitos de entrada de energia em volts, watts e hertz. Outros serviços públicos necessários para a operação também devem ser

especificados, juntamente com as especificações de fornecimento de água. O ambiente físico em que o gerador de hidrogênio é projetado para operar, como faixa de temperatura, especificações barométricas e de umidade, também deve ser definido, o equipamento deve ser conectado e aterrado conforme exigido pela IEC 60204-1.

Conforme a ABNT NBR ISO 16110-1:2010, o projeto e construção de sistema elétrico, bem como a aplicação de equipamento elétrico e eletrônico, incluindo motores elétricos e compartimentos elétricos, devem atender aos requisitos da IEC 60204-1 para aplicações industriais ou IEC 60335-1 para aplicações residenciais, comerciais e industriais leves. Os componentes elétricos instalados em geradores de hidrogênio sem gabinetes destinados para uso ao ar livre devem ser protegidos da chuva, com um grau mínimo de proteção de IPX4D, conforme a ABNT NBR IEC 60529:2001.

O grau IPX4D indica que o equipamento está protegido contra projeções de água de qualquer direção (nível 4 de proteção contra água), mesmo sob condições de chuva intensa, e que possui proteção adicional contra o acesso de fios e objetos sólidos de diâmetro especificado, conforme definido pela letra adicional "D". Essa proteção é fundamental para garantir a segurança elétrica e a confiabilidade do sistema, especialmente em ambientes externos ou expostos a intempéries.

O fabricante deve incluir na documentação técnica do produto, um requisito declarando que as saídas de ventilação do gerador de hidrogênio destinado para uso ao ar livre, devem ser protegidas da chuva para evitar que os componentes elétricos dentro do gabinete sejam molhados. O tipo de conversor para controle de velocidade de motor deve ser adequado para a aplicação conforme a IEC 60146-1-1. As distâncias da tolerância elétrica (por ar) e perda gradativa de corrente (sobre a superfície), bem como a espessura do isolamento sólido para circuitos elétricos, devem estar de acordo com a parte aplicável da IEC 60664.

2.4.7. Procedimentos em caso de fuga de hidrogênio

Se ocorrer uma deflagração devido ao vazamento, ela pode ser controlada fechando as linhas de fornecimento de hidrogênio. Se isso não funcionar e o fogo não puder ser extinto com agentes extintores devido ao risco contínuo de explosão, a melhor abordagem pode ser permitir que o fogo se esgote naturalmente. Em alguns casos, áreas vulneráveis ao fogo podem precisar ser resfriadas com água. Quando o incêndio estiver quase extinto, é importante purgar a instalação afetada com nitrogênio para prevenir a recorrência de chamas no interior (Conselho Linde, 2019).

Para evitar incêndios e explosões perto de geradores de hidrogênio ao ar livre, que não

possuem gabinetes, é importante seguir as normas, segundo a norma ABNT NBR ISO 16110-1:2010 esses geradores podem soltar vapores perigosos. Para prevenir isso, eles precisam ser projetados de maneira segura, e a documentação técnica do produto deve explicar como operá-los e mantê-los. Isso é importante para reduzir qualquer liberação de líquidos, gases ou vapores inflamáveis dos geradores, o que poderia criar áreas perigosas ao redor deles.

É recomendado classificar as áreas próximas aos geradores de acordo com regras específicas (ABNT NBR IEC 60079-10), considerando coisas como, com que frequência liberações perigosas podem acontecer, quanto material é liberado e suas características, ventilação, entre outros fatores importantes.

2.4.8. Dispositivos de segurança

O uso do hidrogênio na produção, armazenamento e transporte apresenta riscos de segurança especiais que devem ser gerenciados com conhecimento especializado em todas as etapas do processo. Segundo o documento fornecido pela Drager, (Drager, 2024) empresa líder em tecnologia de segurança. Dada sua baixa viscosidade, vazamentos de hidrogênio demandam detecção e prevenção eficazes. A presença de hidrogênio pode afetar alarmes de CO, enquanto a invisibilidade da chama e a emissão de radiação ultravioleta requerem detecção específica. Sensores infravermelhos são ineficazes devido à ausência de ligações de C-H, e a proteção em áreas explosivas exige certificação.

Na escolha de tecnologias de detecção, a seleção adequada é necessária. A detecção de chama, baseada em radiação ultravioleta (UV) ou infravermelho multiespectro (MIR), é uma opção. Detectores ultrassônicos identificam vazamentos de alta pressão. A detecção de gás por infravermelho (IR), realizada com detectores catalíticos ou de caminho aberto, é especialmente relevante, pois essa tecnologia identifica a presença de gases inflamáveis, como o hidrogênio, através da absorção seletiva de radiação infravermelha em comprimentos de onda específicos. O princípio baseia-se no fato de que moléculas de certos gases absorvem a radiação infravermelha, permitindo que o sensor detecte alterações na intensidade da radiação transmitida ou refletida, indicando a presença e a concentração do gás. Além disso, sensores específicos para gases tóxicos podem ser necessários conforme o ambiente de aplicação. A seleção criteriosa das tecnologias de detecção e a conscientização sobre os perigos são elementos-chave para garantir a segurança em todas as fases do manuseio do hidrogênio.

Segundo a ABNT NBR ISO 16110-1:2010, existem dois tipos de dispositivos para proteger geradores de hidrogênio: dispositivos de segurança e dispositivos de monitoramento,

tais como indicadores e alarmes. Eles garantem que o gerador funcione corretamente e tome medidas automáticas ou manuais para evitar problemas. Dispositivos de segurança precisam ser confiáveis, pensados para a tarefa, e operarem independentemente de outras funções. Devem seguir princípios de projeto que garantem proteção confiável, como modos de segurança, redundância e autodiagnóstico.

Para evitar sobrecarga, o projeto deve integrar dispositivos de controle e medição, como interruptores para desligar em caso de excesso de corrente, limitadores de temperatura, interruptores de pressão, medidores de fluxo e relés de tempo.

Dispositivos que medem temperatura e gás devem atender a padrões específicos e ter respostas compatíveis com a função. Peças montadas no gerador durante a fabricação, que não podem ser tocadas pelo usuário, devem ser protegidas contra alterações. Alavancas e botões de controle precisam ser bem identificados e ter instruções claras para evitar erros. Eles devem ser projetados de forma a evitar acionamentos acidentais. Esses dispositivos de proteção são essenciais para garantir a segurança dos sistemas de hidrogênio (NBR ISO 16110-1:2010).

A detecção de gás na segurança é importante para identificar gases perigosos. Sensores especiais são colocados em lugares onde podem ocorrer vazamentos, como fábricas e laboratórios. Se os sensores encontrarem um gás perigoso, eles emitem um sinal sonoro. Isso ajuda a evitar problemas e manter a segurança das pessoas. Também é útil para entender como os gases se comportam ao longo do tempo. No entanto, a detecção de gás não é a única coisa importante para a segurança, mas é parte dela.

Detecutores ultrassônicos identificam vazamentos de alta pressão: pequenos vazamentos podem ser detectados a partir de 2 bar, de forma muito rápida, mas limitada ao tamanho do vazamento usados em combinação com outros detectores de gás ou chama (Misturas de H_2 comprimido e $CH_4 + H_2$, detectável por esta tecnologia).

2.4.9. Avaliação de risco

A avaliação de risco em sistemas de hidrogênio exige uma compreensão tanto da probabilidade de ocorrência de eventos adversos quanto da magnitude de suas consequências. Tradicionalmente, a estimativa da probabilidade baseia-se em modelos empíricos derivados da análise de acidentes anteriores. Contudo, a escassez de dados específicos sobre incidentes envolvendo hidrogênio, aliada à incerteza inerente a esses dados, dificulta uma previsão precisa dos riscos. Ademais, esses modelos frequentemente não consideram a totalidade dos possíveis

cenários de falha, incluindo erros humanos, o que limita sua abrangência. Por isso, há uma necessidade crescente de métodos mais completos e confiáveis, que englobem avaliações probabilísticas detalhadas e análises estruturadas como árvores de falhas, capazes de representar de forma mais fiel os riscos associados a esses sistemas.

Para modelar vazamentos de hidrogênio por orifícios, utiliza-se o conceito de bicos nocionais, que permite calcular a taxa de fluxo mássico do gás sob alta pressão. Esse método envolve a substituição do orifício real por um bico fictício que, apesar de possuir uma área maior, mantém a mesma vazão em condições padronizadas. As variações entre os modelos existentes estão relacionadas às diferentes hipóteses adotadas quanto à conservação de massa, momento e energia, às propriedades reais do gás frente ao comportamento idealizado, e ao posicionamento do bico em relação ao regime de fluxo (CALABRESE et al., 2024).

No que tange à análise das consequências, os modelos empíricos para dispersão de gases, amplamente utilizados, frequentemente consideram o hidrogênio como um fluido passivo que se dispersa rapidamente no ambiente, negligenciando sua baixa densidade e a tendência natural de ascender devido à flutuabilidade positiva. Tal simplificação pode levar à subestimação dos riscos envolvidos. Para superar essas limitações, pesquisadores desenvolveram modelos mais avançados que capturam a complexidade da dispersão do hidrogênio, levando em conta as diferentes fases do fluxo e as interações térmicas e dinâmicas com os gases atmosféricos próximos ao ponto de liberação. A alta difusividade do hidrogênio promove sua rápida mistura com o ar e pode resultar na formação de misturas inflamáveis ou explosivas. Os modelos convencionais muitas vezes falham em representar adequadamente esse comportamento, exigindo, para maior precisão, o emprego de simulações que envolvam desde a dinâmica molecular até a dinâmica de fluidos computacional (CFD), capazes de descrever tanto o comportamento microscópico quanto os fenômenos em escala maior.

Quando há ignição de vazamentos contínuos ou intermitentes de hidrogênio, o fenômeno do incêndio a jato é frequentemente observado. Modelos específicos foram formulados para calcular a radiação térmica emitida por essas chamas turbulentas. No entanto, estudos recentes indicam que essas metodologias tendem a subestimar a intensidade térmica, especialmente por não considerarem os efeitos da flutuabilidade. Como resultado, novos modelos foram desenvolvidos visando representar com maior acurácia a intensidade e a distribuição da radiação emitida. Esse método envolve a substituição do orifício real por um bico fictício que, apesar de possuir uma área maior, mantém a mesma vazão em condições padronizadas. As variações entre os modelos existentes estão relacionadas às diferentes

hipóteses adotadas quanto à conservação de massa, momento e energia, às propriedades reais do gás frente ao comportamento idealizado, e ao posicionamento do bico em relação ao regime de fluxo (CALABRESE *et al*, 2024).

Para prever a força das ondas de choque geradas por explosões de nuvens de hidrogênio não confinadas, utilizam-se metodologias como os modelos TNT, TNO, Baker-Strehlow-Tang e Dorofeev. Dentre estes, o modelo TNT é frequentemente utilizado por sua abordagem conservadora, fornecendo estimativas elevadas de sobrepressão a determinadas distâncias — o que pode ser vantajoso para análises voltadas à segurança. Adicionalmente, os modelos probit são amplamente empregados para avaliar os danos potenciais a pessoas e estruturas, relacionando a intensidade da sobrepressão e da radiação térmica com os efeitos esperados. Destaca-se que os efeitos indiretos da onda de choque, como o impacto de fragmentos e a projeção de indivíduos contra obstáculos, representam riscos significativos, superando frequentemente os danos pulmonares diretamente causados pela pressão. Em ambientes confinados, a possibilidade de colapso estrutural emerge como a principal causa de fatalidades em eventos de explosão.

Uma contribuição recente e relevante para o avanço dessas análises é o trabalho de Kashkarov *et al.* (2020), que propuseram ferramentas gráficas de engenharia baseadas em nomogramas para estimar as distâncias de risco associadas à ruptura de tanques de hidrogênio em incêndios ao ar livre. O modelo físico utilizado incorpora não apenas a liberação instantânea da energia mecânica contida no hidrogênio comprimido, mas também a energia química oriunda da combustão do hidrogênio ao se misturar com o ar atmosférico, contribuindo para o fortalecimento da onda de choque.

Esses nomogramas foram desenvolvidos para dois perfis de aplicação: o primeiro, voltado a equipes de resposta emergencial, permite a determinação rápida de perímetros de evacuação; o segundo, destinado a engenheiros de segurança, possibilita a definição mais precisa de zonas de risco a partir de critérios personalizados, conforme regulamentos nacionais e internacionais. Os limiares utilizados consideram efeitos sobre pessoas como perda auditiva temporária, lesões leves, graves e fatais e sobre estruturas incluindo danos menores, demolição parcial e destruição total a partir de faixas de sobre pressão, como 1,35 kPa para sem danos, 16,5 kPa para lesões graves e 100 kPa para fatalidade. Para modelar vazamentos de hidrogênio por orifícios, utiliza-se o conceito de bicos nocionais, que permite calcular a taxa de fluxo mássico do gás sob alta pressão conforme a figura 2.3 e 2.4.

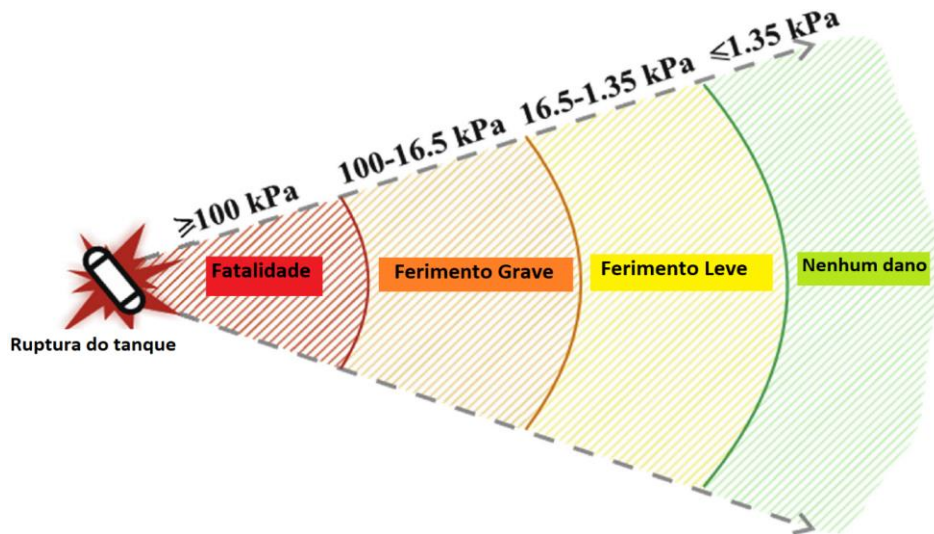


Figura 2.3 – Zonas de risco para pessoas

Fonte: Kashkarov (2020)

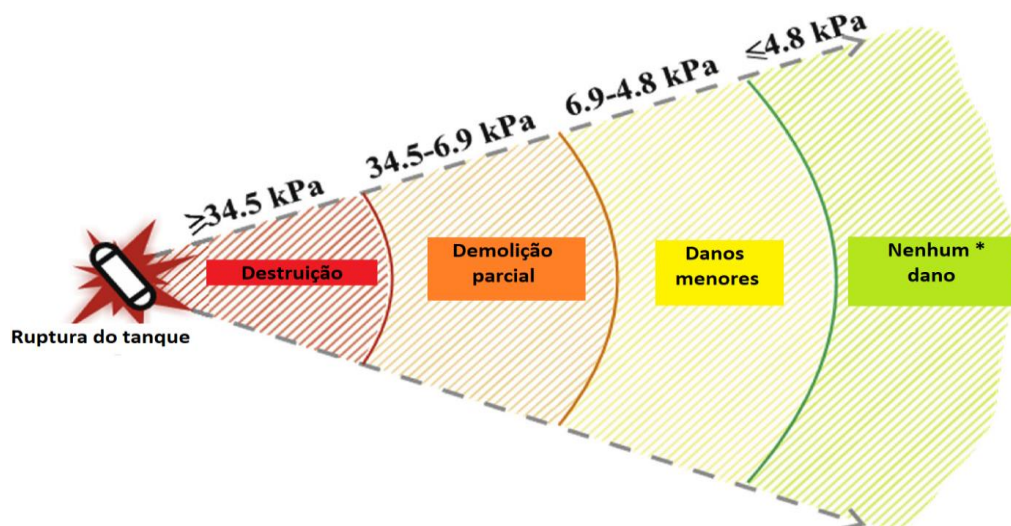


Figura 2.4 – Zonas de perigo para edificações

Kashkarov (2020)

2.4.10. Diretrizes para instalação e uso interno de equipamentos com H2

As diretrizes para a instalação e o uso interno de células a combustível visam compreender e mitigar os riscos de incêndio em ambientes fechados. Para isso, é necessário analisar os fenômenos envolvidos nesses incêndios, considerando fatores como o local da ignição, o tipo e a quantidade de combustível disponível, a geometria do espaço e as propriedades dos materiais que delimitam o ambiente. Esses elementos exercem influência direta no comportamento e na propagação do fogo, sendo essenciais para o desenvolvimento de

medidas eficazes de segurança como a distância entre a Planta de Eletrólise do CH₂V e uma unidade de atendimento hospitalar como, por exemplo, o Hospital de Clínicas de Itajubá. (Karlsson *et al*, 2000).

Após o início de um incêndio causado por vazamento de hidrogênio, uma chama se desenvolve dentro do recinto, formando um jato de fogo. Produtos de combustão quentes e uma camada quente de gases podem representar perigos adicionais. O comportamento do fogo depende do tipo de combustão, interação com o ambiente e acesso ao oxigênio (Karlsson *et al*, 2000). A ventilação desempenha um papel importante no controle da chama, podendo determinar se ela será dominada pelo combustível ou pela ventilação. Em situações de subventilação, a chama pode ser controlada pela ventilação, gerando riscos térmicos e de asfixia. Com ventilação inadequada, a chama pode se extinguir devido à falta de oxigênio, mas pode ocorrer uma reignição se houver uma pré-mistura de gás inflamável (Karlsson *et al* 2000).

Estudos de Utiskul (2006) sobre incêndios subventilados identificaram quatro regimes de comportamento de queima, incluindo chamas fantasmas, que são chamas instáveis que podem surgir durante o processo de extinção do fogo (1) extinção por enchimento; (2) chamas oscilantes e fantasmas; (3) oscilações constantes e (4) queima constante. Observaram chamas fantasmas em locais mal ventilados, destacando que sua ocorrência aumenta com a intensidade do fogo. Estudo investigou incêndios em ambientes com ventilação insuficiente, concluindo que a chama pode se desprender do queimador e que a extinção ocorre se a velocidade da chama pré-misturada for muito baixa (Bertin *et al.*, 2002).

Uma maneira de entender os incêndios em recintos é considerar os diferentes estágios em termos dos fluxos de massa que entram e saem das aberturas do recinto enquanto o incêndio se desenvolve. Os fluxos de massa através das aberturas dependem dos perfis de pressão nelas. Por exemplo, se a pressão dentro do recinto for maior do que fora, todo o fluxo será expelido; enquanto o arrasto para uma chama pode criar uma pressão baixa dentro do recinto, puxando o fluxo pelas aberturas de ventilação. Após o estabelecimento da chama, os perfis de pressão nas aberturas variam dependendo se a chama está bem ventilada ou subventilada. No entanto, a fase inicial do desenvolvimento da chama merece atenção. Logo após a ignição, a pressão dentro do recinto pode ser maior que a pressão externa, mesmo em incêndios bem ventilados (Karlsson *et al*, 2000). Isso ocorre devido à liberação e expansão de gases quentes, que têm um volume maior do que os gases frios.

2.4.12. Perigos de incêndio de jato de hidrogênio

Os perigos de incêndio de jato de hidrogênio são significativos, especialmente ao

considerar os principais parâmetros de interesse, como o comprimento da chama e a radiação da chama. Esses parâmetros são usados para garantir a segurança da vida, propriedade e proteção ambiental. Um conceito fundamental é, como visto anteriormente na figura 2.4 a distância de segurança, que é a distância mínima entre uma fonte de perigo e um objeto (humano, equipamento ou ambiente) que pode mitigar os efeitos de um incidente e evitar que um incidente menor se torne maior.

Ao calcular a distância de segurança, considerar se contra o que você está se protegendo. Em um incêndio ao ar livre, o fluxo de calor e/ou temperatura é importante, enquanto em incêndios em recintos, a asfixia e a sobrepressão também podem ser relevantes. O contato direto com a chama de um jato de fogo pode resultar em queimaduras graves, até mesmo mortais. Além disso, mesmo para aqueles que não estão diretamente nas chamas, a exposição a altos fluxos de calor por radiação pode causar queimaduras graves e até mesmo a morte. Esses danos podem ser expressos em termos de dose térmica, calculada com base na duração da exposição e no fluxo de calor radiativo (Molkov, 2009).

LaChance (2010) apresenta uma variedade de doses térmicas que podem resultar em diferentes graus de queimaduras, desde queimaduras de primeiro grau até queimaduras de terceiro grau, com os níveis mais graves associados ao espectro infravermelho da radiação, tornando-o o mais preocupante em termos de gerar queimaduras, mostrados pelas Tabelas 2.2 e 2.3.

A utilização de sistemas de hidrogênio e células de combustível a pressões até 100 MPa apresenta novos desafios de engenharia para garantir a segurança pública dessas tecnologias emergentes. É necessário obter uma compreensão adequada dos fenômenos físicos subjacentes, incluindo incêndios de jatos, para formular os princípios da engenharia de segurança do hidrogênio. Embora muitas vezes seja considerada uma barreira, para a economia emergente do hidrogênio, a segurança nesta área é um campo desafiador que envolve ciência, engenharia, desenvolvimento tecnológico e inovação (EIGA, 2007).

Os jatos de hidrogênio provenientes de tanques de armazenamento e equipamentos a pressões até 100 MPa são principalmente sob a forma de jato sub expandido, apresentando desafios adicionais de segurança. Ao estudar jatos de hidrogênio, é importante considerar critérios para entender os riscos associados ao seu comportamento e aos incêndios que podem ocorrer, como: comprimento da chama; jato expandido; jato sub expandido; e distâncias perigosas de um vazamento de hidrogênio inflamado, (LaChance 2010).

Os jatos expandidos e sub expandidos, representados na Figura 2.5, onde a linha

vermelha representa um jato expandido e a linha preta, um jato sub expandido, podem ser estudados e previstos através de simulações em CFD. Na figura, o reservatório é indicado pelo número 1, o bico (orifício) pelo número 3, e o número 4 refere-se à condição em que a pressão e a velocidade são iguais à velocidade do som ambiente e local.

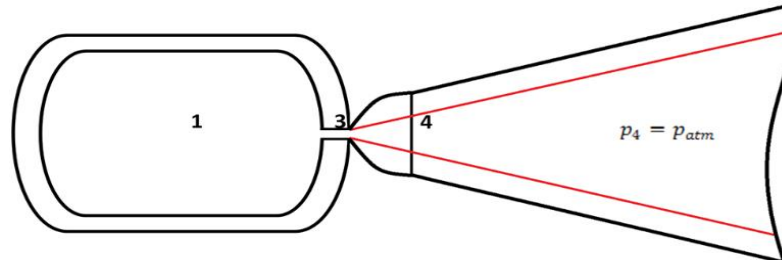


Figura 2.5 – Esquema simples do jato expandido e subexpandido

Fonte: LaChance (2010)

No contexto dos jatos de hidrogênio, a razão de pressão crítica é a relação entre a pressão inicial do reservatório e a pressão ambiente. Para o hidrogênio, essa razão é aproximadamente 1,9. Isso significa que, se a pressão no reservatório for menor que 1,9 vezes a pressão ambiente, o fluxo será subsônico e expandido. Se for maior, a velocidade do gás na saída do bocal atinge o regime sônico, tornando o jato subexpandido.

Quando a razão de pressão é maior que 1,9, a expansão completa do gás não ocorre no bocal, mas sim um pouco mais adiante, em uma região onde a pressão ambiente é atingida gradualmente. Esse fenômeno resulta na formação do disco de Mach, uma estrutura de ondas de choque característica dos jatos supersônicos (LaChance, 2010).

O comprimento da chama em jatos de hidrogênio (L_f) pode ser estimado por meio de correlações adimensionais baseadas em princípios de escoamento compressível. Uma dessas correlações, proposta por Molkov e Saffers (2013), estabelece uma relação entre o comprimento adimensional da chama (L_f/D) e um grupo de similaridade X , definido pela razão entre as densidades do hidrogênio na saída do bico (ρ_N) e do ar ambiente (ρ_S), e pela razão entre a velocidade do jato na saída do bico (U_N) e a velocidade local do som (C_N), elevada ao cubo, mostrado na equação 2.1.

$$X = \left(\frac{\rho_N}{\rho_S} \right) * \left(\frac{U_N}{C_N} \right)^3 \quad (2.1)$$

Onde:

ρ_N : Densidades do hidrogênio na saída do bico (kg/m³).

ρ_S : Densidade do ar ambiente (kg/m³).

U_N : Velocidade do jato de hidrogênio na saída do bico (m/s).

C_N : Velocidade local do som no hidrogênio na saída do bico (m/s).

Esse modelo abrange diferentes regimes de escoamento, incluindo jatos laminares, turbulentos, expandidos e sub expandidos. A classificação do regime depende da razão entre a pressão na saída do bico (P_1) e a pressão ambiente (P_{amb}). Para gases ideais, a condição crítica que separa jatos expandidos de sub expandidos é dada na equação 2.2. Onde a, e

$$\left(\frac{p^*}{p_1}\right) = \left[\frac{\gamma + 1}{2}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.2)$$

Onde:

p^* : Pressão crítica no gargalo do bico (Pa).

p_1 : Pressão inicial do hidrogênio antes da expansão (Pa).

γ : Índice adiabático.

Para o hidrogênio, cujo índice adiabático é aproximadamente 1,4, essa razão crítica resulta em um valor de cerca de 1,9. Valores superiores a esse indicam jatos subexpandidos, caracterizados por velocidades sônicas ou supersônicas e ocorrência de choques internos, enquanto valores inferiores correspondem a jatos expandidos e subsônicos.

Nos casos de jatos expandidos, a modelagem baseia-se nas equações isentrópicas para gases ideais. A densidade do hidrogênio na saída do bico pode ser calculada pela equação 2.3.

$$\rho_N = \rho_1 * \left(\frac{p_{amb}}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}}, \text{ com } \rho_1 = \frac{p_1}{R_{H_2} * T_1} \quad (2.3)$$

Onde:

ρ_1 : Densidade do hidrogênio antes da expansão (kg/m³)

R_{H_2} : Constante do gás hidrogênio (J/(kg·K)).

T_1 : Temperatura do hidrogênio antes da expansão (K).

p_{amb} : Pressão do ar ambiente (Pa).

A velocidade do escoamento é obtida por meio do número de Mach na saída do bico, conforme a equação 2.4.

$$M_N = \sqrt{\frac{2 * \left[\left(\frac{p_1}{p_{amb}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{(\gamma - 1)}} \quad (2.4)$$

Onde:

M_N: Número de Mach na saída do bico

A temperatura e a velocidade local do som são dadas pela equação 2.5 e 2.6.

$$T_N = T_1 * \left(\frac{p_{amb}}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, e C_N = (\gamma * R * T_N) \quad (2.5)$$

$$U_N = M_N * C_N \quad (2.6)$$

Onde:

T_N: Temperatura do jato de hidrogênio na saída do bico (K).

C_N : Velocidade do som no hidrogênio na saída do bico (m/s).

R: Constante universal dos gases (J/(mol·K)).

U_N: Velocidade do escoamento do jato de hidrogênio na saída (m/s).

Por fim, a densidade do ar ambiente pode ser calculada pela equação 2.7 dos gases ideais, assumindo condições atmosféricas padrão.

$$\rho_{amb} = \frac{(p_{amb} * M_{ar})}{(R * T_{amb})} \quad (2.7)$$

Onde:

ρ_{amb}: Densidade do ar ambiente (kg/m³).

M_{ar}: Massa molar do ar (kg/mol).

T_{amb}: Temperatura ambiente (K).

Uma vez estimado o comprimento da chama, a distância de perigo pode ser determinada com base em critérios térmicos associados à exposição humana à radiação. LaChance (2010) define três faixas de severidade térmica associadas ao comprimento da chama L_f: ausência de danos a 3,5 vezes L_f, dor limite em exposição de 5 minutos a 3,0 vezes L_f, e queimaduras de terceiro grau em 20 segundos a 2,0 vezes L_f. Essas estimativas assumem que a radiação térmica é o principal modo de transferência de calor relevante para a segurança em ambiente aberto, embora em espaços confinados outros fatores como sobrepressão e hipóxia também devam ser considerados.

Tabela 2.2 – Dados de queima de radiação

Gravidade da queimadura	Dose limite de gravidade de queimadura (kW/m ²) ^{4/3} s	
	Ultravioleta	Infravermelho (média)
Primeiro grau	260-440	80-130 (105)
Segundo grau	670-1100	240-730 (290)
Terceiro grau	1220-3100	870-2640 (1000)

Fonte: LaChance (2010)

Tabela 2.3 - Exemplo de critérios de danos por fluxo de calor radiante

Intensidade de radiação térmica (kW/m ²)	Tipo de dano
1,6	Nenhum dano para longas exposições
4 a 5	Dor durante exposição de 20 segundos; queimadura de primeiro grau
9,5	Queimadura de segundo grau após 20 segundos
12,5 a 15	Queimadura de primeiro grau após 10 segundos; 1 % de letalidade em 1 minuto
25	Lesão significativa em 10 segundos; 100 % de letalidade em 1 minuto
35 a 37,5	1 % de letalidade em 10 segundos

Fonte: LaChance (2010)

Os critérios de danos para estruturas e equipamentos também podem ser definidos em termos de exposição ao fluxo de calor radiante ou chamas diretas. Valores típicos de fluxo de calor e tempos de exposição para causar danos a estruturas e componentes são apresentados na Tabela 2.4 de LaChance (2010). No entanto, é importante observar que os tempos de exposição necessários para causar danos são longos, geralmente acima de 30 minutos. Devido a esse fato, o impacto dos incêndios de hidrogênio nas estruturas e equipamentos geralmente não é significativo em comparação com seu efeito nas pessoas, como observado por LaChance (2010).

Tabela 2.4 – Exemplo de critérios de danos por fluxo de calor radiante para estruturas e equipamentos

Intensidade de radiação térmica (kW/m ²)	Tipo de dano
4	Quebra de vidro (exposição de 30 minutos)
12,5 a 15	Ignição pilotada de madeira, fusão de plásticos (>30 minutos de exposição)
18 a 20	O isolamento do cabo degrada (>30 minutos de exposição)
10 ou 20	Ignição do óleo combustível (120 ou 40 segundos, respectivamente)
25 a 32	Ignição não pilotada de madeira, deformação de aço (>30 minutos de exposição)
35 a 37,5	Equipamentos de processo e danos estruturais (incluindo tanques de armazenamento) (tempo de exposição >30 minutos)
100	Colapso da estrutura de aço (>30 minutos de exposição)

Fonte: LaChance (2010)

2.4.13. Efeitos térmicos

No caso de um incêndio em um recinto fechado, além da temperatura e do fluxo de calor da chama, a acumulação de gases quentes e produtos de combustão também representa um perigo devido à radiação. Especialmente em incêndios subventilados, é importante quantificar o comprimento, a temperatura e o fluxo de calor da chama externa em diferentes cenários. Além disso, a transferência de calor por convecção dos gases quentes para o invólucro é relevante. Os materiais utilizados na estrutura do invólucro podem influenciar a temperatura dos gases quentes e, conseqüentemente, o fluxo de calor para o combustível em combustão. Dependendo dos materiais, eles podem conservar energia, fazendo com que os gases quentes retenham mais energia, ou permitir uma maior condução de calor para longe dos gases quentes, reduzindo a temperatura dos produtos quentes. Essa transferência de calor para o invólucro pode ser significativa, especialmente em situações limite, como quando a chama está próxima da extinção (Karlsson *et al*, 2000).

2.4.14. Asfixia

Além dos efeitos térmicos, a depleção de oxigênio e a asfixia são considerações importantes para avaliar os riscos fisiológicos em recintos fechados. A asfixia ocorre quando a presença de hidrogênio ou de um gás de purga desloca o ar, reduzindo a concentração de oxigênio abaixo de 19,5 % em volume (NASA, 1997). Esse esgotamento de oxigênio pode representar um problema em ambientes internos. Os diferentes estágios de asfixia, conforme definidos pela NASA (1997), com base na concentração de oxigênio, são resumidos na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Efeitos fisiológicos do esgotamento de oxigênio

% Oxigênio	Efeito fisiológico
15-19 por cento em volume	Diminuição da capacidade de realizar tarefas; pode induzir sintomas precoces em pessoas com problemas cardíacos, pulmonares ou circulatórios
12-15 por cento em volume	Respiração mais profunda, pulso mais rápido, má coordenação
10-12 por cento em volume	Tontura, falta de julgamento, lábios levemente azuis
8-10 por cento em volume	Náuseas, vômitos, inconsciência, rosto pálido, desmaios, insuficiência mental
6-8 por cento em volume	Morte em 8 min; 50 % de morte e 50 % de recuperação com tratamento em 6 minutos, 100 % de recuperação com tratamento em 4 a 5 minutos
4 por cento em volume	Coma em 40 s, convulsões, cessação da respiração, morte

Fonte: NASA (1997)

2.4.15. Sobrepressão

Quando um gás é liberado e se inflama, pode-se criar uma sobrepressão que pode prejudicar pessoas e propriedades. Esse aumento de pressão pode variar dependendo de vários fatores, como confinamento, turbulência, obstáculos, volume e concentração do gás, entre outros. Dois fatores principais podem causar danos: o nível de sobre pressão e a duração dessa alta pressão. Os efeitos de uma sobre pressão em humanos incluem aumento súbito de pressão, que pode prejudicar órgãos como pulmões e ouvidos, além de impactos indiretos, como fragmentos, colapso de estruturas e radiação de calor. Grandes explosões também podem lançar pessoas a distâncias, resultando em ferimentos por colisão com estruturas ou pelo movimento violento (LaChance, 2010).

A Tabela 2.6 apresenta exemplos do nível de sobrepressão necessário para causar danos a seres humanos e estruturas.

Tabela 2.6 – Danos a seres humanos, estruturas e equipamentos causados por eventos de sobrepressão

Sobrepressão (kPa)	Descrição do dano
	Efeitos diretos nas pessoas
13,8	Limiar para ruptura do tímpano
34,5 a 48,3	50 % de probabilidade de ruptura do tímpano
68,9 a 103,4	90 % de probabilidade de ruptura do tímpano
82,7 a 103,4	Limiar para hemorragia pulmonar
137,9 a 172,4	50 % de probabilidade de fatalidade por hemorragia pulmonar
206,8 a 241,3	90 % de probabilidade de fatalidade por hemorragia pulmonar
48,3	Limiar de lesões internas por explosão
482,6 a 1379	Mortes imediatas em explosões
	Efeitos indiretos nas pessoas
10,3 a 20,0	Pessoas derrubadas por onda de pressão
13,8	Possível fatalidade ao ser projetado contra obstáculos
55,2 a 110,3	Pessoas em pé serão jogadas para longe
6,9-13,8	Limiar de lacerações na pele por mísseis
27,6 a 34,5	50 % de probabilidade de fatalidade por ferimentos de mísseis
48,3 a 68,9	100 % de probabilidade de fatalidade por ferimentos de mísseis
	Efeitos em Estruturas e Equipamentos
1	Limite para quebra de vidro
15-20	Colapso de paredes de concreto não armado ou blocos de concreto
20 a 30	Colapso da estrutura de aço industrial
35 a 40	Deslocamento da ponte tubular, quebra da tubulação
70	Destruição total de edifícios; máquinas pesadas danificadas
50 a 100	Deslocamento de tanque de armazenamento cilíndrico, falha de tubulações

Fonte: LaChance (2010)

2.5. Modelagem de CFD para segurança de hidrogênio em tanques de alta pressão

A modelagem de dinâmica de fluidos computacional (CFD) é utilizada para previsão e análise de riscos associados ao uso de hidrogênio, especialmente em cenários de alta pressão e temperaturas elevadas em tanques de armazenamento. A modelagem CFD envolve a resolução numérica de equações de conservação de massa, momento e energia para prever o comportamento de fluidos em diversas condições. No caso do hidrogênio, o CFD é utilizado para simular a dinâmica de jatos e incêndios, permitindo a avaliação das consequências de possíveis acidentes. Estudos como os de Schefer *et al.* (2004, 2007) forneceram dados experimentais valiosos que auxiliam na validação desses modelos, garantindo sua precisão e confiabilidade.

Um dos fenômenos mais críticos em termos de segurança do hidrogênio é o incêndio de jato resultante de uma liberação acidental de hidrogênio pressurizado. Esse tipo de incêndio ocorre quando o hidrogênio é liberado sob alta pressão, formando um jato turbulento que pode se inflamar. O comprimento e a forma da chama resultante são parâmetros cruciais para a avaliação de distâncias de segurança e riscos associados. Estudos demonstraram que o comprimento da chama aumenta com a vazão de massa do jato e o diâmetro do bico de saída. A modelagem CFD permite simular esses cenários de forma detalhada, considerando fatores como intensidade e escala de turbulência na saída do jato. Em simulações de grande redemoinho (LES), os recursos de fluxo maiores que o tamanho da grade são resolvidos, enquanto as estruturas de fluxo menores são modeladas usando modelos de sub-grade (SGS) (Makarov *et al.*, 2004).

A temperatura no interior do tanque de hidrogênio é um fator determinante na segurança do armazenamento. Em altas pressões, as temperaturas podem aumentar significativamente, influenciando a densidade e a reatividade do hidrogênio. Estudos mostraram que a pressão e a temperatura na câmara de estagnação são cruciais para determinar o comportamento do jato de hidrogênio (Schefer *et al.*, 2007). A temperatura máxima do tanque deve ser rigorosamente controlada para evitar cenários de sobrepressão que possam levar a falhas catastróficas. Para validar os modelos CFD, são realizadas comparações entre simulações e dados experimentais. Experimentos em larga escala, como os conduzidos pelos Laboratórios Nacionais Sandia, fornecem uma base sólida para essas validações. Por exemplo, simulações de incêndios de jato de hidrogênio têm sido comparadas com medições experimentais de comprimento e forma da chama, demonstrando boa concordância (Molkov, 2009).

A aplicação de CFD na segurança do hidrogênio é uma ferramenta poderosa para prever e mitigar riscos associados ao armazenamento e uso de hidrogênio em alta pressão. Através de simulações detalhadas, é possível identificar parâmetros críticos, como temperatura máxima do tanque, que afetam diretamente a segurança operacional. A validação contínua desses modelos contra dados experimentais é essencial para garantir sua precisão e utilidade prática.

2.6. Proposta de um plano de segurança baseadas no Painel Europeu de Segurança de Hidrogênio (EHSP)

As sugestões para o plano de segurança para o CH₂V foram desenvolvido com base no modelo europeu estabelecido pelo Painel de Segurança de Hidrogênio Europeu (EHSP), criado em 2017. Esse painel foi instituído no âmbito do Acordo Conjunto para Células de Combustível e Hidrogênio 2 (FCH 2 JU), formalizado em 2021, com o objetivo de consolidar e harmonizar práticas de segurança na utilização do hidrogênio em toda a Europa. O presente trabalho utilizou como referência esse modelo europeu para fundamentar suas diretrizes e assegurar a conformidade com as melhores práticas no campo da segurança do hidrogênio. EHSP visa apoiar o FCH 2JU na gestão da segurança do hidrogênio em nível de programa e projeto, promovendo uma cultura de segurança excepcional. Um plano de segurança oferece diretrizes para a segurança em projetos envolvendo tecnologias de hidrogênio e células combustíveis, sem substituir regulamentações existentes. Também não entra em conflito com normas nacionais ou internacionais e não substitui políticas de segurança existentes. Este guia auxilia parceiros de projetos na identificação de riscos, prevenção e relato de eventos relacionados à segurança, visando uma entrega segura do projeto e uma infraestrutura mais segura.

O plano de segurança deve ser elaborado com um entendimento claro de que o plano precisaria ser atualizado, implementado e os resultados serem relatados internamente e/ou externamente ao longo da vida útil do projeto. A preparação do plano de segurança deve envolver todos os parceiros em diferentes níveis, conforme necessário. Outros interessados ou terceiros podem se envolver na elaboração do plano de segurança, por exemplo, equipes de primeiros e segundos socorros, entidades com um histórico e prestígio internacionalmente reconhecido no campo de segurança do hidrogênio, entre outros.

O objetivo do plano de segurança do projeto é desenvolver atividades técnicas e organizacionais s e organizacionais para:

- Garantir que os resultados do projeto na forma de dispositivo, sistema, processo

e/ou infraestrutura, forneçam um nível adequado de segurança e continuem ou ainda melhorem o estado-da-arte;

- Identificar e abordar o essencial para o sucesso do projeto, lacunas de conhecimento e gargalos tecnológicos se relevantes; e
- Formular atividades que garantam alto nível de segurança organizacional e técnica na entrega do projeto.

2.6.1. Metodologia

A fim de alcançar os objetivos propostos, são relatados todos os processos do projeto, tais como: realizar uma revisão detalhada do estado-da-arte em disposições de segurança de sistemas e processos relacionados ao projeto; identificar vulnerabilidades nos sistemas ou processos, selecionando cenários de incidentes, incluindo aqueles de baixa frequência, mas de altas consequências; utilizar modelos de engenharia de segurança do hidrogênio disponíveis e ferramentas para avaliar os perigos e riscos associados aos cenários selecionados. Se não houver modelos e ferramentas adequados, desenvolver e validar novos modelos para realizar a engenharia de segurança do hidrogênio para o sistema, infraestrutura ou processo sob escopo no projeto; manter o plano de segurança inicial em constante atualização durante o projeto para incorporar novo conhecimento e informações relevantes. Além disso, designar profissionais de segurança, a fim de monitorar minuciosamente a implementação do plano por todos os parceiros envolvidos no projeto, bem como monitorar o projeto como um todo. Eles também devem relatar os resultados e conclusões de segurança em relatórios, bancos de dados, publicações, entre outros meios apropriados.

2.6.2. Itens importantes para configurar um plano de segurança

1. Descrição dos sistemas de segurança e suas funções:

- Implementação do estado-da-arte em segurança;
- Melhores práticas de segurança;
- Cronograma de atualização do plano de segurança e relatório de entrega; e
- Estrutura, responsabilidades e cronograma de relatórios da equipe de segurança.

2. Identificação de vulnerabilidades, perigos e riscos associados

- Seleção de cenários de incidentes;
- Métodos de engenharia de segurança do hidrogênio;

- Técnicas de prevenção, mitigação e soluções inovadoras de engenharia;
 - Relato de progresso em engenharia de segurança de hidrogênio e avaliação de riscos; e
 - Atividades técnicas de segurança do hidrogênio.
3. Descrição das tarefas requerendo procedimentos formais de segurança
- Considerações gerais de segurança no local de trabalho;
 - Procedimentos de revisão de segurança e auto-auditorias;
 - Medidas de resposta a emergências;
 - Gestão de processos de alteração/mudança;
 - Relatório de gestão de segurança e lições aprendidas; e
 - Documentação relevante, procedimentos de segurança e divulgação.
4. Relatórios de quase-acidentes, incidentes e acidentes
- Plano de disseminação de conclusões do projeto sobre segurança do hidrogênio, incluindo lacunas de conhecimento eliminadas e gargalos tecnológicos resolvidos; e
 - Treinamento e plano de educação/formação para pessoal.

2.6.3. Construção de um plano de segurança

Um plano de segurança é essencial para identificar e mitigar perigos e riscos associados a pessoas, propriedades e meio ambiente em projetos de instalação de hidrogênio e sistemas de célula combustível. Deve conter medidas inovadoras e conhecidas, incluindo a aplicação da engenharia de segurança do hidrogênio, para prevenir e reduzir esses riscos a níveis aceitáveis. Este plano integra a identificação de vulnerabilidades, sugestões para eliminar ou controlar perigos e a introdução de medidas de mitigação. A comunicação adequada sobre segurança entre e partes externas, assim como a implementação, monitoramento e relatórios detalhados.

Os documentos e processos relacionados à segurança devem ser atualizados regularmente para incorporar novos conhecimentos e melhores práticas. Os processos envolvem etapas como a identificação de perigos, avaliação de riscos, aplicação de medidas de engenharia de segurança, sugestões para eliminar perigos e introdução de medidas de mitigação, culminando na avaliação do risco em níveis aceitáveis.

Esta meta pode ser alcançada por meio da entrega dos seguintes objetivos-chave que devem ser reportados em resultados relevantes do projeto: Revisão do estado-da-arte em disposições de segurança de sistemas e processos relacionados ao projeto

- Identificar vulnerabilidades de sistemas ou processos, selecionar cenários de incidentes incluindo cenários de baixa frequência e altas consequências;
- Aplicar modelos de engenharia de segurança do hidrogênio disponíveis e ferramentas para avaliar perigos e riscos associados para cenários selecionados. Em caso de ausência de modelos e ferramentas, desenvolver e validar novos modelos para executar engenharia de segurança do hidrogênio para um sistema, infraestrutura ou processo sob escopo no projeto; e
- Atualizar continuamente o plano de segurança inicial durante o projeto para incluir novo conhecimento e informação, designar profissionais de segurança para que monitorem minuciosamente a implementação do plano por todos os parceiros, e o projeto como um todo, e relatem os resultados sobre conclusões de segurança nos relatórios, bancos de dados, por meio de publicações, entre outros.
-

2.6.4. Métodos para identificação de vulnerabilidades de segurança, perigos e avaliação de risco

A identificação de vulnerabilidades de segurança, perigos e avaliação de risco é conduzida por meio de métodos regulamentados da indústria. Estes métodos têm como objetivo auxiliar as equipes de projeto a identificar possíveis problemas de segurança, reduzir a probabilidade de ocorrências indesejadas e minimizar as consequências de incidentes. Ao escolher e aplicar um ou mais métodos apropriados, a equipe de projeto deve considerar diversos aspectos:

- Todos os riscos envolvidos;
- Experiências prévias e quase acidentes;
- Aplicação de controles administrativos e de engenharia relacionados aos riscos, como uso de detectores de hidrogênio e sistemas de desligamento de emergência;
- Compreensão dos mecanismos e impactos de falhas nos controles;
- Pelo menos uma avaliação qualitativa dos possíveis efeitos de segurança e saúde decorrentes de falhas nos controles; e
- Condições operacionais e localização das instalações.

A execução da identificação de vulnerabilidades, perigos e avaliação de risco exige uma equipe experiente em todos os aspectos do projeto. Recomenda-se, também, incluir um membro imparcial, com profundo treinamento em engenharia de segurança de hidrogênio e sem

envolvimento direto no projeto.

A sequência de métodos, conforme apresentada na Tabela 2.7, implica em maiores esforços à medida que se avança na execução de cada método específico.

Tabela 2.7 – Vulnerabilidades de Segurança e Métodos de Avaliação de Riscos

Métodos	Descrição	Referências
Análise de Lista de Verificação	Método qualitativo que avalia o projeto contra diretrizes existentes usando listas de verificação. Utilizado para avaliar projetos específicos com base na experiência da organização.	Apêndice 5. Lista de Verificação do Plano de Segurança, EIGA Doc. 75/07
Determinação das Distâncias de Segurança	Método especulativo que formula perguntas E se... sobre falhas de hardware, software, operadores etc. Usado para prever possíveis cenários de falhas.	Análise de barreira de um posto de abastecimento genérico de hidrogênio; Markert, Engebo, Nielson 3rd ICHS
Identificação de Perigo (HAZID)	Avaliação sistemática para identificar perigos e áreas problemáticas em plantas, sistemas, operações e projetos.	Métodos de identificação de Perigo: Frank Crawley, Brian Tyler, IChemE
Análise de Perigos e Operabilidade (HAZOP)	Método qualitativo que avalia causas e impactos de desvios usando informações do projeto. Identifica perigos e problemas de operabilidade.	Revisão de Literatura por Jordi Dunjó, Vasilis Fthenakis, Juan A. Vílchez, Josep Arnaldos
Classificação da Matriz de Risco	Método qualitativo que combina categorização de probabilidades e consequências com categorias de aceitação de riscos em uma matriz.	Avaliação de Risco Qualitativa da Liquefação, Armazenamento e Transporte de Hidrogênio, G. Hankinson e B. Lowesmith
Modos de Falha e Análise de Efeitos (FMEA)	Ferramenta para analisar modos de falha e seus efeitos nos componentes e no sistema.	Wikipedia - Failure mode and effects analysis, NASA Scientific and Technical Information
Análise da Árvore de Falha (FTA)	Método quantitativo que identifica condições e fatores levando a falhas específicas usando probabilidades.	Application to a hydrogen pipeline. Gerboni, E. Salvador
Análise da Árvore de Eventos e	Abordagem indutiva para identificar e quantificar possíveis resultados	Conference.ing.unipi.it - ICHS2005
Análise das Barreiras	combinando eventos de sucesso e falha.	
Avaliação de Risco Probabilístico (PRA)	Técnica baseada em probabilidade para responder às questões: O que pode dar errado? Qual é a probabilidade? e Quais são as consequências?	Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety, AIChE
Avaliação de Risco Quantitativo (QRA)	Método para quantificar o risco, combinando probabilidade e consequência.	Benchmark exercise on risk assessment applied to a hydrogen refueling station
Engenharia de Segurança de Hidrogênio	Aplicação de princípios científicos e de engenharia para proteção contra efeitos adversos de incidentes com hidrogênio.	Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering (eBook)

Fonte: Adaptado do EHSP (2021)

Avaliar riscos envolve identificar problemas de segurança, perigos e quantificar o risco.

Se utilizam os métodos da Tabela 2.7, mas para tecnologias novas como o hidrogênio, faltam dados exatos. Em situações críticas, é fundamental concentrar-se na avaliação dos cenários mais adversos possíveis, visando a mitigação eficaz dos danos potenciais. A seleção dos métodos de análise deve ser adequada ao estágio do projeto e ao conhecimento disponível sobre o comportamento do hidrogênio. Ressalta-se que a simples identificação dos riscos não é suficiente; é imprescindível realizar uma análise aprofundada da segurança do hidrogênio sempre que necessário, garantindo a implementação de medidas preventivas adequadas.

Cada risco é avaliado com base nas consequências e frequência usando uma matriz, isso facilita encontrar áreas vulneráveis para melhorar a segurança. Categorizando 60 eventos com 1093 casos para armazenamento e transporte de hidrogênio líquido em um posto de abastecimento, tem-se os resultados apresentados a seguir. As categorias de probabilidade escolhidas são representadas pela Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Probabilidade e consequência

Categorias de probabilidade	Categorias de consequência
1: Extremamente improváveis (aprox. 109 por ano)	1: Efeito leve (lesão leve ou efeito na saúde, nenhum dano)
2: Improvável (aprox. 10^{-7} por ano)	2: Lesão leve (lesão leve ou efeito na saúde, dano menor)
3: Possível (aprox. 10^{-5} por ano)	3: Lesão grave (lesão grave ou efeito na saúde, dano moderado)
4: Muito possível (aprox. 10^{-3} por ano)	4: Até 3 fatalidades (ou deficiência permanente, grande dano)
5: Provável (aprox. 101 por ano)	5: Mais de 3 fatalidades (ou dano enorme)

Fonte: Adaptado do EHSP (2021)

2.6.5. Lista de verificação do plano de segurança

A lista de verificação do plano de segurança é um resumo dos elementos importantes para um plano de segurança e ajuda as equipes do projeto a garantirem que o plano cubra o que é necessário e é útil durante todo o projeto. Cada fase do projeto deve ser tratada em cada seção aplicável (projeto, instalação, operações, manutenção e descomissionamento), como está demonstrado na Tabela 2.9, a qual estrutura os elementos do plano de segurança considerando sua aplicação nas diferentes fases do ciclo de vida do projeto. Dessa forma, cada item da tabela deve ser analisado com foco nas exigências específicas de cada fase, garantindo cobertura ampla e contínua da segurança desde o planejamento até o descomissionamento.

Tabela 2.9 – Verificação do plano de segurança

Elemento	Descrição do Plano de Segurança
Políticas organizacionais e procedimentos	Aplicação de políticas e procedimentos de segurança.
Hidrogênio e experiência de célula a combustível	Aplicação da experiência anterior com tecnologias de hidrogênio.
Avaliações de segurança	Revisões de segurança além do ISV.
Identificação de Vulnerabilidades de Segurança (ISV)	Método ISV aplicado, líder do método, cenários e vulnerabilidades identificadas.
Plano de redução de perigos e riscos	Medidas de prevenção e mitigação.
Procedimentos	Procedimentos para localização e execução do trabalho.
Equipamentos e integridade mecânica	Teste, comissionamento, manutenção, calibração, documentação.
Gestão de procedimentos de mudança	Revisão de mudanças propostas para efeitos na segurança.
Documentação de segurança do projeto	Comunicação e disponibilização de informações de segurança.
Treinamento de pessoal	Formação geral e específica, administração e verificação.
Eventos de Segurança e Lições Aprendidas	Relatório, investigação, medidas corretivas, lições aprendidas.
Resposta a Emergências	Planos/procedimentos de respostas a emergências.
Auto-auditorias	Verificação dos procedimentos de segurança.
Aprovação do Plano de Segurança	Processo de revisão e aprovação do plano.
Documentação Adicional	Layout, diagramas, códigos, normas, componentes.
Outros Comentários ou Preocupações	Informações não abordadas acima.

Fonte: Adaptado do EHSP (2021)

2.6.6. Exemplo de um plano de segurança

Inicialmente sugere-se a realização de autoauditorias para assegurar a conformidade e promover a melhoria contínua. Como exemplo, tem-se os principais componentes de uma estação de abastecimento com H₂, conforme apresentados na Figura 2.6, na qual os elementos críticos de segurança estão destacados por meio de cores específicas para facilitar sua identificação. A Tabela 2.10 detalha os aspectos de segurança de cada equipamento da planta, evidenciando as medidas adotadas para assegurar a operação segura e eficiente da instalação.

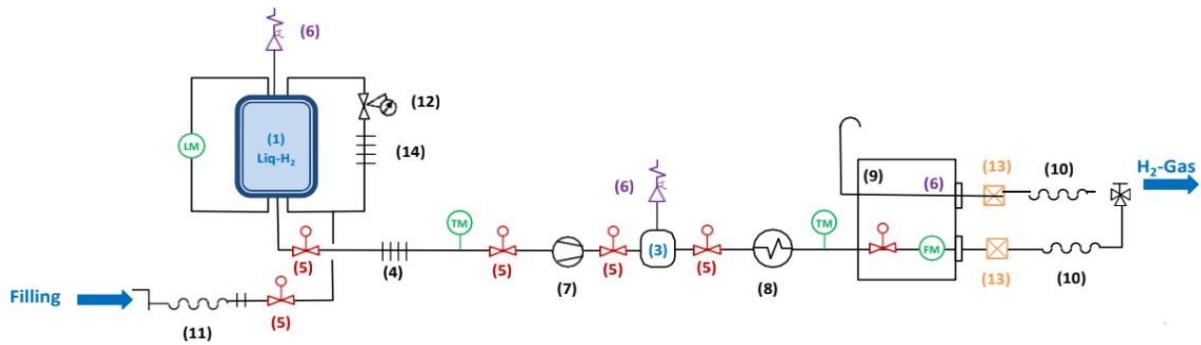


Figura 2.6 – Componentes esquemáticos de uma estação de abastecimento de hidrogênio

Fonte: EHSP (2021)

Na Figura 2.6, tem-se:

- (1) Armazenamento de H₂ líquido
- (3) Evaporador de acúmulo de pressão
- (4) Evaporador
- (5) Válvula de fechamento com emergência
- (6) Válvula de segurança
- (7) Compressor
- (8) Resfriador
- (9) Distribuidor
- (10) Mangueira de água
- (11) Mangueira de descarga
- (12) Regulador de pressão
- (13) Junção de vazamento
- (14) Evaporador de acumulação de gás

Medição:

- (LM) Medição de Nível;
- (TM) Medição de Temperatura; e
- (FM) Medição de Vazão.

Tabela 2.10 – Detalhamento de segurança dos equipamentos da planta

Equipamento/Alarmes	Unidade de armazenamento de LH2 (1)	Unidade de aumento de pressão	Evaporador (14)	Mangueira de descarga (11)	Evaporador (4)	Compressor (7)	Armazenamento intermediário (3)	Resfriador (8)	Dispensador (9)	Mangueira de entrega (10)	Cenário de desligamento de equipamento	Cenário de desligamento do site
Unidade de desligamento emergencial(ESD)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Regulador de pressão	✓	✓	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Acoplamento de separação	✓	✓	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Medição de nível	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NA	NA	NA
Medição de vazão	✓	✓	NA	✓	NA	✓	NA	NA	NA	✓	NA	NA
Medição de temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NA	NA
Deteção de chama	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Deteção de vazamento	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NA	NA
Quebra de mangueira	✓	✓	NA	✓	NA	✓	NA	NA	NA	✓	NA	NA
Ventilação mecânica	✓	✓	NA	✓	NA	✓	NA	NA	NA	✓	NA	NA
Válvula de segurança / Dispositivos mecânicos de alívio	✓	✓	✓	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ventilação atmosférica	✓	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fonte: Adaptado do EHSP (2021)

A resposta de emergência, destacada como o item 12 na lista anterior, é ilustrada a seguir. Em situações de emergência, o sistema será automaticamente desativado. Para assegurar o completo desligamento, a instalação incorpora um dispositivo de desligamento de emergência com válvulas de fechamento. Para interromper o funcionamento do equipamento, os seguintes passos devem ser seguidos: interromper o enchimento, isolar as válvulas do distribuidor (identificadas como válvulas de fechamento (5) na Figura 2.6 e notificar o operador do sistema. No caso de um fechamento da instalação, o procedimento envolve interromper o enchimento, isolar os armazenamentos (1) e (3), fechar as válvulas de bloqueio (5) e desligar o

compressor (7).

Cada componente listado requer um plano de segurança em conformidade com as normas. A documentação deve ser organizada e fornecida aos usuários. Regras específicas, como aquelas aplicáveis a tanques de pressão e equipamentos de baixa temperatura, devem ser acrescentadas. A criação da estação de abastecimento exige planos de segurança para cada etapa e fase. Os procedimentos necessários para cada estágio devem ser identificados e incorporados ao plano de segurança. Um exemplo prático disso pode ser observado na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Detalhamento de segurança dos equipamentos da planta

Procedimentos	Instalação & Comissionamento	Operação	Manutenção
Planejamento e gestão de emergências	✓		
Operações de resposta a emergências	✓		
Isolamento de energia	✓		
Abertura e desembaraço de equipamento/linha	✓		
Procedimento ESD (unidade de desligamento emergencial)	✓	✓	
Sistemas de detecção de hidrogênio e fogo	✓	✓	✓
Procedimentos e projeto de aterramento	✓	✓	✓
Compartimentos perigosos	✓	✓	✓
Requisitos de troca da mangueira		✓	
Detecção e reparo de vazamentos	✓	✓	
Bloqueio/etiqueta	✓	✓	✓
Gerenciamento de mudança	✓	✓	✓
Integridade mecânica	✓	✓	✓
Inspeção de prontidão operacional		✓	
Equipamento de proteção pessoal	✓	✓	
Inspeção e manutenção planejada		✓	
Requerimentos de documentação, retenção e compartilhamento do projeto	✓	✓	✓
Processo de revisão de perigo do projeto	✓		
Sistemas inflamáveis de purga	✓	✓	✓
Teste e inspeção do dispositivo de alívio	✓		
Análise de risco	✓		
Critério de nível de integridade de segurança do projeto			
Sinais de segurança	✓	✓	✓
Teste de barreiras e equipamentos de segurança	✓		
Requisitos de treinamento e procedimentos	✓	✓	✓
Segurança de Soldagem e Brasagem	✓		

Fonte: Adaptado do EHSP (2021)

3. METODOLOGIA

A elaboração da metodologia para o presente trabalho pautou-se na construção de propostas para um plano de segurança para as instalações de produção de hidrogênio verde, com aplicação específica no Centro de Hidrogênio Verde (CH2V) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). A unidade de produção e armazenamento de hidrogênio verde, está situada na avenida Doutor Jerson Dias, no Bairro Estiva, em Itajubá, Minas Gerais. O esquema da produção de hidrogênio verde do CH2V, abriga uma unidade de produção que inclui um eletrolisador do tipo PEM, com uma potência de 300 kW, além de vasos de armazenamento, um dispenser de abastecimento. O funcionamento do CH2V será alimentado exclusivamente por energia renovável, proveniente de painéis fotovoltaicos.

O processo, delineado no fluxograma da Figura 3.1, iniciou-se pela definição dos objetivos, tanto gerais quanto específicos, que nortearam todo o desenvolvimento do estudo. Esta fase inicial foi para delimitar o escopo da pesquisa, estabelecer os resultados esperados e justificar a relevância acadêmica e tecnológica do trabalho.

Subsequentemente à introdução do tema e à sua justificativa, que ressaltaram a crescente demanda global por energia e a urgência em controlar as emissões poluentes, impulsionando a busca por soluções alinhadas ao desenvolvimento sustentável, procedeu-se à revisão bibliográfica. Este capítulo envolveu um levantamento e análise de referências técnicas, científicas e normativas, tanto em âmbito nacional quanto internacional. A revisão abordou a contextualização do hidrogênio no Brasil, suas propriedades, e os aspectos de segurança associados ao seu manuseio e armazenamento. Foram estudadas as principais normas de segurança de hidrogênio nacionais e internacionais, para a prevenção de combustão, autoignição, a integridade de vedações, tubulações, conexões e juntas, além dos requisitos para ventilação e cuidados com a rede elétrica. Também foram examinados os procedimentos em caso de fuga de hidrogênio e a implementação de dispositivos de segurança. As publicações relevantes incluíram as da ASTM (Sociedade Americana de Testes e Materiais), como ASTM E84 e ASTM E136, que avaliam o comportamento de materiais em relação ao fogo. Normas da CGA (Associação de Gases Comprimidos), como CGA C-7 e CGA P-1, focadas na classificação e manuseio seguro de gases. O Regulamento Global Técnico (UN GTR) nº 13, que define requisitos de desempenho para sistemas de armazenamento de hidrogênio veicular. Publicações do Grupo CSA, SAE, UL e do Governo dos EUA, que abrangem desde códigos de caldeiras e vasos de pressão (CSA B51) até testes de incêndio em construção (UL 263) e regulamentos federais para transporte de materiais perigosos. As referências da NFPA

(Associação Nacional de Proteção contra Fogo), incluindo NFPA 1 (Código de Incêndio), NFPA 45 (Laboratórios que Utilizam Produtos Químicos) e NFPA 2 (Código de Tecnologias de Hidrogênio), que fornecem diretrizes para o armazenamento, manuseio e uso seguro do hidrogênio. Normas da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional), como IEC 61010-1:2010 para equipamentos e requisitos de segurança, e da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), como ABNT NBR ISO 14687-2:2018 e ABNT NBR IEC 60079-10-1:2014 sobre atmosferas explosivas, também foram consideradas. As normas ISO (International Organization for Standardization) como ISO 22734:2019 e ISO/TR 15916:2015 forneceram diretrizes para práticas seguras na produção e uso do hidrogênio. A revisão bibliográfica também abrangeu uma proposta de plano de segurança baseada no Painel Europeu de Segurança de Hidrogênio (EHSP).

Com base nessas informações, o documento do Painel Europeu de Segurança de Hidrogênio (EHSP), forneceu a estrutura e a referência principal de como conduzir a elaboração de um plano de segurança. Identificando as vulnerabilidades, sugestões para eliminar ou controlar perigos e a introdução de medidas de mitigação. Dentre os elementos considerados para a configuração de um plano de segurança, destacam-se a descrição dos sistemas de segurança e suas funções, a aplicação do estado da arte em segurança, as melhores práticas de segurança, o cronograma de atualização e relato, e a estrutura e responsabilidades da equipe de segurança. A identificação de vulnerabilidades, perigos e riscos associados é realizada por meio de métodos, incluindo Análise de Lista de Verificação, Determinação das Distâncias de Segurança, Identificação de Perigo (HAZID), Análise de Perigos e Operabilidade (HAZOP), Classificação da Matriz de Risco, Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA), Análise da Árvore de Falha (FTA), Análise da Árvore de Eventos e Análise das Barreiras, Avaliação de Risco Probabilístico (PRA) e Avaliação de Risco Quantitativo (QRA). Cada risco é avaliado com base nas consequências e frequência. O plano também detalha tarefas que requerem procedimentos formais de segurança, como considerações gerais no local de trabalho, procedimentos de revisão de segurança e autoauditorias, medidas de resposta a emergências, gestão de processos de mudança, relatórios de gestão de segurança e lições aprendidas, e documentação relevante.

Posteriormente, foram definidas etapas e processos baseados nas informações coletadas durante a pesquisa e análise. Com base nesse conhecimento, foi feita simulação computacional para analisar o comportamento do hidrogênio em um tanque de alta pressão. Para essa análise, foi empregada a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), utilizando o software ANSYS

Fluent no laboratório HySAFER da ULSTER University. O foco foi verificar a temperatura máxima do tanque que opera sob pressão de 900 bar e calcular a distância de perigo. A simulação foi elaborada com base no desenho técnico do tanque e sua modelagem tridimensional no ANSYS Geometry. A malha do tanque foi gerada no ANSYS Mesh, com 109.316 volumes de controle. Os parâmetros da simulação incluíram um fluxo massivo de abastecimento de 19 g/s, volume de 663,35 litros, materiais como aço e fibra de carbono, faixa de temperatura entre 20°C e 30°C, e diâmetro do bico de entrada de 8 mm. A simulação revelou uma temperatura máxima de 335 K (62 °C) atingida em 380 segundos (6,33 minutos), valor considerado seguro e abaixo do limite crítico de 85°C para ativação de válvulas de alívio térmico. Os dados obtidos na simulação foram utilizados para calcular as distâncias de segurança pela plataforma E-laboratory, onde esses resultados de distâncias de segurança são a base para a construção de um conjunto de informações específicas destinadas às equipes de emergência, incluindo protocolos de atuação, localização de dispositivos de segurança, rotas de fuga e zonas de acesso restrito.

Finalmente, o presente trabalho culminou nas considerações finais, que discutiram os principais resultados, as contribuições do estudo para a segurança em sistemas de hidrogênio e as propostas para trabalhos futuros. A preparação para emergências, incluindo o conhecimento da localização do pronto-socorro mais próximo e informações para treinamento de socorristas da unidade, foi também um aspecto relevante. A planta do CH2V foi considerada dentro das distâncias de segurança adequadas e com medidas de segurança e equipamentos necessários implementados.

A metodologia do trabalho foi apresentada por meio de um fluxograma (figura 3.1) onde são estruturados em blocos técnicos complementares que orientam a elaboração de sugestões para um plano de segurança para a produção de hidrogênio verde no centro de hidrogênio verde (CH2V). A paleta de cores utilizada no fluxograma facilita a identificação dos principais blocos do processo: em laranja, está indicado o ponto de partida e a finalização da metodologia, representando o início e as considerações finais. Os blocos em roxo destacam as etapas técnico-científicas centrais, como a revisão bibliográfica, os documentos necessários para a elaboração de um plano de segurança de hidrogênio do Painel Europeu de Segurança de Hidrogênio (EHSP). O rosa é utilizado para identificar os elementos de análise e aprofundamento, como a justificativa, a contextualização, a abordagem sobre as referências sobre segurança hidrogênio e representam aspectos operacionais específicos, detalhando as principais dimensões da segurança do hidrogênio, incluindo o uso de simulações computacionais (CFD) como

ferramenta analítica de apoio. Por fim, os blocos em azul claro são pontos ainda mais específicos dos objetivos e revisão bibliográfica como vedação, autoignição, prevenção à combustão, entre outros. O encadeamento lógico do fluxograma evidencia a inter-relação entre os objetivos, a revisão teórica, a aplicação prática e a sistematização de dados, compondo uma metodologia e integrada para a elaboração de sugestões para um plano de segurança.

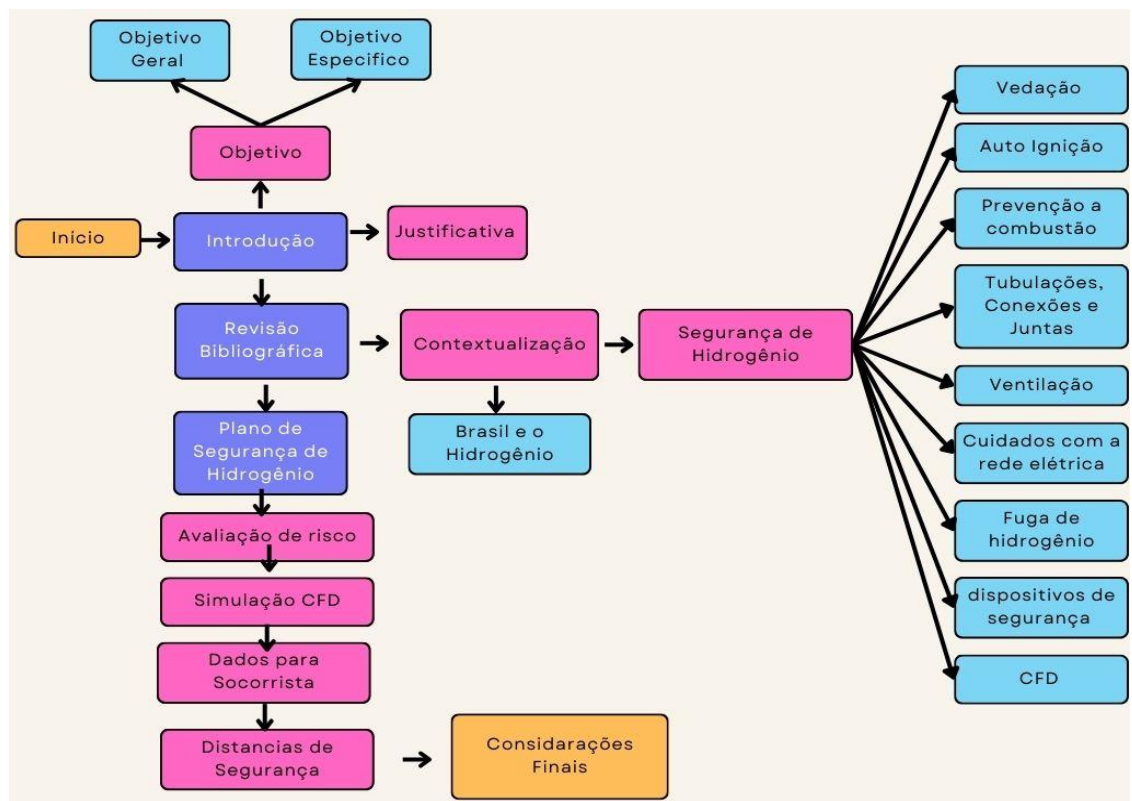


Figura 3.1 – Fluxograma – Metodologia

Fonte: Autoria Própria (2024)

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta possibilitaram a elaboração de sugestões para um plano de segurança específico para a planta de hidrogênio verde do CH2V. A seguir, são apresentados os principais resultados do estudo, incluindo a identificação de riscos, os componentes da instalação e as medidas recomendadas para garantir a segurança das operações.

4.1. Plano de segurança

4.1.1. Avaliação de risco

O principal risco na área é o potencial vazamento de hidrogênio, que pode ocorrer durante a operação dos sistemas, seja em pequenas ou grandes quantidades. A gravidade dos danos resultantes de um vazamento está diretamente relacionada à quantidade de hidrogênio armazenada no local. As distâncias de referência estabelecem os limites dentro dos quais não se espera que ocorram danos significativos às pessoas em função de cenários acidentais envolvendo hidrogênio.

Os principais componentes da estação de abastecimento estão apresentados na Figura 4.1.

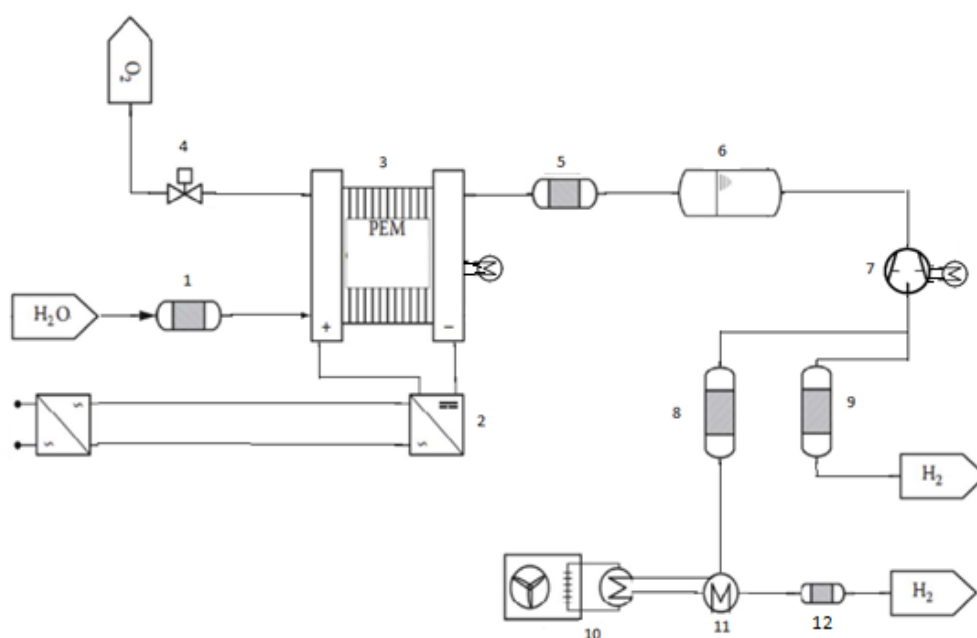


Figura 4.1 – Componentes esquemáticos de uma produção de hidrogênio do CH2V

Fonte: Autoria Própria (2024)

Os componentes de segurança mais importantes estão listados a seguir:

1. Módulo de tratamento da água; responsável pela purificação da água utilizada no processo de eletrólise, garantindo a remoção de íons e impurezas que possam comprometer o funcionamento do eletrolisador.
2. Retificação; converte corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), necessária para alimentar a célula eletrolítica.
3. Célula PEM; equipamento principal da eletrólise, onde ocorre a separação da água em oxigênio e hidrogênio por meio de corrente elétrica.
4. Válvula de fechamento; dispositivo de segurança que interrompe o fluxo de hidrogênio em caso de emergência ou manutenção.
5. Modelo tratamento H₂; remove umidade, oxigênio residual e outras impurezas do hidrogênio produzido, garantindo sua pureza para armazenamento ou uso.
6. Armazenamento baixa pressão (30 bar); utilizado para armazenar o hidrogênio logo após a produção, antes de passar por compressão.
7. Compressor; equipamento que eleva a pressão do hidrogênio para permitir seu armazenamento em tanques de alta ou média pressão.
8. Armazenamento alta pressão (1000 bar); armazena o hidrogênio comprimido em condições adequadas para aplicações como abastecimento veicular.
9. Armazenamento média pressão (450/200 bar); alternativa de armazenamento intermediário, utilizada de acordo com a demanda e logística da planta.
10. Sistema refrigeração H₂; reduz a temperatura do hidrogênio comprimido para garantir segurança e estabilidade no armazenamento e no abastecimento.
11. Trocador de calor H₂; dispositivo que regula a temperatura do hidrogênio, protegendo os equipamentos e melhorando a eficiência do processo.
12. *Dispenser* (abastecimento de veículos). unidade final do sistema, onde o hidrogênio é transferido com segurança para os veículos, seguindo protocolos técnicos específicos.

Com base nesses elementos, foi elaborada a Tabela 4.1, que detalha os equipamentos específicos relacionados a cada etapa do processo do hidrogênio. A Tabela apresenta os principais componentes e dispositivos de alarme e segurança utilizados em cada etapa do processo tecnológico, desde o tratamento de água até o abastecimento final de veículos com hidrogênio. A unidade de desligamento emergencial (ESD) está presente em etapas como a

retificação, a célula a combustível tipo PEM, o sistema de compressão, o modelo de tratamento do hidrogênio e o sistema de refrigeração. O regulador de pressão é amplamente empregado ao longo do processo, presente em quase todas as etapas operacionais, com destaque para os sistemas de compressão e armazenamento. A medição de temperatura, por exemplo, está presente desde o tratamento da água até o dispenser de abastecimento, sendo crítica para a integridade dos componentes e controle de reações exotérmicas. A medição de pressão é igualmente importante, especialmente nas fases de compressão e armazenamento em múltiplas faixas de pressão (baixa, média e alta), permitindo monitorar e prevenir sobrepressões.

Tabela 4.1 – Detalhamento de segurança dos equipamentos da planta de produção do CH₂V

Equipamen to/Alarmes	Modelo de tratame nto da água (1)	Retifica ção (2)	Célula PEM (3)	Modelo tratame nto H ₂ (5)	Compr essor (6)	Armaze nament o baixa pressão (30 bar) (7)	Armaze nament o alta pressão (1000 bar) (8)	Armazen amento média pressão (450/200 bar) (9)	Sistema de refriger ação H ₂ (10)	Trocad or de calor H ₂ (11)	Dispense r (abasteci mento de veículos) (12)
Unidade de desligamento emergencial (ESD)	NA	✓	✓	✓	✓	NA	NA	NA	✓	NA	✓
Regulador de pressão	✓	NA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NA	✓
Acoplamento de separação	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓
Medição de nível	✓	NA	✓	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Medição de vazão	✓	NA	✓	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	✓
Medição de temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	NA	NA	NA	✓	✓	✓
Detectão de H ₂	✓	✓	✓	✓	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Deteção de chama											
Deteção de vazamento	NA	NA	NA	NA	✓	✓	✓	✓	NA	NA	✓
Quebra de mangueira	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	✓	NA	NA	
Ventilação mecânica	✓	✓	NA	✓	NA	NA	NA	NA	NA	✓	
Válvula de segurança / Dispositivos mecânicos de alívio	✓	NA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ventilação atmosférica	NA	NA	NA	NA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Medidor de pressão	✓	NA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	NA	✓

Fonte: Autoria Própria (2024)

Tabela 4.2 – Etapas de procedimentos da planta de produção de hidrogênio do CH₂V

Procedimentos	Instalação & Comissionamento	Operação	Manutenção
Planejamento e gestão de emergências	✓		
Operações de resposta a emergências	✓		
Isolamento de energia	✓		
Abertura e desembarço de equipamento/linha	✓		
Procedimento ESD (unidade de desligamento emergencial)	✓		
Sistemas de detecção de hidrogênio e fogo	✓		
Procedimentos e projeto de aterramento	✓		
Compartimentos perigosos	✓		
Requisitos de troca da mangueira	✓		
Detecção e reparo de vazamentos	✓		
Bloqueio/etiqueta	✓		
Gerenciamento de mudança	✓		
Integridade mecânica	✓		
Inspeção de prontidão operacional			
Equipamento de proteção pessoal	✓		
Inspeção e manutenção planejada			
Requerimentos de documentação, retenção e compartilhamento do projeto	✓		
Processo de revisão de perigo do projeto	✓		
Sistemas inflamáveis de purge	✓		
Teste e inspeção do dispositivo de alívio	✓		
Análise de risco	✓		
Critério de nível de integridade de segurança do projeto			
Sinais de segurança	✓		
Teste de barreiras e equipamentos de segurança	✓		
Requisitos de treinamento e procedimentos	✓		
Segurança de soldagem e brasagem	✓		

Fonte: Autoria Própria (2024)

4.2. Simulação CFD

O estudo foi conduzido para analisar a segurança e a eficiência operacional de um tanque de alta pressão utilizado no projeto da planta de eletrólise de hidrogênio verde do CH₂V, por meio da simulação CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional). O foco principal foi verificar a temperatura máxima do tanque, que opera sob uma pressão de 900 bar, e calcular a distância de perigo associada a esse cenário. A Figura 4.2, mostra um desenho esquemático dos componentes, e em destaque o tanque de armazenamento de 900 bar.

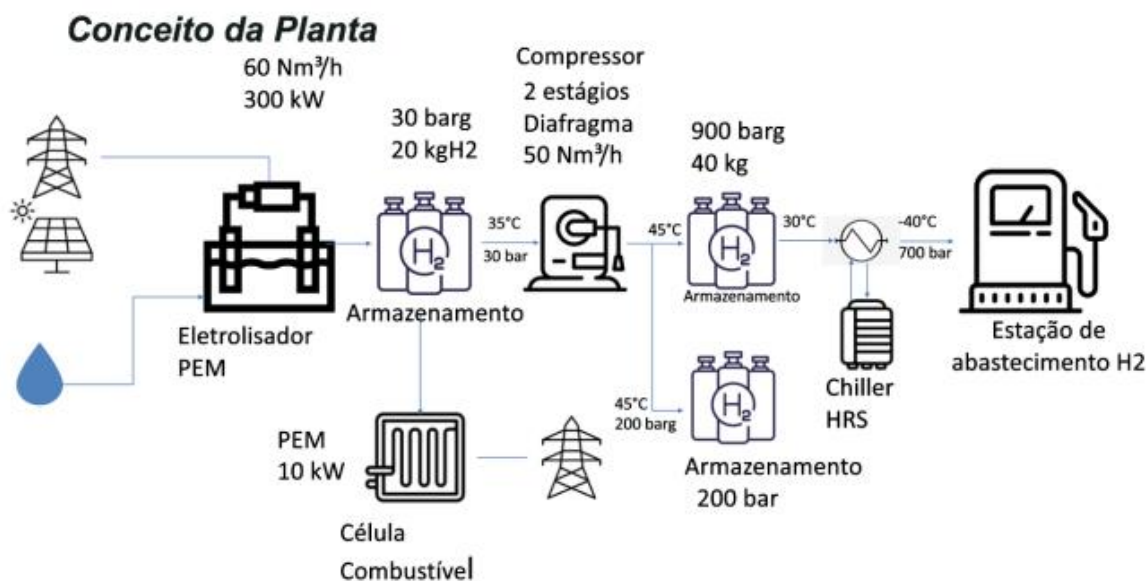


Figura 4.2 – Cenário esquemático utilizado para a simulação da planta de eletrólise do CH₂V

Fonte: Adaptado CH₂V (2023)

A simulação foi elaborada levando em consideração as características específicas do tanque, suas condições de operação e as variáveis envolvidas. Foram utilizadas técnicas de simulação CFD para modelar a geometria do tanque, criar uma malha adequada e descrever o comportamento dos fluidos em seu interior durante o abastecimento.

Para realizar essa análise, o estudo contou com o uso do *software ANSYS Fluent*, que proporcionou as ferramentas necessárias para simular com precisão o comportamento do fluido e calcular os resultados desejados. Todo o trabalho foi conduzido no laboratório de Engenharia e Pesquisa de Segurança de Hidrogênio (HySAFER), da universidade ULSTER, localizado no campus de Jordanstown, Belfast, Irlanda do Norte, Reino Unido. Os cálculos de distância foram realizados pela plataforma *E-laboratory* (recursos computacionais).

É relevante ressaltar que o material do tanque também foi considerado durante o processo de simulação. Trata-se de um recipiente robusto, revestido de aço e carbono, e projetado para suportar as altas pressões envolvidas no processo de abastecimento.

Ao final do estudo, foram obtidos *insights* sobre o desempenho do tanque e identificadas medidas de segurança adicionais que podem ser implementadas para garantir uma operação ainda mais segura e eficiente da planta de eletrólise do CH₂V.

4.2.1. Detalhamento das simulações

Segundo o desenho técnico obtido com o fornecedor do equipamento, foi realizado pelo *ANSYS geometry*, o desenho do tanque de 900 bar, como mostra a imagem da Figura 4.3.

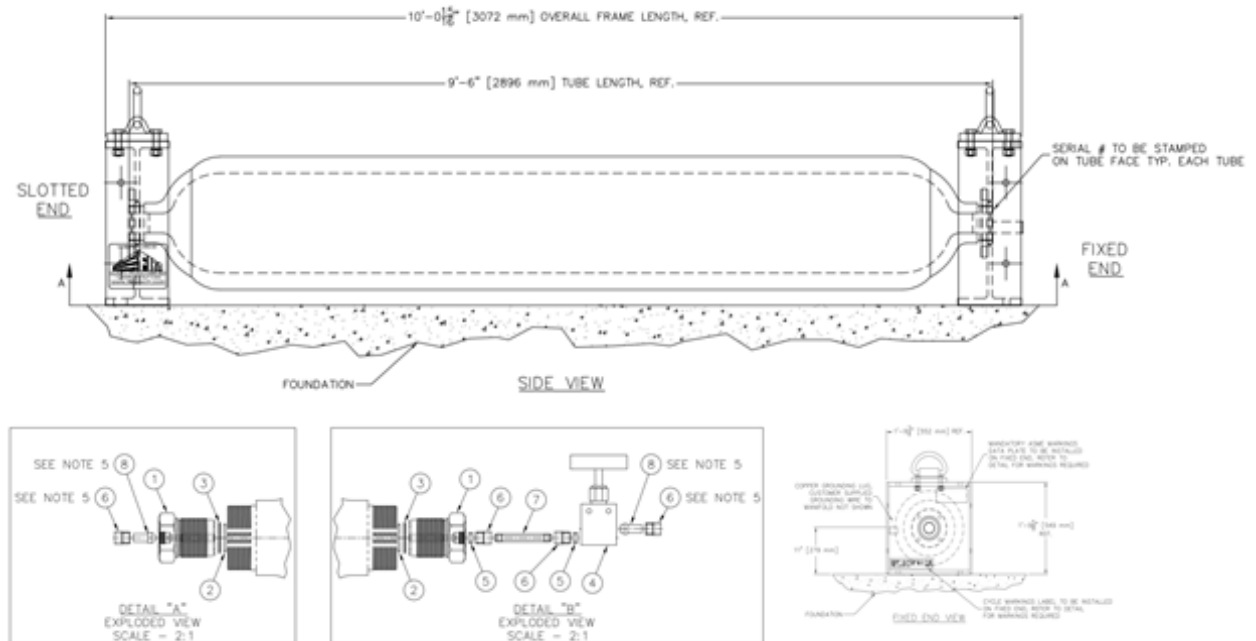


Figura 4.3 – Desenho técnico do tanque de armazenamento de 900 bar

Fonte: NEUMAN & ESSER 2023

A modelagem tridimensional do tanque de armazenamento de 900 bar foi realizada por meio do software *ANSYS Geometry*, permitindo a definição dos principais parâmetros estruturais, apresentado na Figura 4.4. O tanque possui um comprimento de 2,895 metros e um diâmetro de 0,558 metros.

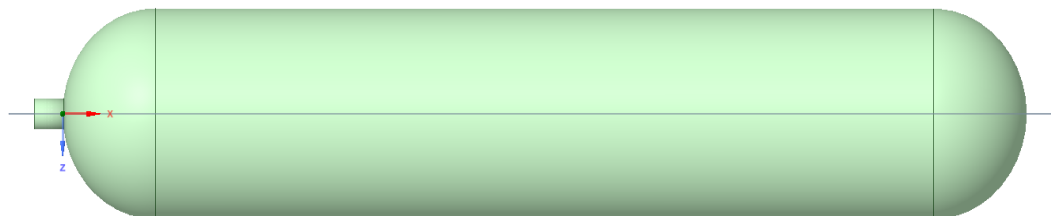


Figura 4.4 – Tanque 900 bar simulado com o *ANSYS Geometry*

Fonte: Autoria Própria (2024)

Na etapa seguinte, foi realizada a geração da malha utilizando o software *ANSYS Mesh*, onde o tanque foi discretizado em pequenos elementos, conforme ilustrado na Figura 4.5. Esse processo permitiu a obtenção de parâmetros fundamentais para a análise computacional. O modelo gerado conta com 109.316 volumes de controle, sendo utilizado o método de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e o *solver Fluent* para a resolução das equações de escoamento. Além disso, a malha foi composta por elementos do tipo tetraédrico, garantindo uma melhor adaptação à geometria do tanque e maior precisão nos resultados das simulações.

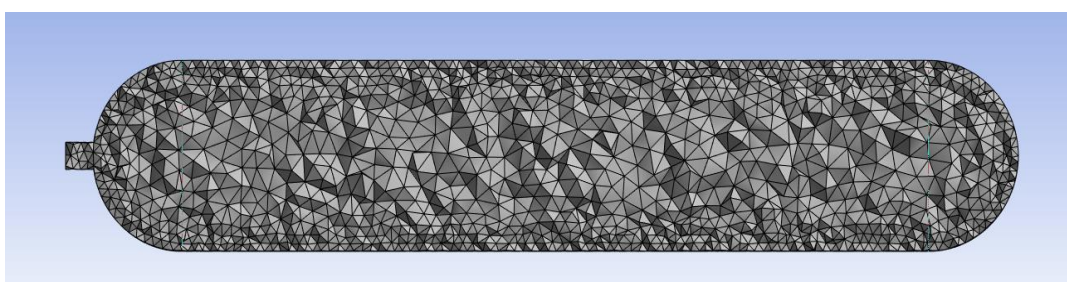


Figura 4.5 – Malha do tanque 900 bar, *ANSYS mesh*

Fonte: Autoria Própria (2024)

Com a malha devidamente gerada, foi realizada a simulação no *ANSYS Fluent*, levando em consideração os parâmetros, de acordo com o cenário estudado. A simulação teve como objetivo analisar o comportamento do fluido dentro do tanque de armazenamento de 900 bar, considerando um fluxo massivo de abastecimento de 19 g/s. O tanque, com volume de 663,35 litros, foi modelado com materiais como aço e fibra de carbono. A faixa de temperatura adotada variou entre 20°C e 30°C, enquanto o diâmetro do bico de entrada foi de 8 mm. Como resultado da simulação, foi possível determinar a temperatura máxima do fluido, conforme apresentado na Figura 4.6.

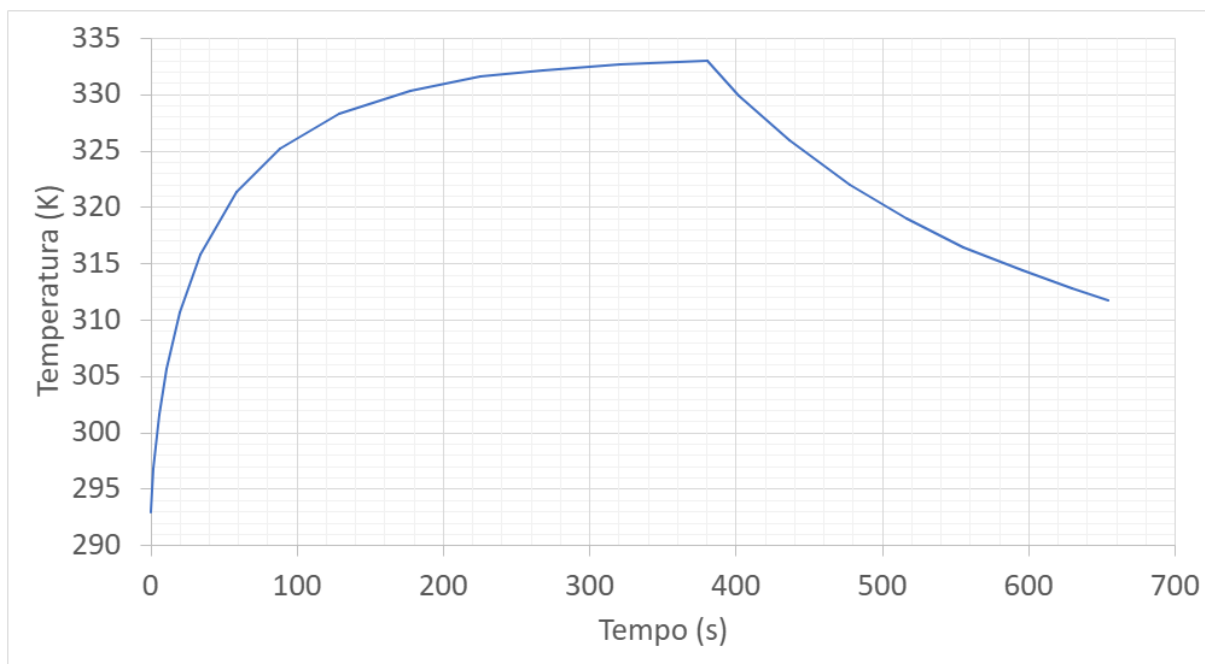


Figura 4.6 – Gráfico temperatura máxima (Kelvin por segundo (K/s))

Fonte: Autoria Própria (2024)

A partir da simulação realizada no ANSYS Fluent, foi possível obter os resultados referentes à temperatura máxima e ao tempo necessário para atingi-la. Observou-se que a temperatura máxima registrada no tanque foi de 335 K (62 °C). Esse valor reflete o aquecimento do fluido sob as condições estabelecidas na simulação. Além disso, verificou-se que o tempo necessário para atingir essa temperatura foi de 380 segundos (6,33 minutos). A temperatura de 335 K (62 °C) em 380 segundos (6,3 minutos) está dentro do esperado e bem abaixo do limite crítico de segurança para ativação de válvulas de alívio térmico. Portanto, o sistema simulado cumpre os critérios de segurança térmica definidos no GTR-13. Segundo a ISO 19881:2018 – Gás hidrogênio — Requisitos de segurança para tanques a temperatura de 62 °C está dentro dos padrões de segurança.

Obtendo a temperatura máxima, foi possível calcular as medidas de distância pela plataforma *E-laboratory*. Os parâmetros utilizados foram: a constante de energia mecânica (α), com valor de 1,8, e a constante de energia química (β), de 0,052, relacionadas à conversão energética do sistema; a pressão ambiente (P_{atm}) de 1 atm, servindo como referência para cálculos; a temperatura ambiente (T_{atm}) de 30 °C; a pressão (P) interna do tanque de 900 bar; a temperatura interna (T_1) de 62 °C; e o volume do tanque (V) de 663,35 litros. Os cálculos realizados com a plataforma E-Laboratory permitiram a determinação das distâncias de segurança associadas à pressão gerada no tanque de armazenamento de 900 bar. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.3 e seguem as diretrizes de Molkov (2020). Com base

nos valores calculados, verificou-se que a uma pressão de 100,87 kPa, a distância de risco é de 8,86 metros, representando um alto risco de fatalidade para indivíduos expostos. Para uma pressão de 16,58 kPa, a distância de segurança aumenta para 29,05 metros, sendo suficiente para evitar lesões graves. Já em níveis mais baixos de pressão, como 1,36 kPa, o impacto se estende até 63,96 metros, podendo causar lesões leves.

Tabela 4.3 – Resultados do raio de distância de segurança para pessoas

Pressão	Distância	Dano
Até 100,87 kPa	8,86 m	Fatalidade
Até 16,58 kPa	29,05 m	Lesão grave
Até 1,36 kPa	63,96 m	Lesão leve

Fonte: Autoria Própria (2024)

O gráfico, representado pela Figura 4.7, gerado pela plataforma *e-laboratory*, mostra raios de distâncias de segurança, em metros, relacionadas à pressão em caso de explosão, e, conseqüentemente, aos danos que podem ser causados, as unidades utilizadas nos gráficos são de pressão por metro.

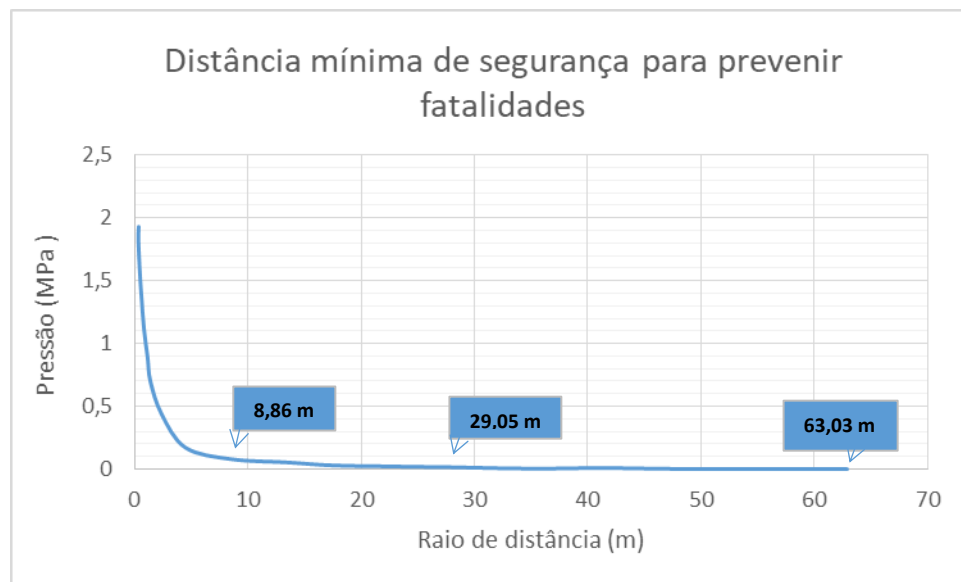


Figura 4.7 – Distância mínima de segurança para prevenir fatalidades, danos graves para pessoas e qualquer tipo de dano, pressão por distância (Pascal x metro) (Pa x m)

Fonte: Autoria Própria (2024)

O gráfico, representado pela Figura 4.8, representa o resultado obtido do e-laboratório para os parâmetros da planta de hidrogênio verde do CH2V.

É importante notar que a zona sem danos não exclui totalmente os danos nas peças do edifício. Por tanto, não haverá destruição significativa do edifício quando exposto a sobrepressões inferiores a 4,8 kPa, mas podem ocorrer danos ligeiros, por exemplo, quebra de vidros ou caixilhos de janelas.

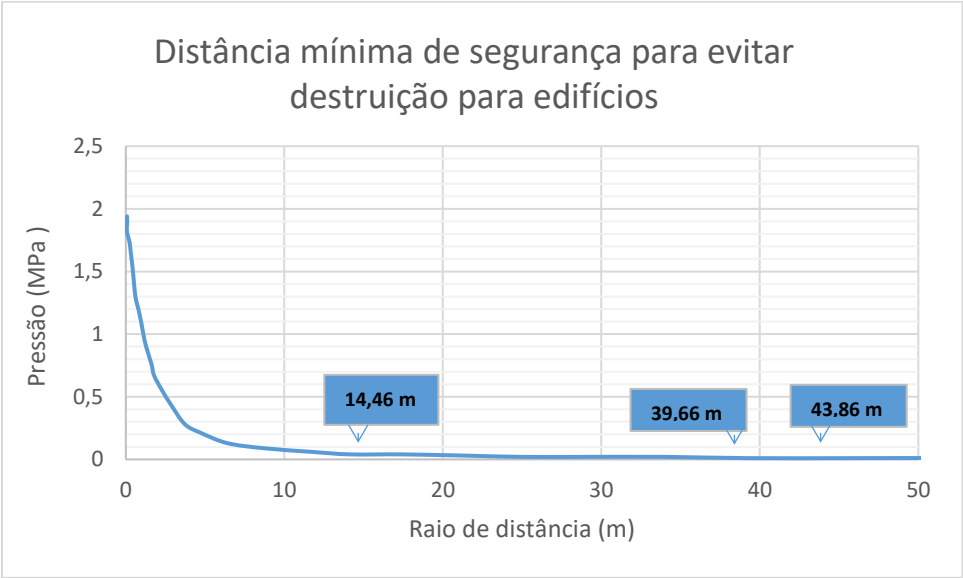


Figura 4.8 – Distância mínima de segurança para evitar danos em edifícios, pressão por distância (Pascal x metro) (Pa x m)

Fonte: Autoria Própria (2024)

A análise das zonas de perigo para edificações foi realizada com base nos cálculos de pressão gerada pelo tanque de 900 bar. Os resultados, apresentados na Tabela 4.4, indicam os níveis de impacto em diferentes distâncias, auxiliando na definição de medidas de proteção estrutural.

Conforme os dados obtidos, edificações localizadas a até 14,46 metros de distância, quando submetidas a uma pressão de 34,5 kPa, podem sofrer destruição total. Já aquelas situadas a uma distância de 39,66 metros, sob a mesma pressão de explosão, podem apresentar destruição parcial. Para construções posicionadas a 43,86 metros, a pressão é reduzida para 6,9 kPa, sendo insuficiente para causar danos estruturais.

Tabela 4.4 – Zonas de risco para edificações

Pressão	Distância	Dano
Até 34.5 kPa	14.46 m	Destruição
Até 34.5 kPa	39.66 m	Destruição parcial
Até 6.9 kPa	43.86 m	Sem danos

Fonte: Autoria Própria (2024)

4.3. Distância de segurança

A Tabela 4.5 apresenta os intervalos de distância estimados para diferentes níveis de sobrepressão, com base nas diretrizes propostas por LaChance (2010) e calculados por meio da ferramenta E-laboratory. Esses intervalos indicam os efeitos esperados sobre seres humanos, estruturas e equipamentos em caso de uma explosão envolvendo hidrogênio, caracterizando o potencial de dano em função da intensidade da onda de choque gerada.

Tabela 4.5 – Resultados dos intervalos de distância

Sobrepressão (kPa)	Descrição do dano	Intervalo de distância (m)
Efeitos diretos nas pessoas		
13,8	Limiar para ruptura do tímpano	27,7
34,5 a 48,3	50 % de probabilidade de ruptura do tímpano	12 – 14,46
68,9 a 103,4	90 % de probabilidade de ruptura do tímpano	8,2 - 9
82,7 a 103,4	Limiar para hemorragia pulmonar	8,2 – 9,2
137,9 a 172,4	50 % de probabilidade de fatalidade por hemorragia pulmonar	7,2 – 6,5
206,8 a 241,3	90 % de probabilidade de fatalidade por hemorragia pulmonar	5,6 - 6
48,3	Limiar de lesões internas por explosão	12
482,6 a 1379	Mortes imediatas em explosões	4,2 – 6,8
Efeitos indiretos nas pessoas		
10,3 a 20,0	Pessoas derrubadas por onda de pressão	19,7 - 32,8
13,8	Possível fatalidade ao ser projetado contra obstáculos	26,4
55,2 a 110,3	Pessoas em pé serão jogadas para longe	8 - 11,26
6,9-13,8	Limiar de lacerações na pele por mísseis	26,4 - 40,2
27,6 a 34,5	50 % de probabilidade de fatalidade por ferimentos de mísseis	14,6 - 16,6
48,3 a 68,9	100 % de probabilidade de fatalidade por ferimentos de mísseis	10 - 12
Efeitos em Estruturas e Equipamentos		
1	Limite para quebra de vidro	50
15-20	Colapso de paredes de concreto não armado ou blocos de concreto	20,2 - 24,7
20 a 30	Colapso da estrutura de aço industrial	15,7 - 20,2
35 a 40	Deslocamento da ponte tubular, quebra da tubulação	13,4 - 14,3
70	Destruição total de edifícios; máquinas pesadas danificadas	10
50 a 100	Deslocamento de tanque de armazenamento cilíndrico, falha de tubulações	8,4 - 11,9

Fonte: Autoria Própria (2024)

No que diz respeito aos efeitos diretos sobre as pessoas, observa-se que a partir de 13,8 kPa já existe risco para integridade física, com a possibilidade de ruptura de tímpano a uma distância de até 27,7 metros. À medida que a sobrepressão aumenta, os danos se intensificam:

entre 34,5 e 48,3 kPa, há uma probabilidade de 50% de ruptura do tímpano, reduzindo a distância segura para aproximadamente 12 a 14,46 metros. Em níveis ainda mais elevados, como entre 68,9 e 103,4 kPa, a chance de ruptura do tímpano chega a 90%, e o intervalo de segurança cai para cerca de 8,2 a 9 metros. A partir de 82,7 kPa, podem ocorrer hemorragias pulmonares, com risco fatal em aproximadamente 50% dos casos quando a sobrepressão atinge entre 137,9 e 172,4 kPa, reduzindo a zona crítica para cerca de 6,5 a 7,2 metros. Em situações extremas, com pressões de até 241,3 kPa, a probabilidade de fatalidade por hemorragia pulmonar chega a 90%, com impacto letal estimado a uma distância de 5,6 a 6 metros. A ocorrência de lesões internas por explosão pode ser desencadeada com 48,3 kPa, afetando pessoas num raio de até 12 metros, e em casos de explosões intensas, com pressões entre 482,6 e 1379 kPa, há possibilidade de mortes imediatas em distâncias que variam de 4,2 a 6,8 metros.

Os efeitos indiretos sobre as pessoas também são relevantes e consideram interações com objetos ou estruturas em movimento. Por exemplo, entre 10,3 e 20 kPa, a onda de pressão pode derrubar pessoas em pé, com efeito sentido até 32,8 metros. A 13,8 kPa, uma pessoa pode ser projetada contra obstáculos, levando a uma possível fatalidade, em uma faixa de até 26,4 metros. Pressões de até 110,3 kPa podem arremessar uma pessoa para longe, atingindo distâncias entre 8 e 11,26 metros. O risco de lacerações na pele causadas por estilhaços (mísseis) começa a ser significativo a partir de 6,9 kPa, com alcance de até 40,2 metros. Com intensidades de 48,3 a 68,9 kPa, a probabilidade de fatalidade por ferimentos causados por mísseis pode chegar a 100%, afetando pessoas em um raio de até 12 metros.

No tocante aos efeitos sobre estruturas e equipamentos, observa-se que danos materiais começam a ocorrer a partir de 1 kPa, nível suficiente para causar quebra de vidros em um raio de até 50 metros. Pressões entre 15 e 20 kPa podem levar ao colapso de paredes de concreto não armado, enquanto estruturas metálicas industriais começam a ceder entre 20 e 30 kPa, em uma faixa crítica de até 20,2 metros. Tubulações e pontes tubulares podem ser danificadas entre 35 e 40 kPa, com risco de quebra até 14,3 metros. Em níveis extremos, a partir de 70 kPa, pode haver destruição completa de edifícios e danos severos em máquinas pesadas, em um raio de até 10 metros. Tanques cilíndricos de armazenamento e sistemas de tubulação são suscetíveis a falhas estruturais com pressões entre 50 e 100 kPa, com potencial de deslocamento até 11,9 metros.

4.4. Emergência

A planta de eletrólise do Centro de Hidrogênio Verde (CH2V), localizada no Parque Científico e Tecnológico de Itajubá (PCTI-UNIFEI), representa um ambiente de risco potencial devido à natureza do processo de produção de hidrogênio verde. Embora o sistema conte com dispositivos de segurança e protocolos operacionais rigorosos, eventos acidentais como vazamentos, explosões ou queimaduras não podem ser completamente descartados. Diante disso, o tempo de resposta a emergências assume um papel na mitigação de danos e na preservação da vida.

A análise da logística de atendimento pré-hospitalar revela dois tempos críticos que influenciam diretamente a eficácia das ações de resposta. O primeiro diz respeito ao tempo necessário para uma ambulância do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) deslocar-se de sua base até a planta, o que leva aproximadamente 16 minutos, conforme indicado na imagem 4.11. Esse intervalo compreende o acionamento da equipe, a mobilização da ambulância e o trajeto percorrido até o local da ocorrência. O segundo tempo relevante é o necessário para o transporte da vítima da planta até o Hospital de Clínicas de Itajubá (HCI), instituição de referência em atendimento de urgência na cidade, estimado em cerca de 13 minutos, conforme apresentado na imagem 4.12. Assim, em condições normais de tráfego e clima, o tempo total entre o acionamento do socorro e a chegada da vítima ao hospital é de aproximadamente 29 minutos.

Esse intervalo temporal é particularmente relevante em situações críticas, como exposição direta ao hidrogênio, queimaduras graves ou traumas provocados por sobrepressão. Nesses casos, os primeiros dez minutos são determinantes para a estabilização do paciente e para o sucesso do atendimento definitivo. A análise demonstra que, embora a distância geográfica entre a planta e os serviços de saúde seja relativamente curta, fatores como mobilização das equipes, condições de tráfego urbano e eficiência na comunicação influenciam diretamente o desfecho da emergência.

Dessa forma, evidencia-se a necessidade de preparação interna adequada na planta, com a presença de brigadas treinadas em primeiros socorros, equipamentos de suporte básico à vida e protocolos bem estabelecidos para comunicação com os serviços de urgência. A infraestrutura local deve permitir o acesso rápido das ambulâncias, com vias desobstruídas e sinalização apropriada, garantindo a entrada e saída ágeis das equipes médicas. Adicionalmente,

recomenda-se a realização de simulados práticos com regularidade, envolvendo as equipes da planta, o SAMU e o Hospital de Clínicas, de forma a testar a eficácia do plano de resposta emergencial, ajustar procedimentos e reduzir o tempo real de atendimento. Esses aspectos são fundamentais para garantir uma resposta rápida e coordenada diante de possíveis eventos acidentais associados à produção de hidrogênio, assegurando maior proteção aos trabalhadores e à comunidade no entorno.

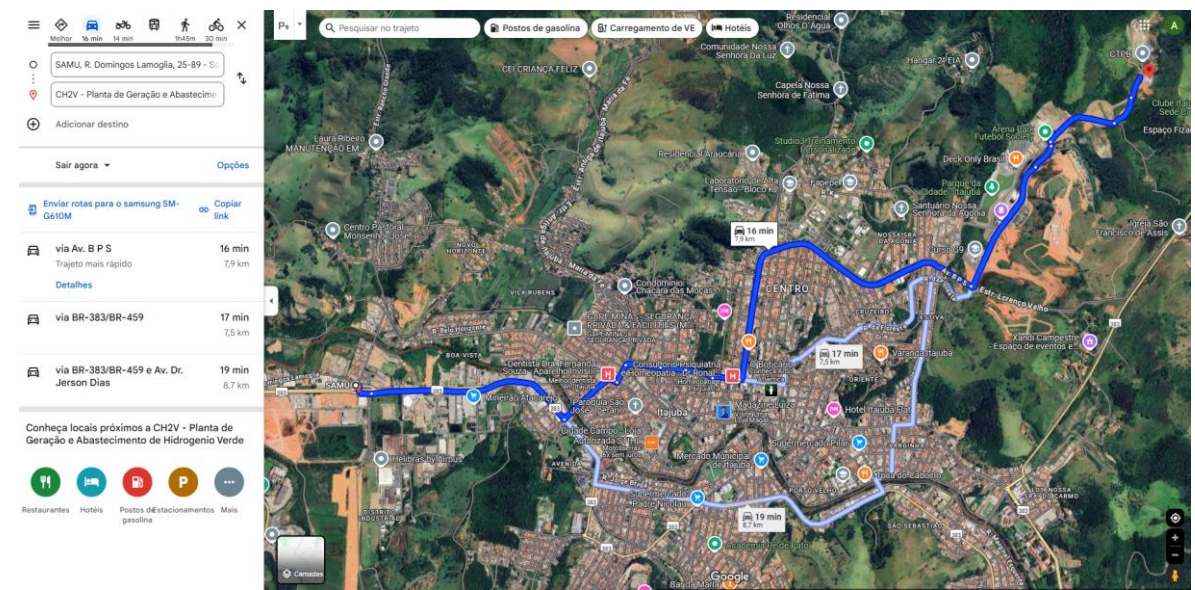


Figura 4.9 – Distância entre a base do Samu e a planta CH2V

Fonte: Google Maps (2025)

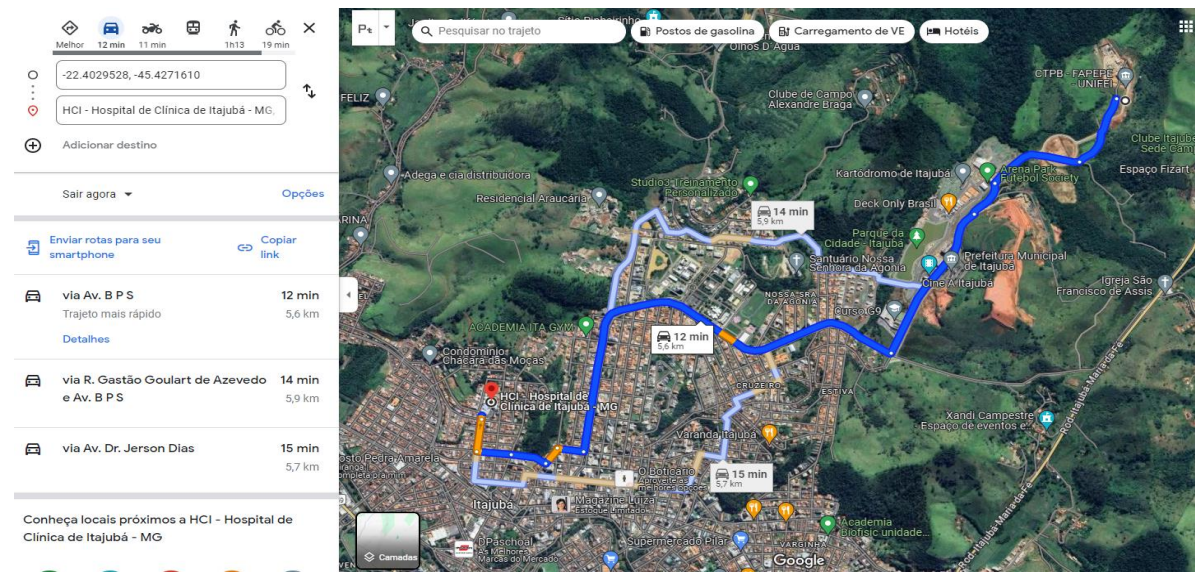


Figura 4.10 – Distância entre a Planta CH2V e o Hospital de Clinicas de Itajubá

Fonte: Google Maps (2024)

5. CONCLUSÃO

A crescente relevância do hidrogênio verde como vetor energético no cenário global reforça a urgência de estabelecer diretrizes sólidas de segurança para sua produção, armazenamento e manuseio. Este trabalho buscou contribuir com essa necessidade ao propor um plano de segurança aplicável ao Centro de Hidrogênio Verde (CH2V) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), com base nas normas técnicas nacionais e internacionais e em diretrizes do Painel Europeu de Segurança de Hidrogênio (EHSP).

O trabalho destacou, técnico e normativo, os desafios e requisitos específicos relacionados ao hidrogênio, incluindo sua inflamabilidade, a complexidade do armazenamento em altas pressões, riscos de asfixia, sobrepressão e autoignição. A revisão bibliográfica aliada à aplicação de simulações numéricas com o uso de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), permitiu avaliar cenários críticos, zonas de risco e propor distâncias seguras para pessoas e edificações.

Com base na simulação realizada, observou-se que a temperatura máxima registrada no interior do tanque de hidrogênio foi de 335 K (62 °C), atingida em um intervalo de 380 segundos (6,33 minutos). Este comportamento térmico indica um aumento gradual de temperatura sob as condições simuladas, sem ocorrência de picos abruptos que poderiam comprometer a integridade estrutural do reservatório.

A fim de avaliar a conformidade com os requisitos internacionais de segurança, os resultados foram comparados com os critérios estabelecidos nas normas UN GTR N° 13 e ISO 19881:2018, que regulamentam a segurança de tanques de hidrogênio comprimido em veículos terrestres. Ambas as normas estabelecem que o sistema de alívio térmico (TPRD) deve ser ativado antes que a temperatura interna atinja 85 °C (358 K), evitando a falha catastrófica do tanque durante exposições prolongadas ao calor, como em cenários de incêndio.

Dessa forma, conclui-se que a temperatura máxima simulada está consideravelmente abaixo do limite crítico estabelecido pelas normas, e o tempo necessário para atingi-la representa um cenário termicamente estável e seguro, dentro da faixa tolerada para sistemas de armazenamento de hidrogênio de alta pressão. Portanto, os dados obtidos evidenciam que o comportamento térmico do tanque simulado está em conformidade com os critérios normativos internacionais de segurança, não apresentando risco iminente de falha por sobreaquecimento nas condições analisadas.

Diante desses dados, propõe-se sugestões de um plano de segurança para uma instalação de produção de hidrogênio, é necessário iniciar com um levantamento detalhado dos

equipamentos, da logística do local e da distribuição dos materiais. Além disso, deve-se realizar um estudo minucioso das normas vigentes, analisar os materiais utilizados pelos fabricantes e estabelecer as quantidades de produção de hidrogênio. A partir dessas informações, a simulação dos riscos deve ser feita considerando todos os equipamentos envolvidos no armazenamento e transporte do gás. Esse processo é essencial para determinar medidas de segurança eficazes antes da construção da planta, garantindo que ela seja desenvolvida com base em cálculos precisos.

Durante a construção e a operação da produção de hidrogênio, devem ser elaborados relatórios técnicos periódicos e documentações detalhadas, assegurando que nenhum item de segurança seja negligenciado. Esse processo deve ser conduzido por uma equipe especializada, garantindo a implementação completa de todas as medidas de proteção. Além disso, é fundamental que os documentos estejam arquivados e de fácil acesso para futuras consultas.

Estar preparado para um acidente também faz parte do plano de segurança. Isso inclui o conhecimento da localização do pronto-socorro mais próximo, a distância até ele e o treinamento adequado dos socorristas da unidade. Esses profissionais devem compreender as propriedades do hidrogênio, suas temperaturas e os possíveis danos que pode causar às pessoas. Para reduzir o risco de comportamento inadequado na área de produção, é essencial restringir o acesso, instalar avisos sobre os perigos e treinar os funcionários. Além disso, a vigilância constante do local, com o uso de tecnologia apropriada, é recomendada para evitar atos de vandalismo.

Com base nesses aspectos, conclui-se, também, que a planta do CH₂V, está construída dentro das distancias de segurança adequadas, medidas de segurança e equipamentos necessários foram implementados adequadamente, recomenda-se a elaboração de um Plano de Emergência, orientando os operadores sobre as ações adequadas em caso de risco de explosão. Esse plano, aliado a um sistema de detecção precoce de vazamentos, permitirá a adoção de medidas de proteção mais eficazes para instalações e pessoas.

Outras recomendações para o CH₂V incluem:

- Acompanhamento (manutenção) do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA);
- Acompanhamento (manutenção) do aterramento de equipamentos para evitar eletricidade estática;
- Proteção dos tanques de armazenamento contra intempéries;

- Uso de tanques com dispositivos de alívio para sobrepressões, com saída direcionada para cima;
- Treinamento contínuo dos envolvidos, baseado no Plano de Atendimento a Emergências (PAE);
- Controle rigoroso de acesso à área de produção.

A adoção dessas medidas contribuirá significativamente para a segurança das operações, minimizando riscos e garantindo um ambiente de trabalho mais protegido para todos os envolvidos.

6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou a simulação de um dos equipamentos que compõem a produção de hidrogênio. No entanto, para um plano de segurança completo, pode expandir essa análise para todos os equipamentos envolvidos no processo, considerando todas as formas de manuseio do hidrogênio. Dessa forma, será possível obter valores precisos das distâncias de segurança em toda a planta, garantindo um planejamento mais robusto e eficaz.

Outra proposta relevante para aprimorar o plano de segurança é a elaboração de matrizes de riscos, que permitiriam a identificação e a avaliação detalhada de possíveis falhas operacionais e seus impactos. A análise dessas matrizes auxiliaria na definição de medidas preventivas e corretivas mais eficientes.

Além disso, sugere-se a criação de um Plano de Emergência, estabelecendo protocolos detalhados de resposta a incidentes, incluindo vazamentos, incêndios e explosões. Esse plano deve ser acompanhado por um método de treinamento contínuo voltado para operadores, socorristas e demais pessoas que tenham acesso à produção de hidrogênio. O treinamento deve abranger aspectos teóricos e práticos, garantindo que todos saibam como agir em situações de risco, reduzindo a probabilidade de acidentes e minimizando possíveis danos.

REFERÊNCIAS

- ADEEL A.; HAFIZ M. A.; ARSLAN H. *et al.* Energy and exergy analysis of fuel cells: A review. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 9, p. 308-21, 2019. doi: 10.1016/j.tsep.2018.12.008. Acesso em 12 jun. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16978-2**. Sistemas de prevenção de deflagração. Parte 2: Resistência mecânica - Requisitos Defagration preventing systems: Mechanical resistance. 1ª ed. International Standard, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 26142**. Hydrogen generators using water electrolysis process. 1ª ed. International Standard, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO14687-1**. Informação e documentação: Referências. Minas Gerais. 1ª ed. International Standard, 2010.
- ASTBURY, G. R.; HAWKSWORTH, S. J. Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 13, p. 2178-85, 2007. doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.005. Acesso em 15 jun. 2023.
- BERTIN, J. J.; CUMMINGS, R. M.; POVINELLI, L. A. **Aerodynamics for Engineers**. Prentice Hall, 2002.
- BEYLER, C. L. Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires. In: **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. 3. ed. Section 2, Chapter 12, 2005.
- BILGER, R. W. The structure of turbulent nonpremixed flames. **Symposium (International) on Combustion**, v. 22, n. 1, p. 1095-108, 1989. doi: 10.1016/S0082-0784(89)80054-2. Acesso em 22 jan. 2024.
- BILGER, R. W.; BECK, R. D. Turbulent jet diffusion flames. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 1, n. 1-2, p. 49-67, 1976. doi: . 10.1016/0360-1285(76)90022-8. Acesso em 03 fev. 2024.
- BRUCE, S.; TEMMINGHOFF, M.; HAYWARD, J.; SCHMIDT, E.; MUNNINGS, C.; PALFREYMAN, D.; HARTLEY, P. **National Hydrogen Roadmap**. CSIRO, Australia, 2018. Disponível em: file:///C:/Users/Administrador/Downloads/18-00314_EN_NationalHydrogenRoadmap_WEB_180823.pdf>. Acesso em 20 agosto 2022.
- CALABRESE, Marcella; PORTARAPILLO, Maria; DI NARDO, Alessandra; VENEZIA, Virginia; TURCO, Maria; LUCIANI, Giuseppina; DI BENEDETTO, Almerinda. Hydrogen safety challenges: a comprehensive review on production, storage, transport, utilization, and CFD-based consequence and risk assessment. **Energies, Basel**, v. 17, n. 6, p. 1–26, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17061350>.
- Certification and Regulation of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. **Fuel Cell & Hydrogen Energy Association**, 2021. <https://www.fchea.org/certification-and-regulation-hydrogen-fuel-cell-vehicles>. Acesso em 03 fev. 2024.

CH2V Centro de hidrogênio Verde de Itajubá. **II Workshop do centro de hidrogênio verde de Itajubá**, apresentação, Edson Bortoni <<https://drive.google.com/drive/folders/1tnzhGtDlhuXDWETi-qgm-HSiF5a4Wgnz>>. Acesso em: 03 agosto de 2023.

CHEN, C.; RODI, W. **Jatos flutuantes turbulentos verticais**: uma revisão de dados experimentais. Oxford: Pergamon Press, 1980.

Clean Hydrogen Joint Undertaking. Safety planning and management in eu hydrogen and fuel cells projects. **Clean Hydrogen Joint Undertaking**, 2022. Disponível em: <https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/news/webinar-safety-planning-and-management-eu-hydrogen-and-fuel-cell-projects-2022-03-30_en>. Acesso em 22 jun 2023.

DRÄGER. Explosion protection gas detection systems. Lübeck: Drägerwerk AG & Co. KGaA, 2018. 19 p. Disponível em: <https://www.draeger.com>. Acesso em: 26 abril 2024.

DADASHZADEH, M.; KASHKAROV, S.; MAKAROV, D.; MOLKOV, V. Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 6, p. 3210-22, 2018. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195. Acesso em 10 ago. 2023.

DADASHZADEH, M.; KASHKAROV, S.; MAKAROV, D.; MOLKOV, V. Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 12, p. 6462-75, 2018. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195. Acesso em 03 fev. 2024.

Dunjó, J., Fthenakis, V., Vílchez, J. A., & Arnaldos, J. (2009). Quantitative risk assessment of hydrogen production using natural gas steam reforming. **Journal of Hazardous Materials**, 162(2- 3), 1431-1438. Acesso em 16 ago. 2023.

EIGA. European Industrial Gases Association. Hydrogen Safety. **IGC Doc 15/06/E**, 2007.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. ABC Energia, 2023.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio**. ABC Energia. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacoes-Arquivos/publicacao-569/Hidrogenio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacoes-Arquivos/publicacao-569/Hidrogenio_23Fev2021NT%20(2).pdf). Acesso em 29 abr. 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica, Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. EPE, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>>. Acesso em 15 junho 2023.

FCH. European Commission. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. **Hydrogen Safety**, 2021. <<https://www.fch.europa.eu/hydrogen-safety>>. Acesso em 03 fev. 2024.

GONG L.; QIANGLING D.; SUN J.; MOLKOV, V. Similitude analysis and critical conditions for spontaneous ignition of hydrogen release into the atmosphere through a tube. **Fuel**, v. 245, p. 413-9, 2019. doi: 10.1016/j.fuel.2019.02.064. Acesso em 29 nov. 2024.

HYSAFE. International Association for Hydrogen Safety. **Regulations General**, 2008. Disponível em: <<http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/RegulationsGeneral>>. Acesso em 12 julho IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Mudanças climáticas 2013:

quinto relatório de avaliação: a base da ciência física. Resumo para formuladores de políticas. **IPCC**, 2013. ISBN: 978-972-9083-15-0. Acesso em 12 jun. 2023.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Panorama do hidrogênio no Brasil. **International Association for Hydrogen Safety (HySafe)**, 2022. doi: 10.38116/td2787. Acesso em 12 jun. 2023.

JONES, J. A. **Hydrogen: Essential Data**. CRC Press, 2001.

KARLSSON, B.; QUINTIERE, J. G. **Enclosure Fire Dynamics**. CRC Press, 2000.

KASHKAROV, S.; LI, Z.; MOLKOV, V. Blast wave from a hydrogen tank rupture in a fire in the open: Hazard distance nomograms. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 3, p. 2429-46. doi: 0.1016/j.ijhydene.2019.11.084. Acesso em 29 nov. 2024. Acesso em 12 jun. 2023.

LACHANCE, J. L. **Progresso em metodologias de avaliação de risco para aplicações emergentes de hidrogênio**. 6º Curso Internacional de Curta Duração e Workshop de Pesquisa Avançada Progresso na Segurança do Hidrogênio - Regulamentos, Códigos e Padrões, 2010.

LAMPERT, D. J.; CAI, H.; WANG, Z.; KEISMAN, J. *et al.* Development of a Life Cycle Inventory of Water Consumption Associated with the Production of Transportation Fuels. **Syria Studies**, v. 7, n. 1, p. 37–72, 2015. doi: 10.13140/RG.2.1.3886.9201. Acesso em 29 nov. 2024.

LEPRICH, U.; HELBING, M.; LEPRICH, J. Hydrogen Safety: An Overview of Safety Aspects in the Production, Transport, and Application of Hydrogen. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 5030, 2021. doi: 10.3390/en14165030. Acesso em 17 abr. 2023.

LINDE. Sustainable Development Report, 2019. Disponível em: <https://assets.linde.com/-/media/global/corporate/corporate/documents/sustainable-development/2019-sustainable-development-report.pdf>. Acesso em 25 janeiro 2023.

MAKAROV, D. V.; MOLKOV, V. V. Modeling and Large Eddy Simulation of Deflagration Dynamics in a Closed Vessel. **Combustion, Explosion and Shock Waves**, v. 40, p. 136–144, mar. 2004.

MCCARTY, R. D.; KLEIN, R.; LEVENDIS, Y. A. Ignition and combustion of hydrogen-air mixtures. **In Combustion Science and Technology**, v. 27, n. 1-2, p. 47-66, 1981. Acesso em 29 nov. 2024.

MOLKOV, V. **Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part II**. Bookboon.com, 2009.

MOLKOV, V. Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering. **4th European Summer School on Hydrogen Safety**, 7 a 16 de setembro de 2009.

MOLKOV, V.; BRAGIN, M. **Vazamento de hidrogênio em alta pressão através de um canal estreito**. In: Fenômenos de desequilíbrio: plasma, combustão, atmosfera. Moscou: Torus Press, 2009.

MOLKOV, V.; MAKAROV, D.; BRAGIN, M. Física e modelagem de jatos subexpandidos e

dispersão de hidrogênio na atmosfera. **24ª Conferência Internacional sobre Interação de Fluxos de Energia Intensos com a Matéria**, 1º - 6º Março de 2009.

MOLKOV, V.; SAFFERS, J. B. A correlação para o comprimento da chama do jato de hidrogênio não pré-misturado no ar parado. **10º Simpósio Internacional sobre Ciência da Segurança contra Incêndios**, 19 de junho de 2011.

MOLKOV, V.; SAFFERS, J. B. Chamas de jato de hidrogênio. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 19, p. 8141–58, 2013.

Nacional de hidrogênio roteiro. **Caminhos para uma indústria de hidrogênio economicamente sustentável na Austrália**, 2018.

NASA. National Aeronautics and Space Administration Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems: Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation. Washington, DC: NASA, 1997.

National Renewable Energy Laboratory. **Hydrogen Safety, Codes, and Standards. NFPA 2: Hydrogen Technologies Code**. 2023.

NEUMAN & ESSER. Desenho técnico BApproved with comments.: Neuman & Esser, 2023

PAINEL EUROPEU DE SEGURANÇA DO HIDROGÊNIO (EHSP). Guia de Engenharia de Segurança do Hidrogênio – Documento de Orientação. **Clean Hydrogen Joint Undertaking** (Clean Hydrogen JU), 2021.

PAMUCA D., IORDACHE M., MUHAMMET D., SCHITEA, D. A new hybrid fuzzy multi-criteria decision methodology model for prioritizing the alternatives of the hydrogen bus development: A case study from Romania. **Revista Internacional de Energia de Hidrogênio**, Volume 46, Edição 57, 18 de agosto de 2021, Páginas 29616-29637.

PREUSTER, P.; ALEKSEEV, A.; WASSERSCHIED, P. Tecnologias de Armazenamento de Hidrogênio para Sistemas de Energia Futuros. **Revisão Anual de Engenharia Química e Biomolecular**, v. 8, p. 445-71, 2017.

RAVI, Sai Sudharshan; AZIZ, Muhammad. Hidrogênio limpo para mobilidade – Quo vadis? **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 47, p. 20632-20661, 1 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.158>.

RIVKIN, C.; BURGESS, R.; BUTTNER, W. Guia de Segurança de Tecnologias de Hidrogênio. **Laboratório Nacional de Energia Renovável, NREL**, 2015. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/60948.pdf>. Acesso em 17 abr. 2023.

SALIBA-SILVA, A. M.; CARVALHO, F. M. S.; BERGAMASCHI, V. S.; LINARDI, M. Water Electrolysis for Hydrogen Production in Brazilian Perspective. **8th latin-american congress on electricity generation and transmission**, p. 1-6, 2009. Disponível em: <https://repositorio-api.ipen.br/server/api/core/bitstreams/004ef6e4-fed7-495b-a36b-69af7942d328/content>. Acesso em 22 fev. 2023.

Sandia National Laboratories. Hydrogen Safety. **US Department of energy**, 2021. <https://www.sandia.gov/ess-ssl/hydrogen-safety/>. Acesso em 17 abr. 2023.

SCHEFER, R. W.; HOUF, W. G.; COLTON, J. Visible flame radii and lengths of hydrogen and natural gas jet flames. **Combustion and Flame**, v. 139, n. 1-2, p. 98-107, 2004.

SCHEFER, R. W.; HOUF, W. G.; WILLIAMS, T. C. *et al.* Characterization of a well-defined hydrogen jet flame. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 8, p. 1269-86, 2007.,

SHELL CANADA. Quest Carbon Capture and Storage. **SHELL**, 2018. Disponível em https://www.shell.ca/en_ca/aboutus/projects-and-sites/quest-carbon-capture-and-storageproject.html#vanityaHR0cDovL3d3dy5zaGVsbC5jYS9xdWVzdA>. Acesso em 14 jun. 2023.

United Nations Economic Commission for Europe. **Global Technical Regulation No. 13: Hydrogen and Fuel Cell Vehicles**, 2019. <https://unece.org/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2019/R013r3e.pdf>. Acesso em 14 jun. 2023.

UTISKUL, Y. **Boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE): A study of superheat limit and fragmentation**. 2006. Tese (Doutorado) – University of Maryland, 2006.

UTISKUL, Y.; *et al.* *The effect of liquid temperature on boiling liquid-expanding vapor explosion (BLEVE)*. **Fire Safety Journal**, v. 40, n. 8, p. 697-709, 2005.

VERA-VALDÉS, J. Eduardo; KVIST, Olivia. Breaching 1.5°C: Give me the odds. **Aalborg University**, 1 dez. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2412.13855>. Acesso em: 01 maio 2025.

VERSTEEG, M. **An introduction to computational fluid, dynamics**. 2ed. Rio de Janeiro: Pearson, 2007. 520p.

XU, G.; ZHANG, W.; WEN, J. *et al.* *LES modeling of hydrogen and natural gas turbulent diffusion flames*. **Combustion Science and Technology**, v. 177, n. 3, p. 685-711, 2005.

YIN, H.; YIP, A. Uma Revisão sobre a Produção e Purificação de Hidrogênio Derivado de Biomassa Usando Tecnologias Emergentes de Membrana. **Catalisadores**, v. 7, n. 10, p. 297, 2017. doi: 10.3390/catal7100297. Acesso em 14 jun. 2023.