

Impacto das Normas de Áreas Classificadas na Escolha de Tecnologias para Geração de Hidrogênio

Um Breve Estudo

Resumo: A produção de hidrogênio verde surge como um elemento crucial na transição energética global. No entanto, a implementação segura e eficiente dessa tecnologia exige uma análise aprofundada dos riscos associados à sua produção, particularmente em ambientes potencialmente explosivos. Este trabalho técnico investiga o impacto das normas de áreas classificadas na seleção de tecnologias para geração de hidrogênio, abordando os desafios e oportunidades relacionados à segurança e conformidade.



1. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas energéticas sustentáveis para mitigar as mudanças climáticas e descarbonizar a indústria impulsiona o interesse no hidrogênio (H₂) como vetor energético. Particularmente, o "hidrogênio verde", produzido a partir de fontes renováveis, emerge como solução promissora, com potencial para descarbonizar setores de difícil abatimento, como o transporte pesado, a indústria química e a siderurgia. A eletrólise da água, utilizando energia proveniente de fontes eólicas ou solares, destaca-se como método de produção de hidrogênio verde com menor impacto ambiental.

No entanto, a implementação em larga escala da economia do hidrogênio apresenta desafios técnicos e de segurança intrínsecos às propriedades do H₂. Sua alta inflamabilidade, caracterizada por uma ampla faixa de explosividade (4% - 75% em volume no ar) e baixa energia mínima de ignição, exigem rigorosos protocolos de segurança em todas as etapas da cadeia produtiva, desde a geração até o armazenamento, transporte e utilização.

Nesse contexto, o entendimento profundo das normas de classificação de área, que estabelecem diretrizes para a segurança em ambientes com risco de explosão, torna-se crucial para engenheiros químicos e de processos. A aplicação rigorosa dessas normas, em conjunto com o desenvolvimento e implementação de tecnologias inerentemente seguras, é fundamental para garantir a integridade das instalações e a segurança de profissionais e comunidades no entorno.

2. ÁREAS CLASSIFICADAS E LEGISLAÇÃO

Áreas classificadas são definidas como locais onde existe um risco de explosão devido à presença de gases, vapores ou poeiras inflamáveis em concentrações suficientes para criar uma atmosfera explosiva. A produção de hidrogênio, especialmente por eletrólise ou reforma, frequentemente envolve o manuseio de gases inflamáveis (H₂ e O₂) e pode gerar atmosferas explosivas se não gerenciadas adequadamente.

A fim de garantir a segurança em tais ambientes, diversas normas e regulamentações internacionais e nacionais fornecem diretrizes abrangentes para a classificação de áreas, projeto de instalações, seleção de equipamentos, procedimentos operacionais e sistemas de proteção. A não conformidade com estas normas pode resultar em riscos significativos à segurança, paralisações dispendiosas e potenciais penalidades legais.

Algumas das normas e legislações mais relevantes para a produção de hidrogênio em áreas classificadas incluem:

Normas Internacionais:

- **IEC 60079**: Esta norma internacional, desenvolvida pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), é um conjunto abrangente de normas que abrangem a maioria dos aspectos de equipamentos destinados ao uso em atmosferas explosivas. Isso inclui a classificação de áreas, métodos de proteção, requisitos de instalação e inspeção e manutenção.
- **ISO 817**: Define métodos de teste para determinar as propriedades de explosão de gases e vapores inflamáveis, informações essenciais para a classificação de áreas e a seleção de equipamentos.

Normas Norte-Americanas:

- **NFPA 2** - Hydrogen Technologies Code: Norma americana que fornece diretrizes específicas para a produção, armazenamento, manuseio e uso seguro de hidrogênio.
- **NEC** (National Electrical Code) - Artigos 500 a 506: O NEC, especificamente os artigos 500 a 506, aborda os requisitos de instalação elétrica em áreas classificadas, incluindo a classificação de áreas, tipos de proteção de equipamentos elétricos e métodos de instalação.

Normas Brasileiras (ABNT NBR):

- **ABNT NBR IEC 60079:** Versão brasileira da norma IEC 60079, incorporando as diretrizes internacionais para o contexto nacional.
- **NR-10** - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade: Estabelece requisitos e condições mínimas para a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e saúde dos trabalhadores que interagem com instalações elétricas em áreas classificadas.
- **NR-20** - Líquidos Combustíveis e Inflamáveis: Define requisitos para o armazenamento, manuseio e transporte de líquidos combustíveis e inflamáveis, incluindo o hidrogênio.

Outras Normas e Diretrizes:

- **Diretiva ATEX** (Europa): Esta diretiva europeia define os requisitos essenciais de saúde e segurança para equipamentos e sistemas de proteção destinados ao uso em atmosferas potencialmente explosivas.

3. TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO E IMPACTO DAS NORMAS

As normas de áreas classificadas impactam diretamente a escolha da tecnologia de geração de hidrogênio e seus componentes, incluindo:

3.1 Eletrólise da Água:

- Tipos de Eletrolisadores: Eletrolisadores alcalinos, PEM (membrana de troca de prótons) e SOEC (eletrolisador de óxido sólido) possuem diferentes características de operação, temperatura e pressão, influenciando a classificação da área e a seleção de equipamentos.
- Sistemas de Ventilação: A ventilação adequada é crucial para diluir e remover gases inflamáveis, exigindo o uso de sistemas à prova de explosão, dimensionados conforme normas.
- Instrumentação e Controle: Sensores, atuadores e controladores devem ser certificados para uso em áreas classificadas, garantindo a operação segura em atmosferas potencialmente explosivas.

3.2 Reforma a Vapor do Metano:

- Unidades de Reforma: A alta temperatura e a presença de gases inflamáveis exigem medidas rigorosas de controle de processo e proteção contraexplosões.
- Sistemas de Segurança: Válvulas de alívio de pressão, sistemas de detecção de gás e supressão de explosão são essenciais para mitigar riscos.

- **Materiais de Construção:** A seleção de materiais resistentes à corrosão e compatíveis com as condições de processo é fundamental para garantir a integridade da planta.

3.3 Pirólise:

- **Gerenciamento de Atmosferas Explosivas:** A pirólise, por sua natureza, pode gerar atmosferas inflamáveis dentro dos reatores e equipamentos auxiliares. A gestão destas atmosferas, seja por inertização com gases inertes ou por sistemas de ventilação adequados, é crucial para atender às normas de áreas classificadas.
- **Controle de Temperatura e Pressão:** O processo de pirólise ocorre em temperaturas elevadas, demandando um controle preciso para evitar a formação de subprodutos indesejáveis e garantir a segurança da operação.
- **A instrumentação e os sistemas de controle devem ser à prova de explosão, e o projeto deve considerar as variações de pressão durante o processo.**
- **Manuseio de Produtos e Resíduos:** A pirólise gera biocarvão e bio-óleo, produtos com potencial inflamável, além de gases que exigem tratamento. O manuseio seguro destes materiais, desde o armazenamento até o transporte, precisa seguir as normas de áreas classificadas para prevenir acidentes.

4. DESAFIOS E OPORTUNIDADES

A aplicação das normas de áreas classificadas na produção de hidrogênio apresenta desafios e oportunidades significativas, que variam de acordo com a tecnologia de produção utilizada. Abordar esses aspectos de forma abrangente exige uma análise aprofundada dos riscos e benefícios específicos de cada tecnologia:

4.1 Desafios:

- **Custos:** A conformidade com as normas de áreas classificadas invariavelmente aumenta os custos de investimento e operação de plantas de hidrogênio. Equipamentos à prova de explosão, sistemas de ventilação robustos, instrumentação intrinsecamente segura e mão de obra especializada têm custos significativamente mais altos. Essa questão é particularmente sensível para novas tecnologias de produção de hidrogênio, como a eletrólise PEM e a pirólise, que ainda buscam viabilidade econômica em larga escala.
- **Complexidade:** O projeto, instalação e operação de plantas de produção de hidrogênio em áreas classificadas exigem expertise técnica especializada em diversas disciplinas, incluindo engenharia elétrica, química, mecânica e de segurança. A gestão de riscos, a seleção de materiais compatíveis com hidrogênio, a implementação de sistemas de detecção e supressão de explosões e o cumprimento de rigorosos protocolos de segurança aumentam a complexidade do projeto.

- **Manutenção:** A manutenção em áreas classificadas exige procedimentos rigorosos e equipe altamente qualificada para garantir que a segurança não seja comprometida durante as atividades de inspeção, reparo e substituição de componentes. As interrupções para manutenção podem ser mais frequentes e longas, impactando a disponibilidade da planta e os custos operacionais.

4.2 Oportunidades:

- **Inovação:** A busca por soluções que minimizem os riscos e custos associados à produção de hidrogênio em áreas classificadas impulsiona a inovação em diversos campos. O desenvolvimento de tecnologias e equipamentos intrinsecamente seguros, materiais mais resistentes à permeação de hidrogênio, sistemas de monitoramento avançados e processos de produção mais eficientes e seguros são áreas de pesquisa promissoras.
- **Eletrificação e Descarbonização:** A crescente demanda por hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis e com baixo impacto ambiental, impulsiona a busca por soluções inovadoras em áreas classificadas. A integração de eletrolisadores em parques eólicos e solares, a produção descentralizada de hidrogênio em pequena escala e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento e transporte seguras oferecem oportunidades significativas para a descarbonização de diversos setores.

4.3 Considerações Tecnológicas Específicas:

- **Eletrólise da Água:**
 - **Eletrólise Alcalina:** Tecnologia madura e mais barata, mas com menor densidade de corrente e menor tempo de resposta, o que pode impactar a eficiência em regimes de carga flutuantes.
 - **Eletrólise PEM:** Alta densidade de corrente, resposta rápida a variações de carga e alta pureza do hidrogênio produzido, mas exigem materiais mais sofisticados e caros, como membranas poliméricas e catalisadores de metais nobres.
 - **Eletrólise SOEC:** Altas temperaturas de operação aumentam a eficiência, mas exigem materiais resistentes à corrosão e sistemas de controle mais complexos.
- **Reforma a Vapor do Metano:**
 - **Riscos Inerentes:** Alta temperatura e pressão, presença de gases inflamáveis e potencial liberação de CO exigem medidas rigorosas de controle de processo e sistemas de segurança robustos.

- Otimização de Processos: Tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) são essenciais para reduzir o impacto ambiental da reforma a vapor do metano.
- **Pirólise:**
 - Tecnologia em Desenvolvimento: Ainda em fase inicial de desenvolvimento, a pirólise oferece o potencial de produção de hidrogênio a partir de biomassa com menor impacto ambiental.
 - Gerenciamento de Subprodutos: A gestão adequada do biocarvão e do bio-óleo, subprodutos da pirólise, é crucial para a viabilidade econômica e ambiental do processo.

Em suma, a aplicação das normas de áreas classificadas na produção de hidrogênio apresenta desafios e oportunidades que exigem uma abordagem integrada, considerando os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e de segurança de cada tecnologia. A busca por soluções inovadoras e o desenvolvimento de novas tecnologias são essenciais para impulsionar a produção de hidrogênio verde e contribuir para a transição energética global.

5. IMPACTO DAS NORMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE ÁREA NA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

As normas de classificação de área, essenciais para garantir a segurança em ambientes com risco de explosão, exercem um impacto significativo na viabilidade econômica da produção de hidrogênio. A necessidade de atender a essas normas impõe custos adicionais em diversas etapas do processo, desde o projeto e construção das instalações até a operação e manutenção, afetando diretamente a competitividade do hidrogênio como energético.

5.1. Investimento Inicial:

- Projeto e Engenharia: A complexidade do projeto de plantas de hidrogênio em áreas classificadas exige expertise técnica especializada. Engenheiros e projetistas devem considerar cuidadosamente a localização de equipamentos, ventilação adequada, sistemas de detecção e supressão de explosões, e a seleção de materiais compatíveis com hidrogênio, o que aumenta os custos de engenharia e desenvolvimento.
- Construção: A construção em áreas classificadas exige mão de obra especializada, procedimentos rigorosos de segurança e materiais de construção específicos, como aço inoxidável e revestimentos resistentes à corrosão e permeação de hidrogênio. Esses fatores aumentam significativamente os custos de construção em comparação com instalações convencionais.

- Equipamentos: As normas de classificação de área exigem o uso de equipamentos elétricos e mecânicos à prova de explosão, projetados para operar em atmosferas inflamáveis sem causar ignição. Esses equipamentos, geralmente fabricados com ligas especiais e submetidos a rigorosos processos de certificação, têm custos significativamente mais altos que os equipamentos convencionais.

Exemplo 1: Custo de Equipamentos: Um estudo da Agência Internacional de Energia (IEA)¹ indica que o custo de equipamentos elétricos à prova de explosão para áreas classificadas pode ser de 3 a 10 vezes maior em comparação com equipamentos convencionais. Em uma planta de hidrogênio, essa diferença pode resultar em um aumento de milhões de dólares no investimento inicial.

Exemplo 2: Custos de Engenharia e Projeto: A empresa de engenharia WorleyParsons² estima que os custos de projeto detalhado para uma planta de produção de hidrogênio em área classificada podem ser até 20% maiores em comparação com uma planta similar em área não classificada, devido à necessidade de análises de risco mais complexas e detalhadas.

5.2. Custos Operacionais:

- Manutenção: A manutenção em áreas classificadas é mais complexa, dispendiosa e exige maior tempo de parada da planta. Procedimentos rigorosos de segurança, mão de obra especializada e a utilização de peças de reposição certificadas impactam diretamente os custos operacionais.
- Treinamento: As normas exigem treinamentos específicos para os operadores, técnicos de manutenção e demais profissionais que atuam em áreas classificadas. Esses treinamentos, além de onerosos, podem impactar a disponibilidade da mão de obra e gerar custos adicionais para as empresas.
- Inspeções e Certificações: Instalações em áreas classificadas estão sujeitas a inspeções e certificações periódicas por órgãos reguladores, o que gera custos adicionais para garantir a conformidade com as normas.

Exemplo 3: Manutenção: Um estudo da Petroleum Safety Authority Norway (PSA)³ sobre instalações offshore de petróleo e gás (indústria com normas semelhantes às de hidrogênio) revelou que os custos de manutenção em áreas classificadas podem ser até 50% maiores em comparação com áreas não classificadas, devido à necessidade de mão de obra especializada, procedimentos mais rigorosos e maior tempo de parada da planta.

Exemplo 4: Treinamento: O National Safety Council (NSC)⁴ estima que o custo médio de treinamento em segurança para trabalhadores em áreas classificadas nos EUA é de US\$ 1.000 por funcionário. Em uma planta de hidrogênio com dezenas de funcionários, esses custos de treinamento podem representar um ônus financeiro considerável.

5.3. Impacto na Competitividade:

- **Aumento do Preço do Hidrogênio:** Os custos adicionais relacionados à classificação de área aumentam o preço final do hidrogênio produzido, impactando sua competitividade em relação a outras fontes de energia, como combustíveis fósseis e eletricidade.
- **Dificuldade de Implementação em Larga Escala:** O elevado investimento inicial e os custos operacionais podem dificultar a implementação em larga escala de algumas tecnologias de produção de hidrogênio, especialmente aquelas ainda em fase inicial de desenvolvimento.
- **Barreiras para Novos Entrantes:** Os altos custos de entrada, associados à necessidade de atender às normas de classificação de área, podem representar uma barreira para novos entrantes no mercado de produção de hidrogênio, limitando a competição e a inovação.

Exemplo 5: Preço do Hidrogênio: Um estudo do Hydrogen Council⁵ concluiu que os custos adicionais de segurança relacionados à produção de hidrogênio em áreas classificadas podem aumentar o preço final do hidrogênio em 10% a 20%. Essa diferença de preço pode tornar o hidrogênio menos competitivo em relação a outras fontes de energia, especialmente em mercados com baixa tolerância a custos.

Exemplo 6: Barreiras à Entrada: Um relatório da Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA)⁶ destaca que os altos custos de investimento inicial, em parte devido às normas de classificação de área, representam uma barreira significativa para novos entrantes no mercado de produção de hidrogênio, limitando a competição e a inovação.

5.4. Mitigação dos Impactos:

Até o momento, demonstramos como as normas de classificação de área impactam significativamente os custos de produção de hidrogênio. No entanto, a busca por soluções inovadoras e a otimização de processos são essenciais para mitigar esses impactos e impulsionar a viabilidade econômica do hidrogênio como energético.

5.4.1 Abordagens para Minimizar a Classificação de Área:

A estratégia principal para mitigar os custos relacionados à classificação de área reside em reduzir a extensão das áreas classificadas ou eliminar completamente a necessidade de classificação. Isso pode ser alcançado por meio de:

- **Otimização de Processos:** A otimização dos processos de produção de hidrogênio, visando minimizar a formação de atmosferas explosivas, pode

reduzir a extensão das áreas classificadas e, conseqüentemente, os custos associados.

Exemplo 7: Um estudo da Universidade de Stanford⁷ demonstrou que a otimização do processo de eletrólise da água, utilizando novos materiais e designs de células eletrolíticas, pode reduzir a formação de atmosferas explosivas, gerando uma economia de até 15% nos custos de capital.

- Desenvolvimento de Tecnologias Inerentemente Seguras: A pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que minimizem os riscos de explosão e vazamentos, como a produção eletroquímica em microcanais e a utilização de hidretos metálicos para armazenamento, pode reduzir a necessidade de medidas de segurança complexas e onerosas.

5.4.2 Entendendo as Normas de Classificação de Área:

Para implementar as estratégias de mitigação, é fundamental compreender os princípios e as normas de classificação de área. As áreas classificadas são definidas como locais onde existe o risco de formação de atmosferas explosivas, compostas por gases, vapores ou poeiras combustíveis em concentrações específicas.

- Normas e Regulamentações: As normas internacionais mais relevantes para classificação de áreas incluem a **IEC 60079** (International Electrotechnical Commission) e a NEC (National Electrical Code). Essas normas definem os requisitos para projeto, instalação e utilização de equipamentos elétricos em áreas classificadas, com o objetivo de prevenir ignições e explosões.
- Metodologias de Classificação: A classificação de áreas é realizada por meio de metodologias de análise de risco, que levam em consideração a probabilidade de formação de uma atmosfera explosiva e a severidade das conseqüências de uma possível explosão. A classificação por zonas (Zona 0, Zona 1, Zona 2) é comumente utilizada, com cada zona representando um nível diferente de risco.
- Fatores Específicos do Hidrogênio: A classificação de áreas em instalações de hidrogênio apresenta desafios específicos devido às propriedades únicas do hidrogênio, como sua alta inflamabilidade, baixa energia de ignição e grande faixa de explosividade.

5.4.3 Equipamentos à Prova de Explosão e Tecnologias Inerentemente Seguras:

A utilização de equipamentos à prova de explosão e a adoção de tecnologias inerentemente seguras são fundamentais para garantir a segurança em áreas classificadas.

- Equipamentos à Prova de Explosão: Esses equipamentos são projetados para operar em atmosferas explosivas sem causar ignição. Existem diversos tipos de proteção, como invólucros à prova de explosão (Ex d), segurança intrínseca (Ex i), imersão em óleo (Ex o), entre outros. A escolha do tipo de proteção adequado depende do tipo de equipamento, da zona de classificação e das condições específicas da instalação.
- Tecnologias Inerentemente Seguras: As tecnologias inerentemente seguras visam eliminar ou controlar as fontes de ignição no próprio projeto do processo ou equipamento. Exemplos incluem a eletrólise em microcanais, que opera com pequenas quantidades de hidrogênio, e a utilização de hidretos metálicos para armazenamento, que armazenam o hidrogênio de forma segura e estável.

5.4.4 Digitalização e Futuro da Segurança em Áreas Classificadas:

A digitalização e as tecnologias da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (IoT) e a análise de big data, estão transformando a gestão de riscos e a segurança em áreas classificadas. Sensores inteligentes, monitoramento remoto e análise preditiva permitem a detecção precoce de condições perigosas, reduzindo o risco de acidentes e otimizando a operação das instalações.

Ao integrar o aprofundamento técnico sobre normas de classificação de área dentro da seção "Mitigação de Impactos", criamos um fluxo mais natural e coeso na apresentação do trabalho, demonstrando como a compreensão das normas e a aplicação de soluções inovadoras são essenciais para superar os desafios e impulsionar a viabilidade econômica da produção de hidrogênio.

Exemplo 8: Otimização de Processos: Um estudo da Universidade de Stanford⁷ demonstrou que a otimização do processo de eletrólise da água, utilizando novos materiais e designs de células eletrolíticas, pode reduzir a formação de atmosferas explosivas e, conseqüentemente, a extensão das áreas classificadas, gerando uma economia de até 15% nos custos de capital.

6.CONCLUSÕES

A busca por alternativas energéticas sustentáveis para mitigar as mudanças climáticas e descarbonizar a indústria impulsiona o interesse no hidrogênio (H₂) como vetor energético. Particularmente, o "hidrogênio verde", produzido a partir de fontes renováveis, emerge como solução promissora, com potencial para descarbonizar setores de difícil abatimento, como o transporte pesado, a indústria química e a siderurgia. A eletrólise da água, utilizando energia proveniente de fontes eólicas ou solares, destaca-se como método de produção de hidrogênio verde com menor impacto ambiental.

No entanto, a implementação em larga escala da economia do hidrogênio apresenta desafios técnicos e de segurança intrínsecos às propriedades do H₂. Sua alta inflamabilidade, caracterizada por uma ampla faixa de explosividade (4% - 75% em volume no ar) e baixa energia mínima de ignição, exigem rigorosos protocolos de segurança em todas as etapas da cadeia produtiva, desde a geração até o armazenamento, transporte e utilização.

Nesse contexto, o entendimento profundo das normas de classificação de área, que estabelecem diretrizes para a segurança em ambientes com risco de explosão, torna-se crucial para engenheiros químicos e de processos. A aplicação rigorosa dessas normas, em conjunto com o desenvolvimento e implementação de tecnologias inerentemente seguras, é fundamental para garantir a integridade das instalações e a segurança de profissionais e comunidades no entorno.

Referências:

1. IEA (2019). The Future of Hydrogen.
2. WorleyParsons (2020). Hydrogen: Delivering a clean energy future.
3. Petroleum Safety Authority Norway (PSA) (2018). Risk level in the petroleum activities.
4. National Safety Council (NSC) (2023). Safety Training - Average Costs.
5. Hydrogen Council (2021). Hydrogen scaling up: A perspective for investors.
6. International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022). Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5°C climate goal.
7. Stanford University (2020). Researchers develop a new, safer way to make hydrogen fuel.

author: Elcio J. Blanco

CEO at **Grennmark Consulting**

Consultor Sênior de PMI/ EHS/Explosive Atmosphere