



VOLUME 6

Princípios básicos de segurança do hidrogênio

NEWTON PIMENTA NEVES JR, SAYONARA ANDRADE ELIZIÁRIO,
JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES, AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA

Princípios básicos de segurança do hidrogênio

Projeto H2Brasil – Expansão do Hidrogênio Verde

Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável (Componente 03 – Capacitação)

Implementação: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)

- Diretor: Markus Francke
- Coordenador: Martin Studte

Coordenação Geral: INTEGRATION / GOPA_INTEC

- Coordenação: Klaus-Peter Albrechtsen
- Especialista: Lothar Hoppe
- Especialista: Rosana Z. Domingues
- Revisão: Victor N. Bistritzki

Coordenação dos Cursos: Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética

- Coordenação Geral dos cursos: Júlia Teixeira Fernandes
- Coordenação Acadêmica: Aurélio Lamare Soares Murta
- Coordenação Operacional: Roney Ramaiano de Souza Silva
- Coordenação Pedagógica: Ariane Louzada Sasso Ferrão
- Tutoria acadêmica e pedagógica: Bianca Zorzetto Carniel Furquim
- Tutoria acadêmica e pedagógica: Isabelle Freire Sousa

Princípios básicos de segurança do hidrogênio

Ficha catalográfica

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Princípios básicos de segurança do hidrogênio
[livro eletrônico]:volume 6/Newton Pimenta
Neves Jr ... [et al.].-- Brasília, DF : LaSUS
FAU, 2023.-- (Coleção 1:conceitos do H2 power-
to-X)
PDF

Outros autores: Sayonara Andrade Eliziário, Júlia
Teixeira Fernandes, Aurélio Lamare Soares Murta.

ISBN 978-65-84854-28-4

1. Energia - Fontes alternativas 2. Fontes
energéticas renováveis - Brasil 3. Hidrogênio
I. Série.

23-178236

CDD-333.794

Índices para catálogo sistemático:

1. Brasil : Energias renováveis : Desenvolvimento
sustentável : Economia 333.794

Tábata Alves da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9253

Dados editoriais:

Editora: LaSUS FAU UnB

Equipe editorial:

- Professor Dr. Caio Frederico e Silva (ed)
- Professora Dra. Marta Bustos Romero(ed)
- Coordenador Técnico: Valmor Cerqueira Pazos



UnB Estante digital: <https://livros.unb.br/>

Princípios básicos de segurança do hidrogênio*



**Esse livro tem como referência a transcrição e adaptação das aulas do Curso 1-Modulo 6 H₂Brasil, 2023.*

Conteúdo das aulas:

**NEWTON PIMENTA NEVES JR
SAYONARA ANDRADE ELIZIÁRIO**

Adaptação para livro:

**JÚLIA TEIXEIRA FERNANDES
AURÉLIO LAMARE SOARES MURTA**

Organização do livro:

**KLAUS-PETER ALBRECHTSEN
LOTHAR HOPPE
ROSANA ZACARIAS DOMINGUES**

Princípios básicos de segurança do hidrogênio

Dr. Newton Pimenta Neves Jr

H2 Análises Técnicas e Perícia | UNICAMP | newton@h2analises tecnicas.com.br

Doutor em Química Analítica e Mestre em Física pela UNICAMP, Bacharel em Física pela USP-São Paulo; Cooperação sobre hidrogênio energético com MCTI, MME; Finep; ABNT; International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy – IPHE. Atuou no Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio; no LH2-UNICAMP, coordenou diversos projetos de produção de hidrogênio a partir da reforma do etanol e do gás natural, eletrólise alcalina da água, hidrogênio de fontes renováveis de energia, aplicações de células a combustível, análise de gases e segurança do hidrogênio. Ministra cursos de Segurança em Gases para profissionais; Desenvolve consultoria em assuntos relacionados ao hidrogênio, otimização e segurança de processos que utilizam gases, além de análises técnicas e laudos.

Dra. Sayonara Andrade Eliziário

Universidade Federal da Paraíba (UFPB) | sayonara@cear.ufpb.br

Professora da UFPB em Engenharia de Energias Renováveis. Foi pesquisadora do Instituto Nacional do Semiárido (INSA); Pós-doc na Universidade Federal de São Carlos, no Departamento de Engenharia de Materiais; Foi pesquisadora no Durham University (UK), Université Paris-Sud 11- França; Doutorado sintetizando materiais nanoestruturados multifuncionais (UNESP); Especialista em Direito da Energia, focado no arcabouço regulatório do regulção do hidrogênio renovável; Consultora de projetos de hidrogênio verde. Tem experiência na área de materiais para energia, catalíticos, fotossensibilizados, síntese química inorgânica, conversão de biocombustíveis, físico-química de materiais, microscopia e eletrocerâmicas.

Dra. Júlia Teixeira Fernandes

Universidade de Brasília (UnB) e Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética | julia@quali-a.com

Doutora pela FAU-UnB, onde é pesquisadora em laboratórios e grupos de pesquisas (LaSUS, LACAM e SiCAC) nas áreas de Sustentabilidade, Bioclimatismo, Conforto Ambiental, Desempenho Térmico e Lumínio, Eficiência Energética, Qualidade Ambiental e Simulação Computacional. Realiza consultorias e capacitações especializadas, em especial, de Etiquetagem de Eficiência Energética das Edificações (PROCEL-EDIFICA/MME), Normas, Certificações, Neroarquitetura e Biofilia. Professora de pós do IPOG e sócia da empresa de tecnologia e inovação Quali-A, implatada no Impact Hub-Brasília.

Dr. Aurélio Lamare Soares Murta

Universidade Federal Fluminense (UFF) | aureliomurta@id.uff.br

Graduado em Engenharia Civil, Mestrado em Transportes (IME), Doutorado e Pós-doutorado em transporte e Planejamento Energético e Ambiental UFRJ. É Professor da UFF no Mestrado e Graduação em Administração, Coordenador do MBA em Logística Empresarial, além de Pesquisador do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais/UFRJ. Membro Imortal da Academia Brasileira de Ciências, Artes, História e Literatura (ABRASCI). Áreas de atuação incluem Engenharia de Transportes, Planejamento e Operação Logística, Gerenciamento de Projetos, Pesquisa Operacional e Simulação.

Princípios básicos de segurança do hidrogênio

Me. Klaus-Peter Albrechtsen

Integration – International Management Consultants GmbH / GIZ | klausalbrechtsen@yahoo.de

Mestrado em Eletrotécnica de Potência e em Educação Profissional pela Universidade de Hamburgo/Alemanha. Especialista nas áreas de energias renováveis, eficiência energética, gestão de projetos, desenvolvimento organizacional, gestão e desenvolvimento de recursos humanos. Mais de 30 anos de experiência na prestação de respectivos serviços de consultoria em mais de 20 países.

Esp. Lothar Hoppe

Integration / Gopa_Intec / GIZ | lotharhoppe@outlook.com

Engenheiro electricista com pós-graduação em eficiência energética e gestão de energia pela PUCRS. Com vasta experiência em: consultoria e auditoria nas áreas de eficiência energética, gerenciamento de energia, economia de energia e sistemas de energia renovável, instrutor e professor em energia renovável em empresas e instituições de ensino com SENAI, PUCRS e outras. Atua nas áreas de Solar térmica, fotovoltaica, eólica, biomassa e hidrogênio.

Dra. Rosana Zacarias Domingues

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Integration/GIZ | dominguesrz@gmail.com

Doutorado pelo *Institut National Polytechnique de Grenoble*-França- INPG; Bacharel, Licenciada e Mestre em Química pela UFMG. Especialista no projeto H2Brasil BR-AL (GIZ-MME) de cursos de capacitação, coordena projetos para criação de ação de novos produtos e serviços com equipes multidisciplinares em empresas (CEMIG, EMBRAER, Magnesita etc.) nas áreas de células a combustível, biomateriais e eletroquímica. Participa dos programas de Pós-Graduação -PPGIT/UFMG.

Dr. Victor Nikolaus Bistrizki

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) | bistrizki@ufmg.br

Possui mestrado e doutorado em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2021). Tem experiência atuando principalmente nos seguintes temas: energia renovável, inovação de biotecnologias, tecnologias de hidrogênio, panorama de patentes.



Por meio da:



Coordenação do curso:



Princípios básicos de segurança do hidrogênio

NEWTON PIMENTA, SAYONARA ELIZIÁRIO,
JÚLIA FERNANDES, AURÉLIO MURTA

Brasília-DF, 2023



Por meio da:



Apoio:



Coordenação do curso:



Objetivo do livro e proteção aos direitos autorais

Ressaltamos que o conteúdo do livro segue uma estrutura textual de transcrição de aulas online, com formato didático e informal. A linguagem é acessível para todos os profissionais que estão tendo a primeira aproximação com o tema do Hidrogênio Verde nos cursos desenvolvidos no âmbito do projeto H2 Brasil.

Como foram inúmeras solicitações para novas turmas, a coordenação geral dos cursos avaliou a relevância de todo o conteúdo gerado no projeto, encarando a confecção dos livros como uma oportunidade de democratizar esse conhecimento no Brasil.

Assim, a leitura do livro também deve ser feita com esse propósito: uma oportunidade de “ler/ouvir” esses grandes especialistas durante uma aula sobre H2Verde. Por isso, o objetivo do livro é ter um caráter técnico, com uma abordagem didática das informações, conteúdos e exemplos ilustrativos, de fácil compreensão, com o propósito de garantir a aprendizagem.

O livro não substitui as publicações e referências acadêmicas sobre o assunto. Para isso, sugerimos conhecer o currículo lattes, a biografia, as publicações (livros e artigos), pesquisas e trabalhos técnicos (de universidades, laboratórios e empresas), desenvolvidos pelos professores conteudistas e especialistas, que são grandes referências no tema no Brasil e mundo.

Lembramos que todo o conteúdo reunido foi fruto de uma iniciativa inédita no país. Reforçamos que todo criador de uma obra intelectual tem seu direito autoral garantido sobre a sua criação. Esse direito é exclusivo dos autores (art. 5.º, XXVII, da Constituição Federal), constitui um direito moral (criação) e um direito patrimonial (pecuniário). Segundo a Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, este material está protegido pela lei de direito autoral.

Solicitamos que qualquer reprodução, parcial ou integral, seja referenciada com a devida autoria e solicitada uma autorização dos autores.

Quanto às imagens utilizadas, suas fontes estão especificadas, e alertamos que o livro não é, e não pode, ser comercializado. O conteúdo é fruto da transcrição das aulas dos professores no Projeto H2Brasil, que tem o intuito de disseminar o conhecimento no Brasil. Seu uso é exclusivamente didático, utilizando as imagens para fins de estudo ou crítica sobre o assunto em questão.



Por meio da:



Coordenação do curso:



Apresentação

O contexto mundial de transição energética para uma economia com zero emissões de carbono prioriza o uso de energias renováveis como a solar, a eólica e a hídrica em oposição as oriundas de fontes fósseis. Entretanto, um dos desafios para uso de tais fontes surge pelo fato delas serem intermitentes e não armazenáveis e, portanto, devem ser utilizadas localmente ou enviadas para uma rede de distribuição.

No Brasil, a capacidade de produção de energia a partir das fontes renováveis é enorme, podendo gerar, em certos momentos, um excedente de energia. O hidrogênio, H_2 , surge então como uma forma de armazenar estas energias. O H_2 , que é um vetor energético, pode ser obtido através de diferentes rotas, com baixa ou nula emissão de carbono. Caso a energia utilizada seja renovável, o H_2 produzido via eletrólise da água é denominado H_2 Verde.

Em uma de suas ações, o Projeto H_2 Brasil Power-to-X previu a capacitação dos futuros profissionais brasileiros que atuarão na cadeia do H_2 Verde. Como foco da “Componente 3 do Projeto” (Educação Profissional e Superior para o Hidrogênio Verde), foram desenvolvidos cursos teóricos e práticos, desde a produção de H_2 até seu uso final.

O objetivo dos cursos foi abordar desde o conhecimento básico fundamental até detalhar temas mais relevantes para o contexto brasileiro. O intuito é a formação de um grande grupo capacitado, que será o futuro corpo docente do tema H_2 Verde no Brasil (Rede H_2 Brasil). O público-alvo eram professores (mestres e doutores) e instrutores nas áreas correlatas ao H_2 Verde, tais como engenharia elétrica, eletrotécnica, mecânica, mecatrônica, química, economia, gestão, TI, economia ou direito com experiência e conhecimento em energias renováveis ou afins.

Foram 1.176 participantes que tiveram a oportunidade de se capacitar, divididos em 11 turmas, num total de 120h de carga horária. As etapas EAD (online) abordaram desde a introdução até a aplicabilidade do H_2 Verde no mercado. Já a etapa presencial focou nos cenários regionais para implantação de tecnologias relacionadas ao H_2 Verde, por meio de visitas técnicas orientadas. Também foram ministrados 8 cursos, denominados masterclasses, com mais de 495 inscritos, com carga horária de 20h a 30h, no formato EAD (online).

Este livro é um dos produtos dessas capacitações, que reuniu 23 professores doutores, em temas relacionados ao H_2 Verde. Foi uma ação, inovadora e colaborativa, de criação de conteúdos, do Brasil e Alemanha. Assim, todo o material didático dos cursos (transcrição de aulas, slides e apostilas) foi compilado, resultando no desenvolvimento de 2 coleções, com total de 10 livros didáticos do projeto H_2 Brasil Power-to-X.

Expressamos nosso reconhecimento aos autores e a toda equipe envolvida, pelo trabalho árduo e inédito. Esperamos que os livros possam contribuir e ampliar ações efetivas para o crescimento do H_2 Power-to-X no Brasil.

Klaus P. Albrechtson

H_2 Brasil Power to X - Programa de Parceria Alemã-Brasileira
Componente: Formação Profissional e Superior para Hidrogênio Verde

Sumário

1. Princípios básicos de segurança do hidrogênio	9
2. Introdução	9
2.1. Considerações gerais sobre acidentes	12
2.2. Classificação dos gases com relação aos riscos para a saúde humana	20
2.3. Técnicas de checagem de vazamentos	28
3. Condições para surgimento e manutenção de fogo	31
4. Características do Hidrogênio	39
4.1. Propriedades físico-químicas do hidrogênio	39
4.2. Comparando O Hidrogênio e os Combustíveis Fósseis	46
5. Procedimentos de segurança	58
5.1. Princípios básicos de segurança do hidrogênio	61
6. Cilindros, Conexões e Válvulas para Hidrogênio e Gases Pressurizados	65
6.1. Armazenamento e deslocamento de cilindros de H ₂	69
6.2. Equipamento de Proteção Individual – EPI	75
6.3. Emergência com cilindro de H ₂	76
6.4. Conexões para gases comprimidos	78
6.5. Válvulas reguladoras de pressão (VRP)	89
6.6. Pressão máxima admissível	91
6.7. Purgas gasosas	92
6.8. Amostragem de gases	103
7. Infraestrutura para Hidrogênio	105
7.1. Sensores de Hidrogênio e Gases	116
8. Regulamentos, Códigos e Normas	120
9. Segurança no licenciamento de empreendimentos de hidrogênio no Brasil	126
10. Considerações finais	142
11. Referências	143

1. Princípios básicos de segurança do hidrogênio

Este livro tem como objetivo principal fornecer subsídios essenciais na compreensão de vários aspectos relacionados à segurança e às características físico-químicas do hidrogênio ao longo de toda a cadeia, desde sua produção até o uso final.

Deve-se considerar os níveis de concentração em que o hidrogênio pode reagir com o ar sob condições normais de pressão e temperatura. Além disso, é crucial compreender as medidas de segurança fundamentais para prevenir a formação de atmosferas explosivas tanto em espaços internos quanto externos. Isso inclui a análise da compatibilidade do hidrogênio com diversos materiais e a identificação de fontes de ignição em ambientes internos e externos.

Outro ponto relevante envolve a compreensão das características físico-químicas das misturas de gases contendo hidrogênio e as implicações de vazamentos em áreas internas e externas. Além disso, é importante conhecer os principais tipos de sensores utilizados para garantir a segurança e detectar gases explosivos e/ou nocivos.

Também se deve considerar os efeitos fisiológicos do contato e manuseio do hidrogênio nos estados gasoso e líquido, juntamente com medidas de proteção ambiental.

Por fim, é fundamental estar ciente da legislação e das normas existentes e vigentes estabelecidas por entidades tais como o Ministério do Trabalho e Emprego, Agências Ambientais, Corpos de Bombeiros, ABNT, ISO, IEC, dentre outros, que orientam a produção, manuseio, armazenamento, transporte e uso final do hidrogênio.

2. Introdução

Tendo em vista a diversidade do público-alvo a que se destina este curso de introdução à segurança do hidrogênio, considerou-se importante iniciar o assunto apresentando uma visão geral sobre a prevenção de acidentes. Embora as indústrias já contem com diversos mecanismos de prevenção de acidentes, incluindo treinamento e manutenção preventiva e preditiva, nas universidades e centros de pesquisa a realidade pode ser bastante distinta.

Por esse motivo, uma abordagem geral acerca dos acidentes e a responsabilidade individual e coletiva sobre a identificação de perigos e a prevenção de eventos perigosos se torna tão importante.

Em seguida, serão apresentadas considerações específicas sobre os perigos decorrentes do trabalho com gases e sua classificação em relação aos riscos para a saúde humana.

Com relação aos gases inflamáveis, serão apresentados alguns conceitos sobre combustão e detonação e as características específicas do hidrogênio, que serão lembradas. Também serão tratadas algumas considerações sobre procedimentos de segurança que, se forem adotados, contribuirão para minimizar os riscos relacionados ao trabalho com gases.

A seguir, são apresentadas várias referências de interesse para o estudo do Hidrogênio Verde e da segurança envolvida na sua manipulação, armazenamento e transporte:

Referências para o estudo do Hidrogênio Verde e da segurança no armazenamento e transporte	
Handbook of Compressed Gases, Compressed Gas Association, Inc.	Gas Encyclopedia Air Liquide (disponível online)
NR-33 Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados	IEC 61508 – Functional Safety
Normas de segurança para o manuseio e utilização de cilindros pressurizados contendo hidrogênio, Prof. Ennio Peres da Silva, Laboratório de Hidrogênio, UNICAMP	Chapter 6 - Regulatory Framework, Safety Aspects, and Social Acceptance of Hydrogen Energy Technologies, in Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies, Academic Press, 2019, Pages 303-356, ISBN 9780128142516
Combustion, flames and explosions of gases, Bernard Lewis and Guenther von Elbe, Academic Press, Orlando, 3rd ed., 1987. ISBN 0-12-446751-2.	Occupational Safety and Health Administration – OSHA National Institute for Occupational Safety & Health – NIOSH National Institute of Standards and Technology – NIST
ABNT NBR IEC 60079, Parte 10-1: Classificação de áreas - Atmosferas explosivas de gás	Hydrogen Tools, https://h2tools.org/ , Pacific Northwest National Laboratory, DOE, EERE
IEC 60079 Part 10-1 Electrical apparatus in hazardous locations: Classification of hazardous gas areas	FISPQ – Ficha de Informação de segurança de produtos químicos (sites de empresas de gás)
ABNT NBR IEC 60079-13:2019 Atmosferas explosivas Parte 13: Proteção de equipamentos por ambiente pressurizado "p" e por ambiente artificialmente ventilado "v"	CETESB - NORMA TÉCNICA P4.261, 2ª Edição, Dez/2011, 140 páginas, Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência
NR-13 Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento	ISO TR 15916: Basic consideration for the safety of hydrogen systems

Figura 1. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Destaca-se o *Handbook of Compressed Gases, Gas Encyclopedia Air Liquide* (disponível online), e normas de segurança, aspectos físico-químicos a serem controlados durante armazenamento, transporte e uso do hidrogênio, como os procedimentos de segurança e a NR-33 sobre vasos de pressão e a NR-13 sobre espaços confinados.



Por meio da:



Coordenação de curso:



A segurança funcional abordada na norma IEC 61508 – Functional Safety é uma abordagem mais moderna, apresentando a matriz de risco, que relaciona a frequência e severidade de acidentes, devendo ser considerada no estudo e uso do Hidrogênio Verde.

Existem agências internacionais de saúde ocupacional e segurança focadas no tema, tais como a NIOSH e a OSHA.

O site Hydrogen Tools foi desenvolvido e é atualizado constantemente pela Pacific Northwest National Laboratory, mantido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (PNNL, DOE, EERE). Esse banco de dados sobre incidentes com hidrogênio é muito importante, pois contém muitas informações, relatórios, vídeos e boas práticas sobre o uso do hidrogênio. Nele é possível selecionar os incidentes por tipo, como por exemplo: erros humanos, falhas de dispositivos, falha de controle ou falta de treinamento.

Já a ABNT NBR IEC 60079 – Atmosferas Explosivas é uma norma bastante complexa, com 19 partes, que somam mais de mil páginas, sendo que a parte 10-1 trata da classificação de áreas. Esse tema é fundamental para garantir a segurança em ambientes com a possível presença de atmosferas explosivas de gases.

A NR-13 é uma norma regulamentadora de caráter mandatório, do Ministério do Trabalho e Emprego, sobre caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, a que também se submetem os tanques de armazenamento, tubulações e demais dispositivos pressurizados para utilização do hidrogênio.

A CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) também possui uma norma técnica para avaliação quantitativa de riscos de acidentes de origem tecnológica provenientes de vazamentos de produtos tóxicos e inflamáveis, na qual existe uma tabela específica para distâncias de separação em função da quantidade de hidrogênio armazenado.

2.1. Considerações gerais sobre acidentes

No dia a dia das empresas, as seguintes constatações têm sido verificadas e se tornam cada vez mais evidentes:

- **Acidentes podem ser evitados;**
- **Para um grande acidente ocorrer, em geral, é necessário um encadeamento de fatos ou ações;**
- **A responsabilidade sobre a prevenção ou ocorrência de acidentes recai sobre toda equipe.**

Mesmo grandes empresas ou empreendimento estão sujeitos a acidentes. Mas é importante ressaltar que os acidente de maior magnitude ocorrem em função de um encadeamento de fatos.

Acidentes impactantes podem acontecer em diversas situações e nos mais diversos tipos de atividade humana. A Figura 2 apresenta alguns exemplos de acidentes importantes que permanecem na memória das pessoas, apesar do longo tempo decorrido. Em cima, à esquerda, a foto do acidente ocorrido com o dirigível alemão de passageiros LZ 129 Hindenburg, em 1937, em Nova Jersey, EUA.

Esse dirigível foi o maior objeto voador já construído, com 245 m de comprimento, e continha cerca de 18 toneladas de hidrogênio utilizado para sua flutuação no ar. Durante a tentativa de atracar com seu mastro de amarração na Estação Aérea Naval de Lakehurst, iniciou-se um incêndio na parte traseira da aeronave que caiu no solo e foi consumido pelas chamas em poucos minutos.

À direita, o acidente nuclear da Usina Nuclear de Three Mile Island, em 1979, Pensilvânia, EUA, provocado por uma combinação de erros humano e técnico, que levou ao desenvolvimento de novos métodos para mitigação de acidentes nucleares. As duas fotos abaixo são do acidente provocado pelo navio petroleiro, *Exxon Valdez*, em 1989 no Alasca, que ganhou notoriedade internacional devido à grande extensão do dano ambiental provocado pelo vazamento de 250 mil toneladas de petróleo bruto no mar, atingindo cerca de 1 300 quilômetros de costa e provocando a morte de milhares de aves, peixes e mamíferos marinhos.

É importante também lembrar que a responsabilidade sobre a prevenção ou sobre a ocorrência de acidentes, recai sobre toda a equipe técnica. Ninguém pode se eximir da responsabilidade da prevenção de acidentes.

Grandes Acidentes

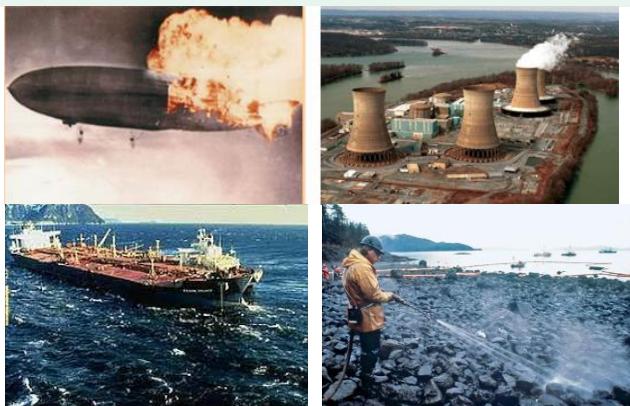


Figura 2: Grande acidentes. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Uma forma didática de classificar os acidentes é por meio de uma pirâmide. Na base da pirâmide estão os “incidentes”, que ocorrem em maior número e com menor severidade. Eles estão relacionados a não-conformidades, atos ou condições não seguras.

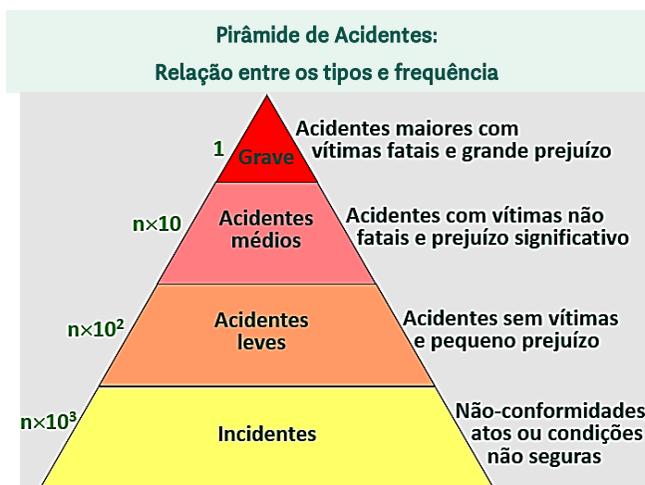


Figura 3. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Por exemplo, uma tomada elétrica que está com mau contato, apresentando faíscas ou temperatura elevada quando conectada a algum equipamento. Ou um piso que costuma ser lavado em horário de grande fluxo de funcionários. Essas condições não seguras poderiam ser facilmente corrigidas. Uma camada acima estão os “acidentes leves”, que podem ser atribuídos a acidentes sem vítimas e pequeno prejuízo

Classifica-se como “acidentes médios”, aqueles com vítimas não fatais e prejuízo significativo. Já os acidentes graves são acidentes maiores, com vítimas fatais e grande prejuízo. Pode-se considerar que, para cada acidente grave acontecer, teriam ocorrido $nx10$ acidentes médios, $nx10^2$ acidentes leves, $nx10^3$ incidentes (não conformidades), onde o número “n” varia de acordo com tipo de atividade, tipo de indústria, quantidade de trabalhadores, dentre outros fatores. Portanto, pode-se considerar que a melhor forma de prevenir acidentes de maior gravidade é por meio de uma atuação efetiva para prevenir ou corrigir as não conformidades ou condições não seguras, evitando assim que sejam atingidas as camadas mais altas da pirâmide de acidentes.

Por exemplo, no caso dos gases, considera-se uma “não conformidade” quando um vazamento é identificado. Se o vazamento for de pequena magnitude, é possível programar uma manutenção corretiva ou preventiva para resolver o problema. Mas esse ponto de vazamento deve ser identificado, notificado e, dependendo do caso, a área deverá ser isolada. Quando se tratar de um vazamento significativo, pode ser necessária uma ação imediata para sua correção, o que pode implicar na interrupção das atividades daquele setor ou até mesmo de toda a planta.

Uma abordagem moderna e interessante para entender essa questão é por meio da matriz de risco, da *IEC 61508 – Functional Safety*, que trata da segurança funcional. A tabela apresentada na Figura 4 foi elaborada com base na norma mencionada e em outras tabelas similares existentes.

Matriz de Risco baseada na IEC 61508 – *Functional Safety* e na literatura

Matriz de Risco			Severidade das consequências do evento perigoso			
			Insignificante	Marginal	Crítica	Catastrófica
Frequência	Probabilidade de falha	Fator de Redução de Risco	Lesões leves	Lesões graves em uma ou mais pessoas	Perda de uma vida	Perda de múltiplas vidas
Frequente	$> 10^{-3}$	$< 1\ 000$	Indesejável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável
Provável	10^{-3} 10^{-4}	$1\ 000$ $10\ 000$	Tolerável	Indesejável	Inaceitável	Inaceitável
Ocasional	10^{-4} 10^{-5}	$10\ 000$ $100\ 000$	Tolerável	Tolerável	Indesejável	Inaceitável
Remoto	10^{-5} 10^{-6}	$100\ 000$ $1\ 000\ 000$	Aceitável	Tolerável	Tolerável	Indesejável
Improvável	10^{-6} 10^{-7}	$10\ 000\ 000$	Aceitável	Aceitável	Tolerável	Tolerável
Muito improvável	$\leq 10^{-7}$	$\geq 10\ 000\ 000$	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Aceitável

Figura 4. Fonte: Newton Pimenta, baseado na IEC 61508 – *Functional Safety* e na literatura.

As três colunas da esquerda da Matriz de Risco estão relacionadas às frequências dos eventos perigosos. Por exemplo, um evento perigoso é considerado Frequente quando a Probabilidade de Falha é maior que 10^{-3} , ou o Fator de Redução de Risco é menor do que 1 000, ou seja, se um evento perigoso ocorrer uma ou mais vezes a cada 1 000 vezes (ou menos) que um determinado procedimento é executado.

De maneira similar, a frequência do evento perigoso é considerada Provável se ocorrer uma ou mais vezes a na faixa de 1 000 ou 10 000 atuações e assim sucessivamente, até se chegar a frequência Muito Improvável, em que um evento perigoso ocorre uma vez (ou menos) a cada 10 milhões de vezes em que um determinado procedimento é executado.

Na matriz de risco, também se considera a severidade das consequências de eventos perigosos. A severidade é considerada Insignificante quando as consequências estiverem relacionadas a lesões leves. A severidade será Marginal quando ocorrerem lesões graves em uma ou mais pessoas; severidade Crítica, quando ocorrer a perda de uma vida; e será Catastrófica quando ocasionar a perda de múltiplas vidas.

Mesmo que a consequência do evento perigoso seja Insignificante, recomenda-se que o incidente seja reportado a fim de identificar e enumerar as não-conformidades. Dessa forma, elas poderão ser corrigidas antecipadamente, diminuindo o risco de incidentes relacionados.

Para dar um exemplo sobre a frequência e severidade de incidentes, pode-se utilizar um fato corriqueiro em ambientes industriais e até mesmo domésticos: a lavagem de um piso.

Se, ao executar essa atividade num determinado local, uma pessoa escorregar e sofrer lesões leves em menos de 1 000 lavagens do piso, esse evento perigoso poderá ser classificado Indesejável, pois é considerado Frequente, embora com severidade Insignificante. A severidade seria Tolerável caso uma pessoa sofresse lesões leves na faixa de 1 000 a 9 999 lavagens desse piso. E esse evento perigoso só atingiria o nível Aceitável se ocorresse uma vez a cada 99 999 lavagens do piso ou mais.

Nesse contexto, é recomendável tomar medidas preventivas, tais como: sinalizar adequadamente o local com placas de “Cuidado! Piso escorregadio!”; adequar o horário de limpeza do piso para quando a circulação de pessoas no local for menor; substituir o piso por um material menos escorregadio etc. Todas essas providências poderiam contribuir para corrigir essa não-conformidade, diminuindo a frequência e severidade dos eventos perigosos durante a lavagem desse local.

Eventos perigosos classificados com severidade Crítica ou Catastrófica constituem situações em que pode ocorrer a perda de uma ou mais vidas. Tais eventos são considerados Aceitáveis somente se ocorrerem uma vez em mais de 10 milhões vezes em que a atividade é executada.

Incidentes e/ou Acidentes (IEC 61508 – Funcional Safety)



Figura 5. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

A matriz de risco é uma ferramenta muito interessante e é recomendável que os eventos perigosos se mantenham sempre dentro no nível Aceitável. É preciso considerar que, em geral, quanto mais seguro é o ambiente de trabalho ou quanto menor o número de falhas que são toleradas, mais caro o sistema se torna. Portanto, é importante encontrar um equilíbrio entre esses aspectos, caso contrário muitas atividades poderão se tornar inviáveis pelo elevado custo dos serviços e produtos decorrentes das exigências com a segurança.

De acordo com a norma IEC 61508, incidentes muito frequentes, são indesejáveis e aumentam a probabilidade de ocorrência de acidentes de maior severidade, que podem escalar para o nível Inaceitável.

O IEC 61508 é o padrão internacional para sistemas elétricos, eletrônicos e programáveis relacionados à segurança eletrônica. Embora a norma faça referência apenas a sistemas de segurança relacionados a componentes eletrônicos e elétricos (tradução livre), a segurança funcional só pode ser alcançada quando todas as funções do sistema são executadas de maneira correta, conforme previsto, inclusive pelos componentes mecânicos.

Incidentes e/ou Acidentes (IEC 61508 – Funcional Safety)

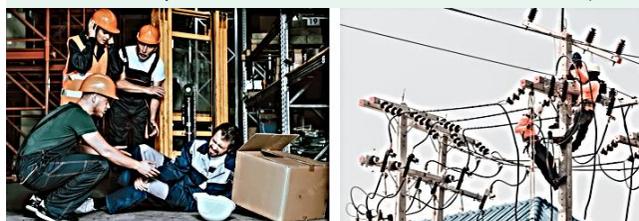


Figura 6. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Não adianta ter um sistema altamente sofisticado de segurança baseado em sensores, sistemas eletrônicos programados e outros elementos, se os sistemas mecânicos não estiverem em conformidade e não corresponderem a esse nível de segurança. O sucesso em atingir o nível pré-estabelecido de segurança depende da correta atuação de todos os componentes do sistema, quer sejam elétricos, eletrônicos ou mecânicos.

Essa norma define o conceito de Nível de Integridade de Segurança (SIL - *Safety Integrity Level*), que é uma medida de desempenho do sistema em termos da probabilidade de falha, como discutido anteriormente.

Incidentes e/ou Acidentes (IEC 61508 – Funcional Safety)



Figura 7.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Há quatro níveis de SIL (Nível de Integridade de Segurança), sendo nível 1 o de maior probabilidade de falha e o nível 4 o de menor. Na prática, sistemas SIL 4 são muito caros de serem implementados e os projetos classificados nessa categoria normalmente precisam ser revistos para reduzir as exigências de segurança.

Uma informação importante, é que produtos ou componentes individuais não possuem classificação SIL e, sim, podem ser adequados para utilização em ambientes SIL específicos.

Uma forma de contornar o uso de um componente que apresenta maior probabilidade de falha é utilizá-lo em duplicata ou em associação com outros componentes. Por exemplo: ao invés de utilizar uma válvula reguladora de pressão pode se utilizar duas válvulas reguladoras de pressão interconectadas de tal forma que se a primeira falhar, a segunda assume a função.

Isso é bastante comum em sistemas que envolvem o uso de hidrogênio, onde é prática usual empregar dois conjuntos de válvulas contendo, por exemplo, os seguintes componentes: válvula manual, válvula pneumática, válvula reguladora de pressão e válvula de alívio de pressão. Ambos os conjuntos de válvulas devem estar conectadas a um sistema de gerenciamento que permita a atuação e sinalização em caso de falha.

Caso o sistema de gerenciamento eletrônico detecte uma falha em um dos ramos do sistema, a válvula pneumática fará a interrupção do fluxo de gás e o outro ramo da tubulação será utilizado. Essa abordagem representa uma maneira altamente eficaz de reduzir custos e aprimorar a segurança do sistema.

E quanto aos acidentes no trabalho com gases?

No trabalho com gases, a situação não é diferente. Os acidentes podem ser evitados, e é surpreendente como um pequeno número de regras básicas pode tornar o trabalho muito mais seguro.

A Figura 8, à esquerda, apresenta o resultado de um acidente envolvendo GNV (gás natural veicular). O proprietário deste veículo decidiu aumentar a autonomia utilizando um botijão de GLP (gás liquefeito de petróleo), que opera a uma pressão consideravelmente mais baixa.

Acidentes com Gases:



Um pequeno número de regras básicas podem tornar o trabalho com gases bastante seguro

Figura 8: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Enquanto a pressão máxima de trabalho dos tanques de GNV é de 250 bar (pressão máxima de abastecimento, ABNT NBR NM ISO 11439), o botijão de GLP opera normalmente na faixa de 4 a 7 bar, que é a pressão de vapor da mistura de propano e butano que se encontra dentro do botijão, à temperatura ambiente. Esse tipo de cilindro é submetido a testes de vazamento até 34 bar, e a testes de ruptura de até 50 bar (ABNT

Pois bem, durante o abastecimento de GNV houve uma grande explosão que destruiu completamente o veículo e parte das instalações do posto de abastecimento. Pelo que se pode observar, o cilindro de GLP se partiu ao meio, na região da costura entre as partes superior e inferior, enquanto o cilindro de GNV (cor rosa) permaneceu íntegro. Não são observados sinais de combustão em nenhum dos componentes ou materiais do veículo, podendo-se concluir que a explosão não foi devida à detonação da mistura de GLP e ar, mas ao rompimento mecânico por excesso de pressão no botijão. Atos dessa natureza constituem crime, pois esse tipo de instalação deve ser realizado por uma empresa qualificada, certificada pelo INMETRO, e o veículo deve passar por uma inspeção veicular anual para obtenção do licenciamento.

Acidentes dessa natureza aumentam a percepção de risco com relação à utilização de gases comprimidos como combustível veicular. No entanto, o número de acidentes em veículos com GNV pode ser considerado baixo, e as explosões ou incêndios são geralmente causadas por: instalação incorreta; uso de componentes não homologados; ou manutenção inadequada.

2.2. Classificação dos gases com relação aos riscos para a saúde humana

É importante lembrar que a manipulação de todos os gases apresentam perigos que devem ser considerados e controlados. Chega a ser surpreendente como a adoção de alguns conceitos básicos podem contribuir para reduzir o risco no trabalho com gases.

Algumas recomendações gerais que devem ser observadas ao manipular gases são as seguintes:

- Todos os gases são asfixiantes, com exceção do ar atmosférico e o oxigênio.
- O risco de asfixia ocorre sempre que o ar atmosférico é deslocado ou diluído por outro gás, tornando o oxigênio disponível insuficiente para manutenção da vida.
- Alguns gases são inodoros e incolores e sua presença não pode ser percebida pelas pessoas. Quando os sintomas se manifestam pode ser tarde demais.
- As pessoas, de maneira geral, podem apresentar tolerâncias muito distintas em relação aos diferentes gases.

Didaticamente, os gases podem ser divididos em três categorias: gases não inflamáveis e não tóxicos, gases inflamáveis e gases tóxicos. A Figura 9 apresenta os principais sintomas e perigos relacionados às três categorias de gases.

A exposição a uma atmosfera com gases não inflamáveis e não tóxicos pode levar inicialmente à sonolência, seguida de perda de consciência e, finalmente, à asfixia e morte, caso a pessoa não seja retirada desse ambiente. Os gases tóxicos podem causar intoxicação, distúrbios psicomotores temporários ou permanentes e envenenamento, podendo resultar em morte por envenenamento.

Os gases inflamáveis, como o hidrogênio, podem formar misturas inflamáveis com o ar, ou atmosferas explosivas, que podem sofrer combustão ou detonação, podendo causar queimaduras, surdez, invalidez e até a morte.

Alguns gases são inodoros e incolores, como é o caso do hidrogênio ou o nitrogênio do ar, o que significa que sua presença não pode ser percebida pelas pessoas ou, quando os sintomas se manifestam, pode ser tarde demais.

Vazamento de gás: possíveis consequências	
Tipos de gás	Efeitos
Gases não inflamáveis e não tóxicos	<ul style="list-style-type: none"> ☹ Sonolência ☹ Perda dos sentidos ☹ Morte por asfixia
Gases Tóxicos	<ul style="list-style-type: none"> ☹ Intoxicação; ☹ Distúrbios psico-motores (T ou P) ☹ Morte por envenenamento
Gases Inflamáveis	<ul style="list-style-type: none"> ☹ Misturas inflamáveis (C e D) ☹ Ferimentos (queimaduras, surdez, invalidez) ☹ Morte por choque ou queimadura

Figura 9.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

A manipulação de gases não inflamáveis e não tóxicos pode levar à falsa sensação de segurança. Num relato, ouvido nos tempos de universidade, um técnico reportou que estava trabalhando num laboratório onde havia uma pequena sala que abrigava *dewars* (garrafas térmicas) de nitrogênio líquido para conservação de amostras à temperatura criogênica.

Ao fazer esforço para levantar um dos *dewars* ele perdeu os sentidos. Por sorte, ele caiu para fora da sala e se recuperou rapidamente. Se ele tivesse caído com a cabeça dentro daquela pequena sala, provavelmente não teria sobrevivido para contar essa história. Ao evaporar, o nitrogênio líquido se acumula ao nível do solo, pois à baixa temperatura sua densidade é maior do que a do ar atmosférico.

Assim sendo, a atmosfera nessa região tem uma baixa concentração de oxigênio e, certamente, vai levar à asfixia e à morte caso a pessoa não seja atendida a tempo. Esse breve relato corrobora a informação de que todos os cuidados devem ser tomados na manipulação de gases com relação à asfixia. E também tem um vínculo com o conceito de Espaços Confinados, assunto que será tratado mais adiante.

Os gases tóxicos são ainda mais perigosos pois, mesmo em baixas concentrações, poderão causar intoxicação, levando a distúrbios

psicomotores temporários ou permanentes e, em última instância, à morte por envenenamento.

Quanto aos gases inflamáveis, em um primeiro momento, eles podem formar misturas inflamáveis, ou atmosferas explosivas, levando a incêndios e detonações. Isso pode resultar em ferimentos, queimaduras, surdez, invalidez temporária ou permanente e, finalmente, à morte por choque ou queimadura. Portanto, é essencial tomar cuidado especial com essas misturas inflamáveis, como no caso do hidrogênio.

Independentemente do tipo de gás, as pessoas podem ficar expostas a condições que vão desde a asfixia até a morte. As medidas preventivas contra asfixia são:

- Evitar a manipulação de gases em recintos fechados;
- Deve-se ventilar adequadamente o ambiente com ar atmosférico de boa qualidade, sem contaminação de outros gases;
- Qualquer descarte de gases deve ser conduzido para fora da sala como, por exemplo, ao purgar tubulações ou reservatórios de gás;
- Não trabalhar sozinho, uma vez que as pessoas apresentam diferentes tolerâncias quando expostas aos gases;
- Só devem permanecer aberto o cilindro de gás que está realmente em uso, caso contrário ele deve ser fechado. Essa é uma forma eficaz de evitar vazamento do gás armazenado no cilindro. Por exemplo, um cilindro que está sendo utilizado para atuar válvulas pneumáticas de segurança deve permanecer aberto; um cilindro de uso esporádico deve permanecer fechado quando não estiver em uso.
- Realizar verificações periódicas de vazamento é extremamente importante. Isso é especialmente recomendado nos sistemas que utilizam hidrogênio, pois o tamanho reduzido das moléculas desse gás possibilita o surgimento de vazamentos. Recomenda-se que sejam realizados ensaios de vazamento com nitrogênio gasoso antes do uso de hidrogênio. As tubulações e sistemas de gases estão sujeitos a variações de pressão e temperatura durante a operação e ao longo do dia, o que causa dilatação e contração dos equipamentos, podendo levar ao surgimento de vazamentos. Portanto, é necessário realizar ensaios de vazamento em todo o sistema periodicamente.

Uma regra de ouro que deve ser seguida à risca é que na ausência de ventilação, a operação não deve ocorrer de forma alguma. A ventilação pode ser natural ou artificial e deve estar prevista no projeto de operação da planta.

A ventilação artificial pode ser realizada com dispositivos tais como exaustores ou ventiladores. Recomenda-se que esses equipamentos sejam ligados no início da operação, antes de qualquer outro. Se ocorrer uma falha na ventilação, a operação deve ser imediatamente interrompida. Se a ventilação faz parte do sistema planejado e não está funcionando adequadamente, a operação não deve prosseguir. A segurança em relação à ventilação deve ser sempre uma prioridade.

No que diz respeito às medidas preventivas contra gases tóxicos, é importante ressaltar que eles representam um risco maior, pois mesmo em baixas concentrações, a inalação pode comprometer a saúde ou levar à morte.

Um exemplo clássico disso é o envenenamento e morte de pessoas em garagens fechadas devido à presença do monóxido de carbono. Por esse motivo, as garagens devem ser bem ventiladas, o que pode ser um desafio em países de clima frio.

Se um motor à combustão for operado em uma garagem fechada ou mal ventilada, haverá um aumento na concentração de monóxido de carbono. Esse gás tem uma afinidade com a hemoglobina do sangue que é até 250 vezes superior à do oxigênio. Portanto, mesmo que a concentração do monóxido de carbono no ar seja comparativamente menor que a do oxigênio, ele se ligará preferencialmente à hemoglobina, resultando na redução da respiração celular e, eventualmente, na asfixia e morte.

Isso pode ocorrer mesmo em ambientes parcialmente confinados ou com ventilação deficiente. Há vários relatos de intoxicações e óbitos provocados pela utilização de compressores com motor à combustão durante a pintura de galpões parcialmente fechados. Isso mostra a importância de garantir uma ventilação adequada durante a manipulação ou exposição aos gases. Adicionalmente, deve-se ficar sempre atento aos sintomas de falta de ar, dificuldade em respirar, dor de cabeça, tontura etc.



Por meio da:



Coordenação do curso:



Com relação às tecnologias do hidrogênio, é necessário lembrar que o gás de síntese produzido a partir dos processos termoquímicos de reforma de etanol, metano, biogás e outros combustíveis pode conter altas concentrações de monóxido de carbono, implicando em elevados riscos à saúde humana. Portanto, os cuidados com relação à presença do monóxido de carbono devem ser tomados por todos aqueles que trabalham com a reforma de combustíveis. A segurança deve ser prioridade em todas as situações envolvendo gases tóxicos.

Algumas informações importantes sobre produtos químicos estão disponíveis em diversas fontes confiáveis.

O NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) constitui uma importante fonte de informações sobre saúde ocupacional, disponibilizando informações sobre cerca de 800 substâncias no próprio site, em arquivo PDF e em um aplicativo para celular (guia de bolso ou *pocket guide*).

A OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) também dedica atenção especial à saúde ocupacional em nível nacional (EUA) e fornece informações e diretrizes importantes de livre acesso.

No site da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), é possível encontrar diversas informações sobre segurança, atendimento de emergências e toxicidade relacionados a gases e substâncias químicas frequentemente transportadas e utilizadas na indústria.

Além disso, todas as empresas que lidam com gases disponibilizam Ficha de Dados de Segurança – FDS de produtos químicos (*Safety Data Sheet*). Recomenda-se fortemente que essas fichas de segurança sejam consultadas, especialmente a do hidrogênio. Elas contêm diversas recomendações importantes para a prevenção de acidentes, abordando questões como asfixia, combustão, detonação, cuidado com os cilindros de gás, medidas emergenciais e muito mais. A consulta às FDS é altamente recomendada para garantir a segurança no manuseio de substâncias químicas.

As orientações da NIOSH e OSHA não se aplicam apenas ao ambiente de trabalho, podendo ser úteis para obter informações sobre várias substâncias de uso doméstico.

Os limites de exposição às substâncias químicas apresentados nas fichas da NIOSH são definidos e apresentados a seguir:

- IDHL, limite imediatamente perigoso para vida ou saúde, NIOSH
- REL, limite de exposição recomendado, NIOSH;
- PEL, limite de exposição permitido, OSHA.
- TWA, concentração média ponderada pelo tempo de exposição para a jornada de 8h/dia, 40h/semana.

Em geral, os limites da NIOSH e OSHA apresentam pequenas diferenças devido aos diferentes critérios adotados para sua determinação. Mas ambos têm o objetivo principal de proteger a saúde ocupacional dos trabalhadores, assegurando que a exposição a substâncias químicas seja mantida em níveis seguros.

Informações sobre Produtos Químicos e Gases

NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards		Carbon monoxide	
<p>Introduction</p> <p>Search the Pocket Guide</p> <p>Chemical Names, Synonyms and Trade Names</p> <p>CAS Numbers</p> <p>RTECS Numbers</p> <p>Appendices</p>		<p>Synonyms & Trade Names Carbon oxide, Flue gas, Monoxide</p>	
<p>CAS No. 630-08-0</p>	<p>RTECS No. FG3500000</p>	<p>DOT ID & Guide 1016119* 9202 168*(cryogenic liquid)</p>	
<p>Formula CO</p>	<p>Conversion 1 ppm = 1.15 mg/m³</p>	<p>IDLH 1200 ppm See: 630080</p>	
<p>Exposure Limits NIOSH REL : TWA 35 ppm (40 mg/m³) C 200 ppm (229 mg/m³) OSHA PEL : TWA 50 ppm (55 mg/m³)</p>		<p>Measurement Methods NIOSH 6504*; OSHA ID209*, ID210* See: NMAM or OSHA Methods*</p>	
<p>Physical Description Colorless, odorless gas. [Note: Shipped as a nonliquefied or liquefied compressed gas.]</p>			
<p>Exposure Routes Inhalation, skin and/or eye contact (liquid)</p>			
<p>Symptoms headache, tachypnea, nausea, lassitude (weakness, exhaustion), dizziness, confusion, hallucinations; cyanosis; depressed S-T segment of electrocardiogram, angina, syncope</p>			

Figura 10. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

A título de exemplo, a Figura 10 apresenta uma ficha de informações da NIOSH sobre o monóxido de carbono, na qual existem muitos dados relevantes sobre esse gás, sintomas decorrentes da exposição, equipamentos de proteção recomendados etc.

Conforme estabelecido pelo NIOSH, o TWA para o monóxido de carbono é de 40 mg/m³ (equivalente a uma fração volumétrica de 0,0035% ou 35x10⁻⁶), concentração que não deve ser excedida para garantir a segurança dos trabalhadores. Por outro lado, a OSHA (Administração de Segurança e Saúde Ocupacional) estabelece um limite de 50 mg/m³ (fração volumétrica de 0,0043% ou 43x10⁻⁶) para o monóxido de carbono.

Um dado muito importante IDLH (Imediatamente Perigoso à Vida ou à Saúde) que para o monóxido de carbono está definido em 1200 ppm (partes por milhão), ou seja, uma fração volumétrica de 0,12% ou 12x10⁻⁴. A exposição a essa concentração de monóxido de carbono é imediatamente perigosa à vida ou à saúde, podendo levar à morte. É fundamental respeitar esses limites e os tempo de exposição pré-determinados para assegurar a saúde e a segurança dos trabalhadores.

A seguir, menciona-se o hidróxido de potássio, que é uma substância utilizada em eletrolisadores alcalinos. Embora não seja uma substância inflamável, é altamente reativa e, quando entra em contato com a água, pode gerar calor suficiente para iniciar a combustão de outros materiais.

Informações sobre Produtos Químicos e Gases

NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards					
Search the Pocket Guide					
Enter search terms separated by spaces. <input type="text"/> <input type="button" value="SEARCH"/>					
Potassium hydroxide					
Synonyms & Trade Names Caustic potash, Lye, Potassium hydrate					
CAS No. 1310-58-3	RTCS No. IT2100000	DOT ID & Guide 1813 154-# (dry, solid) 1814 154-#(solution)			
Formula KOH	Conversion	IDLH N.D. See: IDLH INDEX			
Exposure Limits NIOSH REL : C 2 mg/m ³ OSHA PEL 1: none			Measurement Methods NIOSH 2401 % See: NIOSH or OSHA Methods#		
Physical Description Odorless, white or slightly yellow lumps, rods, flakes, sticks, or pellets. [Note: May be used as an aqueous solution.]					
MW: 56.1	BP: 2415°F	MLT: 716°F	Sol(59°F): 107%	VP(1317°F): 1 mmHg	IP: ?
Sp.Gr: 2.04	FLP: NA	UEL: NA	LEL: NA		
Noncombustible Solid; however, may react with H ₂ O & other substances and generate sufficient heat to ignite combustible materials.					

Figura 11.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

2.3. Técnicas de checagem de vazamentos

Há diversas técnicas que podem ser utilizadas para a detecção de vazamentos e a seguir serão apresentadas algumas que são mais utilizadas.

A primeira técnica, bastante empregada, está baseada na formação de bolhas. Para tanto, pode-se utilizar uma solução composta por 50% de etanol e 50% de água em fração volumétrica ou soluções comerciais específicas para essa finalidade. Quando a solução é aplicada na área de vazamento, haverá a formação de bolhas, que indicarão o ponto de vazamento e uma estimativa aproximada de sua dimensão. Recomenda-se secar a área após a aplicação, repetindo algumas vezes o procedimento, uma vez que o ar presente em algum ponto da conexão pode causar bolhas, mesmo na ausência de vazamento real.

Recomenda-se atenção ao aplicar a solução, pois, no caso de vazamento maiores, poderá não haver formação de bolhas devido à vazão elevada do gás. Para vazamentos muito pequenos, pode-se utilizar uma solução composta por 25% de detergente líquido neutro e 75% de água. A aplicação pode ser realizada com uma seringa, desde que a parte cortante da agulha seja removida para evitar ferimentos, ou com uma pisseta (frasco plástico com uma cânula) contendo a solução. Vazamentos menores resultarão na formação de um colar de bolhas ao redor da área afetada, tornando essa técnica eficaz para a detecção de pequenos vazamentos em várias conexões.

A segunda técnica é a de queda de pressão, mais apropriada para tubulações extensas e reservatórios. Ela consiste em pressurizar o sistema e isolá-lo da fonte de gás para verificar a queda de pressão. Essa queda pode ocorrer em minutos ou ser monitorada por até 24 horas, seguindo normas específicas. É importante medir as pressões e temperaturas inicial e final e utilizar a equação do gás ideal – $p_i/T_i = p_f/T_f$ ou $p_f = (p_i T_f)/T_i$ – lembrando que as temperaturas devem ser expressas em Kelvin e as pressões absolutas. Uma pressão final menor indica a presença de vazamento naquele setor, sendo possível estimar sua magnitude. Uma pressão final maior indica que há alguma válvula dando passagem de uma parte do sistema que se encontra a pressão mais elevada.

O detector de vazamento de hélio é um espectrômetro de massas que identifica a presença de hélio. É utilizado principalmente em sistemas de vácuo, mas pode ser empregado para detectar vazamentos em sistemas pressurizados. No caso de sistemas de vácuo, o reservatório e a linha são conectados ao espectrômetro e todo o conjunto é evacuado. O hélio é aplicado externamente com uma sonda nos possíveis pontos de vazamento. Se houver vazamento, o hélio chegará ao espectrômetro de massas que irá gerar um sinal sonoro ou visual proporcional ao tamanho do vazamento. Esse equipamento é eficaz, porém caro e geralmente não é portátil.

Devido ao elevado custo do hélio, para vasos pressurizados têm-se utilizado uma mistura de nitrogênio e hélio (5% em fração molar, por exemplo). O reservatório é pressurizado com essa mistura gasosa e a sonda estará conectada ao sistema de vácuo e ao espectrômetro de massas. Após o ensaio, a mistura gasosa pode ser comprimida e reutilizada, o que torna o método economicamente viável.

Dispositivos portáteis de detecção de gás, conhecidos como *Leak Detectors*, são especialmente úteis para localizar vazamentos de hélio ou hidrogênio em conexões e áreas de solda de sistemas pressurizados. A elevada condutividade térmica desses gases em relação ao ar, e a maioria dos demais gases, permite a detecção eficaz de vazamentos pequenos por meio desses dispositivos portáteis.

Resumo de Técnicas de checagem de vazamentos

Técnicas de formação de bolhas

1. Solução de 50% Etanol + 50% Água (L/L):

- Aplicar e verificar formação de bolhas;
- Enxugar com papel e reaplicar algumas vezes;
- Indicado para vazamentos “maiores”;

2. Solução 25% detergente liq. neutro + 75% Água:

- Aplicar e verificar formação de bolhas
- Indicado para vazamentos “menores”

Técnicas de pressão e detecção

3. Queda de pressão

- Pressurizar o sistema e isolá-lo da fonte de gás
- Verificar queda de pressão após algum tempo (alguns minutos a 24 h);
- Medir pressões e temperaturas, inicial e final, e aplicar na equação do gás ideal: $p_i/T_i = p_f/T_f$

4. Leak Detector

- **Espectrômetro de massas para detectar He**, que pode ser aplicado

- Lavar com água para evitar oxidação (até aço inox).
- Equipamentos portáteis para detecção de He ou H₂ (\$), com detector por condutividade térmica externamente ao sistema evacuado (\$\$\$);

Figura 12: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Outro método de detecção de vazamentos envolve o uso de sensores portáteis projetados para gases e vapores orgânicos combustíveis. Esses sensores podem ser do tipo estado sólido ou fotoionização. Embora possam ser calibrados para detectar gases específicos, eles não têm a capacidade de identificar qual gás está presente. Além disso, dependendo do sensor, pode ocorrer interferência cruzada entre diferentes gases combustíveis. Portanto, é importante ter cuidado ao interpretar os resultados desses sensores, principalmente quando há mais de um componente presente, gases ou vapores, na atmosfera gasosa que se pretende controlar.

Os sensores ultrassônicos portáteis ou estacionários são capazes de identificar o som proveniente de vazamentos de gás. Embora possam ser utilizados para a maioria dos gases, sua utilização para identificar vazamentos de hidrogênio apresentam alguns desafios em termos de pressão mínima necessária (>10 bar), frequência da onda sonora, presença de ruídos, tamanho do vazamento e distância do sensor ao ponto de vazamento. Recomenda-se selecionar cuidadosamente o fornecedor e o produto, bem como realizar ensaios de campo no local em que o sensor ultrassônico de vazamentos será utilizado.

Assim como tipos de sensores mencionados anteriormente, eles também não são capazes de identificar o gás que está vazando.

Embora o mesmo princípio de operação seja utilizado nos equipamentos para identificar vazamentos em salas ou ambientes em instalações de ar condicionado, a identificação de vazamentos de hidrogênio exigem equipamentos bem mais sofisticados.

Técnicas de checagem de vazamentos: sensores portáteis



5. Sensores para gases e vapores orgânicos e combustíveis:

- Sensores de estado sólido ou PID (fotoionização)
- Podem ser calibrados para cada gás embora não possam identificá-los

6. Sensores ultrassônicos:

- Equipamentos portáteis para qualquer gás, mas sem identificá-los
- Preços mais acessíveis
- Testes com H₂ não foram bons

Figura 13.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

3. Condições para surgimento e manutenção de fogo

Para possibilitar a combustão, três componentes são fundamentais: o combustível, o comburente e uma fonte de ignição. Contudo, há uma quarta condição indispensável para uma chama ou fogo sejam sustentáveis: a ocorrência de reações em cadeia.

Condições necessárias para haja fogo

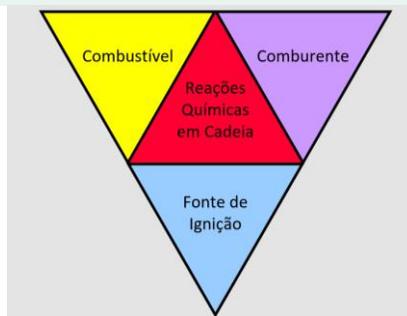


Figura 14.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Um exemplo prático é o acionamento de um fogão a gás doméstico. Se o queimador não estiver bem encaixado, a mistura entre combustível e comburente não será bem-feita, inviabilizando a manutenção das reações em cadeia e, conseqüentemente, da chama. Nesse caso, ao acionar o acendimento elétrico, pode-se ouvir um espocar (pequeno estouro) porque

houve uma deflagração. No entanto, a chama não se sustenta. Para que as reações em cadeia ocorram é necessário reposicionar corretamente o queimador para que a mistura do GLP com o ar atmosférico seja homogênea, possibilitando a manutenção da chama.

O conceito do tetraedro de fogo oferece uma visualização clara das quatro condições necessárias para a manutenção de uma chama, combustão ou detonação: o combustível, o comburente, uma fonte de ignição e, no centro, as reações em cadeia.

No contexto do ar atmosférico, deve-se ressaltar que este contém oxigênio, atuando como comburente, e nitrogênio como gás inerte. Assim, todas as combustões que ocorrem em ambiente atmosférico envolvem misturas desses componentes.

As fontes de ignição são diversas e podem incluir faíscas elétricas, eletricidade estática, fagulhas, chama aberta, aquecimento e choque mecânico. Dependendo da presença de combustível e comburente, de sua proporção, do grau de confinamento da mistura gasosa e da quantidade de energia da fonte de ignição, o resultado pode ser uma combustão ou detonação.



Figura 15.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Contudo, é importante mencionar que a autoignição somente pode ocorrer em misturas explosivas, ou seja, nas quais o combustível está dentro da faixa de inflamabilidade, na presença do oxidante, podendo conter ou não o gás inerte. Nesse caso, existe uma temperatura acima da qual serão

gerados radicais livres em número suficiente para dar início a uma combustão ou detonação. A temperatura de autoignição do hidrogênio é de 500°C (NFPA 325) ou 560°C (Chemsafe). De acordo com explicações, pode-se concluir que um tanque contendo hidrogênio puro não poderá sofrer autoignição.

É importante esclarecer que o fenômeno da autoignição não deve ser confundido com a ignição espontânea, que pode ocorrer quando há vazamentos de hidrogênio para a atmosfera. Nesses casos, a ignição é iniciada pela presença de uma fonte de ignição, que pode ser até mesmo a eletricidade eletrostática de um ser humano. De fato, a energia de ignição do hidrogênio é muito baixa, cerca 0,017 mJ, ou seja, 10 vezes menor que a energia de ignição do metano, por exemplo.

A explosão pode ser definida como o equilíbrio rápido entre um gás a alta pressão e o ambiente que o circunda, com produção de uma onda de choque. Didaticamente, pode-se considerar que há dois tipos de explosão:



Rompimento por pressão, quando ocorre apenas liberação de energia mecânica, acompanhada de uma onda de choque. Neste caso não há a participação de reações químicas, apenas o equilíbrio rápido entre um gás a alta pressão e o ambiente que o circunda.

Com relação ao fenômeno de queima de um combustível, didaticamente pode-se dividi-los em:



Combustão ou deflagração é uma reação controlada, com ocorrência de chama e liberação de energia térmica e radiante. Neste caso a propagação da onda de combustão tem velocidade subsônica;



Detonação é uma reação química muito rápida, com grande liberação de energia mecânica e térmica. A propagação da onda de detonação tem velocidade supersônica.

Figura 16:. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Um exemplo de combustão, com liberação de energia térmica e radiante, é o fogão a gás. Ao se aproximar de um fogão com um dos queimadores

aceso, é possível sentir o calor da chama, enxergá-la, além de escutar o som proveniente da combustão.

Um exemplo de rompimento por pressão é a explosão de uma panela de pressão, que pode ocorrer após um tempo excessivo de cozimento e/ou por entupimento da válvula de saída do vapor.

Exemplos de detonação são a explosão de uma dinamite ou de uma mistura inflamável de gases que se encontra total ou parcialmente confinada.

É importante entender os limites de inflamabilidade do hidrogênio em ar para garantir a segurança durante sua utilização. O gráfico da Figura 17 pode ser utilizado para demonstrar esses limites, levando em consideração a concentração de hidrogênio na mistura no eixo Y e a quantidade de gás diluente no eixo X.

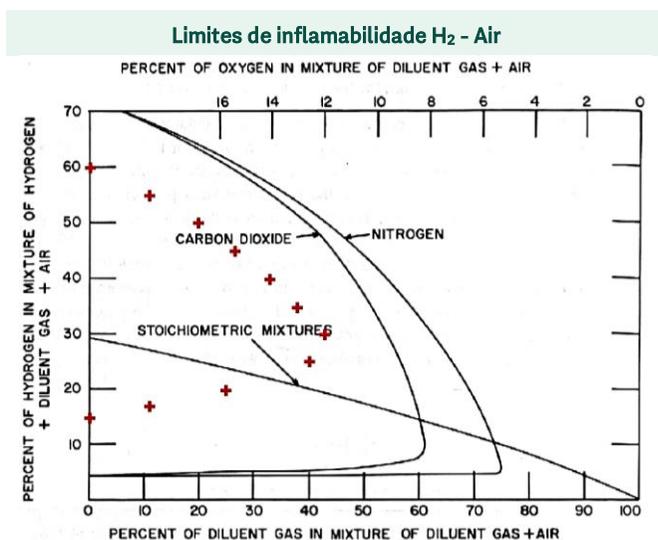


Figura 17.: Fonte: Coward and Jones, Fig.349, ref. 16. Os pontos em cruz foram acrescentados pelo autor e são referentes ao limite de explosividade em presença do nitrogênio como gás diluente.

Para $x=0$, a mistura gasosa contém apenas hidrogênio e ar, sem adição gás inerte diluente. Dessa forma, no eixo y podem ser observados o limite inferior de inflamabilidade do hidrogênio em ar, 4%, e o limite superior de inflamabilidade, 75%, em fração volumétrica. Os pontos em cruz

correspondem à faixa de explosividade e foram acrescentados pelos autores, não fazendo parte do gráfico original. O limite inferior de explosividade da mistura de hidrogênio e ar é 15% e o limite superior de explosividade é 59%. Esses são os limites normalmente encontrados na literatura, mas há dados indicando que em determinadas condições a detonação pode ocorrer para misturas gasosas contendo frações volumétricas de hidrogênio de até 10%. Para tanto, são necessárias algumas condições, tais como: algum grau de confinamento da mistura gasosa, a presença de obstáculos ou espaços com determinadas dimensões.

No gráfico pode-se observar o efeito do dióxido de carbono e do nitrogênio como diluentes da mistura de hidrogênio e ar atmosférico. Fica evidente que uma menor concentração de dióxido de carbono é necessária para tornar inerte a mistura explosiva, cerca de 60%. Utilizando nitrogênio, sua concentração teria que ser superior a 75% para que a mistura explosiva se tornasse inerte.

Pode-se observar também na figura que para uma concentração de oxigênio inferior a 5% a mistura gasosa não é explosiva, pois a quantidade de comburente não é suficiente para possibilitar a combustão. Essa condição pode ocorrer por excesso de hidrogênio, por excesso de gás inerte ou por uma combinação de ambos. Deve-se atentar para o fato que as misturas gasosas com excesso de hidrogênio poderão se tornar explosivas se entrarem em contato com o ar atmosférico. O mesmo não acontece para as misturas gasosas com excesso de gás inerte diluente.

Portanto, é importante conhecer esses limites e as proporções corretas para garantir a segurança na utilização do Hidrogênio Verde.

Considerando que os limites de explosividade do hidrogênio em ar estão entre 15% e 59%, é fundamental evitar que a mistura gasosa chegue a essa composição, pois as consequências podem ser muito severas no caso de uma detonação, devido à onda de choque e à sobrepressão geradas.

Abaixo, podemos ver informações importantes sobre os limites de concentração de hidrogênio e as velocidades de chama na combustão. A velocidade de chama pode chegar a 345 m/s, dependendo da concentração

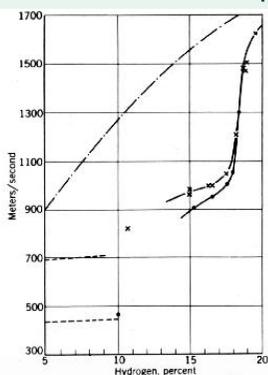
de hidrogênio, e pode chegar a uma velocidade supersônica se a concentração estiver acima de 15%.

É importante lembrar que as chamas não se propagam em concentrações muito baixas de hidrogênio, como até 8%, onde percorreriam uma pequena distância e não alcançariam todo o ambiente. Já em concentrações acima de 15%, a velocidade das chamas pode ser excessivamente alta, o que pode resultar em uma detonação.

Há também um gráfico de queima que mostra que, em experimentos realizados em uma câmara de detonação, as chamas ocorrem com velocidades mais baixas na parte anterior do tubo e evoluem para chamas mais rápidas na parte posterior do tubo, que já podem ser consideradas detonações.

Com 15% de hidrogênio, a velocidade da chama já é acima de 900 m/s, e ela pode aumentar ainda mais de acordo com a concentração de hidrogênio, podendo exceder 2 000 m/s.

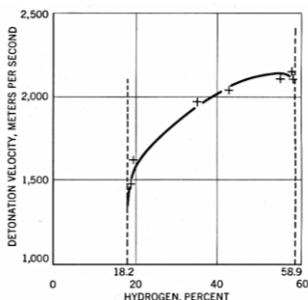
Limites de concentração do H₂ e velocidades de chama para Combustão e Detonação



FENÔMENO	COMBUSTÃO	DETONAÇÃO
Velocidade de chama	< 345 m/s subsônica	> 1 250 m/s supersônica
Limite Inferior (fração molar)	4%	18%
Limite Superior (fração molar)	74%	59%
Observação	H ₂ O interfere na reação de queima	

Curva teórica e resultados experimentais da velocidade de propagação da onda de detonação:

- x parte anterior do tubo
- parte posterior do tubo
- curva teórica



Resultados experimentais: velocidade de propagação da onda de detonação. Fig. 293, Brenton

FENÔMENO	COMBUSTÃO	DETONAÇÃO
Velocidade de chama	< 345 m/s subsônica	1 250 m/s supersônica
Limite Inferior (fração molar)	4%	18%
Limite Superior (fração molar)	74%	59%
Observação	H ₂ O interfere na reação de queima	

Figura 18.: Fonte: Resultados experimentais: velocidade de propagação da onda de detonação. Fig. 293, Brenton

De acordo essa outra referência acima, e baseando-se em resultados experimentais, observa-se que em concentrações entre 18% e 59%, as velocidades podem superar 2 000 m/s. Tal velocidade resulta em uma sobrepressão considerável.

A tabela a seguir indica os danos relacionados à sobrepressão causada por uma explosão. Nesse caso, a sobrepressão corresponde à pressão gerada acima da pressão atmosférica e é geralmente expressa em bar ou hPa (hectopascal).

Probabilidade de danos a estruturas por sobrepressão		
SOBREPRESSÃO		PROBABILIDADE DE DANOS
bar	hPa	
0,020	20	danos ao telhado; 10% vidros quebrados
0,048	48	danos menores às estruturas de casas
0,068	68	demolição parcial casas (s/ cond. morar)
0,156	156	limite inf. p/ danos estruturais severos
0,170	170	50% de destruição de estruturas de tijolos

1 bar = 10⁵ Pa = 1 000 hPa = 100 kPa ~ 10 m coluna d'água = 1 000 cm água

Figura 19.: Agência de Proteção Ambiental, CETESB, SP, Brazil, Norma Técnica P4261/2011

Qual a probabilidade de danos às estruturas por sobrepressão?

Uma pressão muito pequena, de 20 hPa, é suficiente para causar danos à telhados e quebrar cerca de 10% dos vidros. Com 48 hPa, pode haver danos menores estruturas de casas. Já com 68 hPa, temos demolição parcial das casas.

O limite inferior de sobrepressão para causar danos estruturais graves é de 156 hPa. Em tal situação, pode-se observar problemas em vigas, danos em tetos de alvenaria, entre outros. Com uma sobrepressão de 170 hPa, estima-se que 50% das estruturas de tijolos sejam destruídas. Já em valores entre 340 e 480 hPa, ocorre uma quase completa destruição das casas. Embora essas pressões possam parecer baixas, elas têm o potencial de causar danos significativos.

A seguir, são destacados os efeitos da sobrepressão no corpo humano. Vale ressaltar que, apesar da notável resistência do corpo humano, ele não está imune a danos causados por elevadas sobrepressões.

Probabilidade de danos ao corpo humano por sobrepressão					
SOBREPRESSÃO		MORTE POR HEMORRAGIA PULMONAR	SOBREPRESSÃO		ROMPIMENTO DE TÍMPANO
bar	hPa	Probabilidade	bar	hPa	Probabilidade
1,00	1 000	1%	0,16	160	1%
1,20	1 200	10%	0,19	190	10%
1,40	1 400	50%	0,43	430	50%
1,75	1 750	90%	0,84	840	90%
2,00	2 000	99%			

1 bar = 10⁵ Pa = 1 000 hPa = 100 kPa ~ 10 m coluna d'água = 1 000 cm água

Figura 20.: Fonte: Coward and Jones, Fig.349, ref. 16

Como se comporta o corpo humano diante da sobrepressão?

É notável observar a resistência do corpo humano a essas situações. O ser humano apresenta uma maior resistência a sobrepressões do que as estruturas. Isto ocorre porque o corpo não é uma estrutura rígida, podendo absorver melhor o impacto e até mesmo se deslocar ao receber a onda de choque.

Nas explosões, a maioria das vítimas é devida ao colapso de prédios e residências ou projeção de fragmentos. Provavelmente danos aos indivíduos serão menores se estiverem numa área aberta.

Por exemplo, diante de uma sobrepressão de 1 000 hPa, a probabilidade de morte devido a hemorragia pulmonar é de meros 1%. No entanto, com uma sobrepressão de 1 200 hPa, essa probabilidade sobe para 10%.

Nota-se que, conforme a pressão aumenta, a probabilidade de danos cresce de maneira exponencial, não sendo um aumento linear.

Já no que diz respeito ao rompimento de tímpanos, as pressões necessárias para causar dano são consideravelmente menores. Uma sobrepressão de 160 hPa apresenta probabilidade de 1% de causar rompimento, 190 hPa traz 10% de probabilidade, e com 840 hPa, essa chance salta para 90%.

4. Características do Hidrogênio

4.1 Propriedades físico-químicas do hidrogênio

Obter hidrogênio verde tem sido um dos maiores objetivos dos países preocupados com as mudanças climáticas, já que ele tem o potencial de substituir os combustíveis fósseis em transportes, processos industriais ou mesmo na produção de energia térmica e elétrica. O hidrogênio pode auxiliar nessa transição para um sistema de energia 100% renovável, permitindo-nos armazenar energia por maiores períodos, quando comparado às baterias. O hidrogênio também tem sido apontado como a solução para descarbonizar a atual indústria do gás, através da substituição do gás natural (fóssil) por hidrogênio verde ou de baixo carbono, para aquecimento de espaços e água em edifícios.

Todos esses interesses e as formas de obtenção estão relacionados às propriedades específicas do hidrogênio. O hidrogênio é o elemento mais abundante e simples do universo. Porém, a molécula é encontrada em concentrações muito baixas em sua forma pura na natureza e deve ser produzida ou obtida a partir dos compostos nos quais está contido, tais como a água, o metano, metanol, amônia, etanol etc.

Logo, uma grande vantagem de se usar hidrogênio é o fato dele ser inflamável, sendo assim um excelente combustível, mas em paralelo, temos o desafio de extraí-lo de forma eficiente e segura desses compostos e armazená-lo de forma a fornecer uma grande quantidade de energia. Existem diversas rotas para obtenção do hidrogênio, dentre as quais estão as rotas comerciais mais comuns: eletrólise da água (com pesquisas desde 1920) e tecnologias de reforma (introduzidas em 1960).

Quanto às suas propriedades, o hidrogênio é facilmente inflamável, mas, ao contrário do que muitos pensam o gás não é tóxico, é inodoro, insípido e leve. Em comparação ao gás natural, que também é inodoro, incolor e insípido, não permite o uso de mercaptanas (contaminante comum, obtido de petróleo bruto e produtos acabados como gasolina e diesel, usado na indústria de GN), que são compostos adicionados como odorizantes para tornar um gás detectável pelas pessoas.

Uma vez que os odorizantes atualmente conhecidos contaminam as células a combustível e não são aceitáveis em aplicações alimentícias, não é possível usá-los no gás hidrogênio. O hidrogênio é amplamente utilizado como agente redutor em uma série de processos químicos.

Embora o hidrogênio não seja corrosivo e não reaja em certas condições, ele é capaz de reduzir a resistência mecânica de alguns materiais através de uma variedade de processos de interação comumente referidos como fragilização por hidrogênio, sob altas pressões ou baixas temperaturas. Além disso, sua chama é praticamente invisível à luz do dia, como pode ser observado na figura seguir.

Chamas do propano e do hidrogênio vistas de dia e de noite

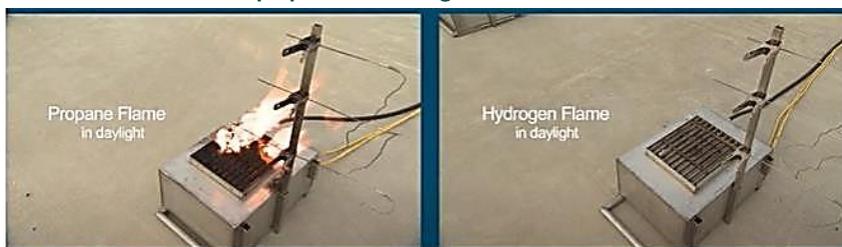




Figura 21: Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=-EbmCGBMl4E>

Embora nenhum combustível seja 100% seguro, o hidrogênio demonstrou ser, em vários aspectos, mais seguro do que os combustíveis convencionais. Podemos analisar abaixo algumas propriedades relativas à segurança:

O hidrogênio é 14 vezes mais leve que o ar e 57 vezes mais leve que o vapor da gasolina, em condições normais de temperatura e pressão (CNTP; 1 bar, 0°C). O gás hidrogênio tem uma densidade de 0,0887 kg/m³ e gravidade específica 0,07, enquanto o ar possui densidade de 1,205 kg/m³ e gravidade 1,0, nas mesmas condições.

Por causa da sua alta difusibilidade, quando liberado, o hidrogênio se dispersa rapidamente (10 vezes mais rápido que o gás natural), reduzindo bastante o risco de ignição a nível do solo. Sua propriedade de fluatuabilidade (o hidrogênio tem a maior fluatuabilidade dentre todas as substâncias conhecidas) demonstra que em qualquer situação de vazamento, ele se difunde rapidamente, reduzindo assim os riscos de ignição.

Porém, em espaços fechados o gás se difunde levando a gradientes de concentração em determinados locais. Em comparação com o hidrogênio, por exemplo, a gasolina apresenta maior risco de incêndios por ser mais pesada que o ar (Consultar: O Acidente de Buncefield, <https://www.rsem.com.br/artigo-acidente-buncefield/>).

Densidades relativas ao ar para hidrogênio e outros combustíveis comuns

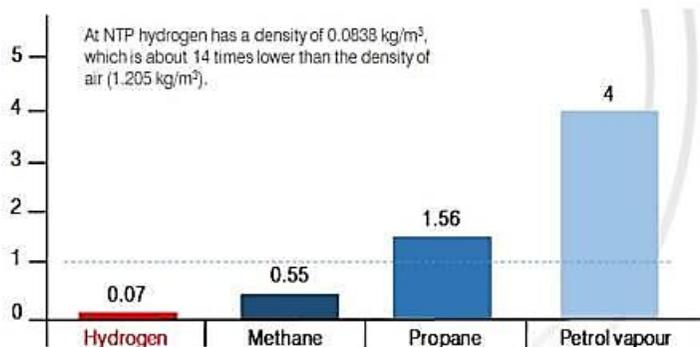


Figura 22: Fonte: Fonte: Hyresponder

Como qualquer substância inflamável, o hidrogênio pode entrar em combustão. Para que ocorra um incêndio de hidrogênio, além do H₂, uma concentração adequada de oxidante (como oxigênio) e a presença de uma fonte de ignição são pré-requisitos. O hidrogênio tem uma ampla faixa de inflamabilidade (4% a 74% no ar) e a energia necessária para inflamar o hidrogênio (0,02 mJ) pode ser muito baixa.

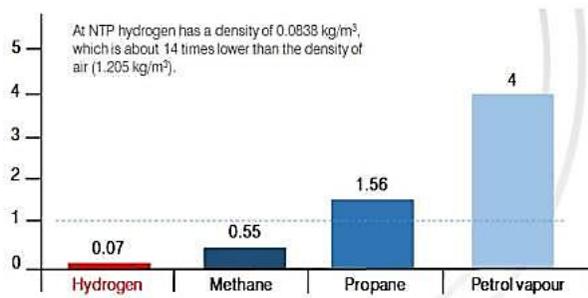
No entanto, em baixas concentrações (abaixo de 10%) a energia necessária para inflamar o hidrogênio é alta – semelhante à energia necessária para inflamar o gás natural e a gasolina em suas respectivas faixas de inflamabilidade – tornando o hidrogênio realisticamente mais difícil de inflamar perto de seu limite inferior de inflamabilidade. Uma faísca causada pela descarga de eletricidade estática de um corpo humano pode ser suficiente para inflamar qualquer um dos combustíveis.

Outro ponto importante é que existe um índice de oxigênio limitante, que é a concentração mínima de oxigênio que suportará a propagação da chama em uma mistura de vapores de combustível e ar. Para o hidrogênio, nenhuma propagação de chama é observada nas CNTP, se a mistura contiver menos de 5% em fração volumétrica de oxigênio.

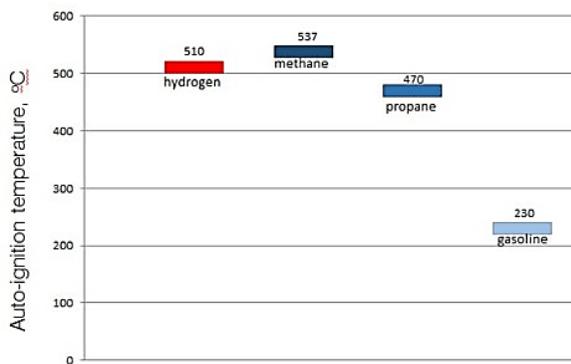
A temperatura de autoignição do hidrogênio é mais alta que de alguns combustíveis. De acordo com os dados das aulas as temperaturas de autoignição: Europa 560°C (EN 1522, Chemsafe); EUA 500°C (NFPA 325,

ASTM E659)) As temperaturas de ponto de fulgor para hidrogênio e outros combustíveis comuns podem ser vistas nas figuras a seguir.

Temperaturas de autoignição para misturas inflamáveis de hidrogênio e outros combustíveis.



Os pontos de fulgor para hidrogênio e outros combustíveis comuns



Note: Gasoline in North America = Petrol elsewhere

	Hidrogênio	Metano	Propano	Gasolina	Diesel
Ponto de inflamação, °C	-253	-188	-96	(-11-45)	37-110

Figura 23: Fonte:

O H₂ tem uma necessidade maior de oxigênio para explosão do que os combustíveis fósseis. O hidrogênio pode ser explosivo com concentrações entre 18% e 59% de oxigênio enquanto a gasolina pode ser explosiva com concentrações entre 1% e 3% de oxigênio. Isso significa que a gasolina tem maior risco de explosão do que o hidrogênio para qualquer ambiente com oxigênio.

Além disso, é pouco provável que ocorra uma explosão causada pelo hidrogênio ao ar livre. Por outro lado, o hidrogênio tem uma faixa de detonação mais ampla em comparação com outros combustíveis.

A faixa de detonação de 13% a 70% em fração volumétrica é relatada para misturas hidrogênio-ar em um tubo de 43 cm de diâmetro, mas essa faixa é normalmente determinada entre 15% a 59%, no ar, havendo mudança na presença de outros gases. Um limite inferior de **explosividade** de 12,5% foi observado em uma instalação russa de testes de detonação (Molkov, 2012). A maior faixa de explosividade de hidrogênio no ar, entre 11% e 59%, é recomendada por Alcock et al. 2001.

A temperatura da chama para 19,6% de hidrogênio no ar alcança 2 318 K. Um claro perigo resultante desta propriedade são queimaduras graves de pessoas diretamente expostas a chamas de hidrogênio, que na maioria das vezes está imperceptível. A temperatura máxima da chama de hidrogênio é de 2 400 K.

A velocidade de queima em um processo de combustão no ar é subsônica na qual um chama de uma mistura combustível-ar inflamável se propaga. A alta velocidade de queima do hidrogênio (2,65 a 3,46 m/s), que é uma ordem de grandeza maior que a do metano (0,45 m/s), indica seu alto potencial explosivo e a dificuldade de confinar ou deter chamas e explosões de hidrogênio (ANSI, 2004).

O coeficiente de Joule-Thomson é definido como a variação da temperatura em função da variação de pressão para uma expansão adiabática (sem troca de calor com o meio ambiente), simplificada, $\mu = (\Delta T/\Delta p)$. A temperatura ambiente, a maior parte dos gases apresenta coeficiente de Joule Thomson positivo, ou seja, quando a pressão do gás diminui, a temperatura também diminui. No entanto, no caso do hidrogênio, hélio e neônio, o coeficiente de Joule-Thomson é negativo à temperatura ambiente. Portanto, o hidrogênio irá se aquecer ao sofrer uma expansão (diminuir a pressão). No entanto, o aumento da temperatura como resultado do efeito Joule-Thomson não é normalmente suficiente para inflamar uma mistura hidrogênio-ar.

O coeficiente de Joule-Thomson de cada gás varia em função da temperatura e pressão. Para o hidrogênio a inversão do coeficiente ocorre a 222 K a 1 bar; portanto, abaixo dessa temperatura o coeficiente de Joule-Thomson será positivo para o hidrogênio. Nessas condições se o hidrogênio for expandido, sua temperatura será diminuída.

O H₂ não é tóxico, mas pode causar asfixia ao diluir o oxigênio do ar. Embora, com exceção do oxigênio, qualquer gás possa causar asfixia, na maioria dos cenários, a fluatibilidade e a difusividade do hidrogênio facilitam a sua dispersão, tornando improvável a ocorrência de asfixia. O risco maior recai sempre sobre a combustão ou detonação.

Por isso, além de se ter o cuidado de trabalhar em locais ventilados e abertos, o uso da detecção através de sensores (ABNT NBR 16577), em condições atmosféricas, é importante, uma vez que o gás hidrogênio é incolor, inodoro e não detectável em nenhuma concentração pelos sentidos humanos.

Em locais confinados, onde cuidados da NR 33 são obrigatórios, as normas ABNT estabelecem que é preciso usar equipamentos de medição atmosférica para controle de gases e vapores. Esses detectores dotados de sensores específicos para gases e vapores devem ser calibrados e certificados.

Ademais, o H₂ não contaminará as águas subterrâneas, nem contribuirá para a poluição atmosférica. O hidrogênio gasoso não cria "fumos".

Em caso de vazamento de hidrogênio em contêineres e tubulações, a difusão é 1,3 a 2,8 vezes maior que o vazamento de metano gasoso e aproximadamente 4 vezes maior que o do ar nas mesmas condições. O hidrogênio liberado tem o potencial de se dispersar rapidamente por difusão rápida, convecção turbulenta e fluatibilidade, limitando consideravelmente sua presença na zona de perigo (Zuettel et al., 2008).

A exposição a incêndios de hidrogênio pode resultar em danos significativos, pela mesma condição de rápida dispersão, além da radiação térmica. Mas, isso pode depender em grande parte da quantidade de vapor de água na atmosfera, pois a umidade atmosférica absorve a energia térmica irradiada de um incêndio e pode reduzi-la consideravelmente.

Uma chama de hidrogênio é praticamente invisível à luz do dia, irradiando principalmente na região do infravermelho e ultravioleta. O hidrogênio queima com chamas azul-claro e não emite luz visível durante o dia (porque a radiação solar pode dominar a visibilidade da chama de hidrogênio) nem fumaça (produz apenas água quando queima no ar), a menos que partículas contendo sódio ou poeira sejam arrastadas e queimado junto com a mistura combustível.

Sensores térmicos são importantes para enxergar onde está a chama e ela não deve ser extinta até que o vazamento seja cessado, caso contrário haverá formação de outra nuvem explosiva. A visibilidade de uma chama de hidrogênio em geral é causada por impurezas como umidade ou partículas no ar. Incêndios de hidrogênio gasoso são facilmente visíveis no escuro e grandes incêndios de hidrogênio são detectáveis à luz do dia apenas pelas “ondulações de calor” e pela radiação térmica na pele (Hord, 1978).

Um incêndio de hidrogênio pode permanecer indetectável e se propagar nas áreas onde o hidrogênio pode vazar, derramar ou acumular e formar misturas potencialmente combustíveis, devido a sua falta de visibilidade. Todavia, em comparação com a combustão de hidrocarbonetos, as chamas de hidrogênio irradiam significativamente menos calor, por isso a primeira medida de segurança a ser tomada é o afastamento. O calor somente será sentido pelas pessoas no caso de contato quase direto com a chama de hidrogênio. Portanto, os fluxos de calor convectivos e radiativos são parâmetros importantes para serem considerados em uma situação de emergência e devem ser avaliados para a proteção da vida, da propriedade e do meio ambiente.

4.2 Comparando O Hidrogênio e os Combustíveis Fósseis

A substituição de combustíveis convencionais por transportadores de energia alternativos foi implementada pela introdução do gás natural como combustível, no mercado mundial, e atualmente ele é utilizado na indústria, no aquecimento residencial e até no setor de transportes, especialmente na Europa.

As perspectivas para o uso do hidrogênio são semelhantes às do gás natural, uma vez que diversos países estudam misturas seguras de inclusão do hidrogênio no GN. Comparando hidrogênio, metano e gasolina, como mostrado na Tabela 1, a gasolina parece ser mais segura, em alguns aspectos, devido ao seu ponto de ebulição mais alto, menor volatilidade e limites mais estreitos de inflamabilidade e explosividade.

No entanto, tanto o hidrogênio e metano (o principal componente do gás natural) podem ser armazenados com segurança usando a tecnologia disponível atualmente.

O H₂ possui um conjunto único de características que diferem de outros combustíveis conhecidos. O hidrogênio tem os valores mais baixos de massa molecular, densidade e viscosidade e seu coeficiente de difusão no ar é o mais alto entre todos os gases. A condutividade térmica do hidrogênio é significativamente maior do que a de outros gases. As consequências de vazamentos de hidrogênio a céu aberto ou em espaços parcialmente confinados são drasticamente reduzidas por sua fluatuabilidade.

O hidrogênio fluirá mais facilmente de um local e se misturará com o ar ambiente até um nível de concentração seguro, ou seja, abaixo do LIE (4 % no ar) muito rapidamente.

- LII - Limite Inferior de Inflamabilidade
- LSI - Limite Superior de Inflamabilidade
- LIE - Limite Inferior de Explosividade
- LSE - Limite Superior de Explosividade

Vazamentos de hidrogênio suportam em taxas de fluxo de combustão muito mais baixas do que vazamentos de outros combustíveis e suas chamas são as mais fracas de que qualquer combustível, bem como os limites de vazão de massa são maiores do que os de metano e propano.

Todavia, chamas de hidrogênio causam corrosão muito mais rápida do que as chamas de metano, quando colidem com amostras feitas de alumínio, aço inoxidável e fibras de carvão de silício.

Em comparação com o gás natural, o hidrogênio tem algumas características menos seguras, como facilidade de vazamento, baixa energia mínima de ignição, ampla faixa de inflamabilidade (no ar), ampla faixa de explosividade (11% a 59% em fração volumétrica) e efeitos de fragilização em materiais. Esses atributos demandam ao alto investimento em segurança e a utilização em larga escala do hidrogênio poderá estar sujeita a certas restrições.

O hidrogênio tem o maior poder calorífico por unidade de massa (maior razão energia/massa dentre todos os combustíveis) e o menor por unidade de volume. Por isso, para fornecer uma autonomia competitiva, o hidrogênio deve ser armazenado como um gás sob pressão ou deve ser liquefeito, o que traz outras implicações. Apesar de sua menor densidade de energia volumétrica, a vantagem de peso é geralmente ofuscada pelo alto peso dos tanques de armazenamento de hidrogênio e equipamentos associados, projetados para aplicações de transporte seguro, consideravelmente mais volumosos e pesados do que aqueles utilizados para combustíveis líquidos, como gasolina ou diesel (Hord, 1978).

A tabela a seguir apresenta uma comparação entre dois combustíveis gasosos, hidrogênio e metano, e a gasolina. Embora a pontuação total favoreça a gasolina, ao classificar esses combustíveis em termos de segurança, deve-se notar que existem vantagens e desvantagens para cada uma das propriedades ou eventos, que pode mudar a partir de uma aplicação de combustível para outro. Portanto, a tabela não está direcionada à aplicação, mas nos dá uma ideia dos prós e contras desses combustíveis em aspectos específicos de segurança.

Tabela 1- Tabela de comparação entre combustíveis inflamáveis

Propriedade	Hidrogênio	Metano	Gasolina
Tamanho das moléculas	Menor tamanho de molécula resultandona maior taxa de vazamento (+)	Tamanho demolécula pequeno resultando em altataxa de vazamento (++)	Grande tamanho demolécula resultandodem baixa taxa de vazamento (+++)
Perigo de incêndiopor derramamento de combustível	Desenvolvimento rápido (+)	Desenvolvimento intermediário (++)	Baixo desenvolvimento (+++)
Duração do fogo	Mais curto (+++)	Intermediário (++)	Mais longo (+)

Temp. da Chama	Aproximadamente o mesmo	Aproximadamente o mesmo	Aproximadamente o mesmo
Odorização para detecção de vazamentos	Não permitido se for usado como combustível de célula a combustível (+)	Odorizado artificialmente com mercaptanos (++)	Normalmente odorífero (+++)
Flutuabilidade	14,5 vezes mais leve que o ar em NTP (+++)	1,8 vezes mais leve que o ar em NTP (++)	Mais pesado que o ar (+)
Energia de explosão	Mais baixo por volume (+++)	Intermediário (++)	Maior por volume (+)
Limites de inflamabilidade e explosividade	Limites mais amplos(+)	Limites intermediários (++)	Limites mais estreitos (+++)
Energia de ignição	1/14 do metano e 1/12 da gasolina (+)	14x mais do que o de hidrogênio (ainda que descargas de eletricidade estática de um corpo humano inflamem facilmente) (++)	12x mais que o hidrogênio (ainda que descargas de eletricidade estática de um corpo humano inflamem facilmente) (+++)
Temperatura de autoignição	Temperatura de autoignição mais alta (585 °C) (+++)	Alta temperatura de autoignição (540 °C) (++)	Baixas temperaturas de autoignição (227- 477 °C) (+)
Deflagrações	Confinado: razão de aumento de pressão <8:1 (+) Não confinado: Geralmente <7 kPa	Confinado: razão de aumento de pressão <8:1 (+) Não confinado: Geralmente <7 kPa	Confinado: razão de aumento de pressão 70-80% de hidrogênio (++) Não confinado: Geralmente <7 kPa
Detonações	Razões de aumento de pressão de ~ 15:1 (+) Tempo para pico de pressão: 10 vezes menor que o metano (+)	Razões de aumento de pressão de ~ 15:1 (+) Tempo para pico de pressão: 10 vezes maior que o hidrogênio (+++)	Razões de aumento de pressão de ~ 12:1 (++) Tempo para pico de pressão: 10 vezes maior que o hidrogênio (+++)
Risco de estilhaços	Invólucros comuns:(L/ D < 30): Aproximadamente o mesmo para metano-ar (+)	Invólucros comuns:(L/ D < 30): Aproximadamente o mesmo hidrogênio-ar (+)	Um pouco menos grave (++) Túneis ou tubos: Menor risco devido à tendência para DDT (+++)
	Túneis ou tubos: Maior risco devido à tendência para DDT (+)	Túneis ou tubos: Menor risco devido à tendência para DDT (++)	
Calor radiante	Menor (menor probabilidade de efeito dominó) (+++)	Intermediário (++)	Mais alto (+)
Fumaça perigosa	Menos perigoso (+++)	Menos perigoso (++)	Mais perigoso (+)
Visibilidade da chama	Mais baixo (+)	Intermediário (++)	Mais alto (+++)
Combate a incêndio	Mais difícil (+)	Mais difícil (+)	Menos difícil (+++)

Pontuação total de segurança	30+	33+	39+
------------------------------	-----	-----	-----

Nota: Mais sinais de adição denotam maior segurança.

Além desses fatores podemos medir o desempenho da octanagem, usado como padrão para medir a resistência à detonação em motores de combustão interna e recebe uma classificação de octanagem relativa de 100, a partir de dados de hidrocarbonetos. Combustíveis com um índice de octano superior a 100 têm mais resistência à autoignição do que a própria octanagem.

O hidrogênio tem um índice de octano muito alto e, portanto, é resistente à detonação (em misturas pobres, ou seja, com menor concentração de combustível), possui 130+ em comparação com outros combustíveis: metano (125), propano (105), gasolina (87), diesel (30). O número de octanos não tem relevância para o uso de hidrogênio com células a combustível, mas é interessante em processos de combustão.

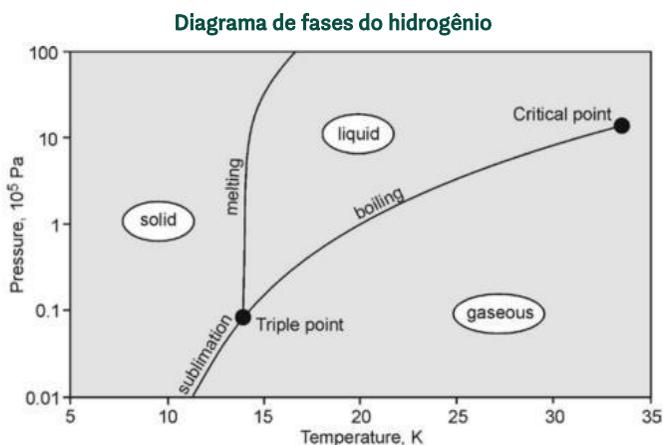
Para melhorar sua competitividade, de oferta energética por volume, o hidrogênio pode ser liquefeito. O hidrogênio líquido (LH2) é um líquido incolor, inodoro, não corrosivo e pouco reativo. É um fluido criogênico (com temperaturas abaixo de -73°C). Qualquer respingo de hidrogênio líquido na pele ou nos olhos pode causar queimaduras graves por congelamento ou hipotermia.

O LH2 ferverá rapidamente ou se transformará em gás se exposto ou derramado em um ambiente com temperatura ambiente e a inalação de vapores frios pode causar desconforto respiratório e asfixia no final. O aquecimento do LH2 à temperatura ambiente pode levar a pressões muito altas em espaços confinados.

A razão volumétrica de LH2 para GH2 é 1:848. O LH2 possui a densidade mais baixa que qualquer gás liquefeito e se expande aproximadamente 850 vezes ao passar do estado líquido para o estado gasoso (CNTP), portanto, é armazenado a pressões relativamente baixas em recipientes isolados a vácuo de parede dupla, equipados com discos de ruptura, aberturas e dispositivos de alívio de pressão (TPRDs).

Ao contrário do propano, a compressão do hidrogênio gasoso não o liquefaz, por isso, não há LH2 em vasos de armazenamento de hidrogênio gasoso comprimido. Os vasos de armazenamento de GH2 também são equipados com TPRDs para permitir uma ventilação controlada do gás hidrogênio. Em caso de incêndio, o risco de Explosão de Vapor em Expansão de Líquido em Ebulição (BLEVE) está ausente. Mas, de qualquer forma, o vapor saturado frio produzido por derramamentos de hidrogênio liquefeito (LH2) é mais pesado que o ar e permanecerá próximo ao solo até que a temperatura suba (Rigas e Sklavounos, 2005).

O diagrama de fases do hidrogênio é apresentado na Figura 24, no qual três curvas estão presentes. As curvas mostram a mudança da temperatura: de ebulição, liquefação (ou condensação), de fusão (e congelamento), solidificação e para o processo de sublimação, todas em função da pressão.



O LH2 possui densidade de 70,78 kg/m³, que é aproximadamente 14 vezes menos densa que a água e sua gravidade específica é 0,071. A densidade mais alta do vapor de hidrogênio saturado em baixas temperaturas pode fazer com que a nuvem de hidrogênio flua horizontalmente ou mesmo para baixo, imediatamente após a liberação, se ocorrer um derramamento ou vazamento de LH2.

Uma importante preocupação com o uso do LH₂ é que, com exceção do hélio, todos os gases serão condensados e solidificados a temperaturas muito baixas, caso sejam expostos a sua presença. Assim, vazamentos de ar ou outros gases diretamente expostos ao hidrogênio líquido podem acarretar diversos perigos pois os gases solidificados podem entupir tubos, orifícios e válvulas devido à formação de gelo. Em um processo conhecido como bombeamento criogênico, a redução no volume dos gases de condensação pode criar vácuo, atraindo ainda mais gás, por exemplo, ar como oxidante. Grandes quantidades de materiais condensados ou solidificados podem se acumular se o vazamento persistir por longos períodos. Nestes casos, além desses gases poderem transportar calor para o hidrogênio líquido, causando perdas, em caso de aquecimento, os materiais solidificados irão vaporizar, resultando em altas pressões ou formando misturas explosivas.

De forma geral, o hidrogênio é transportado, conforme a necessidade, às vezes por longas distâncias, por dutos ou navios, e em curtas distâncias, em rodovias por caminhões. Em caminhões de hidrogênio liquefeito um espaço de segurança no interior do tanque deve ser deixado, em caso de acidente.

De forma geral, alguns cuidados devem ser reforçados com o LH₂, uma vez que esse possui maior densidade do vapor de hidrogênio saturado a baixas temperaturas, o que pode fazer fluir uma nuvem de hidrogênio na horizontal ou para baixo imediatamente depois de uma explosão.

A nuvem inflamável é significativamente maior do que a nuvem induzida por uma liberação de hidrogênio gasoso. A condensação da umidade atmosférica também adicionará água a nuvem, tornando-a visível e ainda mais densa.

A TPRD é imprescindível nesses casos pois, se a pressão for suficientemente baixa ou o diâmetro para liberação do H₂ for suficientemente grande, uma rain-out (formação de gotículas de hidrogênio que caem no solo e induzem uma piscina de H₂) pode ocorrer evitando maiores acidentes. Além disso, atenção precisa ser tomada pois é possível que uma explosão secundária aconteça após a deflagração inicial da liberação da nuvem devido ao enriquecimento de oxigênio.

O Hidrogênio é um gás incolor, inodoro e inflamável. Embora não seja tóxico, é mais leve que o ar. Comercialmente, o hidrogênio é fornecido em cilindros sob altas pressões, com cilindros típicos possuindo uma capacidade hidráulica de 50 L. Estes podem ser isolados, ou frequentemente agrupados e interconectados, seja em uma carreta ou transportados em cilindros de maior tamanho em carretas rodoviárias.

É crucial destacar que vazamentos de hidrogênio sob alta pressão frequentemente resultam em inflamação espontânea – isso não é autoignição. A chama produzida pelo hidrogênio é incolor. Na atmosfera, a presença do hidrogênio é em concentrações extremamente baixas, cerca de 0,5 $\mu\text{mol/mol}$.

Quanto à sua produção, os métodos mais empregados incluem a reforma a vapor de gás natural ou metano, eletrólise alcalina da água e a purificação de subprodutos industriais ricos em hidrogênio.

O hidrogênio tem várias aplicações, como no refino de petróleo, especialmente para reduzir a concentração de enxofre dos derivados de petróleo, resultando na formação de H_2S , o qual é facilmente separado da fase líquida.

Além disso, a siderurgia o utiliza amplamente para desoxigenação. Outras aplicações incluem a hidrogenação de óleos comestíveis, como margarina, criação de atmosferas redutoras em processos industriais e uso em cromatografia gasosa. De acordo com a norma NBR 7502 da ABNT, o hidrogênio está classificado no grupo de risco 2.

O hidrogênio é mais leve que o ar. Quando liberado no ambiente, naturalmente se dirige para pontos elevados, acumulando-se em tetos de ambientes fechados, cavidades ou reentrâncias.

Ao iniciar um vazamento de hidrogênio de uma tubulação posicionada ao nível do solo ou em meio a uma parede, observa-se a difusão do gás pelo ambiente. Ele não ascende imediatamente ao topo. Mesmo com o vazamento contínuo, forma-se um gradiente de concentração. Haverá, sem dúvida, uma concentração mais elevada próximo ao teto, mas também é possível encontrar uma mistura explosiva ao nível do solo. Não é correto

pensar que o hidrogênio simplesmente sobe e se concentra unicamente no teto. Ele se dispersa por todo o ambiente.

Além de sua característica inflamável, o hidrogênio pode atuar como um gás asfíxiante. Uma vantagem importante é que ele acompanha a movimentação do ar. Se houver ventilação adequada no local, o hidrogênio será rapidamente disperso e conduzido para fora do ambiente.

Portanto, nota-se uma pequena divergência entre as normas, que muitas vezes é resultado das diferentes metodologias empregadas nos ensaios. O limite inferior de inflamabilidade é estabelecido em 4%. No entanto, há variações entre as normas quanto ao limite superior de inflamabilidade.

Principais perigos			
 <p>GHS02 Inflamável</p>		 <p>GHS04 Gás sob pressão</p>	
Temperatura de Autoignição, Limites de Inflamabilidade e Ponto de Fulgor			
Europa	EN 1839 – Limites EN 14522 – Autoignição	EUA	ASTM E681 – Limites ASTM E659 – Autoignição
Temperatura de Autoignição (Chemsafe)	560 °C	Temperatura de Autoignição (NFPA 325)	500°C
Limite Inferior de Inflamabilidade (IEC 80079-20-1)	4% vol	Limite Inferior de Inflamabilidade (NFPA 325)	4% vol
Limite Superior de Inflamabilidade (IEC 80079-20-1)	77% vol	Limite Superior de Inflamabilidade (NFPA325)	75% vol
Odor: nenhum		https://encyclopedia.airliquide.com/hydrogen#safety-compatibility	

Figura 25: Fonte: <https://encyclopedia.airliquide.com/hydrogen#safety-compatibility>

Aqui estão os símbolos do Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos, também conhecido pela sigla GHS, conforme estabelecido pelas Nações Unidas.

Existe um livro referente a este sistema, denominado "*Purple Book*" da *United Nations*. O código GHS02 e seu símbolo correspondente são designados para gases e substâncias inflamáveis, enquanto o GHS04 representa gases sob pressão.

GHS – United Nations

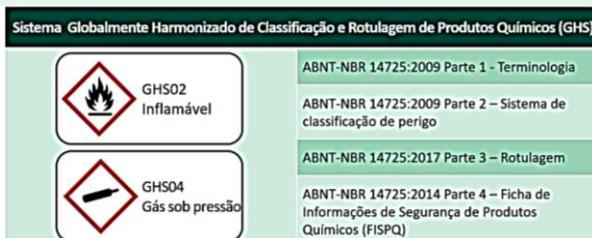


Figura 26.: Fonte: Purple Book - Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS), United Nations

A Norma ABNT-NBR 14725 é baseada no GHS e é composta dos seguintes itens: Terminologia; Sistema de classificação de perigos; Rotulagem para armazenamento e transporte; Critérios para elaboração da Ficha de Dados de Segurança (que substituiu a FISPQ).

Ao acessar os sites das empresas de gás, é possível encontrar essas fichas de segurança. É fortemente recomendado consultar e analisar essas fichas.

Características do H₂

- ☺ mais leve que o ar: dissipa-se rapidamente;
- ☺ inodoro e incolor: impossível notar a presença;
- ☺ chama incolor: levemente azulada, difícil visualização;
- ☺ irradiação térmica: apesar da alta temperatura de chama, ao queimar emite pouca radiação térmica para os arredores;
- ☺ não corrosivo: compatibilidade com materiais;
- ☺ não tóxico: não provoca envenenamento;
- ☺ vazamentos de H₂: contém menos energia que gás natural
- ☺ rápida dispersão: maior fluatibilidade e difusão que o propano, gás natural ou vapores de gasolina
- ☺ produto da queima é água: não tóxico e não poluente
- ☺ baixa energia de ignição: 0,02 mJ (0,28 mJ, CH₄);
- ☺ alta velocidade de chama: 7× mais rápida que gasolina ou gás natural, facilidade de combustão e detonação
- ☺ altamente inflamável: exige cuidados na sua manipulação, como qualquer combustível;
- ☺ alta densidade de energia por massa: é a maior dentre todos os combustíveis (3 × gasolina);
- ☺ baixa densidade de energia por volume: é difícil armazenar grandes quantidades de gás;
- ☺ é a menor molécula: apresenta tendência a vazamentos.

Figura 27.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Já foram discutidas diversas propriedades do hidrogênio. Quanto ao poder calorífico, normalmente nos cálculos se utiliza o poder calorífico inferior, que é de 120 MJ/kg. De maneira geral, nos cálculos de energia e eficiência energética, recomenda-se utilizar o poder calorífico inferior, no qual se considera que a água contida nos produtos da reação (combustão ou conversão eletroquímica) encontra-se no estado de vapor. O poder calorífico superior é mais elevado porque considera que água ao final do processo encontra-se no estado líquido. Mas, normalmente, a energia de liquefação da água não é aproveitada na prática.

Materiais considerados incompatíveis com o hidrogênio incluem agentes oxidantes, lítio, halogênios e, claro, o oxigênio. Já os materiais compatíveis são latão, aço carbono, aço inox, alumínio, zinco, cobre, monel, Kel-F, teflon, PVC, policarbonato, viton, buna-N, 56eoprene e poliuretano. No entanto, é preciso ter atenção ao aço carbono e ao aço inox, pois podem sofrer fragilização por hidrogênio (*embrittlement*).

Deve-se ter cautela com processos eletroquímicos de acabamento de materiais, pois podem introduzir uma grande quantidade de hidrogênio no material, equivalente à uma exposição ao hidrogênio gasoso de dezenas ou centenas de MPa. Após esses procedimentos eletroquímicos de acabamento, é necessário realizar uma desidrogenação. Em relação ao aço 304, sua compatibilidade varia conforme o acabamento, então é recomendável atenção ao usá-lo.

Características do H ₂		
Massa Molar	g	2,016
Densidade	kg/m ³	0,0899
Poder Calorífico Superior	MJ/kg	141,90
	MJ/m ³	11,89
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg	119,90
Temperatura de ebulição	K	20,3
Densidade do líquido	kg/m ³	70,8
Ponto Crítico		
temperatura	K	32,94
pressão	Bar	12,84
densidade	kg/m ³	31,40
Temperatura mín. de autoignição no Air	°C	570
Mistura estequiométrica com Air	%mol/mol	29,53
Temperatura de chama (Air)	K	2 318
Coefficiente de difusão	cm ² /s	0,61
Calor específico (C _p)	kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	14,89

- ☉ **detonação em espaços abertos:** é improvável;
- ☹ **materiais incompatíveis:** agentes oxidantes, lítio, halogênios;
- ☉ **materiais compatíveis:** latão, aço carbono*, aço inox*, alumínio, zinco, cobre, monel, Kel-F, teflon, PVC, policarbonato, viton, buna-N, neoprene, poliuretano.
- ☹ **fragilização de materiais:** aço carbono e aço inox podem sofrer fragilização (*embrittlement*) na presença de hidrogênio e/ou baixas temperaturas.

Figura 28.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Os limites de inflamabilidade e detonação do hidrogênio, em ambientes ricos em oxigênio, possuem uma faixa de inflamabilidade que se estende de 4% a 94%, e a detonação pode alcançar até quase 90%. O limite de detonação inferior é semelhante ao do ar. Trata-se de uma faixa consideravelmente ampla.

Considerando a energia necessária para iniciar uma combustão, em miliJoules (mJ), observa-se que os valores para propano (representado em verde) e metano são bastante semelhantes, com energias mínimas quase idênticas.

Para o hidrogênio, apenas cerca de 0,02 mJ já é o suficiente para desencadear uma combustão, especialmente quando as concentrações estão em torno de 20% a 30% de oxigênio em ar. Isso evidencia um dos riscos associados ao trabalho com hidrogênio. Portanto, é essencial operar fora dessas faixas críticas de concentração, evitando potenciais situações de risco.

Inflamabilidade do H₂

Limites de inflamabilidade e detonação do H₂

Mistura	Inflamabilidade (mol/mol)	Detonação (mol/mol)
[H ₂] em O ₂	4% a 94%	15% a 90%
[H ₂] em Air	4% a 75%	15% a 59%

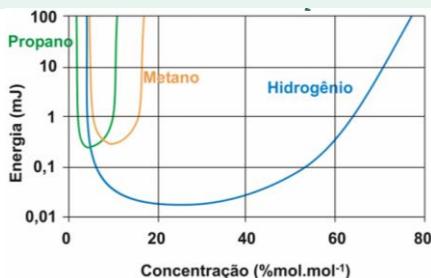


Figura 29: Fonte: Notas de Aulas, 2023.



Assista o vídeo:

Hydrogen Safety: Hydrogen Flame Prop Demonstration

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=r-8H5u4YzuY&t=2s>

5. Procedimentos de segurança

Procedimentos de segurança são essenciais e a primeira providência nesse sentido é assegurar que todas as normas adotadas estejam sendo rigorosamente seguidas. Além das normas, os processos realizados em indústrias ou laboratórios devem estabelecer procedimentos e boas práticas no manuseio do hidrogênio, os quais nem sempre estão descritos nas normas. Esses procedimentos devem ser definidos por toda a equipe, considerando as particularidades de cada indústria, laboratório ou processo.

Para além das normas gerais, é crucial estabelecer procedimentos específicos, e a participação de toda a equipe no desenvolvimento dessas diretrizes é fundamental. Procedimentos muito complexos são difíceis de implementar e nem sempre se traduzem em maior segurança. Então, uma boa recomendação é: mais simples é melhor!

O objetivo é criar um conjunto de regras claras que sejam facilmente compreendidas e seguidas por todos. Se as regras forem complicadas ou pouco práticas, existe a possibilidade de serem contornadas, o que pode resultar em incidentes. Um exemplo clássico é o das prensas hidráulicas que para serem acionadas exigiam que o operador pressionasse dois botões, o que exigia o emprego das duas mãos simultaneamente. Essa era uma medida preventiva para que o operador mantivesse as mãos longe do local de prensagem. Pois bem, por vezes, os sensores eram burlados o que invariavelmente acarretava consequências graves, tais como esmagamentos dos dedos ou das mãos, ou até mesmo amputações.

Deve ficar muito claro para toda a equipe que para trabalhar com segurança é necessário algum esforço adicional, que é absolutamente necessário. Em relação a alterações nos procedimentos, deve existir uma hierarquia clara de autorização. Mudanças não podem ser feitas unilateralmente e qualquer alteração deve ser aprovada por superiores e discutida com a equipe.

Importante ressaltar que qualquer membro da equipe deve ter o poder de alertar ou até mesmo suspender atividades se perceber uma violação das normas acordadas. A segurança não pode ser comprometida por ninguém, independentemente da posição hierárquica.

É fundamental que todos estejam cientes e concordem previamente com os procedimentos estabelecidos e que haja respeito mútuo. Uma observação crucial é que cada indivíduo é responsável não apenas por sua própria segurança, mas também pela segurança de todos os membros da equipe. Expor-se a riscos pode ter consequências não só para o indivíduo, mas também para os demais membros da equipe que tentariam socorrê-lo em caso de emergência.

A seguir, é apresentado um formulário de riscos de grande relevância, que foi elaborado com base num formulário da CEMIG e adaptado para o manuseio de gases. Em 2003, foi realizado treinamento em segurança do hidrogênio e cromatografia gasosa para profissionais da empresa, no Laboratório de Hidrogênio, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Na época a Cemig possuía um laboratório de hidrogênio junto a Usina Térmica Igarapé, localizada próxima a Belo Horizonte.

Esse formulário é do tipo checklist e constitui uma ferramenta essencial no planejamento de atividades com gases. Ele não só contribui para minimizar riscos no manuseio de gases, como também visa maximizar a segurança da equipe envolvida.

Outra função importante é auxiliar na definição de responsabilidades para a equipe de apoio em emergências, garantindo atendimento e socorro adequados. Em caso de acidentes, este planejamento permite ações mais imediatas e eficazes.

Na análise de riscos, é fundamental numerar o documento, registrar a data e a hora. Deve-se identificar o projeto em questão, a tarefa específica e os respectivos objetivos.

Em ambientes industriais, pode haver necessidade de realizar procedimentos não convencionais, como manutenções em equipamentos recentes que ainda não possuem todos os protocolos estabelecidos. Para tarefas rotineiras, determinar o objetivo, identificar a liderança e listar os participantes é uma prática recomendada.

Formulário de riscos

Análise de Riscos		H2 Análises Técnicas e Perícia		No. Arq:	Data:	Hora:
Projeto						
Tarefa						
Objetivos						
Responsável						
Participantes						
Observações	Anjo da Guarda	Motorista:	Telefonista			
Emergência	Pronto-Socorro	Bombeiro	CIPA			
Perigos / Acidentes						
1.	Alta Pressão	9.	Animais / Insetos	18.	Queda de objetos	
2.	Explosão	10.	Calor / Frio excessivo	19.	Queda de pessoas	
3.	Incêndio	11.	Cansaço Físico / Mental	20.	Radiação	
4.	Estilhaços / Fagulhas	12.	Choque elétrico	21.	Retorno de tensão	
5.	Produtos Químicos	13.	Contusão / Ferimento	22.	Ruído excessivo	
6.	Asfixia	14.	Falha de comunicação	23.	Umidade Excessiva	
7.	Gases Inflamáveis	15.	Iluminação inadequada	24.	Vibração	
8.	Gases Tóxicos	16.	Impacto Ambiental	25.	Outro	
		17.	Operação de guindaste	26.	Outro	
Descrição das atividades		Perigos			Medidas de controle dos Riscos	
1.						
2.						

Figura 30.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Em situações de emergência, torna-se essencial contabilizar os membros da equipe, garantindo a segurança de todos. Diversas situações devem ser consideradas: algum membro ficou retido? Houve quedas? Existem indivíduos feridos incapazes de se comunicar? Para esse controle, o registro dos participantes torna-se fundamental.

O termo "Anjo da guarda" é utilizado em contextos de alta tensão elétrica. Refere-se a alguém que monitora, fora da zona de risco, enquanto outros executam tarefas perigosas. A principal responsabilidade deste papel é assegurar a segurança da equipe envolvida na atividade de risco, emitindo alertas e tomando as primeiras providências para socorro imediato em caso de emergências.

Nesses casos, o papel do motorista e da telefonista são essenciais. O motorista poderá conduzir imediatamente feridos leves para o hospital; a telefonista deverá dispor dos números de pronto-socorro e bombeiros para um contato imediato.

Na seção subsequente, os potenciais perigos ou acidentes devem ser listados.

Neste ponto, é interessante esclarecer os conceitos "perigo" de "risco".

Perigo (*Hazard*) é um conceito qualitativo sobre uma situação que pode causar danos a pessoas, animais, objetos etc.

Risco (*Risk*) é uma medida quantitativa do perigo ou da segurança, sendo expresso como uma razão entre duas quantidades, como uma frequência ou como uma probabilidade. Há diversos tipos de risco, por exemplo: individual, social, comercial, financeiro, ambiental etc.

Como exemplo de perigo, podemos dizer que “é perigoso atravessar esta avenida”. Ou seja, essa é uma situação em que se reconhece que existe um potencial de dano aos pedestres que se dispõem a atravessar esta avenida. Se por outro lado dizemos “a cada 5 000 pessoas que atravessam essa avenida, uma é atropelada”, estamos fornecendo uma medida quantitativa do perigo de atravessar a avenida: 1 atropelamento a cada 5 000 travessias. Ou seja, uma frequência de 0,02%, que seria considerado um evento perigoso Provável na Matriz de Risco.

5.1. Princípios básicos de segurança do hidrogênio

As normas ABNT NBR são normas nacionais aprovadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e possuem caráter voluntário. São estabelecidas através de consenso e são fruto do trabalho de comitês compostos por especialistas oriundos de empresas, indústrias, universidades, centros de pesquisa e agências governamentais.

Esses profissionais atuam, por vezes, na tradução de normas internacionais, como as normas ISO ou IEC, ou na criação de normas específicas para o contexto brasileiro. Tais normas tornam-se obrigatórias somente quando integradas a legislações ou decretos.

Por outro lado, as NR (Normas Regulamentadoras) são normativas estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e têm caráter compulsório. Dentre elas, destaca-se a ABNT NBR 14.787, que aborda espaços confinados, focando na prevenção de acidentes e estabelecendo procedimentos e medidas de proteção.

A NR-18.20 estabelece requisitos específicos para os espaços confinados na construção civil, enquanto a NR-33 estabelece diretrizes gerais para a

segurança em espaços confinados, que se aplicam a todas as atividades econômicas, complementando as normativas anteriores. É relevante mencionar que todas as NRs têm sido constantemente atualizadas e estão disponíveis na internet, sendo de acesso gratuito.

Espaços confinados



Pictograma de
espaço confinado

- **ABNT NBR 14.787:** Espaços Confinados – Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção
- **NR 18.20:** Locais Confinados (com foco na construção civil)
- **NR-33:** Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados (complementa as normas anteriores)
- **ABNT NBR:** Norma Brasileira aprovada pela ABNT, de caráter voluntário, e estabelecida por consenso
- **NR:** Norma Regulamentadora estabelecida pelo Ministério do Trabalho e Emprego, com caráter obrigatório

Figura 31:. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

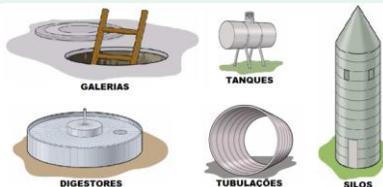
Espaço confinado refere-se a um ambiente com ventilação insuficiente, onde a atmosfera pode sofrer alterações contínuas devido à evolução de gases tóxicos ou à redução da concentração de oxigênio. Para monitorar tais ambientes, utiliza-se um instrumento denominado detector ou analisador portátil de gases.

Há diversos tipos de detectores capazes de analisar diferentes tipos de gases, sendo os mais comuns os que analisam oxigênio e dióxido de carbono. Outros gases de interesse são o monóxido de carbono, a amônia, o sulfeto de hidrogênio, os gases combustíveis, dentre outros. Esse dispositivo é essencial para determinar se um espaço confinado é seguro para ser acessado.

Espaços confinados



<https://riscozerosc.com.br>



<https://maesso.wordpress.com>

Figura 32:. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Exemplos de espaços confinados incluem galerias, que são áreas fechadas com ventilação limitada; grandes tanques, que exigem manutenção interna; tubulações; silos de armazenamento de grãos; e biodigestores. É importante notar que biodigestores, em particular, podem ser extremamente perigosos. Esses ambientes produzem uma atmosfera rica em metano e dióxido de carbono, tornando a concentração de oxigênio inadequada para seres humanos, o que já resultou em diversos acidentes graves, com diversos óbitos.

A concentração de oxigênio prevista no ar é de aproximadamente 21% em fração molar ou fração volumétrica. Toda vez que tiver concentrações abaixo de 19,5%, existe o risco de asfixia. E todas as vezes que houver concentrações acima de 23%, existe o risco de combustão acelerada. A combustão acelerada de hidrocarbonetos, óleo, graxa e outros materiais combustíveis pode em muitos casos acabar ocasionando incêndios de grandes proporções ou explosões.

No pictograma referente a espaços confinados, destaca-se a imagem de uma pessoa desfalecida. É mandatório que nele conste a inscrição “espaço confinado”. A sinalização adequada é imprescindível, indicando o perigo associado e a proibição de acesso devido ao risco elevado de morte.

NR-33 Concentração de Oxigênio			
	Air atmosférico [O ₂] = 20,9% mol/mol		
menos O ₂ Asfixia	19,5% < [O ₂] < 23%		
	mais O ₂ Combustão Acelerada		

Figura 33-. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Características de espaços confinados são destacadas pela sua natureza traiçoeira e insegura. Antes de qualquer acesso, é recomendado o uso de um monitor de oxigênio e de outros gases. Atividades em espaços confinados possuem riscos inerentes que demandam atenção constante.

A atmosfera em um espaço confinado pode sofrer alterações frequentes. Em ambientes restritos, a respiração humana pode reduzir a concentração de oxigênio devido ao consumo deste e à exalação de CO₂.

Ressalta-se que a composição da atmosfera em tais espaços não é garantida. Os riscos associados a espaços confinados devem ser identificados e gerenciados. Caso haja possibilidade de produção de gases inflamáveis ou tóxicos, precauções específicas devem ser adotadas.

A entrada em espaços confinados exige permissão prévia. A presença de sinalização adequada é mandatória, e o acesso a tais áreas deve obedecer a protocolos estabelecidos. A obtenção de permissão formal torna-se um requisito crucial.

Diretrizes estabelecidas visam à segurança em ambientes de risco. A identificação e o tratamento correto de espaços confinados são essenciais. Alguns locais, mesmo que parcialmente abertos ou restritos, podem necessitar de cuidados similares aos de espaços confinados. Por exemplo, embora uma garagem possa não ser classificada tecnicamente como espaço confinado, em determinadas situações, pode ser necessário adotar precauções equivalentes.

Dicas sobre espaço confinado

- Espaço confinado é traiçoeiro e inseguro
- Utilize um monitor de oxigênio e gases antes de entrar
- Nenhuma operação em espaço confinado é segura
- A atmosfera num espaço confinado muda continuamente
- Nenhuma atmosfera continua permanentemente segura
- Nunca subestime os riscos de um espaço confinado
- Os riscos nos espaços confinados devem ser conhecidos e controlados
- Nunca entre num espaço confinado sem permissão de entrada
- Nunca se esqueça dessas informações, elas podem salvar sua vida
- Reconheça e respeite os espaços confinados
- Alguns espaços abertos podem requerer os mesmos cuidados que os espaços confinados

Figura 34.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

6. Cilindros, Conexões e Válvulas para Hidrogênio e Gases Pressurizados

Didaticamente, pode-se classificar os gases em três tipos: industriais, medicinais e especiais. Embora tenham especificações de pureza e composição diferentes, a maior parte é comercializada na forma de gás comprimido em cilindros. A seguir, são apresentadas informações e especificações técnicas sobre esses cilindros, que constituem um tipo especial de vaso de pressão.

Observando um cilindro, percebe-se sua estrutura tubular. Muitas vezes, não se dá a devida atenção a seus detalhes, mas é possível identificar uma base côncava, o corpo cilíndrico, uma calota e um capacete. Este último pode ser removível ou fixo. O capacete fixo, conforme ilustrado em determinadas imagens, possui uma abertura que permite acesso à válvula, contudo, em situações de impacto, servirá para protegê-la.

Na região da calota, localiza-se um colar ou gargalo, onde é acoplada a válvula responsável pelo controle de abertura e fechamento do cilindro. É imperativo que o capacete fixo permaneça constantemente no cilindro, não sendo permitida sua remoção.

Gravadas na calota encontram-se informações pertinentes, como a pressão de trabalho, geralmente expressa em bar ou kgf/cm^2 . Outros dados incluem o número de identificação, norma de fabricação, data de fabricação e as datas de testes hidrostáticos. A validade desses cilindros varia conforme seu tipo.

É estritamente proibido remover ou alterar as características gravadas na calota. Modificações nas informações apresentadas são inaceitáveis. Além desses dados, existem outras informações mandatórias, como peso, volume interno, fórmula do gás e demais características relevantes.

Cilindros de gás pressurizado

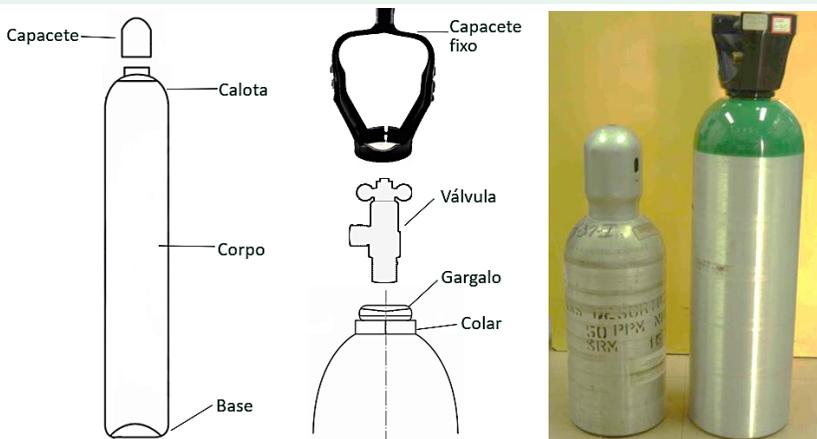


Figura 35.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Examinando atentamente a identificação técnica presente na calota do cilindro, nota-se a presença das seguintes informações:

1. Identificação do fabricante.
2. Pressão de serviço, que neste exemplo é de 200 bar.
3. Pressão de teste hidrostático, que costuma ser uma vez e meia maior que a pressão de trabalho. Neste caso, o cilindro foi testado a 300 bar, o que confere confiabilidade para sua operação até o próximo teste.
4. A norma de fabricação, neste exemplo, ISO 9809-1.
5. A tara do cilindro, que é aproximadamente 59 kg.
6. A capacidade nominal ou hidráulica, que é de 50 l.
7. A data de realização do teste hidrostático.
8. Número de série.
9. Símbolo do fabricante.
10. Órgão responsável pela certificação do teste hidrostático.
11. Rótulo de identificação do produto.

Cilindros de gás pressurizado

Identificação Técnica dos Cilindros

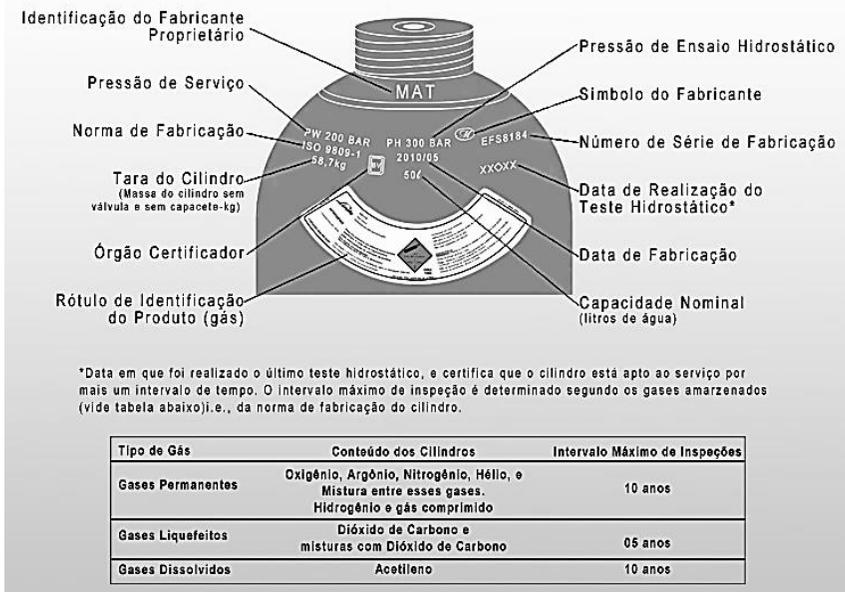


Figura 36.: Fonte: <https://www.eutox.com.br/>

Focando nos tipos de gases e seus intervalos de inspeção:

- Gases permanentes como oxigênio, argônio, nitrogênio, hélio, misturas desses gases, hidrogênio e ar comprimido têm um intervalo de inspeção máximo de 10 anos. Contudo, caso o cilindro sofra choques, avarias, ou seja, exposto a calor excessivo, este intervalo de inspeção deve ser reduzido, sendo recomendado o envio do cilindro ao fornecedor para teste hidrostático.
- Gases liquefeitos, como dióxido de carbono e misturas com dióxido de carbono, possuem intervalo de inspeção de cinco anos.
- Gases dissolvidos, como o acetileno, têm um intervalo de inspeção que pode chegar a 10 anos.

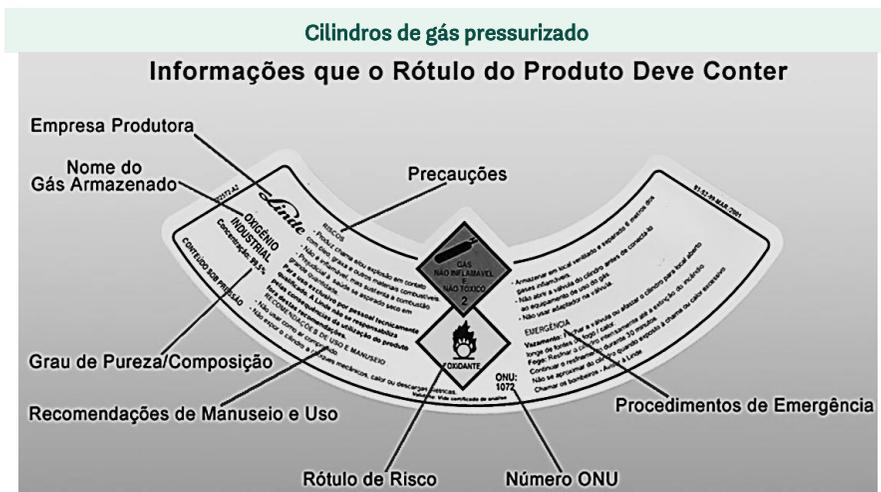


Figura 37.: Fonte: <https://www.eutox.com.br/>

Ao observar com atenção o rótulo do cilindro, identificam-se as seguintes informações:

- **Empresa produtora:** Mostra a marca ou nome da empresa que produziu ou envasou o gás.
- **Riscos e Precauções:** Informações sobre os potenciais riscos associados ao gás e as precauções que devem ser tomadas durante o manuseio.
- **Grau de Pureza:** Indica a concentração do gás no cilindro. Por exemplo, um gás 2.5 possui 99,5% de pureza; um gás 4.0 tem 99,99% de pureza. Outra referência importante é o número ONU.
- **Recomendações de Manuseio:** Fornece orientações sobre como manusear o cilindro e o gás de forma segura.
- **Pictogramas:** Símbolos gráficos de uso internacional que informam sobre as características e riscos do gás. No exemplo dado, tem-se um pictograma indicando que se trata de um gás comprimido (neste caso, oxigênio) e outro mostrando que é um gás oxidante.
- **Procedimentos de Emergência:** Orientações sobre o que fazer em caso de incidentes com o gás ou com o cilindro.

É essencial que todos os cilindros apresentem estas informações de maneira clara e visível. Anteriormente, essa ficha de informações podia

estar localizada no corpo do cilindro, mas atualmente é mais comum encontrá-la no rótulo.

Um rótulo adesivo no corpo do cilindro fornece informações sobre as características físico-químicas do produto e principais cuidados no seu manuseio.

Devem ser rejeitados para uso os cilindros:

- sem identificação adequada, sem pintura ou capacete;
- com sinais de amassamento ou corrosão, no corpo ou válvula;
- cilindros com teste hidrostático vencido (5 ou 10 anos, Figura 36).

Não é permitido reparar o cilindro ou sua válvula, nem modificar qualquer característica ou cor.

6.1. Armazenamento e deslocamento de cilindros de H2

No tocante às normas técnicas vigentes e aplicáveis aos cilindros de H₂, é crucial observar os seguintes pontos:

- Distâncias Mínimas: Respeitar as distâncias mínimas das vias públicas, o que varia conforme a quantidade de gás armazenado. Também manter distância de transformadores e redes elétricas.
- Separar Gases: É fundamental separar gases inflamáveis de gases poluentes e destes de outros materiais combustíveis. Em emergências, materiais combustíveis ampliam a severidade do acidente.
- Condições de Armazenamento: Os cilindros necessitam de proteção contra chuva e sol, devendo ser mantidos a temperaturas abaixo de 54°C. O armazenamento ideal ocorre em áreas externas, fechadas, cobertas, bem ventiladas, secas e longe de materiais corrosivos.
- Características do Local: O piso deve ser plano e horizontal, dado o peso dos cilindros. Materiais de construção precisam ser resistentes ao fogo, não sendo adequado, por exemplo, o uso de portas de madeira em áreas de armazenamento. O teto inclinado facilita a ventilação de gases mais leves, como o hidrogênio. Para

gases mais densos, como o GLP, é essencial possuir aberturas na parte inferior da sala.

- **Acesso e Segurança:** O espaço deve permitir fácil acesso de pessoas e cilindros, mantendo sempre os acessos abertos quando manipulando gases para facilitar a evacuação. Elementos elétricos, como tomadas e lâmpadas, devem ser à prova de explosão.
- **Posição dos Cilindros:** Os cilindros devem ser armazenados na posição vertical e com capacete. A disposição deve favorecer a retirada dos cilindros mais antigos sem deslocar os mais recentes.
- **Sinalização:** É mandatório ter sinalização visível e clara, como "Proibido fumar, provocar faíscas ou chamas". Pictogramas indicativos de gás comprimido ou inflamável devem estar presentes, bem como placas que diferenciem cilindros cheios de vazios. Cilindros defeituosos também devem ser claramente sinalizados, assim como os "Cilindros cheios" e "Cilindros vazios".

A rigorosa aderência a essas diretrizes não apenas garante a conformidade com as normas, mas principalmente preserva a segurança de todos os envolvidos.

Armazenamento de cilindros de H₂



Figura 38.. Fonte: Notas de Aulas, 2023.

É proibido deixar cilindros soltos. Eles devem ser encostados uns nos outros e firmemente fixados com correntes à parede ou a um suporte adequado.

Por exemplo, no laboratório de hidrogênio da Unicamp, foi desenvolvido um suporte específico para tal finalidade. Esse dispositivo, de construção simples, foi elaborado no próprio laboratório usando um gancho em formato de "L". Com ele, é possível acomodar uma corrente e ajustá-la ao cilindro. Assim que a corrente estiver devidamente ajustada, o cilindro permanecerá seguro e não cairá, mesmo que sofra uma leve inclinação.

É um método eficaz, simples e de baixo custo. Embora existam correias disponíveis no mercado para essa finalidade, o sistema de correntes demonstrou ser simples e confiável. Mais de um cilindro pode ser ancorado, contanto que estejam firmemente encostados uns nos outros e presos pela corrente.

Além disso, é essencial a presença de equipamentos de segurança como hidrantes e extintores de incêndio, seja de dióxido de carbono ou de pó químico, nas áreas de armazenamento. Estes equipamentos devem estar estrategicamente posicionados em locais de fácil acesso, prontos para serem utilizados em caso de emergências.

Entretanto, é crucial garantir que não obstruam o caminho, facilitando a movimentação de pessoas e cilindros. Ou seja, eles devem estar sempre acessíveis, mas sem causar obstrução no trânsito de pessoas ou cilindros.

Resumos sobre Armazenamento de H2

- Respeito às normas técnicas vigentes: distâncias mínimas de vias públicas, transformadores, redes elétricas, materiais combustíveis, etc.
- Cilindros protegidos de chuva e raios solares, $T < 54^{\circ}\text{C}$
- Área externa, fechada, coberta, bem ventilada, seca, isolada de materiais corrosivos
- Piso horizontal e plano, materiais resistentes ao fogo
- O teto deve possibilitar o escape do gás
- Fácil acesso de pessoas e cilindros; evasão facilitada
- Tomadas, lâmpadas, fiação, etc. à prova de explosão
- Cilindros são guardados obrigatoriamente com capacete e na posição vertical
- A disposição dos cilindros deve permitir a retirada dos mais antigos (por data enchimento) sem que seja necessário mexer na posição dos demais
- Sinalização obrigatória, bem visível e suficiente:
- "Proibido fumar, provocar faíscas ou chamas"
- "Cilindros cheios" e "Cilindros vazios".

Figura 39: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

No manuseio e armazenamento de cilindros de gás, existem ações e procedimentos que devem ser estritamente evitados devido aos riscos inerentes. Estas são algumas das regras fundamentais:

- Não se deve reparar um cilindro ou sua válvula. Esta atividade é especializada e deve ser realizada somente pelo fornecedor do gás.
- Não se deve modificar qualquer característica ou cor do cilindro.
- Ao movimentar um cilindro, é obrigatório que ele esteja com capacete instalado.
- Em cilindros com capacete fixo, este ****não**** deve ser retirado.
- Antes de conectar, o cilindro ****deve**** estar devidamente preso com correntes.
- Não se deve abrir uma válvula de cilindro para verificar seu conteúdo sem uma válvula reguladora de pressão conectada.
- Cilindros com a válvula aberta ****devem**** estar em uso. Caso contrário, a válvula ****deve**** ser fechada.
- Não se deve suspender um cilindro usando cabo de aço preso ao corpo.
- Não suspender um cilindro por meio de eletroímã.
- Não movimentar um cilindro rolando-o na posição horizontal.
- Em caso de queda de um cilindro, ****não**** se deve tentar segurá-lo.

Adotar estas precauções é vital para garantir a segurança durante o manuseio e armazenamento de cilindros, minimizando riscos e assegurando a integridade do ambiente de trabalho.

Os padrões de cores para cilindros de gases são regulados por normas, como a ABNT NBR 12173. Estes padrões ajudam a identificar rapidamente o conteúdo de um cilindro, promovendo uma manipulação mais segura. Seguem os padrões mencionados:

- Hidrogênio: Cor amarela.
- Hélio: Cor laranja.
- Argônio: Marrom escuro.
- Mistura de Argônio e CO₂ (para solda): Marrom um pouco mais claro.

- Oxigênio Industrial: Preto (diferenciando-se do oxigênio medicinal, que tem cilindro na cor verde).
- Nitrogênio: Cinza escuro.
- Dióxido de Carbono (CO₂): Cinza mais claro.
- Acetileno: Cor vermelha (devido à sua propriedade altamente inflamável).

A maior parte das empresas obedecem a essas cores.

Mas, algumas empresas, por questões de branding ou identificação, podem optar por pintar os cilindros com uma cor característica da marca, reservando a calota (ou parte do topo) do cilindro para a cor que indica o conteúdo conforme a norma. Esse procedimento auxilia na identificação rápida do gás contido, mantendo a segurança e conformidade com as normas estabelecidas.

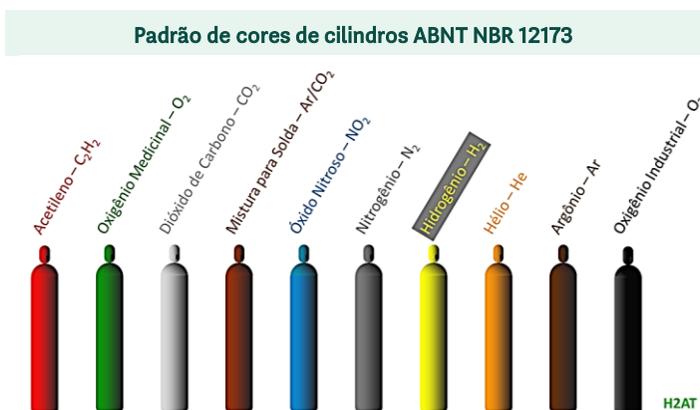


Figura 40: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Para realizar o deslocamento horizontal de cilindros de forma segura, existem métodos recomendados. Um deles é a utilização de carrinhos específicos para cilindros. Esses dispositivos são geralmente simples e de baixo custo, e facilitam bastante o transporte, reduzindo o esforço necessário. Durante o uso do carrinho, é obrigatório que o cilindro esteja com o capacete e esteja preso ao carrinho com uma corrente ou correia ajustável. Além disso, é essencial que se use equipamentos de proteção individual, como luvas, sapatos de segurança, óculos e capacete.

Deslocamento horizontal de cilindros



Figura 41.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Outro método para o deslocamento vertical de cilindros é a utilização de um carrinho com três rodas que giram, o que facilita o transporte em escadas. Contudo, mesmo que esse carrinho seja projetado para facilitar o processo, ainda é necessária uma certa força para deslocar o cilindro escada acima de forma segura, pois os cilindros de aço com capacidade hidráulica de 50 L pesam cerca de 50 kg.

Deslocamento vertical de cilindros



Figura 42.: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

Por outro lado, quando se trata de caminhões de transporte de cilindros, a maioria deles já vem equipada com um elevador especializado. Com esse mecanismo, o cilindro é posicionado no elevador e devidamente preso com correntes. Em seguida, o elevador faz o içamento do cilindro, assegurando

que a elevação ocorra de maneira segura e sem contratempos. Essa tecnologia amplia a eficiência e segurança durante o manuseio dos cilindros.

6.2. Equipamento de Proteção Individual – EPI

Para a movimentação dos cilindros é necessário utilizar EPI adequado, como luvas de raspa de couro e bota com biqueira de aço e calcanhar reforçado.

Em situações envolvendo cilindros, a segurança é primordial. Em caso de queda do cilindro, os calçados de proteção garantem que os pés estejam salvaguardados.

Além disso, é imprescindível o uso de óculos de segurança com proteção lateral para prevenir eventuais fluxos de gás comprimido que possam alcançar e prejudicar os olhos. Esses óculos proporcionam uma proteção adequada.

Equipamento de Proteção Individual – EPI



Figura 43: Fonte: Notas de Aulas, 2023.

O capacete, por sua vez, é também altamente recomendado, especialmente porque no ambiente de trabalho com cilindros e tubulações, há riscos de impactos na cabeça.

Em cenários onde se trabalha com gases tóxicos ou quando se suspeita de vazamento, torna-se necessário o uso de equipamento de respiração autônomo.

O equipamento exemplificado possui 30 minutos de autonomia e vem com uma máscara facial que veda completamente o rosto, garantindo que o usuário não inale substâncias nocivas. Em alguns casos, essa máscara pode ser equipada com filtros específicos para gases tóxicos.

Contudo, a norma é que o usuário respire o ar proveniente do cilindro de ar comprimido, que posteriormente será exalado pelos pulmões. Adicionalmente, o equipamento deve vir equipado com um manômetro com temporizador.

Quando a pressão do gás dentro do cilindro chega a um nível crítico, um alarme vibratório é acionado, alertando o usuário sobre a necessidade de se retirar do local imediatamente.

6.3. Emergência com cilindro de H2

Emergências envolvendo cilindros de hidrogênio devem ser tratadas adequadamente.

Em um exemplo de expansão de um tanque de hidrogênio, observou-se que, apesar da emissão de chamas, os tanques em si não explodiram e se mantiveram intactos, evidenciando a resistência desses compartimentos. Em um incidente específico com um caminhão-tanque de hidrogênio líquido, houve colisão por outro veículo na parte traseira, resultando em vazamento e consequente combustão do hidrogênio.

Nessa situação, após consulta com especialistas, a equipe de bombeiros optou pela abordagem mais segura: permitir que o hidrogênio continuasse queimando até que se esgotasse completamente do tanque. Isso porque interromper a chama sem garantir a contenção do vazamento pode resultar em uma atmosfera potencialmente explosiva.

Conforme mencionado anteriormente, a formação de uma nuvem gasosa densa proveniente de vazamento de hidrogênio líquido misturado ao ar atmosférico é particularmente perigosa porque possui alta densidade. Ela permanecerá ao nível do solo por períodos mais longos, podendo-se deslocar e atingir outros locais ou instalações, provocar incêndios, asfixia, queimaduras por frio etc.

Emergência com cilindro de H₂



Photo: Ole Berg-Rusten / NTB Scanpix



Left: A photo taken from north of the turnpike Thursday evening by Mandie Crawford, Wauseon, shows hydrogen burning as it leaked from the tanker. After consulting with experts, firefighters determined the safest way to deal with the problem was to allow the material to burn off as it escaped the tank.

Figura 44.: Fonte: <https://norwaytoday.info/news/explosion-sandvika-hydrogen-tank>

Caso ocorra uma ignição espontânea do hidrogênio em tal cenário, a detonação é quase certa. A abordagem tomada foi deixar o gás que vazava queimar e, paralelamente, provavelmente resfriar outras partes do caminhão para evitar danos adicionais.

Em situações em que o vazamento não pode ser contido, a prática recomendada é transferir os cilindros para áreas abertas e ventiladas, dissipando o gás. Somente após a contenção completa do vazamento é que se inicia a intervenção direta. Se um cilindro estiver emitindo chamas direcionadas a outro cilindro ou estrutura, é importante redirecionar essa chama para uma posição segura. Esse procedimento só deve ser realizado em condições aceitáveis de segurança para o operador.

Vale lembrar que chamas de hidrogênio não são visíveis durante o dia, o que demanda cuidados adicionais. Câmeras termográficas para hidrogênio podem ser utilizadas para detectar tais chamas. Um recurso frequentemente empregado e bastante recomendável é a utilização de uma vassoura de palha natural para verificar a existência de chama.

O fornecedor deve ser comunicado sobre o incidente e os cilindros envolvidos em tais incidentes devem ser devidamente identificados e colocados fora de serviço. Reportar acidentes e incidentes é importante, pois fornece informações valiosas para a equipe e para o fornecedor, ajudando a identificar possíveis falhas em lotes específicos de cilindros, falhas de procedimento etc. A segurança da equipe e do ambiente deve sempre ser a prioridade, e a transparência em reportar problemas não deve

ser vista como punição, mas sim como uma medida proativa de prevenção e oportunidade de treinamento para toda a equipe.

6.4. Conexões para gases comprimidos

As conexões para gases comprimidos são essenciais para garantir a segurança e eficiência no manuseio e transporte desses materiais. Há diversos tipos de conexões disponíveis e é fundamental entender suas especificidades.

Em tarefas cotidianas, utilizamos majoritariamente a rosca direita. Por exemplo, nas garrafas de leite ou torneiras, giramos no sentido horário para fechar e no sentido anti-horário para abrir.

A rosca direita é utilizada nas conexões das válvulas dos cilindros de gases comburentes e inertes. Contudo, para gases combustíveis utiliza-se a rosca esquerda, nas quais giramos no sentido anti-horário para apertar a porca e no sentido horário para despertar a porca que se conecta ao cilindro. Essa característica é indicada pelo entalhe presente na porca da conexão. Essa convenção elimina o risco de conectar inadvertidamente gases combustíveis e comburentes na mesma linha de gases, minimizando o risco de criar uma mistura gasosa explosiva e a alta pressão dentro da tubulação.

Conexões para gases comprimidos

Cilindros para gases inflamáveis utilizam conexões com rosca esquerda, indicada pelo entalhe na porca

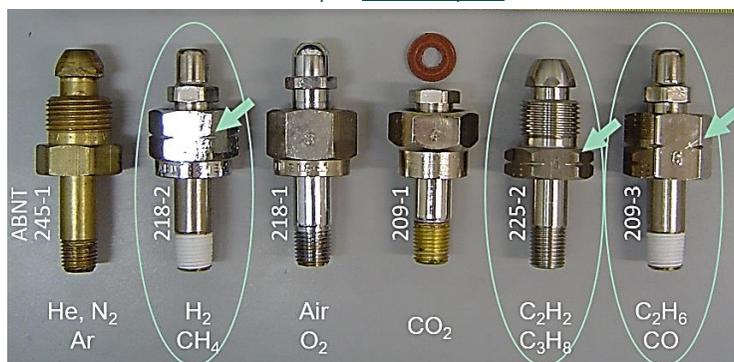


Figura 45:. Fonte: LH2-UNICAMP



Por meio da:



Coordenação do curso:



Portanto, cilindros de gases como hidrogênio, metano, acetileno, propano e monóxido de carbono têm um entalhe na porca, indicação de rosca esquerda. Esse entalhe serve como um alerta visual, indicando que a conexão tem uma rosca esquerda e, assim, reforçando as medidas de precaução na hora de manusear e conectar esses cilindros.

As normas ABNT estabelecem padrões específicos para os tipos de bicos em conexões para cilindros de gases. É essencial ter em mente esses padrões para garantir a segurança e eficiência no manuseio e transporte de gases comprimidos.

Um detalhe fundamental a ser observado nesse tipo de conexão é que é inútil tentar realizar a vedação na rosca, como indicado na Figura 42, ABNT 245-1. A parte roscada serve apenas para fixação mecânica, não possuindo a função de vedação. Na realidade, a vedação ocorre entre o bico e o receptáculo que se encontra na válvula do cilindro, e é uma vedação do tipo metal-metal.



Figura 46.: Fonte: LH2-UNICAMP

Com exceção do bico ABNT 209-1 que possui um anel de vedação, todos os demais bicos visualizados na Figura 46 apresentam vedação do tipo metal-metal. É importante proteger a área de vedação do bico para que não

seja danificada ou riscada. Uma dica útil é envolver o bico com um saco plástico quando o cilindro não estiver em uso, evitando a acumulação de sujeira ou pó.

Atualmente, a maior parte dos cilindros de gás comprimido utilizam conexões do tipo metal-metal. De maneira geral, apenas cilindros de GLP, gás natural e oxigênio utilizam anéis de vedação. No Laboratório de Hidrogênio da Unicamp durante muitos anos foram utilizados com sucesso anéis de vedação feitos de nylon, para os cilindros de hidrogênio. Mas os bicos eram adequados para esse tipo de conexão.

Um alerta importante ao utilizar fita teflon para fazer a vedação de conexões roscadas é evitar colocar fita teflon no primeiro fio de rosca. Caso isso ocorra, ao rosquear, pedaços de teflon irão se soltar e se deslocar ao longo do sistema de gás provocando entupimentos, comprometendo a vedação das válvulas agulha, o funcionamento das válvulas reguladoras de pressão etc. Quando se utiliza fita teflon, recomenda-se aplicá-la a partir do segundo fio de rosca. Opcionalmente, para remover o teflon do primeiro fio rosca, pode-se utilizar um estilete. Nas conexões roscadas, recomenda-se que o rosqueamento abranja quatro fios de rosca para assegurar uma conexão mecânica segura.

Nas conexões roscadas para gases pressurizados normalmente são utilizadas roscas do tipo NPT, que são cônicas. Por exemplo, na Figura 46 todos os bicos apresentam roscas macho $1/4$ NPT.

Antigamente havia muitos problemas de compatibilidade entre os fabricantes em relação a esse tipo de conexão, a ponto de comprometer seriamente a fixação mecânica e a vedação. Atualmente, várias marcas tais como Swagelok, Parker, Hy-lok, Triunion e Tylok apresentam boa compatibilidade.

No entanto, recomenda-se sempre verificar cuidadosamente a compatibilidade no momento da compra e da manutenção. As roscas cônicas NPT apresentam o mesmo passo que as conexões com rosca paralela do tipo BSP, o que pode gerar equívocos. A recomendação para gases a alta pressão é a utilização de conexões com roscas cônicas do tipo

NPT. Como exemplo, a Figura 47 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta dois niples, união roscada macho x macho, 1/8 e 1/4 NPT.

Outro ponto importante a ser observado é a pressão máxima de operação, assunto que será mais bem discutido numa próxima seção.

A Figura 47 apresenta também as conexões com dupla anilha para tubos de aço, bem como algumas dicas de montagem e detalhes a serem observados para se obter boa estanqueidade. Essas conexões para tubos possuem duas anilhas, frontal e traseira; a anilha frontal é normalmente projetada para fornecer uma vedação entre ela, a tubulação e o corpo da conexão, enquanto as anilhas traseiras prendem a tubulação e mantêm a anilha frontal na posição adequada.

Ao utilizar anilhas, é fundamental evitar arranhões no sentido longitudinal do tubo. Se isso ocorrer, recomenda-se fazer um polimento do tubo no sentido circular com lixas adequadas, finalizando com uma lixa com granulometria 600.

Na imagem central superior da Figura 47 pode-se observar que as anilhas estão mal posicionadas, muito próximas à ponta do tubo. Esse posicionamento inadequado cria um pequeno espaço entre o tubo e a conexão, que em aplicações analíticas é designado "volume morto".

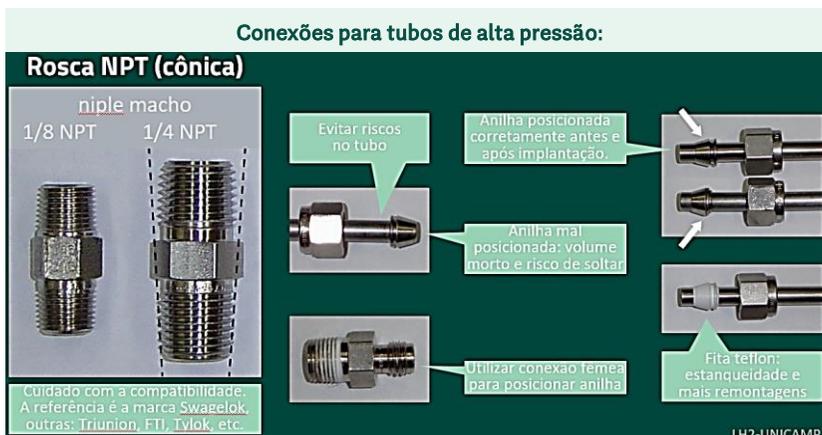


Figura 47: Fonte: LH2-UNICAMP

Esse volume morto é bastante prejudicial nas aplicações analíticas, pois dificulta a limpeza da tubulação, retendo um pequeno volume de ar ou outro gás indesejado. Além disso, a anilha posicionada muito na ponta do tubo irá comprometer a integridade mecânica da tubulação e a vedação de gases a alta pressão.

Nas tubulações que passam por sucessivas montagens/desmontagens as anilhas podem se deformar, aproximando a anilha traseira da frontal. Quando isso ocorre, recomenda-se que a conexão seja substituída, para evitar danos à conexão fêmea.

Em sistemas que são montados e desmontados frequentemente, não só devemos estar atentos a vazamentos, como também a danos. Ao identificar uma conexão danificada, é necessário substituí-la, e em alguns casos, ambos os componentes – macho e fêmea – precisam ser trocados.

O processo de instalação das anilhas requer atenção aos detalhes. Para facilitar o processo, essa operação poderá ser feita numa bancada com morsa. Após inserir a porca e as anilhas no tubo, recomenda-se que seja utilizada uma conexão fêmea (que irá receber o tubo) para fazer a fixação das anilhas no tubo. Essa conexão deve ser exatamente igual a que irá receber o tubo com as anilhas posteriormente. Na pré-montagem, o tubo deve ser completamente inserido na conexão, garantindo que não fique nenhum espaço vazio entre ambos.

Em seguida, será feito um aperto manual da porca, seguido de um aperto com uma chave fixa, ver Figura 48. Durante o processo de montagem e desmontagem, recomenda-se fazer marcações com caneta hidrográfica nas conexões para garantir o posicionamento e aperto corretos. No caso de tubos de 1/4" deve-se dar uma volta completa com a chave fixa. Após esse giro, a anilha já estará fixada firmemente ao tubo.

Conexões para tubos de alta pressão:



Guia para aperto da anilha exemplo com tubo de 1/4"

- Pré-montagem: encostar + 1 volta
- 1ª montagem: + 1/4 volta (ou 1+1/4)
- Próximas montagens:
 - marcar posição antes de desmontar
 - ao remontar apertar até 1/8 volta
- Tubo de menor diâmetro: menos aperto
- Tubo de maior diâmetro: mais aperto

Figura 48: Fonte: Notas de Aulas, 2023

No caso de tubos de 1/4" na pré-montagem deve-se dar uma volta completa com a chave fixa. Esse procedimento assegura que as anilhas estarão fixadas firmemente ao tubo. Após a pré-montagem, na 1ª montagem deve-se dar um aperto adicional de 1/4 de volta; nas próximas remontagens recomenda-se apertar 1/8 de volta em cada uma delas.

Vale ressaltar que tubos com diâmetros menores exigem menos torque. Na cromatografia gasosa, frequentemente são utilizados tubos com diâmetro externo de até 1/16", equivalente a 1,6 mm. São tubos muito delicados e é essencial consultar o guia do fabricante para garantir o manuseio e montagem corretos.

Para sistemas que operam em baixas pressões, os tubos plásticos podem ser utilizados, especialmente nos sistemas pneumáticos.

Conexões e tubos para baixa pressão



Figura 49: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Atualmente, o mercado oferece uma ampla variedade de conexões de engate rápido. Uma característica dessas conexões é a presença de um o-ring, responsável por assegurar uma vedação eficiente ao redor dos tubos plásticos acoplados às conexões. Até mesmo algumas conexões com rosca BSP podem utilizar um o-ring externo para realizar a vedação.

Os tubos plásticos podem ser de diversos materiais, tais como PVC, polipropileno, nylon e polietileno. O poliuretano é um material que apresenta boa flexibilidade e os tubos apresentam vedação adequada com os engates rápidos nas aplicações pneumáticas. Não se recomenda sua utilização com hidrogênio e gases combustíveis.

Conexões com anilhas plásticas do tipo Detroit, apresentadas na Figura 49 à direita, quando combinadas com tubos de polietileno, são muito úteis e proporcionam uma boa vedação, podendo ser utilizados nas aplicações de laboratório, amostragem de gases etc. A pressão máxima de trabalho neste caso é de 8 bar.

As anilhas plásticas se destacam pela facilidade de uso e por possibilitar inúmeras remontagens. Um aperto manual geralmente proporciona uma boa vedação; mas, quando necessário, pode-se dar um leve aperto com uma chave fixa, de cerca de $1/8$ de volta.

Válvulas são componentes fundamentais em diversos sistemas, principalmente naqueles que lidam com o controle do fluxo de fluidos. Existem variados tipos de válvulas, cada uma adequada a uma situação ou aplicação específica.

Uma das válvulas mencionadas é a válvula agulha, assim denominada devido à sua forma característica. Geralmente, essa válvula possui um corpo e uma haste alongada, em cuja extremidade há um polímero que se assenta sobre o orifício interno do corpo da válvula, o que promove uma boa vedação do gás.

Válvulas agulha para gases



Figura 50:. Fonte: LH2-UNICAMP

Um ponto importante a destacar é a vedação metal-metal. No passado, no laboratório, houve problemas ao utilizar válvulas alemãs desse tipo. Elas eram excelentes em termos de construção, mas quando utilizadas para gás, apresentavam problemas recorrentes de vazamento. Frequentemente era necessário enviá-las para oficina para polimento das superfícies de vedação. Com o passar do tempo, aprendemos que para a vedação de gás, é mais apropriado o uso de válvulas que utilizam polímeros para vedação. As válvulas metal-metal com a ponta da haste cônica podem ser utilizadas para fluidos com uma viscosidade mais elevada, como óleo e água, e proporcionam algum grau de controle de vazão.

Considerando apenas o aspecto externo, muitas vezes, as válvulas parecem idênticas. Por isso, é essencial observar as especificações da válvula. No exemplo apresentado, uma válvula possui um código "V", para fluidos viscosos, enquanto outra tem a indicação "K", apontando para o uso do polímero Kel-F, ideal para a vedação de gases.

A utilização do polímero como elemento de vedação apresenta grandes vantagens porque ele tem a capacidade de se acomodar em pequenas irregularidades e de incorporar impurezas, como pó e pequenos detritos. Para evitar problemas relacionados a existência de pó ou detritos, deve-se

utilizar filtros com elemento sinterizado ao longo de toda a tubulação do sistema de gases. Isso garantirá uma operação mais eficiente e segura.

Válvulas, como qualquer outro componente mecânico, estão sujeitas a desgastes e imperfeições ao longo do tempo. Se pensarmos em algo cotidiano, como uma torneira, observa-se que, periodicamente, é preciso substituir vedações para evitar vazamentos. Isso acontece porque as vedações se desgastam ou deformam com o uso constante, fazendo com que não cumpram mais adequadamente sua função.

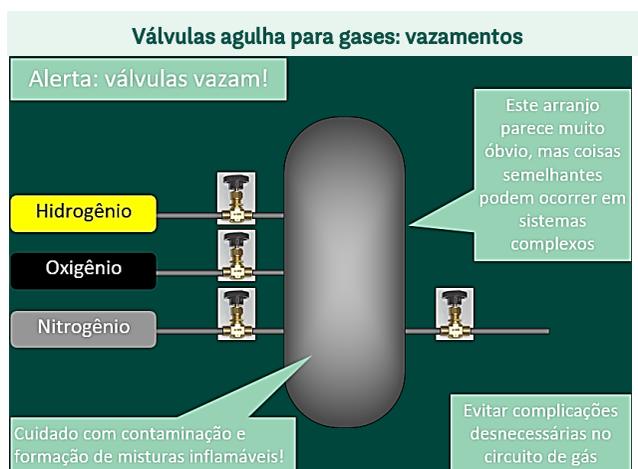


Figura 51: Fonte: LH2-UNICAMP

Com as válvulas industriais, de laboratório ou mesmo para uso doméstico, a situação não é diferente. Mesmo que tenham sido projetadas para serem robustas e confiáveis, há uma certa taxa de vazamento que depende de parâmetros tais como: tipo de válvula, design e materiais de construção; tipo de gás; faixa e diferencial de pressão; e temperatura. Geralmente, os fabricantes podem informar a taxa de vazamento interno (através da válvula), além das demais especificações. Para hidrogênio a alta pressão pode-se considerar um vazamento interno máximo permitido de 1×10^{-6} L/min. Algumas normas também determinam os valores de vazamento para a atmosfera através da haste (stem) e demais partes da válvula.

Apesar de extremamente baixos, os valores de vazamento interno esperados não podem ser ignorados, especialmente em aplicações críticas.

Por isso, é fundamental estar ciente das características da válvula, realizar verificações da estanqueidade e manutenções preventivas periodicamente. Sempre que observado um desvio do comportamento esperado deve-se realizar a manutenção corretiva da válvula no menor prazo possível.

Em resumo, assim como qualquer outro componente mecânico, as válvulas e seus componentes internos têm uma vida útil e requerem atenção e cuidado para garantir seu funcionamento ideal.

Em qualquer sistema que manipule gases, especialmente os inflamáveis ou comburentes, a segurança deve ser a prioridade máxima. Mesmo vazamentos pequenos não apenas acarretam perdas materiais, mas também representam um risco real de formação de misturas inflamáveis, podendo resultar em acidentes graves.

Para evitar contaminações devido ao vazamento interno das válvulas recomenda-se ajustar adequadamente as pressões das diversas partes do sistema de forma que se ocorrer um vazamento não haverá formação de uma mistura explosiva.

Além disso, sempre que for possível ou viável, uma boa prática nas paradas do processo é inertizar os reservatórios utilizando um gás inerte para evitar o risco de formação de misturas inflamáveis. Esta medida assegura que não haja nenhuma possibilidade de combustão. Em sistemas que trabalham com gases combustíveis, o uso de conjuntos de válvulas em duplicata é comum. As válvulas com atuação pneumática são especialmente úteis, pois podem ser acionadas remotamente sem a necessidade de eletricidade, o que proporciona maior segurança. Em ambientes industriais, muitas vezes, estas são complementadas por uma válvula manual, o que permite um controle adicional.

Por fim, ao projetar ou operar sistemas de gás, é importante manter a simplicidade. Sistemas menos complexos são mais fáceis de monitorar, manter e consertar, o que reduz o risco de acidentes. Em suma, práticas rigorosas de segurança são vitais para assegurar o funcionamento eficaz e seguro de qualquer sistema que envolva gases.

6.5. Válvulas reguladoras de pressão (VRP)

É importante entender a importância das válvulas reguladoras de pressão na utilização de gases comprimidos, como o hidrogênio.

Na figura abaixo à esquerda, pode-se observar a figura de uma válvula reguladora de pressão, em corte, com os orifícios de entrada (conexão com o cilindro de alta pressão) e saída do gás, ajustada com a pressão de trabalho do sistema a ser alimentado.



Figura 52.: Fonte: <https://rotarex.com/>

A respeito das válvulas reguladoras de pressão (VRP), há dois modelos principais: o de simples estágio e o de duplo estágio. O segundo tipo, o de duplo estágio, oferece um controle mais refinado da pressão de saída. Nas válvulas reguladoras de simples estágio, conforme a pressão do cilindro diminui, a pressão de saída pode aumentar, o que é indesejável. O modelo de duplo estágio normalmente não apresenta essa instabilidade.

No dispositivo é possível identificar uma manopla que, ao ser girada no sentido anti-horário até o fim, bloqueia o fluxo de gás. No entanto, para interromper o fluxo de gás o mais adequado é fechar a válvula do cilindro ou uma válvula manual instalada logo após a VRP. Não é recomendável utilizar frequentemente a manobra de fechar o fluxo de gás diretamente na VRP porque isso pode comprometer a vida útil de suas partes internas, principalmente nas válvulas com diafragma metálico.

A pressão de saída do gás pode ser ajustada por meio da manopla da VRP. Ela atua sobre uma mola que contrabalança a pressão do gás em um diafragma, permitindo a regulação da pressão de saída conforme desejado. O primeiro e o segundo estágios da válvula estão claramente indicados, sendo que existe outra mola no segundo estágio.

As portas de entrada de saída de gás na VRP estão indicadas e recomenda-se muita atenção para não inverter as conexões. Habitualmente, há indicações claras (por meio de pictogramas ou inscrições como "IN" e "OUT") para evitar equívocos. Inverter as conexões pode resultar em danos à válvula. Além disso, é fundamental considerar a compatibilidade do tipo de gás com o material da válvula, bem como a pressão máxima que ela pode suportar, e, igualmente importante, que os manômetros sejam compatíveis.

Ao trabalhar com VRP, nunca devemos operá-las no limite de sua capacidade. É recomendável utilizar uma pressão de saída entre 50% a 70% de seu valor nominal. Também é essencial estar atento à escala dos manômetros, e ao adquirir novos, garantir que possuam escalas compatíveis, para evitar complicações decorrentes de conversões de unidades.

No contexto de aplicações específicas, como na cromatografia gasosa, é aconselhável marcar no próprio manômetro de saída a pressão de trabalho normalmente utilizada. O uso de pressões inadequadas pode danificar os equipamentos.

Outro ponto importante é o material do diafragma. No passado, era comum o uso de diafragmas de borracha, mas para gases como o hidrogênio, isso era problemático. Hoje em dia, diafragmas de aço inoxidável são recomendados e amplamente disponíveis, especialmente para aplicações envolvendo hidrogênio e gases ultrapurificados.

Por fim, é deve-se atentar para o coeficiente de vazão da válvula para garantir que atenda às demandas do sistema. Em situações que envolvem gases ultra purificados ou para fins analíticos, deve-se optar por válvulas com volumes internos reduzidos para garantir a pureza dos gases e a obtenção de amostras representativas com finalidades analíticas.

6.6. Pressão máxima admissível

A pressão máxima admissível de um sistema é um parâmetro que exige atenção especial. A ASME (Associação de Engenheiros Mecânicos) denomina esta medida como *Maximum Allowable Working Pressure*, que, em português, traduz-se como "pressão máxima de trabalho" ou "pressão máxima de trabalho admissível".

É imperativo conhecer a pressão máxima de trabalho de todos os componentes a fim de determinar a pressão máxima de todo o sistema. Ela será determinada pelo componente com a menor pressão máxima permitida. Esse componente específico define a pressão para todo o sistema ou para uma parte específica dele.

É essencial ter cautela com as válvulas reguladoras de pressão para garantir que as portas de entrada e saída de gás não sejam invertidas, o que pode danificar a válvula. Outro cuidado é para que a pressão de saída ajustada na VRP não ultrapasse a pressão máxima do sistema.

Conexões metálicas podem transmitir uma falsa sensação de segurança. É fundamental conhecer sua pressão máxima de trabalho, consultando o catálogo do fornecedor quando necessário. Uma boa prática é anotar a pressão máxima de trabalho no dispositivo para fácil consulta.

Na atualidade, dispositivos como vasos de pressão geralmente têm a sua pressão de trabalho indicada. Assim, em produtos como cilindros, todas as informações pertinentes estão gravadas. Normalmente, estes vasos de pressão estão equipados com uma válvula de alívio ou um disco de ruptura.

O disco de ruptura é um dispositivo geralmente visível, fabricado a partir de uma liga metálica e projetado para se romper sob certas condições de temperatura e pressão. Isso permite a liberação do gás, evitando que pressão máxima admissível seja superada, prevenindo explosões provenientes de rompimento por pressão.

Válvulas de alívio, por sua vez, são projetadas para liberar o gás contido no vaso de pressão ou cilindro quando a pressão atinge um valor preestabelecido. Normalmente, todos os vasos de pressão vêm equipados com tais dispositivos de segurança.

Os processos que utilizam misturas gasosas produzidas por um sistema dinâmico, com dois ou mais gases em fluxo contínuo, devem passar por um dispositivo que garanta a homogeneização da mistura. Ao contrário do que intuição pode sugerir, os gases nem sempre se misturam de maneira rápida e uniforme. Por exemplo, no uso cotidiano de um fogão a gás, se o queimador não estiver corretamente posicionado, pode-se observar que a chama não se mantém, indicando que os gases não estão sendo misturados de forma adequada. Isso evidencia a necessidade de homogeneizar misturas gasosas.

Nos reservatórios, a homogeneização pode ser realizada com o uso de hélices internas. Um exemplo prático é o frasco de tinta spray, que contém uma esfera no interior. Antes de usar, agita-se o frasco para homogeneizar as fases líquida e gasosa.

Em contextos industriais, no processo de produção de misturas gasosas com finalidades preparativas ou analíticas, uma etapa obrigatória é a homogeneização da mistura gasosa num equipamento com roletes sobre os quais os cilindros ficam girando por horas, em ambas as direções.

É importante destacar que misturas com densidades muito distintas podem estratificar se deixadas em repouso por algum tempo. Profissionais da área analítica estão familiarizados com essa questão, especialmente quando utilizam misturas com gases de densidades muito distintas ou hidrocarbonetos voláteis. Nesses casos, a homogeneização é fundamental para preservar a qualidade da mistura de calibração e para obter análises quantitativas com boa exatidão.

6.7. Purgas gasosas

No contexto de trabalhar com gases, a palavra "purgar" assume uma conotação técnica específica. De acordo com a definição do dicionário Michaelis, purgar é o ato de purificar, removendo impurezas ou elementos estranhos.

Em operações com gases, significa limpar ou lavar um reservatório através de um gás. Esse processo pode envolver a limpeza do reservatório com

múltiplas passagens de gás ou o alívio da pressão de um sistema, permitindo que o gás nele contido seja liberado para o ambiente.

A purga gasosa é utilizada para diferentes finalidades. Uma delas é a de finalidade preparativa, que envolve a lavagem com gás de um reservatório para que ele possa receber outro gás. Por exemplo, se um reservatório se encontra com ar em seu interior, é prática comum que esse reservatório seja inertizado previamente com nitrogênio antes de introduzir o hidrogênio. Esse processo pode ser denominado purga com nitrogênio, lavagem com nitrogênio ou inertização com nitrogênio.

Além disso, do ponto de vista analítico, é vital que os componentes do sistema – tais como tubulação, válvulas e cilindros amostradores – sejam adequadamente purgados para assegurar uma amostra representativa.

Outra finalidade crítica da purga está relacionada à segurança. O procedimento pode ser utilizado para inertizar uma mistura e retirá-la da faixa de inflamabilidade. Por exemplo, se um reservatório estiver preenchido com ar, a redução da concentração de oxigênio abaixo de 5% garante que a atmosfera esteja segura para a subsequente introdução de hidrogênio.

Existem três tipos básicos de purga:

1. **Purga por Arraste**: O gás de purga é utilizado para "arrastar" ou remover o gás existente no reservatório.
2. **Purga por Diluição Contínua**: O gás de purga é introduzido continuamente no reservatório para diluir o gás existente até atingir a concentração desejada.
3. **Purga por Diluição Discreta**: O gás de purga é introduzido em etapas, com aumento e diminuição da pressão, para que o gás contido no reservatório vá sendo diluído sucessivamente até que se alcance a concentração desejada.

Purga por arraste

Uma quantidade de gás de purga igual à quantidade de gás existente no tubo é suficiente para eliminar o gás original. O gás original é arrastado por um pequeno diferencial de pressão

Purga por Arraste é muito adequada para tubulações

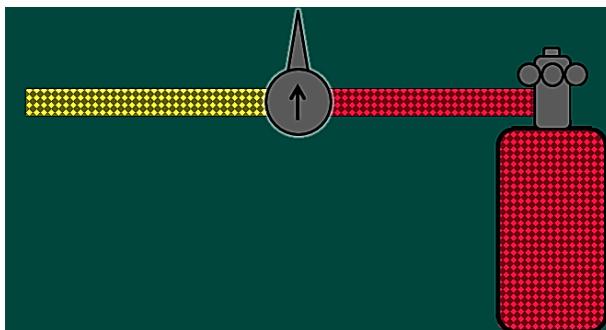


Figura 53.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Em qualquer aplicação, a purga é uma etapa essencial para garantir a segurança, a exatidão das análises e a eficácia das operações envolvendo gases.

A purga por arraste é particularmente eficaz para tubulações. Devido a geometria favorável, o gás de purga desloca o gás original da tubulação por meio de um leve diferencial de pressão. A quantidade de gás purga utilizada é praticamente igual à capacidade hidráulica da tubulação.

Imagine, por exemplo, uma tubulação que atualmente contém ar e há a necessidade de limpar um segmento específico dela. Ao abrir a válvula, o gás pressurizado desloca e arrasta o ar que estava no interior da tubulação. Ao concluir esse processo, basta fechar a válvula, e assim, o segmento da tubulação estará limpo (ou purgado). É recomendável nesses casos, estimar a capacidade hidráulica da tubulação e a vazão do gás de purga para estimar o tempo de purga necessário. Na prática, utiliza-se um tempo um pouco maior para garantir a purga completa do sistema.

A grande vantagem da purga por arraste, especialmente em tubulações, é a sua simplicidade e rapidez. Em muitos casos, tudo que é necessário fazer é abrir e fechar duas válvulas para efetuar a purga da tubulação.

Na purga por diluição contínua, o gás presente dentro do reservatório é diluído continuamente. Esse processo envolve a introdução contínua do

gás de purga e o escoamento contínuo do gás original misturado com o gás de purga para fora do reservatório, promovendo uma diluição progressiva do gás inicial.



Figura 54.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

O emprego da purga por diluição contínua em reservatórios grandes apresenta alguns desafios. Nesses casos, se o regime de escoamento do gás de purga dentro do reservatório não for turbulento, a mistura do gás de purga com o gás presente no reservatório pode não ocorrer de forma satisfatória, diminuindo a eficiência do processo. Para promover maior turbulência seria necessário utilizar vazões mais elevadas do gás de purga, o que resultaria em um consumo excessivo de gás.

Além disso, em tais sistemas, o fluxo do gás de purga pode seguir uma rota preferencial, fazendo com que determinadas partes do reservatório ou sistema sejam purgadas principalmente por difusão. Didaticamente, podemos considerar essas regiões como "volumes mortos" e sua presença torna a purga por diluição contínua menos eficiente nesses casos. Seria necessária uma quantidade maior de gás de purga ou um tempo mais longo de escoamento para que as concentrações desejadas sejam atingidas.

Em processos de purga por diluição contínua, a concentração do gás original no reservatório é governada por uma equação exponencial negativa.

Nesta equação, começamos com a concentração inicial do gás em questão, no exemplo citado, o "gás amarelo". Esta concentração inicial vai se alterando à medida que o gás é purgado e substituído por outro gás, o "gás vermelho" no exemplo.

Equação da Diluição Contínua

$$\downarrow C = C_0 \times \exp\left(-K \times \frac{V}{V_0}\right) \uparrow$$

C = concentração da espécie A, mol/mol

C_0 = concentração inicial de A no reservatório, mol/mol

V = volume de gás de purga (mL, L, m³)

V_0 = volume de gás no reservatório (mL, L, m³)

K = fator de correção (Tabela D.1, NFPA 69 ed. 2019, *Standard on Explosion Prevention Systems*)

Figura 55. Fonte: Notas de Aulas, 2023

A equação possui a seguinte forma: a concentração atual do gás amarelo é igual à concentração inicial multiplicada por uma exponencial negativa, a qual leva em consideração fatores como o volume do gás no reservatório e o volume de gás que já passou por este reservatório. Um fator de correção K é aplicado tendo em vista que, na prática, a mistura entre o gás de purga e o gás existente no reservatório não é perfeita. Dessa forma, K é o fator de eficiência da mistura, que pode ser utilizado em diversas situações, desde a purga de um reservatório até a ventilação de uma sala contaminada por vazamento de gases tóxicos ou inflamáveis.

Os valores do fator K podem ser encontrados na Tabela D.1 da norma *NFPA 69 – Explosion Prevention Systems – 2019 Edition*, dedicada a sistemas de prevenção de explosões, reproduzida em tradução livre na Figura 56. A norma informa ainda que, devido existência de poucos dados para definição desse fator, a maior parte das autoridades recomenda que sejam considerados valores menores ou iguais a 0,25.

Alguns exemplos de aplicação do fator K são os seguintes. Se um ambiente com ventilação natural tiver apenas uma única abertura de exaustão, a eficiência da mistura será bem limitada, correspondendo a apenas 20%, o que é representado por um $K = 0,2$. Mas, se existirem múltiplas aberturas ou infiltrações por fendas, essa eficiência sobe para 30%, ou seja, $K = 0,3$.

Tabela D.1: Eficiência da mistura (K) para várias condições de ventilação

Método de Suprimento de Air		Abertura única de exaustão	Múltiplas aberturas de exaustão
Ventilação natural	Infiltração por fendas	0,2	0,3
	Infiltração por portas abertas ou janelas	0,2	0,4
Ventilação forçada de air	Grelhas e registros	0,3	0,5
	Difusores	0,5	0,7
	Teto perfurado	0,8	0,9

Figura 56.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Já em ambientes com ventilação forçada, quando se tem o ar circulando por meio de grelhas e registros, $K = 0,3$ para uma única abertura de exaustão e $K = 0,5$ para múltiplas aberturas. As maiores eficiências de mistura são obtidas para ventilação forçada e teto perfurado: para abertura única, $K = 0,8$ e para múltiplas aberturas de exaustão, $K = 0,9$. Isso significa que o ar e o gás se misturam de forma muito mais eficaz nesses casos.

Estas informações são fundamentais, por exemplo, para determinar quanto tempo será necessário para que uma sala contaminada por um gás tóxico ou inflamável se torne segura novamente, dependendo do tipo de ventilação e das aberturas de exaustão da sala.

Se a variável de interesse for o tempo ao invés do volume, a equação pode ser facilmente adaptada. Ao invés de usar diretamente o volume, utiliza-se a vazão vezes o tempo. Isso torna a equação bastante versátil, podendo ser utilizada para determinar uma das variáveis tempo, vazão ou concentração sempre que duas delas forem conhecidas.

A purga por diluição discreta, ver Figura 57, é um processo realizado em etapas sucessivas que no caso de reservatórios pressurizados apresenta algumas vantagens interessantes sobre a purga por diluição contínua. Cada etapa de purga é constituída por duas fases: na 1ª fase a pressão do reservatório é reduzida para o valor p_i , que pode ser a pressão atmosférica ou o vácuo, dependendo do caso; na 2ª fase, a pressão do reservatório é elevada até p_f que é a pressão do gás de purga (vermelho).

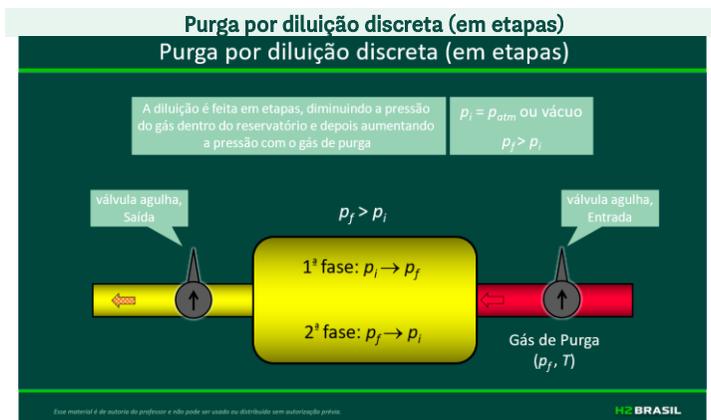


Figura 57: Fonte: Notas de Aulas, 2023

A operação de redução da pressão do reservatório para p_f é realizada com a abertura da válvula de saída, que deve ser fechada em seguida. A operação de aumento de pressão do reservatório até p_f com o gás de purga é realizada com a abertura da válvula de entrada, que deve ser fechada em seguida. Uma vez executadas as duas fases, a 1ª etapa da purga está concluída.

O processo se repete: pressurizar com o gás de purga e depois depressurizar, liberando o gás do reservatório. Este ciclo é realizado sucessivamente até que o gás original do reservatório seja completamente substituído pelo gás de purga, ou até atingir a concentração desejada. A ideia é garantir que o gás que ocupava inicialmente o reservatório seja removido de forma eficiente, por motivos de segurança, para garantir a pureza do gás armazenado ou para outras finalidades técnicas.

A equação que rege a diluição discreta (em etapas) é apresentada na Figura 58, juntamente com o índice k , correspondente à etapa, que é um número natural maior ou igual a zero.

Equação da Diluição Discreta

$$C_k(A) = C_0(A) \times \left(\frac{p_i}{p_f}\right)^k$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

p_i = pressão no reservatório após a purga (menor)

p_f = pressão do gás de purga (maior)

C_0 = concentração inicial da espécie A

C_k = concentração de A na etapa k

Figura 58: Fonte: Notas de Aulas, 2023

A cada nova etapa, a concentração do gás original no reservatório diminui em função da relação entre as pressões. Esse processo continua de forma repetida e, em cada ciclo, a quantidade do gás original presente no reservatório vai decrescendo.

A técnica de purga por diluição discreta se mostra vantajosa, em termos de eficiência, ao ser comparada à diluição contínua, sobretudo quando a pressão p_i é menor que a pressão atmosférica, ou seja, quando se utiliza vácuo.

É importante compreender como os valores das pressões inicial e final influenciam a quantidade de gás de purga que é consumida no processo e o número de etapas necessárias para atingir as concentrações desejadas dos componentes da mistura gasosa remanescente no reservatório.

A Figura 59 apresenta uma tabela com o número de etapas (entre parênteses) e a quantidade de gás de purga (gás vermelho) consumida no processo. Os cálculos foram realizados com o intuito de preparar o reservatório para receber um gás ultrapurificado, ou seja, a concentração do gás inicial (amarelo) deve ser de apenas $1 \mu\text{mol/mol}$ ao final da purga.

O volume de gás purga consumido no processo é dado em termos da capacidade hidráulica do reservatório. Por exemplo, se $V = 7$ isto significa que a purga demandou um volume de gás equivalente a 7 vezes a capacidade hidráulica do reservatório, à pressão atmosférica ou 1 bar.

Observando a tabela são obtidas conclusões interessantes sobre a quantidade de gás consumida no processo e o número de etapas necessárias.

Purga por Diluição Discreta para atingir 1 $\mu\text{mol/mol}$								
Diluição Contínua $V = 14$	(nº de purgas)				Volume de gás			
	p_i (bar)							
	p_f (bar)	0,010	0,100	0,500	1,000			
0,5	(4)	2	(9)	4	-	-	-	-
1,5	(3)	5	(5)	7	(13)	13	(35)	18
2	(3)	6	(5)	10	(10)	15	(20)	20
3	(3)	9	(5)	15	(8)	20	(13)	26
4	(3)	12	(4)	16	(7)	24	(10)	30
7	(3)	21	(4)	28	(6)	39	(7)	42

Figura 59.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Na prática da purga por diluição discreta, quando observamos a tabela de diluição em etapas com o objetivo de atingir 1 $\mu\text{mol/mol}$, diversos fatores tornam-se relevantes. Um destes é a pressão inicial. Esta pode ser igual à pressão atmosférica, ou seja, 1 bar, ou pode ser significativamente menor, situando-se em condições de vácuo.

Por exemplo, temos pressões de 100 mbar, 500 mbar, 100 mbar e 10 mbar. Notavelmente, 100 mbar é um nível de vácuo bastante acessível na prática, representando apenas 1 décimo da pressão atmosférica ambiente.

Nesse contexto, é interessante observar que, com uma pressão final de 1,5 bar e uma pressão inicial de 1 bar, são necessários 18 volumes de gás e até 35 etapas para se atingir a desejada concentração de 1 $\mu\text{mol/mol}$. No entanto, ao se operar com uma pressão inicial de 10 mbar, apenas 7 volumes de gás e 5 etapas são suficientes para se alcançar a mesma concentração. Para comparação, uma diluição contínua demandaria 14 volumes de gás, praticamente o dobro, mesmo considerando uma eficiência de mistura ótima, $K = 1$, o que não é factível.

Além disso, um detalhe importante a se considerar é que aumentar a pressão final nem sempre traz benefícios proporcionais. Ao analisarmos pressões finais de 1,5, 2 e 3 bar, para pressão inicial de 100 mbar,

observamos que todas requerem o mesmo número de etapas, cinco no total, mas o volume de gás consumido pode ser mais que o dobro, 7, 10 e 15, respectivamente. Algo similar acontece para pressão inicial de 10 mbar, em que o número de etapas é 3 e o volume de gás de purga consumido corresponde a 5, 6 e 9, respectivamente.

Essas observações são muito relevantes em cenários industriais. Equipamentos como eletrolisadores e reformadores necessitam de inertização prévia. Portanto, a escolha de uma estratégia de purga adequada pode impactar diretamente nos custos associados ao consumo de gás de purga.

Utilizar o vácuo é, sem dúvida, a abordagem mais eficaz para purgar um reservatório que contém gás. No entanto, mesmo quando conseguimos estabelecer um bom vácuo, é comum adotarmos três purgas como uma prática padrão nas aplicações analíticas ou de gases ultrapurificados.

Vale lembrar que as comparações citadas anteriormente foram feitas sob condições ideais. Foi assumido que o fator K (eficiência da mistura) da diluição contínua era igual a 1 e que a purga em etapas ocorria eficientemente, com os gases misturando-se perfeitamente a cada etapa. No caso da purga discreta com emprego de vácuo a eficiência da mistura é bem próxima a 100%. Mesmo assim, na prática e dependendo da aplicação, é recomendável realizar uma ou duas purgas a mais como fator de segurança.

A purga em reservatórios rígidos, como cilindros e vasos de pressão, é particularmente mais eficiente quando os equipamentos estão equipados com duas válvulas. A razão para isso é que essa configuração facilita o escoamento direcional do gás.

Primeiro, ao abrir uma válvula, introduzimos o gás de purga, e, em seguida, abrimos a outra para liberar o gás. Repetindo este processo, aproveitamos o efeito da purga por arraste, empurrando o gás consistentemente numa direção específica. Se tivermos apenas uma válvula, enfrentamos o desafio de o gás ter que entrar e sair pelo mesmo orifício, o que pode ser muito ineficiente especialmente com gases de densidades muito distintas. Nesse caso, a mistura dos gases pode não ser homogênea, exigindo mais etapas

para uma purga adequada. Portanto, sempre que possível, é recomendado utilizar uma configuração com duas válvulas em pontos opostos.

Purga por Diluição Discreta: caso não haja vácuo

Reservatórios rígidos (cilindros, vasos de pressão): utilizar válvulas de entrada e saída de gás em pontos opostos.



Reservatórios de volume variável (gasômetros, bags): esvaziar o máximo possível antes de tornar a encher.

Por medida de segurança, realizar **duas** ou mais purgas além do número calculado.



Figura 60. Fonte: Notas de Aulas, 2023

Já em reservatórios com volume variável, como gasômetros e bags, a estratégia é simples: esvaziar ao máximo e depois preencher novamente. No entanto, vale destacar que no atual estágio de desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio os gasômetros tornaram-se obsoletos. Eletrolisadores de água para produção de hidrogênio operam a altas pressões, dispensando o uso do gasômetro. Tipicamente, os eletrolisadores alcalinos operam na faixa de 1 a 20 bar e os eletrolisadores tipo PEM na faixa de 20 a 100 bar, em pressão manométrica.

É fundamental mencionar que, por razões de segurança, é comum realizar pelo menos duas purgas adicionais além da quantidade inicialmente calculada, garantindo assim a eficiência e a segurança do processo.

Introduzir um gás inflamável em um reservatório exige precauções meticulosas para garantir a segurança. Antes de tudo, é fundamental garantir que a concentração de oxigênio no reservatório seja reduzida para um nível que impossibilite a formação de uma mistura inflamável.

Como regra geral, para misturas com hidrogênio, a concentração de oxigênio deve ser inferior a 5% em fração molar ou volumétrica. Atingir esse patamar é crucial antes de se considerar a introdução de hidrogênio no reservatório: $O_2 < 5\% \text{ mol/mol}$.

Além disso, ao concluir operações que envolvam hidrogênio, se surgir a possibilidade de formação de misturas inflamáveis devido a contaminações ou erros operacionais, é essencial recorrer novamente ao processo de inertização do reservatório. Esta é a prática padrão para assegurar que o ambiente interno do reservatório permaneça seguro.

Este protocolo de segurança é ainda mais evidente quando lidamos com operações de eletrolisadores. Sempre que uma operação é iniciada ou concluída, as linhas do sistema precisam ser inertizadas. E aqui surge um ponto importante sobre sistemas de alarme: eles precisam ser inteligentes e precisos.

Alarmes frequentes e desnecessários podem resultar em paralisações constantes, o que, por sua vez, leva a perdas significativas de produtividade e aumentos nos custos. Em situações de emergência, quando ocorre uma parada abrupta, todo o sistema precisa ser inertizado e o processo reiniciado do começo. Portanto, a eficácia e a precisão dos sistemas de alarme são vitais para equilibrar segurança e produtividade.

Um ponto adicional a considerar é a presença de vapor d'água nos sistemas. Se o objetivo é eliminá-lo usando apenas vácuo, o processo pode ser bastante demorado. Nessas situações, um aquecimento moderado pode ser extremamente benéfico, pois irá acelerar a remoção do vapor d'água, tornando a purga mais eficiente.

6.8. Amostragem de gases

Quando se trata de amostradores, existem diversos modelos disponíveis, adequados para diferentes aplicações e necessidades. Um dos modelos é o cilindro amostrador, frequentemente equipado com um manômetro. No entanto, para gases ultrapurificados, o manômetro pode representar uma fonte de contaminação. Portanto, recomenda-se posicionar o manômetro fora do amostrador, minimizando o risco de contaminação.

Os sacos amostradores, ou "bags", são feitos de materiais plásticos adequados para armazenamento de amostras gasosas. No entanto, o hidrogênio pode permear através desses sacos. Há versões aluminizadas que oferecem maior retenção para hidrogênio ou misturas com monóxido de carbono e outros gases.



Figura 61.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Em situações com necessidade de coleta de muitas amostras, o uso de cilindros metálicos pode ser desafiador devido a custos, peso ou questões logísticas. Nesses contextos, seringas plásticas de polipropileno são alternativas eficazes. Equipadas com uma torneira de três vias, estas permitem a realização de purgas de maneira eficiente. Embora sejam práticas, é importante considerar que apresentam certa permeabilidade ao hidrogênio.

Para aplicações em laboratórios de cromatografia, para análise amostras gasosas na faixa de % em fração volumétrica, recomenda-se o uso da seringa *gas tight*. O êmbolo da seringa tem uma vedação e a agulha da seringa é longa e com pequeno diâmetro interno. Essas características minimizam a contaminação da amostra que será coletada e injetada no cromatógrafo através de um septo de borracha para ser analisada.

A análise cromatográfica de traços em hidrogênio ultrapurificado exige a utilização de outro tipo de injetor, com válvula multivias e circuito pressurizado da amostra.

7. Infraestrutura para Hidrogênio

Na abordagem dos materiais adequados para o uso com hidrogênio, a escolha criteriosa é fundamental, e é esperado que fabricantes e distribuidores forneçam as especificações dos materiais. Na ausência dessas informações, torna-se necessário testar os materiais em questão. Atualmente, com a variedade de distribuidores e fabricantes disponíveis no mercado, a seleção é mais facilitada.

Materiais como aço 316, latão e alumínio são frequentemente recomendados para essa finalidade. Em relação ao aço inox 304, é preciso atenção quanto ao acabamento. Processos de usinagem por eletroerosão e outros procedimentos eletroquímicos podem comprometer o material, introduzindo hidrogênio. Em determinadas circunstâncias, um tratamento térmico subsequente pode ser necessário.

Existem diversas normas que discorrem sobre esse tema e, em documentações específicas, há um compilado de informações pertinentes ao assunto. As soldas, ainda que seguras, têm o potencial de alterar as características originais dos materiais.

Dessa forma, é crucial a escolha adequada do material e uma execução correta. Processos como recozimento são aconselhados, assim como a preferência pela solda orbital. Documentações complementares também trazem normas específicas sobre soldas e cilindros que as utilizam em sua fabricação. A consulta é altamente recomendada.

Em relação aos detalhes construtivos, recomenda-se o manuseio de hidrogênio em locais abertos sempre que viável. Para construções, é essencial garantir uma ventilação adequada para diluir o gás combustível em situações de vazamento.

O confinamento de gases deve ser evitado, pois, geralmente, nuvens abertas de hidrogênio não provocam detonações. Conforme observado em aulas anteriores, a prática sugerida é permitir que o gás continue queimando, uma vez que tais nuvens não detonam. Entretanto, o risco reside no acúmulo dessas nuvens, que, se submetidas a um confinamento parcial, podem eventualmente detonar.

Quanto ao hidrogênio líquido, este demanda precauções específicas devido a possíveis queimaduras causadas pelo frio, formação de misturas explosivas densas de hidrogênio-ar-vapor d'água e risco de asfixia.

Em relação à construção segura para locais que trabalham com hidrogênio, há vários aspectos essenciais a considerar. Paredes e telhados devem ser projetados para suportar uma pressão de até 1 200 Pa (0,012 bar ou 0,12 m H₂O) sem danos, o que é uma pressão bastante baixa em comparação com a pressão atmosférica padrão de 1 000 hPa.

Para garantir a segurança das áreas de trabalho, as paredes internas ou divisões devem estender-se do chão ao teto e ser firmemente ancoradas, permitindo o isolamento eficaz de diferentes áreas, como a de produção e de armazenamento. Uma estratégia crucial é direcionar qualquer explosão potencial para áreas com menor concentração de pessoas e edifícios.

Assim, se uma sala de produção estiver adjacente a uma área frequentemente ocupada e a um pátio externo, a parede próxima à área ocupada deve ser reforçada, enquanto a parede voltada para o pátio pode ser mais frágil. Isso garante que, no caso de uma explosão, a onda de choque seja direcionada principalmente para o pátio.

Além disso, é aconselhável que portas e janelas externas sejam projetadas para abrir para fora, facilitando a liberação de pressão. Idealmente, os telhados também devem ser capazes de se deslocar para aliviar a sobrepressão durante uma explosão.

Quando se trata dos materiais utilizados, a maior parte da construção deve ser feita de materiais não combustíveis para minimizar riscos adicionais. E, especificamente para a tubulação de hidrogênio, é essencial que não seja enterrada.

Também é recomendado evitar a instalação em galerias totalmente seladas, já que permitir a fuga de gás é mais seguro do que mantê-lo confinado. Finalmente, em termos de conexões, a solda é geralmente preferível e todas as conexões devem estar acessíveis para inspeção regular.

Para viabilizar a operação de equipamentos elétricos em áreas com potencial risco de explosão, existem várias técnicas e padrões estabelecidos, como:

- **Invólucros à prova de explosão**: Esses invólucros são projetados de tal forma que, mesmo se uma mistura explosiva estiver presente internamente, a explosão não se propagará para o ambiente externo. Isso ocorre devido à presença de orifícios ou canais de pequenos diâmetros, nos quais a chama será extinta, não se propagando para o meio externo. Uma característica essencial é que, em caso de explosão, não haverá lançamento de fragmentos que possam ferir indivíduos.
- **Invólucros pressurizados**: Estes são pressurizados com gás inerte para evitar a formação de uma atmosfera explosiva internamente.
- **Materiais de preenchimento ou imersão**: Uma técnica onde os equipamentos são imersos em substâncias como óleo para evitar a ignição.
- **Equipamentos intrinsecamente seguros**: Esses dispositivos operam com energia muito abaixo da necessária para dar início a uma ignição, tornando-os seguros por natureza. A desvantagem é o alto custo desses equipamentos.
- **Diferença entre à prova de explosão e intrinsecamente seguro**: Enquanto os equipamentos à prova de explosão são projetados para conter uma explosão interna ou para não lançar fragmentos, os intrinsecamente seguros operam com energia tão baixa que não podem iniciar uma ignição.

No contexto das normas, os equipamentos elétricos devem, em geral, seguir as diretrizes do *National Electric Code* (NFPA 70), Classe 1, divisão 2, grupo B. Isso geralmente se refere a dispositivos blindados e motores especificamente classificados para operar em ambientes potencialmente explosivos.

O Brasil segue a Norma ABNT NBR IEC, que se baseia na norma internacional IEC 60079. Esta norma trata de instalações elétricas em atmosferas explosivas. Especificamente, a parte 14 da norma aborda esta temática. Equipamentos blindados e à prova de explosão, embora eficazes, são onerosos. Portanto, uma estratégia complementar pode ser minimizar

a presença de pontos elétricos potencialmente perigosos na área de risco, como tomadas e interruptores, ou movê-los para locais mais seguros.

Neste pátio do laboratório de hidrogênio da Unicamp, há diversos detalhes construtivos estrategicamente pensados para garantir segurança.

Evitando acúmulo de H₂: proteção passiva



1. Aberturas no telhado para ventilação

2. Veneziana na parede para ventilação

LH2-UNICAMP

Figura 62:. Fonte: Notas de Aulas, 2023

Um desses elementos é o teto inclinado e com aberturas, projetado para assegurar que, em caso de vazamento, o gás ascendente seja eficientemente ventilado. É válido ressaltar que a ventilação se torna mais eficaz à medida que aumentamos a altura, garantindo assim uma dissipação mais rápida e segura do gás. A Norma ABNT 60079 oferece diretrizes sobre os índices de ventilação e velocidades de vento adequadas para diferentes alturas, como 2 m e 5 m.

O laboratório também contava com uma veneziana em várias paredes do prédio, garantindo uma ventilação natural constante. Os eletrolisadores ficavam posicionados no interior do galpão próximos à veneziana e ao portão de entrada, e o retificador de corrente ficava localizado na sala ao lado, à direita, atrás do tanque de nitrogênio líquido.

A existência de uma veneziana adicional neste espaço assegurava ventilação adequada. Além disso, uma parede espessa de isolamento separava o retificador dos eletrolisadores, sendo que apenas o barramento passava por ela, devidamente vedado.

Esses recursos e configurações são o que denominamos de "proteção passiva". São elementos construtivos que, uma vez implementados, fornecem proteção contínua sem necessidade de ações adicionais. Portas,

janelas, frestas e venezianas são exemplos práticos e eficientes desse tipo de proteção, pois não demandam manutenção ou ativação constante para garantir a segurança.

No laboratório, havia uma sala que abrigava a linha de purificação do hidrogênio. Apesar da eletrólise alcalina da água originar hidrogênio com alto grau de pureza, ele ainda continha traços de oxigênio, além de nitrogênio e, eventualmente traços de hidrocarbonetos, uma vez que o hidrogênio passava pelo gasômetro e por um selo d'água.

O processo de purificação utilizado era criogênico, empregando peneiras moleculares para absorver os gases indesejados. Com isso, o hidrogênio resultante tinha uma alta pureza, tipicamente 99,9995% em fração molar, ou 5.5.

Evitando acúmulo de H₂: proteção passiva

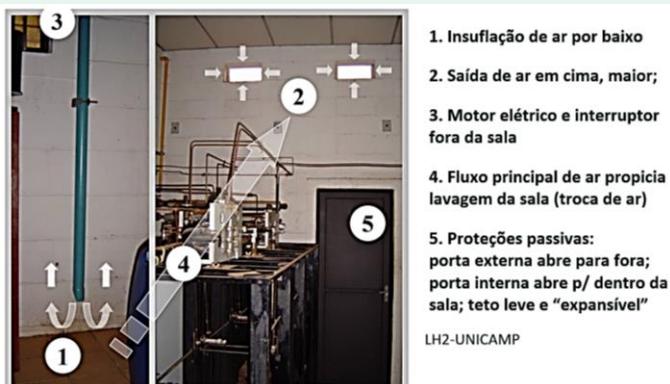


Figura 63:. Fonte: Notas de Aulas, 2023

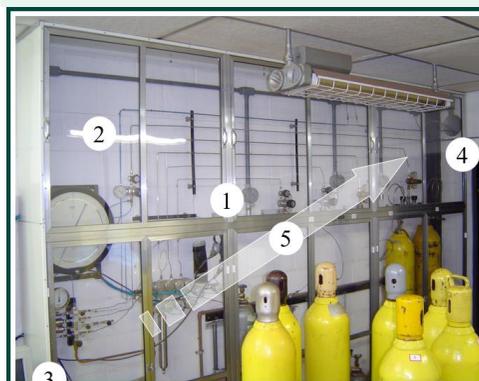
Para garantir uma proteção ativa, foi adotado a técnica de insuflação de ar: um soprador externo insuflava ar pela parte inferior da sala, e o ar era expelido pela parte superior, estabelecendo um escoamento contínuo através da sala, sobretudo nas áreas com mais conexões de equipamentos. Esta constante renovação do ar ajudava a evitar acúmulos de gases indesejados.

Além disso, o motor elétrico ficava estrategicamente posicionado fora da sala de purificação. Eram efetuados testes de vazamento nas conexões da linha de purificação regularmente para garantir a segurança. A porta

externa da sala permanecia sempre destravada, proporcionando uma rota de fuga rápida para os operadores em caso de qualquer emergência. Em contrapartida, a porta interna, que dava acesso a uma área com maior circulação de pessoas, abria-se para dentro da sala.

No laboratório de cromatografia e preparação de misturas gasosas havia uma capela com uma estrutura de alumínio leve. Em vez de vidro, optou-se pelo policarbonato por ser mais leve, flexível e menos propenso a quebras. Em caso de detonação, o policarbonato lançaria fragmentos mais leves e menos contundentes do que o vidro.

Detalhes construtivos da sala e capela



LH2-UNICAMP

1. Capela tem estrutura leve de alumínio
2. Acrílico laminado ou policarbonato ao invés de vidro
3. Entrada de ar
4. Exaustão
5. Fluxo principal de ar
6. Observação; cilindros em serviço (não são armazenados neste local)

Figura 64:. Fonte: Notas de Aulas, 2023

A entrada de ar da capela estava localizada na parte inferior do lado esquerdo, enquanto a exaustão era realizada pelo lado superior direito, por meio de um exaustor. Essa configuração garantia um fluxo constante de ar através da capela, capaz de diluir qualquer possível vazamento de gás em seu interior.

Os cilindros amarelos presentes dentro da sala no momento da foto foram mantidos ali pelo tempo necessário para realizar uma mistura gasosa específica. Esse foi um procedimento eventual para o qual foram tomadas medidas de segurança adicionais. Durante o processo as portas da capela permaneceram abertas, e a exaustão foi ajustada para um valor consideravelmente mais alto.

O laboratório estava equipado com luminárias blindadas à prova de explosão e a fiação era conduzida dentro de tubulações vedadas. Havia sensores para hidrogênio, monóxido de carbono e óxido nitroso instalados dentro da capela.

Equipamentos elétricos na sala e capela



Figura 65. Fonte: Notas de Aulas, 2023

A maior parte da fiação da capela era acomodada em tubos de PCV vedados. Pequenos trechos de fiação que ligavam os instrumentos (transmissores de pressão e temperatura) utilizavam fiação do tipo PP, que possui uma capa protetora adicional sobre os condutores. Todo o sistema era adequadamente aterrado eletricamente.

O teto do laboratório era especialmente leve e pré-montado. Em caso de explosão, esse teto seria deslocado, reduzindo a sobrepressão no ambiente.

Ao lado da capela ficavam os equipamentos eletroeletrônicos do Sistema de Elaboração de Padrões Automatizado – SEPA, Figura 66, em que eram preparadas misturas gasosas padrão com finalidades analíticas e preparativas.

Os pontos de entrada de sinais, relês, fontes de alimentação, placas de automação e toda a instrumentação estavam instalados em um gabinete ao lado da capela. As válvulas solenoides que comandavam as válvulas pneumáticas no interior da capela também estavam instaladas nesse

gabinete. Essa configuração eliminava o inconveniente do aquecimento das válvulas solenoides, que comprometeriam o controle de temperatura, além de minimizar o risco decorrente da energização das bobinas elétricas e da maior parte da instrumentação.

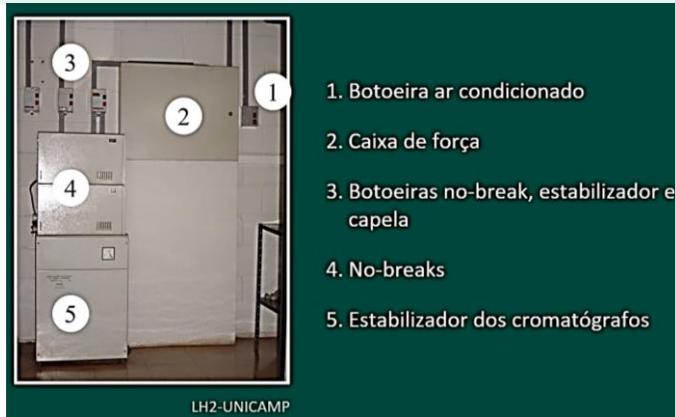
Além disso, tomadas e interruptores também foram instalados fora da capela para reduzir riscos. A bomba de vácuo, por sua vez, estava estrategicamente posicionada na entrada de ar, área considerada com menor probabilidade de acúmulo de gás inflamável. Como um dos itens dos procedimentos de segurança rotineiramente empregados, o exaustor da capela era acionado antes de qualquer operação.



Figura 66:. Fonte: Notas de Aulas, 2023

Havia um hall adjacente à sala de cromatografia onde ficavam situados as botoeiras dos aparelhos de ar-condicionado e do exaustor, a caixa de força, o nobreak e estabilizadores responsáveis pela alimentação da capela e dos cromatógrafos.

Equipamentos elétricos fora da sala



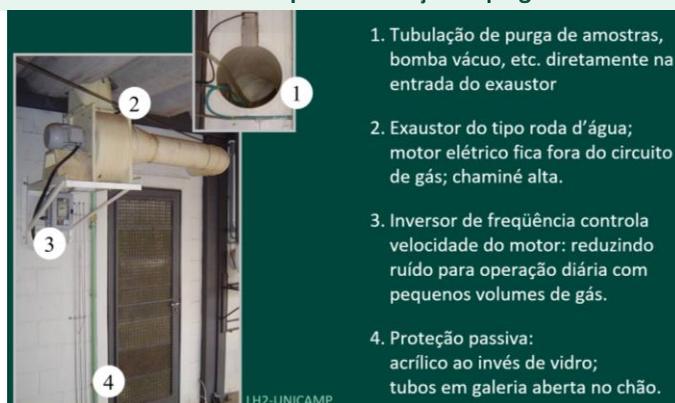
1. Boteeira ar condicionado
2. Caixa de força
3. Boteiras no-break, estabilizador e capela
4. No-breaks
5. Estabilizador dos cromatógrafos

Figura 67.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Houve uma época em que alguns desses equipamentos ficavam alocados dentro do laboratório de cromatografia, no entanto, após uma análise de risco, decidiu-se que eles deveriam ser instalados no hall.

Na Figura 68, pode-se observar que o motor do exaustor da capela estava posicionado externamente. Era um exaustor do tipo “roda d’água” que contava com um inversor de frequência para ajustar a vazão e controlar o ruído.

Exaustor da capela e tubulação de purga



1. Tubulação de purga de amostras, bomba vácuo, etc. diretamente na entrada do exaustor
2. Exaustor do tipo roda d’água; motor elétrico fica fora do circuito de gás; chaminé alta.
3. Inversor de frequência controla velocidade do motor: reduzindo ruído para operação diária com pequenos volumes de gás.
4. Proteção passiva: acrílico ao invés de vidro; tubos em galeria aberta no chão.

Figura 68.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Adicionalmente, como parte das medidas de proteção passiva, optou-se pelo uso de acrílico na porta externa do laboratório, ao invés do vidro.

Os cromatógrafos eram alimentados com gases provenientes de cilindros instalados num espaço adjacente, presos na parede com correntes, num local coberto, aberto e com boa ventilação natural. A tubulação dos cilindros até os cromatógrafos passavam por uma galeria no solo, que, apesar de aberta, era protegida por uma chapa metálica. Importante salientar que essa galeria podia ser facilmente acessada para inspeções regulares e não havia tubulações subterrâneas.

A figura a seguir apresenta uma área destinada aos testes de eletrolisadores de água da Stuart, empresa renomada e uma pioneira no desenvolvimento desta tecnologia. Em 2002, houve uma visita às instalações da empresa em Toronto.



Figura 69:. Fonte: Notas de Aulas, 2023

Na figura pode-se notar diversos aspectos de interesse que contribuem para a segurança das instalações. Há um gabinete ventilado de um eletrolisador bipolar. A localização dos interruptores foi estrategicamente pensada para estar afastada, e a saída é claramente sinalizada. A configuração do espaço é livre de obstáculos excessivos, e o cilindro é adequadamente fixado em um carrinho, conforme as normativas.

Chama atenção a distribuição dos exaustores pela sala. Estes não estão no teto porque, no caso de um vazamento, o gás hidrogênio tende a se dispersar por toda a sala. Os exaustores estão estrategicamente localizados a uma altura ligeiramente acima da fiação.

A fiação, por sua vez, é disposta em canais abertos, evitando assim o acúmulo de gás e garantindo uma constante troca gasosa. No que diz respeito à iluminação, as luzes são à prova de explosão e possuem vedação adequada.

Um último ponto a destacar é a altura do teto. Espaços com tetos mais baixos apresentam um certo grau de confinamento, trazendo riscos adicionais. No entanto, uma sala mais ampla, como a observada, já oferece um nível de segurança adicional.

A tubulação do gás é posicionada na parte superior precisamente para prevenir problemas associados a vazamentos.



Figura 70.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Caso ocorra algum vazamento, o hidrogênio, por ser mais leve, tende a se dispersar na parte superior da sala, evitando a acumulação ao nível do chão. Tubulações posicionadas próximas ao solo podem resultar em altas concentrações de hidrogênio nessa área em caso de vazamentos, criando rapidamente uma atmosfera explosiva. Trazer as linhas de gases para

dentro da sala de uma posição elevada, ao nível do teto, contribui para um maior distanciamento dos equipamentos elétricos, aumentando a segurança em casos de vazamento.

7.1. Sensores de Hidrogênio e Gases

A seleção do sensor adequado é determinada por diversos critérios. Existem requisitos essenciais, como a faixa de concentrações, duração da operação e o tempo de resposta, que idealmente deve ser inferior a 60 segundos. Além disso, a substituição do elemento sensor deve ser econômica.

Muitos sensores são projetados de forma modular, permitindo a troca apenas do elemento sensor, mantendo o invólucro. Isso pode resultar em economia significativa. A expectativa de vida útil ideal é de 2 anos, visto que cada substituição implica em recalibração e verificação do dispositivo.

O custo, a simplicidade na manutenção e os intervalos de calibração, preferencialmente mais extensos (ao menos semestrais), são fatores igualmente relevantes. A interferência de outros gases presentes na área monitorada também deve ser considerada, uma vez que podem afetar a resposta do sensor, produzir falsos alarmes e até mesmo danificar o sensor.

Sensores catalíticos e de estado sólido normalmente operam ligeiramente aquecidos para evitar condensação. Em ambientes frios ou úmidos, a condensação pode comprometer a eficácia do sensor, impedindo a detecção correta do gás.

Para gases combustíveis, as opções incluem sensores em estado sólido, infravermelho ou eletroquímico. Em contrapartida, gases tóxicos geralmente utilizam sensores eletroquímicos ou de estado sólido. É importante salientar que os gases tóxicos requerem menores limites de detecção devido às baixas concentrações que podem afetar a saúde dos trabalhadores. Para compostos orgânicos voláteis, os sensores de fotoionização são mais recomendados.

Em relação a hidrocarbonetos, embora a ionização por chama seja uma opção, nem sempre é a mais prática, especialmente em áreas classificadas devido à necessidade de uma chama ativa. Tais sensores são mais adequados para cromatografia gasosa em análises quantitativas específicas.

Para outros gases, os sensores de condutividade térmica e colorimétricos podem ser opções viáveis.

Os sensores são ferramentas essenciais na monitorização e detecção de diferentes tipos de gases, seja em ambientes industriais, laboratoriais, residenciais ou até mesmo para uso individual. A escolha adequada do sensor é crucial para garantir a segurança e a eficácia na detecção.

- **Sensores eletroquímicos:** Estes são amplamente utilizados para monitorar oxigênio e gases tóxicos. Eles podem operar em faixas como %mol/mol ou $\mu\text{mol/mol}$. Devido ao seu baixo consumo, são ideais para uso portátil, o que prolonga a vida útil do sensor. Há versões para uso pessoal que monitoram níveis de oxigênio, sendo desligados sempre que possível para aumentar sua vida útil.
- **Sensores catalíticos:** Devido ao seu custo reduzido, são uma opção popular para monitorar gases combustíveis, sobretudo na faixa de 0 até o Limite Inferior de Inflamabilidade. São ótimos para aplicações simples e portáteis.
- **Sensores de infravermelho:** Estes são adequados para a detecção de gases combustíveis. Apresentam um bom desempenho, mas a sua gama de gases detectáveis é mais restrita. São ideais para a análise de CO e CO₂, embora possam ser mais volumosos, principalmente quando utilizados para detectar baixas concentrações.
- **Sensores de estado sólido:** Capazes de detectar a maioria dos gases **combustíveis** na faixa do Limite de Inflamabilidade. São frequentemente utilizados em aplicações estacionárias para monitorar hidrogênio e monóxido de carbono. É muito importante atentar para as interferências cruzadas que podem ocorrer.

Concluindo, uma decisão acertada na escolha do sensor é imprescindível para assegurar uma monitorização de gases abrangente, robusta e confiável.

A seguir, é apresentado um transmissor de gás projetado com características de segurança intrínseca, contando com um visor de alarme.



Transmissor de gás intrinsecamente seguro, com visor e alarme.



Controlador para 32 transmissores de gás. Realiza teste e aquecimento dos transmissores automaticamente. Quatro níveis de alarme para cada sensor e interface digital de saída.

Figura 71. Fonte: Notas de Aulas, 2023

Ele é alojado em um invólucro robusto e blindado, que oferece múltiplas camadas de proteção. Caso ocorra algum imprevisto ou falha, essa estrutura foi projetada para evitar a dispersão de fragmentos. Além disso, vale destacar que o transmissor foi projetado para operar com uma energia elétrica abaixo da necessária para provocar ignição, o que o torna intrinsecamente seguro.

Do lado direito da Figura 71 pode ser visto um controlador capaz de gerenciar até 32 transmissores de gás simultaneamente. Uma de suas funções é a realização do teste de aquecimento de cada um desses transmissores. Mesmo sendo um modelo mais antigo, ele está equipado com quatro distintos níveis de alarme para cada sensor, além de possuir uma interface digital para saída de dados. Atualmente há controladores modulares, expansíveis e altamente configuráveis que podem receber sinais de vários tipos de sensores. Os novos modelos são integrados com software que permite analisar os diversos sinais e tomar a melhor decisão com relação ao nível de alarme e atuação de vários relês.

As câmeras de imagens térmicas são instrumentos notáveis no cenário tecnológico atual. Existem diversos fabricantes que oferecem tanto modelos fixos quanto portáteis. A essência dessas câmeras reside no seu

sensor de radiação infravermelha ou ultravioleta, capaz de produzir uma representação visual da temperatura da superfície de objetos, e até mesmo em chamas. O que torna essas câmeras tão especiais é sua capacidade de distinguir formas de maneira nítida em função da temperatura dos diversos objetos presentes no ambiente.



Figura 72.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Sua versatilidade enquanto equipamento portátil é outro ponto forte: seu manuseio é simples, similar ao de uma câmera convencional ou um smartphone. Além disso, elas proporcionam um mapa de calor preciso, eliminando a necessidade de contato direto para a medição da temperatura.

De acordo com as informações obtidas junto a um fabricante qualificado de detectores para gases, embora as chamas de hidrogênio em ar emitam radiação na faixa do infravermelho, elas são mais bem detectadas na faixa de radiação do ultravioleta. Dessa forma, antes de adquirir uma câmera de imagem térmica, recomenda-se verificar com atenção as especificações técnicas e consultar o fabricante sobre as características específicas relacionadas a detecção de chamas de hidrogênio.

No entanto, as câmeras de imagem térmica possuem suas limitações. Por exemplo, não são capazes de identificar vazamentos que não produzam

chamas. Assim, em situações em que há um vazamento em progresso, que pode evoluir e resultar em um acidente, essas câmeras não seriam suficientes. Nesse contexto, é imperativo complementar o uso das câmeras térmicas com outros sensores, garantindo uma proteção abrangente e eficaz.

Lembrando que, ao lidar com hidrogênio, é essencial garantir que todos os protocolos de segurança sejam seguidos para prevenir acidentes e garantir a integridade de todos os envolvidos.

Em síntese, segue algumas dicas de construção para H₂:

1. Tubulação de Hidrogênio:

- Nunca deve ser enterrada.
- Priorize locais arejados, evitando galerias vedadas.
- Opte prioritariamente por solda como forma de conexão.
- Dê ênfase à seleção apropriada de materiais e à qualidade da solda.

2. Sistemas e Componentes:

- Adote um sistema duplo contendo válvula agulha, válvula reguladora de pressão (VRP) e disco de ruptura.
- Como alternativa ao disco de ruptura, considere usar uma válvula de alívio.
- Implemente filtros de pó nas linhas de gases.

3. Segurança e Prevenção:

- Trabalhe para evitar o acúmulo de gás.
- Mantenha o circuito de gás simples, evitando complicações desnecessárias.
- Evite a mistura de combustível com comburente.
- Se houver mistura: assegure-se de não confiná-la e evite extinguir a chama.

A melhor conduta é estancar o vazamento ou permitir que a mistura se dissipe de maneira controlada.

- Realize checagens periódicas de vazamentos.

8. Regulamentos, Códigos e Normas

No Brasil, o uso de gás natural veicular (GNV) é amplamente difundido. Foi mencionado que, além do tradicional GNV, há uma crescente adoção do biogás. Atualmente, alguns postos de abastecimento já dispõem do biogás veicular e ele também vem sendo utilizado no setor industrial.

GNV – Gás Natural Veicular no Brasil



Figura 73.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

O GNV tem uma expressiva presença em vários estados do país. Existem mais de 1 800 postos de abastecimento de GNV e mais de 2 milhões de veículos movidos a GNV ou multicomcombustível. Devido ao preço competitivo do GNV, muitos taxistas escolhem este combustível, tornando comum que, ao utilizar um táxi em grandes cidades, o passageiro esteja em um carro movido a GNV.

Contudo, existem preocupações relacionadas à segurança. Alguns dos acidentes observados estão ligados à instalação inapropriada de botijões GLP para aumentar a autonomia do veículo. Esse tipo de improvisação acarreta riscos significativos de acidentes de grande severidade. Uma instalação inadequada pode levar à destruição do veículo, danos ao posto de combustível e lesões aos funcionários e público, que irão acarretar multas e processos judiciais ao responsável. Por esse motivo, é essencial que veículos a GNV sejam submetidos a inspeções anuais, assegurando sua conformidade com as normas estabelecidas.

A seguir, é apresentado o Projeto de Ônibus a Hidrogênio e Células a Combustível para Transporte Urbano no Brasil, que recebeu suporte do PNUD (Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas). Esse projeto foi financiado pelo GEF, pela FINEP/BR e contou com a colaboração de diversos stakeholders, que eram as indústrias e instituições envolvidas na iniciativa.

Ônibus a H₂ e CaC para Transporte Urbano no Brasil



Figura 74: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Na Figura 74, à esquerda, é possível observar o compressor do posto de abastecimento localizado em uma área externa e bem ventilada, cuja pressão de trabalho era de 400 bar. No centro, observa-se a imagem do posto de hidrogênio com o dispenser, equipamento utilizado para o abastecimento dos ônibus.

Durante a execução do projeto, foram construídos 4 ônibus, três dos quais operaram normalmente junto com outros ônibus movidos a diesel no corredor metropolitano. No total os veículos percorreram 12 000 mil km e transportaram 18 000 passageiros. Na época, o projeto do ônibus movido a hidrogênio brasileiro foi reconhecido como sendo o mais avançado do mundo.

Infelizmente, o projeto foi encerrado em 2016 e tanto os ônibus quanto a estação de abastecimento de hidrogênio foram desativados. Mas, recentemente, em 2023, foi divulgada uma boa notícia: a EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos) e a USP (Universidade de São Paulo) assinaram um convênio para reativar a frota de três ônibus a hidrogênio. Os ônibus cedidos pela EMTU e fabricados pela Marcopolo com a colaboração de diversas empresas. A USP será responsável pela operação e manutenção dos ônibus sob supervisão da EMTU, que acompanhará a operação diária dos ônibus na Cidade Universitária.

No âmbito da mesma iniciativa, o governo de São Paulo por meio da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação apoiará um projeto para desenvolvimento da primeira estação de abastecimento de hidrogênio renovável a partir do etanol do mundo. O projeto será desenvolvido pelo RCGI da USP em parceria com empresas privadas do segmento. O projeto conta com financiamento da SHELL e participação da Raizen, SENAI, Toyota e Hytron, que também será responsável pelo desenvolvimento do reformador de etanol.

Ao abordar a estrutura normativa, é possível identificar um triângulo hierárquico. No ápice dessa hierarquia, encontram-se as leis, que possuem caráter mandatório e são inquestionavelmente obrigatórias.

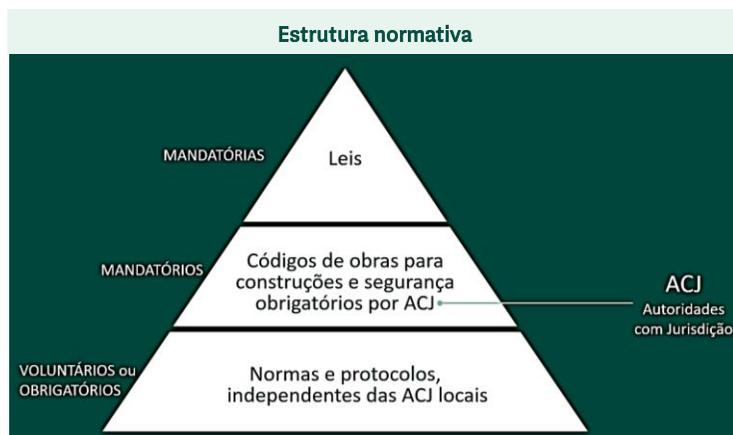


Figura 75: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Na sequência, vêm os códigos de obra voltados para construções e segurança. Estes são exigidos por autoridades com jurisdição. E quem seriam essas autoridades com jurisdição? São entidades que, amparadas pela legislação, têm poder de estabelecer normas e regulamentos, de emitir licenças e de fiscalizar empreendimentos.

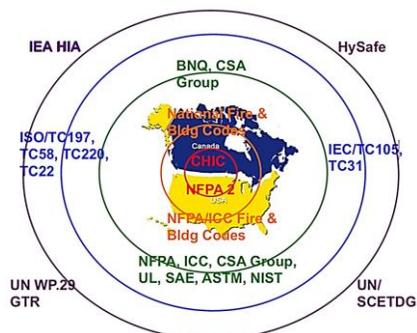
No contexto apresentado, CETESB, Corpo de Bombeiros e Ministério do Trabalho são exemplos de tais autoridades. Comumente, esses códigos possuem caráter mandatório. Há também códigos de obras oriundos de prefeituras e em nível estadual.

Por fim, na base desse triângulo normativo, situam-se as normas e protocolos de caráter voluntário, que não derivam diretamente das autoridades com jurisdição.

Neste contexto, é apresentada uma estrutura regulatória que aborda aspectos de segurança e aceitação social na América do Norte. Tal estrutura pode ser consultada no capítulo 6 do livro "*Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*".

Embora esteja disponível em formato ebook, é necessário realizar uma compra para acessá-lo. É válido mencionar que eu, Newton Pimenta, tive a honra de contribuir para o Capítulo 6 – *Regulatory Framework, Safety Aspects, and Social Acceptance of Hydrogen Energy Technologies* deste trabalho, coordenado pelo Dr. Andrei Tchouvelev e com a colaboração do Dr. Sérgio Pinheiro do Inmetro.

Regulatory Framework, Safety Aspects, and Social Acceptance – North America



- Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies (e-book)
- Regulatory Framework, Safety Aspects and Social Acceptance of Hydrogen Energy Technologies (Chapter 6)
- A.V. Tchouvelev, Sergio P. de Oliveira and Newton Pimenta

Figura 76.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Na estrutura regulatória do Brasil, a nível estadual destacam-se os Corpos de Bombeiros e as agências ambientais. Em São Paulo, a agência ambiental correspondente é a CETESB, que possui equivalentes em todos os demais estados brasileiros.

Em uma esfera superior, encontra-se o Ministério do Trabalho e Emprego, de jurisdição federal, e cujas normas regulamentadoras (NR) são obrigatórias. Um exemplo é a NR-33, que trata de espaços confinados, que já foi mencionada anteriormente.

A SAE-Brasil e a ABNT são entidades que produzem normas de grande relevância e numa esfera abrangente, mas de adesão voluntária. A ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, é representada no Brasil por organismos tais como ISO, IEC, NFPA e ASTM, sendo a instituição responsável pela tradução dessas normas para o português. É importante mencionar que a ABNT tem uma Comissão Especial de Estudos, CEE 67 – Tecnologias de Hidrogênio, que é espelho do *TC 197 – Hydrogen Technologies* da ISO.

O Inmetro, ou Instituto Nacional de Metrologia, é responsável pela metrologia científica e industrial, metrologia legal e acreditação. Ele mantém uma rede de laboratórios aptos a aferir equipamentos de medida em todo o Brasil e estabelece relações com diversos outros institutos semelhantes ao redor do mundo.

Estrutura normativa, Aspectos de segurança e Aceitação social no Brasil



- **Ministério do Trabalho e Emprego:**
Jurisdição Federal
NR: Normas Regulamentadoras (MANDATÓRIAS)
- **INMETRO:**
Instituto Nacional de Metrologia
Metrologia Científica e Industrial
Metrologia Legal Acreditação
- **ABNT:**
Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO, IEC, NFPA, ASTM
Comissão Especial de Estudos
CEE 67 – Tecnologias de Hidrogênio

TC – Technical Committees

- ISO/TC 197: Hydrogen technologies
- ISO/TC 58: Gas cylinders
- ISO/TC 220: Cryogenic vessels
- ISO/TC 22: Road vehicles
- IEC/TC 105: Fuel cell technologies
- IEC/TC 31: Equipment for explosive atmospheres
- IEA HIA - International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement
- HySafe - International Association for Hydrogen Safety
- UN WP.29 - United Nations Working Party 29 that developed GTR #13 (Global Technical Regulation) for hydrogen and fuel cell vehicles (FCVs)
- UN SCETDG - United Nations Sub-Committee on Transportation of Dangerous Goods

Figura 77.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

No âmbito da ISO, existem vários Comitês Técnicos. Há o TC 197 sobre Tecnologias de Hidrogênio, mas também há outros responsáveis por cilindros, vasos criogênicos e veículos. Dois assuntos de suma importância na área do hidrogênio que estão sendo tratados pela IEC são: células a combustível e atmosferas explosivas. Enquanto isso, a ISO foca em outras tecnologias relacionadas ao hidrogênio. Uma visão mais abrangente dos diversos comitês da ISO e IEC é apresentada na Figura 77.

Com relação às normas de maneira geral, observa-se uma sobreposição de competências em algumas áreas.

Em um nível mais abrangente, existe a Agência Internacional de Energia, que fornece uma vasta quantidade de conhecimentos e promove diversas ações em relação à segurança do hidrogênio, bem como para sua inserção na matriz energética de muitos países.

Além disso, há o "*United Nation Working Party*", que possui o grupo GTR (Regulamentação Técnica Global) e outro comitê dedicado ao transporte de produtos perigosos.

9. Segurança no licenciamento de empreendimentos de hidrogênio no Brasil

Quando se trata de aspectos de segurança no licenciamento de empreendimentos no Estado de São Paulo, duas instituições são fundamentais: o Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo e a CETESB.

Em outros estados, existem instituições com funções similares. É notável o intercâmbio da CETESB com outras agências ambientais estaduais, e entre os Corpo de Bombeiros das Polícias Militares Estaduais. Em geral, observa-se que as entidades paulistas são muito ativas e desempenham um papel de certa liderança no cenário nacional.

Conforme mencionado anteriormente, no Projeto de Ônibus a Hidrogênio e Células a Combustível para Transporte Urbano no Brasil, um posto de abastecimento de hidrogênio foi licenciado no Estado de São Paulo. Para tanto, o empreendimento precisou ser aprovado pelo Corpo de Bombeiros

e pela CETESB. De acordo com as entrevistas realizadas com ambas as instituições na época, não houve grandes entraves no processo de licenciamento. Por outro lado, o projeto motivou o desenvolvimento de algumas normativas relacionadas ao hidrogênio em ambas as instituições, conforme será comentado adiante.

A circulação dos ônibus teve que ser a autorizada pela Secretaria Municipal de Mobilidade e Trânsito de São Paulo, o que também não constituiu um grande obstáculo.

Corpo de Bombeiros SP Brasil

Corpo de Bombeiros SP Brasil

Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo – Brasil –

Jurisdição Estadual
Principal foco é a
Prevenção de incêndios
“intramuros”
45 Instruções Técnicas

HIDROGÊNIO
IT 28/2011
Manipulação, armazenamento,
comercialização e utilização
de gás liquefeito de petróleo
(GLP)
Anexo B

Este material é de autoria do professor e não pode ser usado ou distribuído sem autorização prévia.

H2BRASIL

Figura 78.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

O Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo tem jurisdição estadual e sua principal preocupação é a prevenção de incêndios intramuros, ou seja, dentro dos limites do empreendimento.

A instituição possui 45 instruções técnicas, destacando-se a IT 28/2011, que trata da manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo. O Anexo B dessa instrução técnica tem uma tabela com as distâncias de separação para o armazenamento de hidrogênio, ver Figura 798, que foi motivada pelo projeto dos ônibus a hidrogênio.

Outra iniciativa oriunda desse projeto foi a monografia elaborada pelo Cap PM Cesar Casademunt Toller, intitulada “Atendimento às emergências

envolvendo ônibus com célula a combustível de hidrogênio: Proposta de procedimento operacional padrão para o Corpo de Bombeiros da PMESP”, São Paulo, 2009. A monografia foi apresentada para conclusão do Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais.

Na IT 28/11, Anexo B, dois critérios são utilizados para estabelecimento da distância de separação de armazenamento de hidrogênio: o volume de hidrogênio e a capacidade hidráulica do reservatório. A Figura 79 apresenta a tabela do Anexo B, que foi modificada para informar massa de hidrogênio ao invés de volume, o que tornará as comparações mais fáceis de serem compreendidas.

Corpo de Bombeiros SP Brasil			
DISTÂNCIAS DE SEPARAÇÃO			
RECIPIENTE	GÁS		
Capacidade volumétrica total dos recipientes	Capacidade máxima de hidrogênio possível de ser armazenada nos recipientes, em fase líquida ou gasosa		
Capacidade hidráulica	massa de hidrogênio		
	< 1,0 kg	1,0 a 7,5 kg	> 7,5 kg
< 2 m ³	0 m	6 m	7,5 m
> 2 m ³	0 m	6 m	15 m

IT 28/2011 – Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP) / Anexo B / A tabela original foi modificada e m³ convertido para kg

MODIFICADO

Figura 79.: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Com base nessa tabela foram realizadas algumas estimativas, apresentadas na tabela da Figura 80. As colunas da tabela indicam: o estado do hidrogênio (gás ou líquido), a capacidade hidráulica do reservatório (m³), massa de hidrogênio armazenada (kg), distância de separação imposta pela IT 28/11 (m), e as condições de armazenamento (p , T) ou equivalência (nº cilindros de gás, 50 L).

Os resultados indicam que utilizar a capacidade hidráulica do reservatório como critério – menor ou igual a 2 m³ ou maior – acarreta algumas distorções importantes no caso do hidrogênio. O mesmo aconteceria com relação a outros gases que não se liquefazem ao serem pressurizados a temperatura ambiente.

O critério provavelmente foi baseado em gases que se liquefazem à temperatura ambiente e a pressões relativamente baixas, como o GLP, para os quais a quantidade de produto armazenada é proporcional ao volume do reservatório.

Para esclarecer as contradições decorrentes desse critério são apresentados e comentados os três casos a seguir, que podem ser facilmente visualizados na tabela da Figura 80.

Corpo de Bombeiros SP Brasil				
Distâncias de separação baseadas na IT-28/2011				
Gás ou Líquido	Capacidade m ³	Massa de H ₂ kg	Distância m	Condições ou Equivalência
Gás	qq tamanho	1,0	0,0	1,5 cilindro
Gás	qq tamanho	7,5	6,0	11 cilindros
Gás	2,0	7,6	7,5	11 cilindros
Gás	2,0	78,4	7,5	25°C, 70 MPa
Líquido	2,0	120,7	7,5	LH2 tanque
Gás	2,1	7,6	15,0	11 cilindros
Gás	2,1	82,3	15,0	25°C, 70 MPa
Gás	45,5	500,0	15,0	Tube trailer, 25°C, 25 MP
Líquido	82,9	500,0	15,0	LH2 tanque

Figura 80: Cálculos realizados por Newton Pimenta

Fonte: Notas de Aulas, 2023

Caso 1: Para reservatórios com 2,0 m³ de capacidade hidráulica a distância de separação é de no máximo 7,5 m para quantidades muito distintas: de 7,6 a 78 kg, para o hidrogênio gasoso, até 121 kg, para o caso do hidrogênio líquido. Considerando que as quantidades são muito distintas, com a razão entre as massas de 1:10:16, as distâncias de separação não deveriam ser iguais.

Caso 2: A mesma quantidade de hidrogênio gasoso, 7,6 kg, – equivalente a 11 cilindros de hidrogênio com 50 L de capacidade hidráulica cada um – impõe uma distância de separação de 7,5 m se um reservatório tiver 2,0 m³; mas, para um reservatório ligeiramente maior, com 2,1 m³, a distância exigida seria de 15 m (o dobro). Esse aumento da distância de separação implica em custos adicionais. Embora o aspecto de segurança seja crucial,

é indispensável viabilizar o licenciamento e a operação das indústrias sem onerá-las excessivamente.

Caso 3: Quantidades de hidrogênio que vão de 7,6 kg até 500 kg (ou mais) exigiriam a mesma distância de separação, 15 m, para reservatórios com capacidade hidráulica superiores a 2,0 m³. Neste caso, a razão entre as massas de hidrogênio é de 1:66, então, as distâncias de separação também não deveriam ser iguais, como no Caso 1. Atualmente, 500 kg é a quantidade de hidrogênio gasoso transportada por um tube trailer moderno, com cilindros do tipo 4. É intrigante observar a mesma a distância de separação é requerida apenas 7,6 kg de hidrogênio, equivalente a 11 cilindros com 50 L de capacidade interna cada um.

Os comentários dos três casos indicam esta norma deveria passar por uma revisão para ser aprimorada, a fim de evitar possíveis incongruências e questionamentos em sua implementação.

A CETESB, que possui jurisdição estadual, desempenha um papel crucial na garantia da qualidade do ar, da água e do solo, além de conduzir o processo de licenciamento ambiental com foco no risco social das comunidades vizinhas aos empreendimentos.

Dependendo das quantidades de materiais tóxicos e inflamáveis e da densidade populacional nas proximidades de um empreendimento, pode ser necessário realizar uma avaliação quantitativa de riscos utilizando como guia a Norma Técnica P4261/2011 da própria CETESB.

O processo de licenciamento do posto de hidrogênio já mencionado motivou o desenvolvimento um trabalho para cálculo das distâncias de separação para o armazenamento de hidrogênio. O resultado final foi uma tabela relacionando os valores da massa de hidrogênio com as distâncias de separação, apresentada no Anexo E da referida norma. A CETESB realizou um trabalho bastante significativo na elaboração dessa tabela e um resumo das hipóteses e metodologia de cálculo é apresentado na figura a seguir.

Distâncias de separação para armazenamento de H₂
Agência de Proteção Ambiental, CETESB, SP, Brasil
Norma Técnica P4261/2011, Anexo E



CETESB

Norma P4261		Hipóteses para elaboração das tabelas do Anexo E	Liberação de 20% (massa) do gás inflamável	H ₂ and CH ₄ 169 bar, 25°C
Massa H ₂ kg	Distância m			
10	18	Meteorologia vento 2 m/s 25°C	Codes & Softwares PHAST 6.54 EFFECTS PLUS 5.5 SuperChems 6.2	Dispersão de nuvens para LII Explosão equivalente a TNT Sobrepresão 0,1 bar
50	30			
100	38			
150	43			
200	48			
250	51			
300	54			
400	60			
500	65			

Uma dessas hipóteses de cálculo foi a de que ocorreria a liberação de 20% da massa total do hidrogênio armazenado. Além disso, foram consideradas as seguintes condições meteorológicas: velocidade do vento de 2 m/s, e temperatura ambiente de 25°C.

Para calcular essas distâncias, foram utilizados softwares especializados, e foi considerada a dispersão da nuvem de hidrogênio até o limite inferior de inflamabilidade, que é de 4%. Também foi considerada uma sobrepresão de 0,1 bar como parte das condições de contorno.

Esse trabalho foi apresentado na *International Conference on Hydrogen Safety 2011* e foi bem aceito pelos pares.

Distâncias de separação para armazenamento de H₂
Agência de Proteção Ambiental, CETESB, SP, Brasil
Norma Técnica P4261/2011, Anexo E



CETESB

**HYDROGEN RISK ASSESSMENT IN
 SAO PAULO STATE – BRAZIL**

**S.R. Tomaz, G.G. Michelino, and
 N.P. Neves Jr**

**International Conference on
 Hydrogen Safety 2011**

Norma P4261		
Massa H ₂ kg	Distância m	Área* m ²
10	18	1 000
50	30	2 800
100	38	4 500
150	43	5 800
200	48	7 200
250	51	8 200
300	54	9 200
400	60	11 300
500	65	13 300

HRS com 100 kg
área de 1/2 bloco

HRS com 300 kg
área de 1 bloco

HRS com 500 kg
área de 1,3 blocos

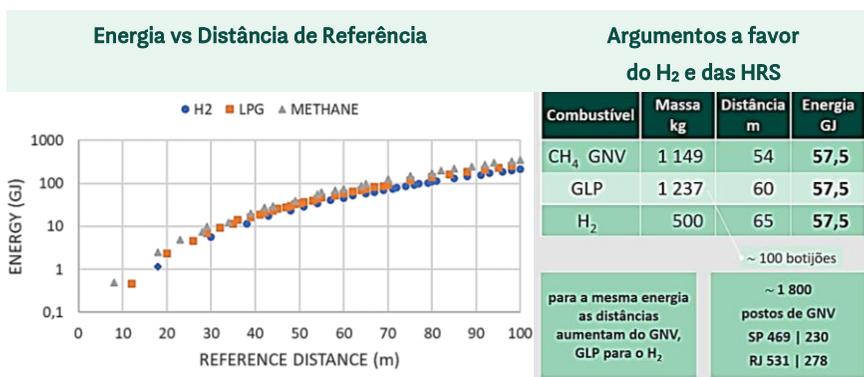
Os resultados indicam que, para armazenar 10 kg de hidrogênio com segurança, seria necessária uma distância de 18 metros, equivalente a uma área de 1 000 m², o que corresponde a um espaço consideravelmente grande, com dimensões de 33 metros por 33 metros.

Uma quantidade de 100 kg de hidrogênio exigiria uma distância de 38 metros, equivalente a um círculo com esse raio. Para um armazenamento de 300 kg de hidrogênio, a área requerida seria praticamente de um quarteirão, totalizando 10 000 metros quadrados.

No caso de 500 kg de hidrogênio, que seria uma quantidade típica de caminhões de hidrogênio ou de um posto de abastecimento, a área necessária seria ainda maior, 13 270 m², excedendo um quarteirão. Parece que essa exigência é um tanto exagerada.

A seguir, temos uma comparação entre o hidrogênio, o gás liquefeito de petróleo (GLP) e o metano em relação à energia e à distância de separação. Podemos observar que, para a mesma distância de separação, o hidrogênio apresenta uma quantidade menor de energia.

Uma outra forma de visualizar a situação é que, para a mesma quantidade de energia, a distância de separação aumenta na seguinte ordem: metano e gás natural veicular (GNV), GLP e hidrogênio. É importante ressaltar que a quantidade mencionada é equivalente a 100 botijões de GLP.



há medidas para reduzir a distância

Figura 81: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Já a NFPA (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION), possui jurisdição nacional nos Estados Unidos e é amplamente reconhecida internacionalmente, inclusive na América Latina, onde é representada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

O principal foco da NFPA é a prevenção de incêndios, tanto intramuros (dentro de edifícios) quanto extramuros (fora de edifícios). Eles mantêm quase 400 códigos e padrões, e entre eles, há um código específico, o NFPA 2, que trata das diretrizes relacionadas ao hidrogênio. É importante mencionar que este código faz referência a várias outras normas da própria NFPA, como por exemplo, a *NFPA 55 – Compressed Gases and Cryogenic Fluids Code*.

Sobre as distâncias mínimas de separação, as quais se aplicam a propriedades ou espaços públicos, a NFPA estabelece que, no caso de 11 kg de hidrogênio, a distância de separação é de apenas 1,5 m, o que é significativamente menor do que as diretrizes da CETESB, por exemplo.

Vale ressaltar que, para uma quantidade significativamente maior, como 500 kg de hidrogênio, a distância de separação exigida é de 7,6 m. Isso é relevante ao lembrar do acidente ocorrido na planta da Air Products, em Santa Clara, Califórnia, em 2019, no qual se observa que as distâncias de separação entre os *tube trailers* estacionados eram muito pequenas.

Em conjunto com outras medidas mitigadoras, se as distâncias fossem um pouco maiores, os danos aos *tube trailers* teriam sido significativamente menores. O trailer em que ocorreu o acidente foi danificado porque ficou exposto diretamente às chamas do hidrogênio que vazou devido a um erro operacional. Os demais foram afetados pelo incêndio que se perpetuou por uma série de fatores, mas pode-se atribuir a severidade das consequências ao fato de estarem muito próximos uns dos outros.

Tomando como exemplo o acidente mencionado, é muito provável que as distâncias de separação preconizadas pela NFPA sejam muito pequenas. Portanto, recomenda-se muita cautela ao adotar esses valores. Sobre esse assunto, a norma "ABNT NBR IEC 60079-10-1 – Classificação de áreas – Atmosferas explosivas de gás" apresenta diretrizes para cálculo das distâncias de separação. Embora o cálculo não seja simples, há exemplos

que podem contribuir para uma definição mais acertada a respeito da distância de separação.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION

Separation distances for gaseous H₂ NFPA 2



NFPA 2		
H ₂ Mass kg	Distance m	Area m ²
11	1,5	7
53	3,0	29
127	4,6	66
212	6,1	117
502	7,6	182

Minimum distances to properties and public spaces

Conversion of units and calculations made by Newton Pimenta

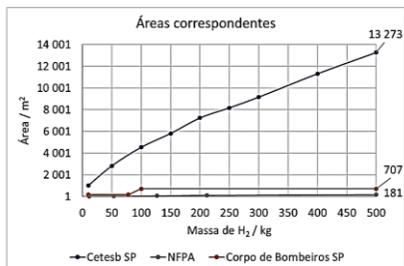
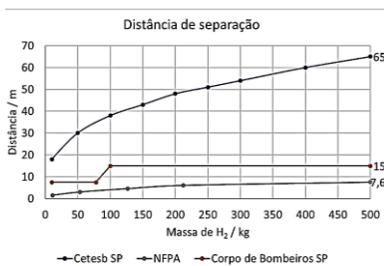
Figura 82: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Neste contexto, a Figura 83 apresenta uma comparação entre as distâncias de separação estipuladas pela CETESB, Corpo de Bombeiros e pela NFPA para quantidades de hidrogênio de até 500 kg. As diferenças observadas são muito relevantes, por exemplo, para 500 kg de hidrogênio tem-se 7,6, 15 e 65 m respectivamente para NFPA, Corpo de Bombeiros e CETESB.

Além disso, conforme observado anteriormente com relação ao Corpo de Bombeiros, o critério do volume do tanque faz com que as distâncias nem sempre sejam proporcionais às quantidades de hidrogênio. Portanto, existe claramente a necessidade de esclarecer essas diferenças e um trabalho para harmonizar essas normas seria muito bem-vindo.

É importante ressaltar que muitas das normas e padrões relacionados ao Hidrogênio Verde estão em desenvolvimento e ainda não atingiram o grau de maturidade esperado. Como discutido, há normas que se sobrepõem ou que ainda não estão harmonizadas. Isso significa que pode ser necessário consultar especialistas e dialogar com as agências para chegar a uma conclusão adequada sobre as melhores condutas a seguir para atingir o nível de segurança requerido no licenciamento de um determinado empreendimento.

Comparação das distâncias



No caso da CETESB, para 500 kg de H₂, a distância de separação é de 65 m.

Comparação com a área de um bloco de 100 x 100 m².

Figura 83: Fonte: Notas de Aulas, 2023

A seguir, serão discutidas as normas para uso final relacionadas ao tema.

Há uma confusão entre os diferentes documentos (códigos, normas, regulamentos, especificações técnicas, relatórios técnicos, relatórios informativos e práticas recomendadas) os quais iremos explicitar aqui:

- **Os códigos** são definidos como "declaração sistemática de um corpo de leis" ou "um sistema de princípios ou regras". Eles geralmente se aplicam à construção ou ao ambiente construído. Os códigos estabelecem requisitos mínimos para coisas como distâncias de deslocamento entre instalações permanentes, requisitos de ventilação, requisitos de encanamento e eletricidade e outros itens relacionados a um ambiente construído. Um código pode fazer referência a um padrão, o qual deve ser cumprido pela jurisdição que tem autoridade sobre seu projeto. Os códigos mais frequentemente encontrados na área de hidrogênio e células a combustível incluem códigos ICC e NFPA.
- **Os padrões** são definidos como "algo estabelecido como regra para medição ou como modelo a ser seguido". Em alguns casos, eles realmente não são muito diferentes dos códigos. Mas os padrões não são obrigatórios até que sejam citados em algum lugar, como em um código, regulamento, contrato de aquisição ou outro documento de requisitos. O padrão deve ser baseado em desempenho, ou seja, "cada unidade deve atender aos seguintes

testes", ou pode ser um padrão de projeto, ou seja, "o bocal deve ser feito dos seguintes materiais e ter as seguintes dimensões". Os padrões para a unidade de fabricação ou teste são independentes de onde a unidade será usada e devem cumprir requisitos técnicos mínimos para garantir a uniformidade do produto, incluindo segurança e desempenho.

- **Os regulamentos** são definidos como "uma regra emitida por uma autoridade executiva de um governo e com força de lei que trata dos detalhes de procedimento". A Federal Aviation Administration (FAA) tem regulamentos sobre o que pode e o que não pode ser levado a bordo de uma aeronave, por exemplo. Esses regulamentos geralmente são orientados à segurança. No Brasil, o Ministério do Trabalho emite as NRs.
- **Especificações Técnicas** (TS) são usadas para "fins de pré-padronização" pela ISO e IEC, entre outras, quando o assunto em questão ainda está em desenvolvimento, ou onde por qualquer outro motivo existe uma possibilidade futura, mas não imediata, de um acordo para publicação de uma norma. Na ISO e IEC, as Especificações Técnicas estão sujeitas a revisão pelo comitê ou subcomitê técnico em até 3 anos após sua publicação. O objetivo é reexaminar a situação que resultou na publicação de uma Especificação Técnica e, se possível, obter o acordo necessário para a publicação de uma Norma Internacional para substituir a Especificação Técnica.
- **Especificações publicamente disponíveis** (PAS) pode ser uma especificação intermediária, publicada antes do desenvolvimento de uma Norma Internacional completa, ou, na IEC, pode ser uma publicação publicada em colaboração com uma organização externa. É um documento que não cumpre os requisitos de uma norma e é válido por um período inicial máximo de 3 anos (com possibilidade de prorrogação).
- **Relatórios Técnicos** (TR) são inteiramente informativos por natureza, escritos por um comitê ou subcomitê técnico que coletou dados referentes ao processo, serviço ou produto. O comitê

técnico ou subcomitê responsável decide sobre a retirada de um Relatório Técnico.

- **Documentos SAE**- são documentos emitidos pela Sociedade de Engenheiros Automotivos. Podem ser: Normas SAE, documentação de práticas ou especificações de engenharia amplamente aceitas para um material, produto, processo, procedimento ou método de teste; Práticas Recomendadas, documentações de práticas, procedimentos e tecnologia que se destinam a ser guias para práticas de engenharia padrão; Relatórios de Informações, são compilações de dados de referência de engenharia ou material educacional útil para a comunidade técnica.

Portanto, embora códigos, padrões e regulamentos sejam requisitos importantes para proteger o público, na maioria dos casos cada um tem um nicho único. Os códigos geralmente se aplicam ao ambiente construído. Os padrões geralmente se aplicam a componentes, sistemas e testes. Os regulamentos geralmente se aplicam ao transporte ou regras de procedimento. Cada organização de desenvolvimento de padrões e organização de desenvolvimento de código tem regras específicas para seu processo de consenso, e os requisitos para diferentes tipos de documentos variam.



Figura 84: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Normas técnicas internacionais são determinadas por alguma autoridade internacional de normalização e reconhecidas como referência no comércio internacional pela Organização Mundial do Comércio. São levadas em conta principalmente quando não há uma norma nacional determinada. Aqui, apresentamos normas de organizações internacionais e algumas nacionais, dentro da cadeia de valor do hidrogênio, bem como para determinados usos finais.

É relevante mencionar que ocorre uma sobreposição de competências entre diversas agências de normalização. No Brasil, a ABNT desempenha um papel fundamental nesse contexto e representa a ISO, a Organização Internacional de Normalização.

É essencial destacar a existência do ISO/TC 197, o Comitê Técnico 197 da ISO, dedicado às tecnologias de hidrogênio, que abrange vários outros subcomitês especializados. Esses subcomitês englobam tópicos diversos, como análise de gases, gás natural, materiais plásticos e de borracha, conexões para gás, soldagem e outros processos relevantes. A variedade de comitês reflete a importância da segurança no uso do hidrogênio e suas aplicações específicas.

É relevante ressaltar a importância de órgãos como a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), a ISO (Organização Internacional de Normalização) e a IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) no contexto das normas relacionadas ao hidrogênio e suas aplicações.

A IEC, em particular, desempenha um papel significativo, com várias normas voltadas para as células a combustível e a classificação de áreas em atmosferas explosivas de gás, abordando questões essenciais de segurança e padronização nessas áreas específicas.

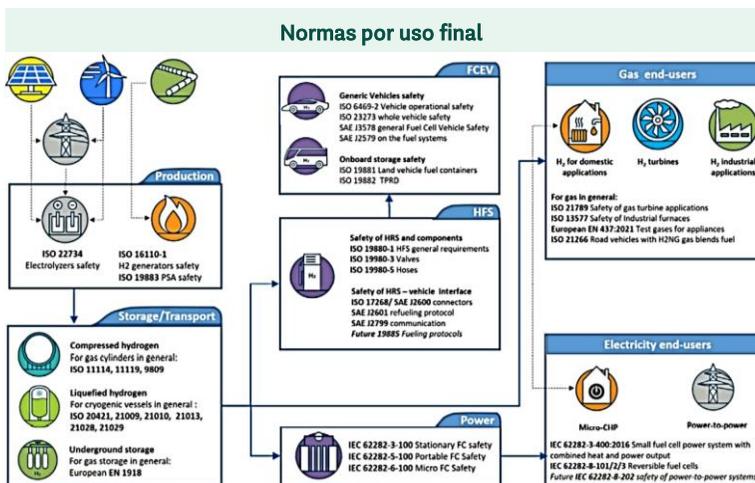


Figura 85: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Vale a pena destacar que existem várias normas e organismos que regulamentam diferentes aspectos relacionados ao hidrogênio e suas aplicações. Para veículos, por exemplo, normas da SAE (*Society of Automotive Engineers*) e da CSA (*Canadian Standards Association*) são relevantes. No que diz respeito a recipientes, as normas da ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) e da CGA (*Compressed Gas Association*) desempenham um papel importante.

Normas em cada setor

	Veículos	Recipientes	Armazenamento	Infraestrutura
Fuel Specs:	SAE			SAE
Weights/Measures:	SAE			SAE
Fueling:	SAE			SAE
Sensors/Detectors:	SAE			SAE
Connectors:	SAE			SAE
Containers:	SAE			SAE
Building and Fire Code Requirements:	SAE			SAE
General FC Vehicle Safety:	SAE			SAE
Fuel Cell Vehicle Systems:	SAE			SAE
Fuel System Components:	SAE			SAE
Containers:	SAE			SAE
Reformers:	SAE			SAE
Emissions:	SAE			SAE
Recycling:	SAE			SAE
Service/Repair:	SAE			SAE
Storage Tanks:		ASME, CGA, API		
Piping:		ASME, CGA, API		
Dispensers:		UL, CGA, API		
On-site H2 Production:		UL, CGA, API		
Codes for the Environment:		UL, CGA, API		
Composite Containers:			ASME, CGA, API	
Pipelines:			ASME, API, CGA	
Equipment:			ASME, API, CGA	
Fuel Transfer:			API	
Composite Containers:			SAE	
Weights/Measures:			SAE	
Fueling:			SAE	
Sensors/Detectors:			SAE, UL, CGA, API	
Connectors:			SAE	
Communications:			SAE, UL, CGA, API	
Building and Fire Code Requirements:			SAE, UL, CGA, API	

Figura 86: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Além disso, a EIGA (*European Industrial Gases Association*), embora europeia, influencia normas seguidas globalmente devido à sua representatividade no setor de gases industriais. Essa diversidade de normas muitas vezes resulta em sobreposição e compartilhamento de requisitos e diretrizes.

É fundamental ressaltar a importância das normas técnicas na especificação e regulamentação de processos, produtos e serviços em diversos setores. Embora o uso dessas normas seja voluntário, elas desempenham um papel fundamental na melhoria da aceitação de produtos e serviços no mercado.

Observa-se que muitas vezes a motivação para a criação dessas normas é uma demanda regional e empresas com interesses na área contribuem voluntariamente para sua elaboração. Além disso, essas normas podem ser usadas tanto para impor quanto para reduzir barreiras comerciais, e é fundamental estar ciente desse aspecto.

Lista de órgãos internacionais

		Organization Name	Standards Development Areas
	AGA	American Gas Association	Materials testing standards
	API	American Petroleum Institute	Equipment standards for petroleum production, storage and handling
	ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers	Promoting sustainability through research, standards writing, publishing, and education
	ASME	American Society of Mechanical Engineers	Mechanical and multidisciplinary engineering, design codes and standards
	ASTM	American Society for Testing and Materials	Technical test standards for materials, products, systems
	CGA	Compressed Gas Association	Equipment design and performance standards for compressed gas systems and components
	CSA	CSA Standards	US and Canadian equipment standards
	DOT	Department of Transportation	Federal transportation regulatory agency
	FERC	Federal Energy Regulatory Commission	Regulates interstate transmission of electricity, gas, and oil
	GTI	Gas Technology Institute	Supplies technical support and training for the energy industry
	ICC	International Code Council	Family of model building codes, including the International Fire Code
	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Electrical standards
	NERC	North American Electric Reliability Corporation	Produces standards for electric grid operation
	NFPA	National Fire Protection Association	Model codes and standards, including the National Electric Code
	NIST	National Institute of Standards and Technology	Measurement standards
	SAE	Society of Automotive Engineers	Vehicle standards
	NARUC	National Association of Regulatory Utility Commissioners	Represents state public service commissions
	UL	Underwriters Laboratory	Equipment and performance testing standards

Deve-se destacar que a cooperação internacional é uma atividade essencial para o desenvolvimento de normas que atendam aos critérios de

todas as partes envolvidas, e o aumento da participação brasileira em fóruns internacionais na área do hidrogênio deve ser incentivado.

Agências de Normas e Informação



Figura 87: Fonte: Notas de Aulas, 2023

Além disso, enfatiza-se que o aprimoramento das normas nunca deve ser encarado como um processo concluído, pois as normas precisam acompanhar o avanço tecnológico e as mudanças na sociedade.

O curso também destaca a importância de ter discernimento ao lidar com as normas e a necessidade de negociação com as autoridades competentes para viabilizar a implantação de empreendimentos relacionados ao hidrogênio.

Por fim, enfatiza-se o respeito pelas instituições que desenvolvem normas, códigos e padrões, reconhecendo o desafio que esse trabalho representa. A mensagem geral é de que as normas desempenham um papel crucial no avanço tecnológico e na segurança da sociedade, e é fundamental abordá-las com sabedoria, respeito e com espírito de colaboração.

10. Considerações finais

Espera-se que este livro tenha fornecido uma introdução abrangente ao universo do hidrogênio, com foco nos "Princípios Básicos de Segurança do Hidrogênio".

Durante essa exploração, foram abordados aspectos essenciais relacionados à segurança e às características físico-químicas do hidrogênio, que demandam controle e atenção em todas as etapas da cadeia, desde a produção até o uso final.

Foi destacada a importância de compreender os níveis de concentração em que o hidrogênio pode reagir com o ar, sob condições normais de pressão e temperatura.

Além disso, enfatizou-se a necessidade de adotar medidas de segurança cruciais para prevenir a formação de atmosferas explosivas, tanto em ambientes internos quanto externos. Isso incluiu a análise das reações explosivas do hidrogênio com e a identificação de fontes de ignição em diversos cenários.

Outro ponto relevante envolveu a compreensão das características físico-químicas das misturas de gases que contêm hidrogênio, bem como as implicações de vazamentos em áreas internas e externas. Também foram abordados os principais tipos de sensores utilizados para garantir a segurança e detectar gases explosivos e/ou nocivos.

Considerou-se a importância de conhecer os efeitos fisiológicos do contato e manuseio do hidrogênio – além de gases inflamáveis, inertes e tóxicos –, bem como as medidas de proteção ambiental necessárias.

Além disso, ressaltou-se a relevância da legislação e das normas existentes e vigentes, estabelecidas por entidades como a ABNT, ISO, IEC e outros órgãos regulatórios, que orientam as práticas relacionadas à produção, manuseio, armazenamento, transporte e uso final do hidrogênio.

Resumidamente, este livro explorou a importância da segurança e analisou os aspectos físico-químicos que demandam controle em todas as etapas da cadeia de produção e uso do H₂.

À medida que profissionais e pesquisadores avançam em sua jornada de aprendizado sobre o hidrogênio verde, é recomendável a leitura dos próximos volumes, que oferecerão uma visão mais aprofundada e detalhada de todos os aspectos envolvidos na implementação eficaz e eficiente dessa tecnologia.

11. Referências

Handbook of Compressed Gases, Compressed Gas Association, Inc.

NR-33 Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados

Normas de segurança para o manuseio e utilização de cilindros pressurizados contendo hidrogênio, Prof. Ennio Peres da Silva, Laboratório de Hidrogênio, UNICAMP

Combustion, flames and explosions of gases, Bernard Lewis and Guenther von Elbe, Academic Press, Orlando, 3rd ed., 1987. ISBN 0-12-446751-2.

ABNT NBR IEC 60079, Parte 10-1: Classificação de áreas - Atmosferas explosivas de gás

IEC 60079 Part 10-1 Electrical apparatus in hazardous locations: Classification of hazardous gas areas

ABNT NBR IEC 60079-13:2019 Atmosferas explosivas Parte 13: Proteção de equipamentos por ambiente pressurizado “p” e por ambiente artificialmente ventilado “v”

NR-13 Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento

Gas Encyclopedia Air Liquide (disponível online)

IEC 61508 – Functional Safety



Por meio da:



Coordenação de curso:



Chapter 6 - Regulatory Framework, Safety Aspects, and Social Acceptance of Hydrogen Energy Technologies, in Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies, Academic Press, 2019, Pages 303-356, ISBN 9780128142516

Occupational Safety and Health Administration – OSHA
National Institute for Occupational Safety & Health – NIOSH

National Institute of Standards and Technology – NIST

Hydrogen Tools, <https://h2tools.org/>, Pacific Northwest National Laboratory, DOE, EERE

FISPQ – Ficha de informação de segurança de produtos químicos (sites de empresas de gás)

CETESB - NORMA TÉCNICA P4.261, 2ª Edição, Dez/2011, 140 páginas, Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência

ISO TR 15916: Basic consideration for the safety of hydrogen systems

LOVINS, Amory B. Twenty hydrogen myths. Rocky Mountain Institute, 2003.

ROSSONI, Cláudio Farias; ROCHA, Gustavo Visnardi; SALES, Karina. Segurança no transporte de gases: oxigênio líquido refrigerado. Revista Processando o Saber, v. 5, p. 60-74, 2013.

FIRE AND EXPLOSION RISK ANALYSIS FUNDAMENTAL ANALYSIS

<https://www.icheme.org/media/17752/the-flixborough-disaster-report-of-the-court-of-inquiry.pdf>

<https://www.sciencefocus.com/future-technology/hydrogen-power-myths/>

https://h2tools.org/sites/default/files/2021-06/AP_Santa_Clara_Incident_Review_Report_Rev1.pdf

<https://www.powermag.com/lessons-learned-from-a-hydrogen-explosion/>

<https://www.youtube.com/watch?v=-EbmCGBMI4E>

Materials compatibility with hydrogen Available from:
https://www.researchgate.net/publication/260792512_Materials_compatibility_with_hydrogen [accessed Sep 26 2022].

Handbook of Compressed Gases, Compressed Gas Association, Inc. Gas Encyclopedia Air Liquide (disponível online)

Normas de segurança para o manuseio e utilização de cilindros pressurizados contendo hidrogênio, Prof. Ennio Peres da Silva, Laboratório de Hidrogênio, UNICAMP

Chapter 6 - Regulatory Framework, Safety Aspects, and Social Acceptance of Hydrogen Energy Technologies, in Science and Engineering of Hydrogen-

Based Energy Technologies, Academic Press, 2019, Pages 303-356, ISBN 9780128142516

SAITO, Guilherme Keiji et al. Método para análise de riscos e especificação de requisitos de segurança em processos industriais com múltiplos modos de operação. 2019.

Combustion, flames and explosions of gases, Bernard Lewis and Guenther von Elbe, Academic Press, Orlando, 3rd ed., 1987. ISBN 0-12-446751-2.

IEC 61508 – Functional Safety

NR-33 Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados



Por meio da:



Coordenação de curso:



ABNT NBR IEC 60079, Parte 10-1: Classificação de áreas - Atmosferas explosivas de gás

IEC 60079 Part 10-1 Electrical apparatus in hazardous locations: Classification of hazardous gas areas

ABNT NBR IEC 60079-13:2019 Atmosferas explosivas Parte 13: Proteção de equipamentos por ambiente pressurizado “p” e por ambiente artificialmente ventilado “v”

NR-13 Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento ISO TR 15916: Basic consideration for the safety of hydrogen systems

CETESB - NORMA TÉCNICA P4.261, 2ª Edição, Dez/2011, 140 páginas, Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência

FISPQ – Ficha de informação de segurança de produtos químicos (sites de empresas de gás); OSHA Occupational Safety and Health Administration

NIOSH - National Institute for Occupational Safety & Health NIST - National Institute of Standards and Technology Plataformas:

Hydrogen Tools, <https://h2tools.org/>, Pacific Northwest National Laboratory, DOE. <https://hyresponder.eu/>, Clean Hydrogen Partnership

<https://www.iche.org/>

<https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/>

H2BRASIL



www.quali-a.com/h2brasil



Por meio da:



Apoio:



Organização:

