

Certificação de Hidrogênio Verde: um metamodelo e uma especificação de requisitos

Ronnildo Rodrigues Sampaio¹, Alcemir Rodrigues Santos²

¹ Laboratório de Engenharia de Software - LES
Universidade Estadual do Piauí (UESPI)
Piripiri, Piauí, Brasil

ronnildosampaio@aluno.uespi.br, alcemir@prp.uespi.br

Resumo. A transição energética global tem promovido o hidrogênio verde como uma solução promissora para o armazenamento e fornecimento de energia limpa, especialmente quando produzido a partir de fontes renováveis, como energia solar e eólica. Entretanto, para garantir a confiabilidade e rastreabilidade do hidrogênio verde, a implementação de esquemas de certificação que validem sua origem torna-se essencial. Este artigo propõe um metamodelo de certificação para hidrogênio verde, desenvolvido para integrar processos e requisitos essenciais, abrangendo desde a produção até a transferência e o cancelamento de certificados. A validação do metamodelo foi realizada por meio de um protótipo de baixa fidelidade, que busca simplificar e padronizar os processos de certificação, promovendo transparência e confiança na cadeia de suprimento.

1. Introdução

A produção de hidrogênio renovável tem se destacado como uma solução chave na transição energética global devido ao seu potencial de armazenar e fornecer energia limpa, com emissões praticamente nulas [Goodwin et al. 2024]. Nos últimos anos, essa tecnologia tem atraído investimentos substanciais dos setores público e privado, especialmente para a produção de hidrogênio por eletrólise, um processo que utiliza fontes renováveis como energia eólica e solar para quebrar a molécula da água. No entanto, assim como outras formas de produção de energia, o hidrogênio precisa de garantias de origem para assegurar sua autenticidade e rastreabilidade, o que está sendo atendido por meio de esquemas de certificação e rotulagem, tanto em operação quanto em desenvolvimento.

A garantia de origem é fundamental tanto para a produção quanto para o consumo, pois estabelece critérios e requisitos que asseguram a qualidade e a procedência do hidrogênio. A literatura especializada, como mencionado por [Goodwin et al. 2024] descreve como esses padrões são implementados por meio de regulamentações, certificações e rotulagens, com o objetivo de verificar e demonstrar a conformidade do hidrogênio produzido. Esses esquemas de certificação, desenvolvidos por governos e empresas, compartilham características comuns, o que oferece uma base sólida para a criação de um metamodelo.

No contexto do desenvolvimento de um metamodelo para certificação de hidrogênio verde, o objetivo foi construir uma estrutura que integrasse os diferentes requisitos, métodos e processos presentes nos esquemas de certificação existentes. O metamodelo foi baseado na padronização de processos e atributos de certificação, utilizando a

linguagem UML (Unified Modeling Language) como base para sua modelagem. A partir da análise de diferentes esquemas de certificação de hidrogênio, foi possível identificar os pontos principais e os atores envolvidos, criando uma estrutura robusta que abrange as etapas de produção, certificação, transferência e cancelamento de certificados.

O projeto finalizado não apenas resultou em um metamodelo de certificação de hidrogênio verde, mas também em um protótipo de baixa fidelidade que valida esse modelo em um contexto prático. Este protótipo foi desenvolvido com o objetivo de testar e validar as funcionalidades do sistema de certificação, com foco na interação de usuários como Titulares de Conta e o *Órgão Emissor*, facilitando o registro, a emissão e a transferência de certificados de hidrogênio verde. Com a implementação de um fluxo claro de processos e validação de dados, o protótipo possibilitou simular as operações dentro do metamodelo, garantindo que as etapas descritas no processo de certificação fossem seguidas corretamente.

Este metamodelo, aliado ao protótipo de baixa fidelidade, contribui para uma simplificação e aprimoramento dos processos de certificação, oferecendo uma base sólida para o desenvolvimento de novas certificações de hidrogênio, além de otimizar a operação dos esquemas de certificação existentes, garantindo maior transparência e eficiência no processo de certificação de hidrogênio verde. O metamodelo proposto para a certificação de hidrogênio verde contribui significativamente para a qualidade do processo ao oferecer uma estrutura padronizada que facilita a automação, garantindo eficiência e segurança na emissão dos certificados. Ele define com clareza os processos, atores e fluxos de trabalho, promovendo maior transparência, rastreabilidade e conformidade. Além disso, a criação de histórias de usuário e o desenvolvimento de um protótipo de baixa fidelidade permitem identificar e validar necessidades funcionais, para a construção de sistemas robustos e alinhados às normas legais e regulatórias, como a *RED II* e as *ISOs*. Essas contribuições ajudam a otimizar o processo de certificação, tornando-o mais confiável e acessível para os diversos *stakeholders* envolvidos.

As demais seções deste artigo estão organizadas da seguinte forma: Fundamentação Teórica, que contextualiza o tema proposto; Trabalhos Relacionados, que aborda estudos sobre o hidrogênio verde; Metodologia, que descreve as atividades realizadas para obtenção dos resultados; Metamodelo do Processo de Certificação de Hidrogênio Verde, onde é apresentado e descrito o metamodelo proposto; Avaliação do Metamodelo, que detalha o método utilizado para validar o metamodelo com base em histórias de usuário; e, por fim, Conclusão e Trabalhos Futuros, que sintetiza os principais achados e sugere direções para pesquisas futuras.

2. Fundamentação Teórica

O hidrogênio (H_2) é o elemento químico mais abundante no universo, distinguindo-se por sua baixa densidade, menor número atômico ($Z = 1$) e menor massa atômica entre os elementos conhecidos. Na Terra, ele está presente em forma gasosa na atmosfera e constitui diversos compostos químicos, sendo a água (H_2O) o exemplo mais emblemático. Atualmente, o hidrogênio pode ser produzido a partir de diferentes fontes de energia, como a queima de carvão mineral, reforma de biomassa, energia nuclear, energia solar, entre outras. O método de produção do H_2 determina sua classificação. Por exemplo, o hidrogênio produzido pela queima de carvão mineral é classificado como “cinza”, devido ao uso de

combustíveis fósseis e à emissão significativa de dióxido de carbono (CO_2) gerada durante a reforma do metano a vapor. Outras classificações associadas à produção de hidrogênio incluem: azul, marrom, branco, rosa, turquesa e verde. A principal aposta na produção de hidrogênio está no uso de fontes de energia renováveis, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e atender às metas estabelecidas no [ONU 2015], que propõe limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C. Nesse contexto, o hidrogênio verde — produzido exclusivamente a partir de fontes de energia limpa — desponta como uma alternativa viável para a transição energética e a descarbonização de diversos setores. Sua atratividade se deve ao elevado potencial energético e à capacidade de armazenamento, superando as limitações dos combustíveis fósseis. Na literatura, diversos autores apresentam definições para o conceito de hidrogênio verde. A Tabela 1 reúne algumas dessas definições, destacando a energia utilizada na produção do H₂V.

Definições	Referências
O hidrogênio verde é uma tecnologia baseada na geração de hidrogênio a partir de fonte renovável.	[Barroso et al. 2022]
O hidrogênio verde é um termo que é utilizado para se referir ao hidrogênio que é obtido por meio de fontes renováveis.	[Fernandes et al. 2023]
Hidrogênio produzido por meio da eletrólise da água usando uma corrente elétrica, desde que a eletricidade usada para alimentar o processo seja inteiramente de fontes renováveis.	[Oliveira et al. 2021]
Produzido por meio de eletrólise da água usando fontes de energia renováveis	[de Lara and Richter 2023]

Tabela 1. Definições para Hidrogênio Verde encontradas na literatura.

O hidrogênio verde (H₂V) é produzido por meio de um processo denominado eletrólise. Esse processo consiste na separação das moléculas da água (H₂O) para extrair hidrogênio (H₂), utilizando exclusivamente fontes de energia renováveis, como solar, eólica, e energia das marés. Esse método resulta na geração de energia completamente limpa, ou seja, livre de emissões de gases de efeito estufa (GEE). A energia proveniente do H₂V é essencial para a descarbonização de setores como o energético, industrial e de transporte, desempenhando um papel crucial no cumprimento das metas propostas pela União Europeia (UE) de alcançar emissões líquidas zero de GEEs até 2050 [UEPARLAMENT 2018].

Embora a produção de hidrogênio verde esteja caminhando para estabelecer-se como o principal vetor energético para substituir os combustíveis fósseis, o mesmo necessita de mecanismos para garantir a sua origem. Devido à crescente demanda por H₂V, governos, empresas e instituições têm trabalhado para estabelecer certificações, levando em conta questões como sustentabilidade, transparência e rastreabilidade. Nesse contexto, as certificações de hidrogênio verde desempenham um papel fundamental ao garantir a rotulagem (transparência), a origem (rastreabilidade) e a sustentabilidade desse vetor energético [de Lara and Richter 2023]. O principal objetivo de uma certificação é fornecer informações claras e confiáveis sobre um produto ou serviço. No caso do H₂V,

a certificação assegura ao consumidor que a energia utilizada foi gerada a partir de fontes limpas, promovendo transparência em todas as etapas do processo de produção. Na Europa e em outros continentes, diversas certificações estão em desenvolvimento ou em fase de implementação, buscando garantir a origem renovável do hidrogênio. Esses esquemas de certificações definem os critérios, como requisitos (cálculo de emissões, tipo de energia, ciclo de vida) e processos (registros de dispositivos, emissão de certificados), para verificar se o hidrogênio produzido atende às especificações necessárias para ser classificado como hidrogênio verde.

As certificações existentes analisadas neste estudo apresentam características comuns tanto em seus processos quanto em seus requisitos, elas não seguem uma estrutura padronizada, deixando a definição das certificações a critério das partes interessadas (*stakeholders*). A falta de padronização torna o processo ambíguo e suscetível a erros, como um hidrogênio ter duas classificações. Nesse contexto, a adoção de um metamodelo traz diversos benefícios: promove a estruturação e formalização do processo, garantindo uma padronização consistente e reduzindo ambiguidades; facilita a interoperabilidade, assegurando compatibilidade entre diferentes softwares e possibilitando a integração de ferramentas que auxiliam nos processos de auditoria e monitoramento; possui características que favorecem a escalabilidade e extensibilidade; assegura a qualidade e a conformidade dos processos, permitindo auditorias mais eficientes e promovendo maior transparência e rastreabilidade; e facilita a implementação de sistemas de software. A [OMG 2016] define um metamodelo como modelo que especifica a criação de outros modelos, funcionando como um molde para o desenvolvimento de uma estrutura, conceito ou sistema específico. Os metamodelos utilizam a notação de classes UML, permitindo uma representação genérica dos conceitos e definições que compõem a estrutura de um modelo. Uma analogia simples para entender o conceito de metamodelo é compará-lo a uma receita de bolo. A receita, como um metamodelo, define os ingredientes e o modo de preparo, mas permite a criação de diferentes tipos de bolo, variando os sabores e coberturas. Da mesma forma, um metamodelo fornece uma estrutura genérica que pode ser adaptada para criar modelos específicos com base nessa estrutura.

3. Trabalhos Relacionados

O hidrogênio verde tem sido amplamente investigado como uma alternativa sustentável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e descarbonizar setores estratégicos, como energia, transporte e indústria. Apesar de avanços significativos, sua implementação ainda enfrenta desafios técnicos e regulatórios que demandam soluções inovadoras para assegurar sua rastreabilidade, transparência e conformidade. [Atteya et al. 2023] realizaram uma análise abrangente sobre o papel do hidrogênio em uma economia de baixo carbono, abordando desafios ao longo do ciclo de vida do recurso e explorando o uso de tecnologias emergentes, como *blockchain*, para descentralizar mercados de energia. O estudo destacou a importância de padrões consistentes para esquemas de certificação, reforçando a necessidade de garantir a confiabilidade e rastreabilidade na cadeia de suprimento. No presente artigo, buscou na literatura diferentes documentos para compilar em um documento base os principais processos envolvendo a regulação do hidrogênio verde.

Nos últimos anos, o aquecimento global e a busca por fontes de energia sustentáveis têm impulsionado intensamente as pesquisas relacionadas às energias re-

nováveis, com destaque para o hidrogênio verde como uma alternativa viável para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Com a crescente produção desse tipo de energia, especialmente nos últimos anos com o hidrogênio renovável, surgiram os certificados verdes, que comprovam a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis e ganharam reconhecimento substancial [Chrysikopoulos et al. 2024]. Ainda de acordo com [Chrysikopoulos et al. 2024], após uma análise detalhada de documentos relacionados ao tema, concluiu-se que essas certificações abrangem uma compreensão aprofundada dos mecanismos de suporte à energia renovável, destacando o papel crucial da divulgação de eletricidade na promoção da transparência e o potencial transformador de tecnologias emergentes. O estudo também destacou a relevância da inteligência artificial e do *block-chain* no cenário de comércio de certificados verdes. Este artigo, por sua vez, revisitou diversas certificações na literatura com o objetivo de desenvolver um modelo para padronizar a criação de certificados e principalmente voltado para o desenvolvimento de softwares relacionados a certificação.

O desenvolvimento de fontes de energia sustentáveis tornou-se um grande desafio para a humanidade. O hidrogênio verde (H_2V), produzido por meio de eletrólise da água usando fontes de energia renováveis, oferece uma solução potencial para reduzir nossa dependência de combustíveis fósseis [de Lara and Richter 2023]. De fato o potencial do H_2V na transição energética em setores como transporte, indústria e economia (mercado de energias renováveis) torna este vetor tão importante para a sustentabilidade energética. [de Lara and Richter 2023] Analisou estratégias de alguns países para impulsionar o desenvolvimento e adoção de tecnologias de hidrogênio. Dentro dessas estratégias desenvolvidas nestes territórios para uso do hidrogênio, uma delas é a garantia de origem (GO) ou certificação de hidrogênio renovável, no qual foi o foco deste artigo onde concentrou-se em analisar estas certificações e identificar atributos e métodos semelhantes entre elas e realizar um levantamento de requisitos para definir um metamodelo para certificação de hidrogênio verde.

As tecnologias emergentes, como inteligência artificial e *blockchain*, têm um grande valor no mercado de hidrogênio verde, tanto na produção quanto na comercialização desse recurso. [Svitanko 2024] Destaca que o uso de tecnologias de tokenização baseadas em ativos financeiros digitais (DFA) oferece exclusividade, transparência e segurança no comércio de hidrogênio. O estudo também discute várias opções de DFA no desenvolvimento do mercado de hidrogênio, atração de investimentos, automatização de bens e transporte, além da construção de um mercado regulatório adequado. O ecossistema que envolve o hidrogênio abrange diversos processos, desde a emissão do certificado até sua transferência e cancelamento. Este artigo teve como objetivo compilar esses processos presentes na literatura sobre H_2 verde e transformá-los em histórias de usuários, com o intuito de definir os módulos de uma aplicação e delineá-los como cada processo seria realizado em uma aplicação real por meio de um protótipo de baixa fidelidade.

A produção de energia renovável, como eólica e solar, integra-se nas redes elétricas convencionais, tornando quase impossível distinguir essas fontes. Nesse contexto, os certificados verdes e a comercialização de energias limpas ou renováveis (REC) tornam-se essenciais para esse mercado. [Yamaguchi et al. 2021] afirma que a tecnologia *blockchain* pode ser útil para garantir a rastreabilidade e transparência das transações, em-

bora existam barreiras à sua implementação, como o desenvolvimento legal e de mercado, demonstrando ao consumidor final que ele está, de fato, consumindo energia limpa. Além disso, [Yamaguchi et al. 2021], após analisar duas empresas que utilizam *blockchain* para este tipo de certificado, concluiu que a posição de uma organização em relação a outras partes interessadas pode alterar o comportamento na adoção da tecnologia; (b) a solução tecnológica antecede a percepção do problema; e (c) as organizações criam diferentes representações do artefato para cada parte interessada. A adoção da tecnologia *blockchain* pode ter um grande impacto nos processos transacionais envolvendo hidrogênio verde. Este artigo buscou identificar os atores, atributos e métodos (processos) e fluxo desses processos em cada ator da certificação, no que culminou na elaboração de histórias de usuários e implementação de um protótipo de baixa fidelidade que contemplava tanto o metamodelo como as histórias que poderia utilizar a *blockchain* nos processos.

4. Metodologia

A metodologia deste estudo foi estruturada em cinco etapas principais:

Levantamento bibliográfico: Consultas a relatórios e documentos técnicos relacionados a certificações de energia renovável, com foco nas práticas adotadas para o hidrogênio verde.

Extração de dados: Identificação de atores, atributos e processos por meio de técnicas de engenharia de requisitos, resultando em um documento consolidado de referência.

Criação do metamodelo: Desenvolvimento do metamodelo com base nos dados extraídos, utilizando a linguagem UML para estruturar fluxos e interações.

Validação por histórias de usuário: Elaboração de histórias de usuários para validar o metamodelo em cenários simulados.

Prototipação de telas para aplicação: Construção de um protótipo de baixa fidelidade para representar as funcionalidades principais do metamodelo, facilitando a análise de sua aplicabilidade.

Esta pesquisa foi conduzida por meio de consultas a sites oficiais de organizações públicas e/ou privadas que visam ou já desenvolveram certificações para o hidrogênio verde, *renovável* e *limpo*, com base nas principais metas definidas pelo relatório internacional de mudanças climáticas e documentos relacionados [UEPARLAMENT 2018]. Também foram empregadas técnicas de engenharia de *software*, especificamente engenharia de requisitos, para identificar os principais componentes das certificações (atores, atributos e métodos) e os processos relacionados a elas. Com base nos requisitos catalogados e organizados, iniciou-se a criação de um metamodelo para certificação de hidrogênio verde. Por fim, elaboraram-se histórias de usuário para os processos relacionados à certificação, como forma de validação do metamodelo proposto. A partir das histórias, foi proposto um protótipo de baixa fidelidade para uma aplicação mobile.

5. Metamodelo do Processo de Certificação de Hidrogênio Verde

Um metamodelo é um modelo que especifica a criação de outros modelos, funcionando como um molde para o desenvolvimento de uma estrutura, conceito ou sistema [OMG 2016]. As certificações de hidrogênio seja ela para produções verde, limpa ou de baixo carbono possuem características e composições em comum dentro do escopo

de validação da energia e garantia de origem produzida. Por esse compartilhamento entre os requisitos e processos no escopo do esquema de certificação, identificado entre as diversas certificações analisadas, um metamodelo que padronize a criação, elaboração e também o desenvolvimento de ferramentas tecnológicas que contemplem os processos de envolvidos para o hidrogênio verde foi desenvolvido.

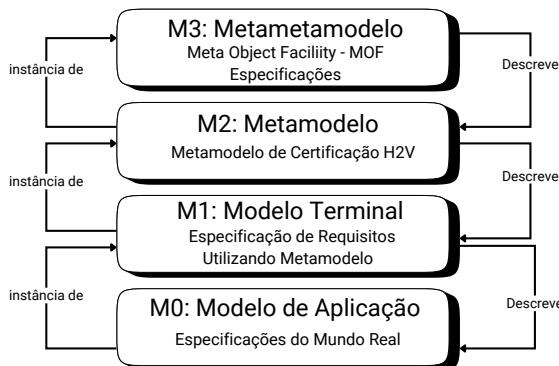


Figura 1. Camadas do Metamodelo de Certificação para H2V.

Fonte: Adaptado do MOF [OMG 2016].

O metamodelo proposto organiza os processos de certificação de hidrogênio verde em camadas, conforme a arquitetura do Meta Object Facility (MOF)[OMG 2016] . A camada M3 define a base para a criação de metamodelos; M2 estrutura o metamodelo de certificação; M1 descreve a aplicação prática, como diagramas UML; e M0 refere-se às implementações em nível operacional. Esse modelo padroniza fluxos de trabalho, permitindo maior interoperabilidade e eficiência nos processos de certificação. A Figura 1 ilustra os atores e as interações essenciais, como *Titulares de Conta*, *Órgãos Emissores* e *Organismos de Certificação*, destacando suas responsabilidades e fluxos operacionais.

A Figura 2 ilustra o metamodelo desenvolvido com base na extração e síntese dos dados obtidos na literatura relacionada à certificação de hidrogênio verde. Para sua construção, foram analisados diversos documentos, incluindo relatórios técnicos, normas ISO e esquemas de certificação. Alguns desses esquemas encontram-se em fase de desenvolvimento, enquanto outros já estão em operação e emitindo certificados para o hidrogênio. A Tabela 2 apresenta uma lista detalhada desses esquemas, indicando seus países de origem e respectivos status. Durante a análise, foram identificados os principais requisitos envolvidos nos processos de certificação, abrangendo *Atores*, *Esquemas* e *Processos*, além de outros elementos destacados na literatura. Esses atributos foram organizados e integrados no metamodelo de certificação de hidrogênio verde, cujas metaclasses são descritas nas subseções a seguir.

5.1. Atores e suas responsabilidades

5.1.1. Autoridade Competente

O órgão responsável por definir os processos e requisitos dentro do metamodelo de certificação junto as partes interessadas (*stackholders*) é a *Autoridade Competente*. Este ator tem as seguintes responsabilidades dentro do processo de certificação de hidrogênio definido no metamodelo:

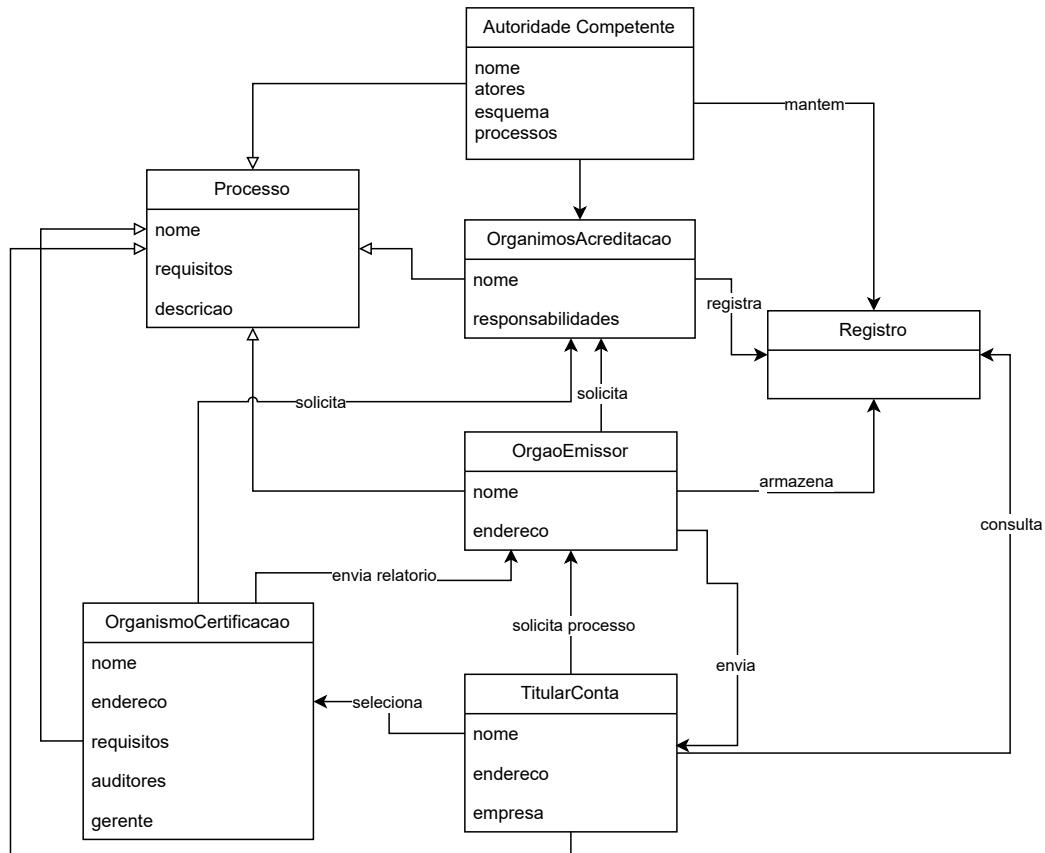


Figura 2. Metamodelo do processo de certificação de hidrogênio verde

Fonte: Autoria própria.

Nome	País	Status
CCEE	Brasil	Ativo
CertifHy NGC Certification	UE	Ativo
CertifHy RFNBO Scheme	UE	Ativo
TUV SUD	Alemanha	Ativo
World Bank Group	Chile	Desenvolvimento
Esquema de Garantia de Origem	Austrália	Desenvolvimento
H2Global Stiftung (H2Global)	Alemanha	Ativo
Green Hydrogen standard	China	Ativo
Toyota City Plain	Japão	Ativo
UK Low Carbon Hydrogen Standard	Reino Unido	Desenvolvimento
Energy GOV	EUA	Desenvolvimento
Green Hydrogen Standard for India	India	ativo

Tabela 2. Lista de processos de certificação de Hidrogênio Verde analisadas.

- Redigir o esquema de certificação, que envolve as definições de atributos e métodos essenciais para todo o escopo relacionado a obtenção, transferência e

cancelamento de certificados verdes.

- Definir como ocorre esses processos, por quais órgãos, qual o fluxo de ocorrência da solicitação e prosseguimento das demais etapas até a conclusão dos mesmos.

De acordo com a atuação deste ator dentro do escopo de certificação a definição de atributos para meta-classe *AutoridadeCompetente* é a seguinte:

Nome: A *Autoridade Competente* é identificada por seu nome no metamodelo, como exemplificado pelo CERTIFHY [CertifiHy 2023], sendo este atributo a identificação para seu certificado verde posteriormente emitido.

Atores: Este atributo no metamodelo descreve as entidades públicas ou privadas que participam do processo de certificação, como o *Organismo de Certificação* e o *Órgão Emissor*.

Esquema: O esquema de certificação/documento de especificações, todas as regras e os critérios para sua obtenção, como o “Esquema de Certificação de H₂V da Austrália”[Regulator 2023].

Processos: Este atributo na literatura refere-se a todos processos individuais que ocorrem durante a certificação, como o “Registro de Titular”, “Registro de Lote de Produção”e “Emissão de Certificado”.

5.1.2. Organismo de Acreditação

Uma camada adicional ao processo de certificação por parte do *Autoridade Competente* é o *Organismo de Acreditação*, entidade essa responsável por receber solicitações de órgãos que desejam fazer parte do processo de certificação, seja ele para emitir certificados como *Órgão Emissor*, realizar auditorias como *Organismo de Certificação* ou para contribuir como *stackholders* para endossar o esquema de certificação. Este ator contribui significativamente para redução da carga de trabalho da *Autoridade Competente*, além de acelerar o processo de certificação, permitindo que mais empresas participem de forma eficiente e ágil no ciclo de emissão de certificados. No metamodelo proposto este ator contém os seguintes atributos:

Nome: Nome da empresa responsável pela Acreditação.

responsabilidades: Atributo definido pela *Autoridade Competente* que define quais as obrigações e comprometimentos por parte deste órgão dentro do escopo da certificação verde.

Além de autorizar a participação de empresas e organizações no processo de certificação, o *Organismo de Acreditação* também é responsável por credenciar as empresas que realizam auditorias sobre os meios de produção e o hidrogênio produzido. Esse processo de acreditação é essencial para garantir que as auditorias sejam realizadas de acordo com os requisitos e diretrizes estabelecidas pela *Autoridade Competente*. Assim, o *Organismo de Acreditação* desempenha um papel crucial, assegurando a qualidade e a confiabilidade das avaliações realizadas ao longo do processo de certificação de hidrogênio verde.

5.1.3. Órgão Emissor

Depois da *Autoridade Competente*, o *Órgão Emissor* é o principal ator que utiliza o esquema de certificação. O mesmo é o responsável por da prosseguimento à diversos processos listados a seguir:

Processo Registro Titular de Conta: O *Órgão Emissor* recebe a solicitação de registro de *Titular de Conta* que é a pessoa responsável por uma entidade que irá submeter todos os processos relacionados à certificação do seu hidrogênio produzido. Esse processo envolve a criação e o gerenciamento de contas para os responsáveis pela produção e certificação do hidrogênio.

Processo Registro Dispositivo de Produção: O *Órgão Emissor* também gerencia o processo de registro dos dispositivos de produção de hidrogênio, como, por exemplo, os eletrolisadores. Esse registro é uma etapa fundamental para garantir a rastreabilidade da produção de hidrogênio.

Processo Registro Lote de Produção: Após o registro do dispositivo de produção, o titular registrado solicita o registro dos lotes de produção. Esse processo assegura que a produção de hidrogênio seja registrada corretamente, acompanhando todos os lotes de produção associados.

Processo de Emissão de Certificado: Com todos os registros validados para dispositivos e lotes de produção, o *Órgão Emissor* emite o certificado correspondente. Esse processo envolve a verificação de que a produção atende a todos os requisitos estabelecidos pela *Autoridade Competente*, passando, também, por um processo de auditoria realizado por um *Organismo de Certificação*.

Processo de Cancelamento de Certificado: O cancelamento de um certificado pode ocorrer de duas formas: por solicitação do titular ou a expiração da validade do certificado. Quando a validade expira, o certificado é automaticamente cancelado após a data estabelecida no esquema de certificação.

Processo de Transferência de Certificado: Os titulares de conta podem transferir seus certificados válidos, por meio da mediação do *Órgão Emissor*. Esse processo garante que as transferências de certificados sejam realizadas de acordo com as regras e requisitos estabelecidos.

Dentro do processo de certificação de hidrogênio verde, o *Órgão Emissor* é responsável pela execução de diversas atividades essenciais. No metamodelo proposto, esse ator ocupa o centro da execução dos processos, incluindo o registro de titulares, dispositivos e lotes de produção, além de atividades como emissão, cancelamento e transferência de certificados. Esses processos são fundamentais para garantir a conformidade e a rastreabilidade da produção de hidrogênio verde, assegurando que todas as etapas estejam em conformidade com os requisitos da *Autoridade Competente*.

5.1.4. Titular de Conta

Os representantes de empresas que desejam emitir seus certificados verdes, nomeiam uma pessoa responsável por realizar todas as solicitações referentes o hidrogênio produzido. Esse ator dentro do metamodelo proposto envia as suas solicitações de processos ao *Órgão Emissor* e consulta seus resultados dos mesmos através da classe resultado. Ele possui os seguintes atributos:

nome: nome da pessoa responsável pela conta.

endereço: localização da empresa em qual ele é atuante.

empresa: conjunto de atributos que definem a empresa, como nome, endereço, CNPJ.

5.1.5. Organismo de Certificação

Dentro do processo de certificação de hidrogênio verde, o *Organismo de Certificação* desempenha um papel fundamental, conforme descrito no metamodelo. Este ator é responsável por avaliar as solicitações de atributos em lotes de produção, em conformidade com o esquema de certificação definido pela *Autoridade Competente*, após solicitação de auditoria por parte do *Órgão Emissor*. Além disso, o *Organismo de Certificação* realiza auditorias, envia relatórios ao *Órgão Emissor* com seu parecer após a análise de documentação e vistoria nos dispositivos de produção e nos lotes. Dentro do metamodelo este ator possuem as seguintes funções:

- Receber solicitações de auditoria por parte do *Órgão Emissor* e/ou Titulares de Conta.
- Realizar auditoria sobre os requisitos e verificar conformidade com o esquema.
- Enviar relatório de auditorias para o *Órgão Emissor*.

O fluxo de trabalho do *Organismo de Certificação* segue as etapas descritas a seguir:

- *Titular de Conta:* O processo começa com a solicitação de um *Titular de Conta*, que pode ser para a emissão de certificado, transferência, cancelamento de certificado ou registro de lote de produção.
- *Órgão Emissor:* Após a solicitação do *Titular de Conta*, o *Órgão Emissor* analisa a documentação apresentada e verifica sua conformidade com o esquema de certificação. Após análise, o *Órgão Emissor* solicita uma auditoria ao *Organismo de Certificação* (o titular pode escolher o *Organismo de Certificação*).
- *Organismo de Certificação:* O *Organismo de Certificação* realiza a análise da documentação apresentada pelo *Titular de Conta* e efetua uma vistoria no dispositivo de produção e nos lotes relacionados. Após essa análise, um relatório detalhado com o parecer do organismo é enviado ao *Órgão Emissor*.
- *Órgão Emissor:* Com o relatório recebido do *Organismo de Certificação*, o *Órgão Emissor* pode tomar uma das seguintes ações:
 - Emitir o certificado, se todos os requisitos forem atendidos.
 - Solicitar novos documentos ou auditorias, caso haja inconformidades ou informações adicionais necessárias.
 - Indeferir a solicitação, caso os requisitos não sejam atendidos.
- Após tomar uma decisão, o *Órgão Emissor* registra seu parecer no sistema, e o *Titular de Conta* pode consultar o resultado da solicitação.

5.2. Fluxo do Metamodelo

O processo de certificação de hidrogênio não segue um fluxo unidirecional, pois necessita-se de etapas a serem realizadas antes mesmo da solicitação de emissão de um certificado. A seguir é descrito o fluxo de uma emissão de certificado por parte de um *Titular de Conta*, descrito todo o fluxo desde a definição do esquema até a notificação do resultado da solicitação:

- Definição do esquema de certificação por parte da *Autoridade Competente*.
- Nomear o *Organismo de Acreditação* para validar os órgãos que desejam participar da certificação estabelecida.
- Acreditação de empresas e/ou instituições, definição de *Órgãos Emissores* e Organismos de Certificação.
- Registro de Titulares de Conta para cadastro de dispositivos de produção e lotes de produção de hidrogênio para serem certificados.
- Solicitação de emissão de certificados para lotes de produção devidamente registrados pelo *Titular de Conta*.
- Auditoria e envio de relatório de lotes de produção pelo *Organismo de Certificação*.
- Resultado da solicitação pelo *Órgão Emissor*, podendo solicitar nova auditoria para verificação de atributos ou solicitação de novos documentos comprobatórios.
- Emissão do certificado e notificação de registro para *Titular de Conta*.

6. Avaliação

A avaliação do metamodelo proposto foi realizada por meio do desenvolvimento de parte da *especificação de requisitos* para uma aplicação computacional voltada à certificação de hidrogênio verde. Para isso, foram elaboradas histórias de usuários detalhadas para cada ator envolvido no processo de certificação, abordando suas interações e necessidades dentro do fluxo de trabalho. Além disso, um protótipo de baixa fidelidade foi criado para um software, que representa parte do metamodelo, focando especialmente nos órgãos responsáveis pela emissão dos certificados. Este protótipo permitiu validar a aplicação prática dos conceitos do metamodelo e sua viabilidade na construção de uma solução digital para o gerenciamento da certificação de hidrogênio verde.

6.1. Histórias de Usuário

As Histórias de Usuário são uma técnica amplamente utilizada na engenharia de *software* para descrever funcionalidades de maneira simples e objetiva, utilizando a linguagem do próprio usuário. Elas são escritas em poucas sentenças, focando no que o usuário deseja alcançar e nos benefícios que a funcionalidade trará [Valente 2020]. Essa técnica não apenas ajuda os desenvolvedores a entender os requisitos necessários para a construção de uma funcionalidade, mas também serve como um meio de validação, permitindo que os *stakeholders* confirmem se as necessidades foram atendidas após a implementação.

No contexto da avaliação do metamodelo de certificação de hidrogênio verde (H_2V), a técnica de Histórias de Usuário foi aplicada para descrever as funcionalidades e interações dos diversos atores envolvidos no processo de certificação. Esses atores incluem a *Autoridade Competente*, o *Organismo de Acreditação*, o *Organismo de Certificação*, o *Órgão Emissor* e o *Titular de Conta*. Para cada um desses papéis, foram elaboradas Histórias de Usuário específicas, com o objetivo de mapear suas funções, necessidades e responsabilidades no ciclo de certificação. A seguir, será apresentada uma descrição detalhada das Histórias de Usuário para cada ator, bem como uma explicação sobre como cada uma delas se relaciona com o metamodelo proposto, garantindo que todos os requisitos e processos necessários para a certificação de H_2V estejam adequadamente contemplados na solução.

6.1.1. Histórias de Usuário Autoridade Competente

As Histórias de Usuário para a *Autoridade Competente* foram elaboradas a partir da análise dos processos e requisitos encontrados na literatura sobre certificação de hidrogênio. Este ator desempenha um papel central na definição dos atributos esquemas de certificação e na coordenação de todos os processos envolvidos como: registro de titular, acreditação de órgãos e emissão de certificados. A seguir, as histórias de usuário estão diretamente relacionadas aos atributos (esquema, processos e atores) do metamodelo, como descrito na Tabela 3.

Tabela 3. Tabela de histórias de usuário da Autoridade Competente.

histórias de usuário
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino o esquema e os atributos e requisitos deste esquema para a certificação de hidrogênio.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino os Atores participantes no escopo de certificação.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> estabeleço os processos.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino o processo de acreditação para aprovar os Organismos de Certificação e/ou <i>Órgão Emissor</i> .
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino o processo de emissão do certificado para que os Órgãos consigam emitir uma garantia de origem para o hidrogênio.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino o processo de transferência do certificado para que os Titulares de conta e Órgãos transfiram os certificados entre si.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino o processo de registro de dispositivo de produção para que os Titulares de Conta junto ao <i>Órgão Emissor</i> registrem os dispositivos de produção dos titulares.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino o processo de registro de <i>Titular de Conta</i> de usuário para que o Titular possa emitir, transferir, cancelar certificados e registrar dispositivos de produção e/ou lotes de produção.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino o processo de cancelamento de certificação para que os Titulares de Conta junto ao <i>Órgão Emissor</i> cancelem suas garantias de origem dos seus lotes de produção ou parte do lote.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> mantendo os registros de titular da conta, dispositivos de produção e certificados emitidos para que sejam acessados pelos respectivos órgãos.
Eu como pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> defino os critérios para <i>Organismo de Acreditação</i> e nomeio o mesmo após análise rigorosa.
Eu como Pessoa Responsável pela <i>Autoridade Competente</i> aprovo os organismos de certificação e estabeleço critérios desta aprovação.

As Histórias descritas da Tabela 3 fazem referência a *meta-classe Autoridade Competente* na Figura 2. Tanto as histórias como a *meta-classe* seguem o padrão encontrado dentro da literatura sobre certificação de hidrogênio, onde o metamodelo propõe uma estrutura que contempla os principais atributos para *Autoridade Competente*, e suas interações com os outros atores através da *meta-classe Processos* e *Organismo de*

Acreditação, garantindo que o processo de certificação seja claro, eficiente e em conformidade as normativas internacionais, como as definidas pela RED II [UPDATE 2018] e ISO 14064 [for Standardization 2019] para produção de hidrogênio verde.

6.1.2. Histórias de Usuário Organismo de Acreditação

As Histórias de Usuário para o *Organismo de Acreditação*, conforme descrito na Tabela 4, validam o processo de acreditação metamodelo a *meta-classe Organismo de Acreditação* realiza o processo estabelecido pela *Autoridade Competente*, delineando as ações específicas que o organismo deve realizar. Estas histórias detalham os passos necessários para a execução do processo de acreditação e credenciamento de empresas, destacando as seguintes atividades:

- *Autorização de participação*: O *Organismo de Acreditação* deve autorizar empresas e organizações a se engajarem no processo de certificação, baseando-se em critérios e requisitos estabelecidos pela *Autoridade Competente*.
- *Credenciamento das empresas auditadoras*: O organismo deve credenciar as empresas que realizarão as auditorias sobre os meios de produção e o hidrogênio produzido, garantindo que essas auditorias atendam aos requisitos necessários para a emissão de certificados válidos.

Tabela 4. Tabela de histórias de usuário do *Organismo de Acreditação*.

histórias de usuário

Eu como Pessoa Responsável pelo *Organismo de Acreditação* recebo solicitações.

Eu como Pessoa Responsável pelo *Organismo de Acreditação* autorizo uma organização como *Órgão Emissor* para que emita certificados pela *Autoridade Competente*.

Eu como Pessoa Responsável pelo *Organismo de Acreditação* autorizo uma organização como *Organismo de Certificação* para que realize auditorias e garanta conformidade com o esquema de certificação.

Eu como Pessoa Responsável pelo *Organismo de Acreditação* solicito a revisão dos dados de solicitação do credenciamento para garantir a transparência do *Órgão Emissor* e/ou *Organismo de Certificação*.

Eu como Pessoa Responsável pelo *Organismo de Acreditação* cancelo registro de órgãos, tornando-o desqualificado.

O *Organismo de Acreditação* desempenha um papel essencial ao atuar como um intermediador confiável, que alivia a carga de trabalho da *Autoridade Competente* e acelera o processo de certificação de hidrogênio verde. As Histórias de Usuário descritas para a *meta-classe* deste ator evidenciam suas responsabilidades em autorizar a participação de empresas no processo de certificação e em credenciar as empresas auditadoras. Com isso, o metamodelo proposto reforça a importância desse ator para a eficiência e a confiabilidade do processo de certificação, garantindo que as auditorias sejam realizadas de forma adequada e em conformidade com as normas e diretrizes estabelecidas, resultando em certificados válidos e de qualidade para o hidrogênio verde.

6.1.3. Histórias de Usuário Órgão Emissor

Tabela 5. Tabela de histórias de usuário do Órgão Emissor.

histórias de usuário
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> preciso receber solicitações de Registro de <i>Titular de Conta</i> , Registro de Dispositivos de Produção, Emissão de Certificado, Transferência de Certificado, e Cancelamento de Certificado.
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> após receber a solicitação de Registro de <i>Titular de Conta</i> , preciso registrar a conta no sistema para que o usuário (Empresas ou Responsável por uma empresa) possua uma conta no sistema.
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> após receber uma solicitação de Registro de Dispositivos de Produção, preciso registrar os dispositivos no sistema para que as auditorias possuam um registro pré estabelecido dos dispositivos de produção.
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> após receber uma solicitação de Emissão de Certificado, preciso solicitar uma Auditoria ao <i>Organismo de Certificação</i> para que seja realizada uma revisão da documentação dos meios de produção do lote de H2V.
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> após receber uma solicitação de Transferência de Certificado, preciso solicitar uma Auditoria ao <i>Organismo de Certificação</i> para verificar se os critérios da certificação ainda estão em conformidade.
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> após receber uma solicitação de Cancelamento de Certificado, preciso registrar o Cancelamento no sistema.
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> preciso solicitar auditorias de Lotes de Produção e/ou Dispositivos de Produção ao <i>Organismo de Certificação</i> para que seja realizada uma revisão da documentação dos meios de produção do lote de H2V.
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> preciso revisar Dados das Auditorias realizadas pelo <i>Organismo de Certificação</i> .
Eu como Pessoa Responsável pelo <i>Órgão Emissor</i> após revisar Dados das Auditorias realizadas, preciso verificar a conformidade com os atributos do esquema para que seja possível Aprovar, Indeferir ou Solicitar uma Nova Auditoria.

As Histórias de Usuário descritas na Tabela 5 detalham as funcionalidades que o software de certificação de hidrogênio verde deve conter para apoiar o *Órgão Emissor* na execução dessas atividades. As histórias de usuário para este ator abrangem as funções descritas anteriormente, tais como:

- Registro e gerenciamento de titulares de conta, com a inserção de dados pertinentes sobre os responsáveis pela certificação.
- Cadastro de dispositivos de produção, incluindo a validação dos requisitos para cada dispositivo registrado.
- Controle e registro de lotes de produção, com funcionalidades para gerenciar os dados dos lotes e associá-los aos dispositivos de produção.
- Emissão de certificados, garantindo que todos os processos e requisitos necessários sejam cumpridos antes da emissão do certificado.
- Gestão de cancelamento e expiração de certificados, com funcionalidades para cancelar certificados conforme as solicitações dos titulares ou após a expiração de sua validade.

- Facilidade de transferência de certificados, permitindo que os certificados válidos sejam transferidos entre titulares de forma segura e conforme as regras definidas.

O *Órgão Emissor* tem um papel essencial dentro do processo de certificação de hidrogênio verde, sendo o responsável pela execução das atividades-chave, como o registro de titulares, dispositivos, lotes de produção e a emissão, cancelamento e transferência de certificados. As Histórias de Usuário descritas para a *meta-classe Órgão Emissor* validam as funções que esse ator desempenha, evidenciando as necessidades de um software de certificação eficaz para a automação e o controle dessas atividades. Com a implementação dessas funcionalidades, o processo de certificação de hidrogênio verde torna-se mais eficiente e transparente, cumprindo os requisitos da *Autoridade Competente* e garantindo a rastreabilidade e a confiabilidade dos certificados emitidos.

6.1.4. Histórias de Usuário Organismo de Certificação

As histórias de usuário para este ator, foram listadas funcionalidades essenciais que um software deve conter para contemplar os requisitos deste Organismos de Certificação dentro do escopo da cerificação de hidrogênio verde. As funcionalidades descritas para este ator incluem:

Tabela 6. Tabela de histórias de usuário do *Organismo de Certificação*.

histórias de usuário

Eu como Auditor pelo *Organismo de Certificação* preciso receber solicitações(processos) de auditoria para realizar auditorias no processo de emissão de certificados.

Eu como Auditor pelo *Organismo de Certificação* realizo auditorias na emissão de certificados.

Eu como Auditor pelo Órgão de Certificação preciso realizar auditorias em dispositivos de produção e/ou lotes de produção para verificar a conformidade dos atributos de acordo com o esquema de certificação.

Eu como Auditor pelo Órgão de Certificação preciso enviar o relatório da auditoria para o *Órgão Emissor* para que revise os dados da auditoria e conclua o processo.

Eu como Gerente do *Organismo de Certificação* preciso manter a equipe atualizada sobre processos e acompanhar o andamento dos processos das auditorias.

- Análise de Documentação: O *Organismo de Certificação* deve ser capaz de revisar a documentação enviada pelo *Titular de Conta* e verificar a conformidade com as regras do esquema de certificação.
- Realização de Auditoria: A auditoria é uma etapa crucial, pois envolve a verificação in loco dos dispositivos de produção e dos lotes de hidrogênio. O software deve permitir ao *Organismo de Certificação* agendar, realizar e registrar auditorias.
- Envio de Relatórios: Após a auditoria, o *Organismo de Certificação* deve ser capaz de gerar relatórios detalhados com os resultados da análise e enviá-los ao *Órgão Emissor*, que utilizará essas informações para tomar decisões sobre a certificação.

Tabela 7. Requisitos descritos na forma de histórias de usuário.

#	Ator	Cenário	Estória	D	P	C
1	<i>Órgão Emissor</i>	Aplicativo	ES01: Eu como <i>Órgão Emissor</i> , devo consultar todas as minhas solicitações pendentes e novas solicitações.	2, 3,	Alta	9
2	<i>Órgão Emissor</i>	Aplicativo	ES02: Eu como <i>Órgão Emissor</i> , quero receber solicitações para emissão, transferência, cancelamento, registro de dispositivos de produção e lotes de produção.	4	Alta	5
3	<i>Órgão Emissor</i>	Aplicativo	ES03: Eu como <i>Órgão Emissor</i> , após receber as solicitações preciso solicitar auditorias para verificar conformidade com esquema de certificação,	4	Alta	5
3	<i>Órgão Emissor</i>	Aplicativo	ES04: Eu como <i>Órgão Emissor</i> , preciso Emitir, Indeferir, ou Solicitar nova auditoria para uma solicitação de emissão.	3, 4	Alta	5
4	<i>Titular de Conta</i>	Aplicativo	ES05: Eu Como <i>Titular de Conta</i> , preciso solicitar registro de dispositivo de produção e lotes de produção de hidrogênio.	-	Alta	12
5	<i>Titular de Conta</i>	Aplicativo	ES06: Eu como <i>Titular de Conta</i> , preciso realizar solicitações de emissão de certificados para os lotes já cadastrados.	4	Alta	5
6	<i>Titular de Conta</i>	Aplicativo	ES07: Eu como <i>Titular de Conta</i> , preciso consultar os resultados das minhas solicitações.	5	Alta	4, 5
7	<i>Titular de Conta</i>	Aplicativo	ES08: Eu como <i>Titular de Conta</i> , preciso consultar meus certificados emitidos.	5, 4	Alta	5

D: Dependência; **P:** Prioridade; **C:**Complexidade.

O *Organismo de Certificação* dentro esquema de certificação de hidrogênio verde desempenha funções objetivas e de fundamental importância, pois é o responsável por realizar auditorias, analisar a conformidade dos documentos e enviar pareceres ao *Órgão Emissor*. As Histórias de Usuário para este ator descritas na Tabela 6, e a *meta-classe Organismo de Acreditação*, garantem que as funcionalidades necessárias para desempenhar essas tarefas sejam adequadamente atendidas no software para certificação. Com a implementação dessas funcionalidades, o processo de certificação será mais transparente, eficiente e confiável, permitindo que os lotes de produção de hidrogênio sejam auditados corretamente e que a emissão de certificados ocorra de acordo com os requisitos estabelecidos pela *Autoridade Competente*.

6.2. Protótipo de Baixa Fidelidade

Um protótipo de baixa fidelidade é uma representação inicial de um sistema ou produto, criado de forma simples e com o mínimo de detalhes, com o objetivo de explorar e comunicar ideias de design. Esse tipo de protótipo é utilizado principalmente nas fases iniciais do desenvolvimento de um produto, antes que o design final seja implementado.

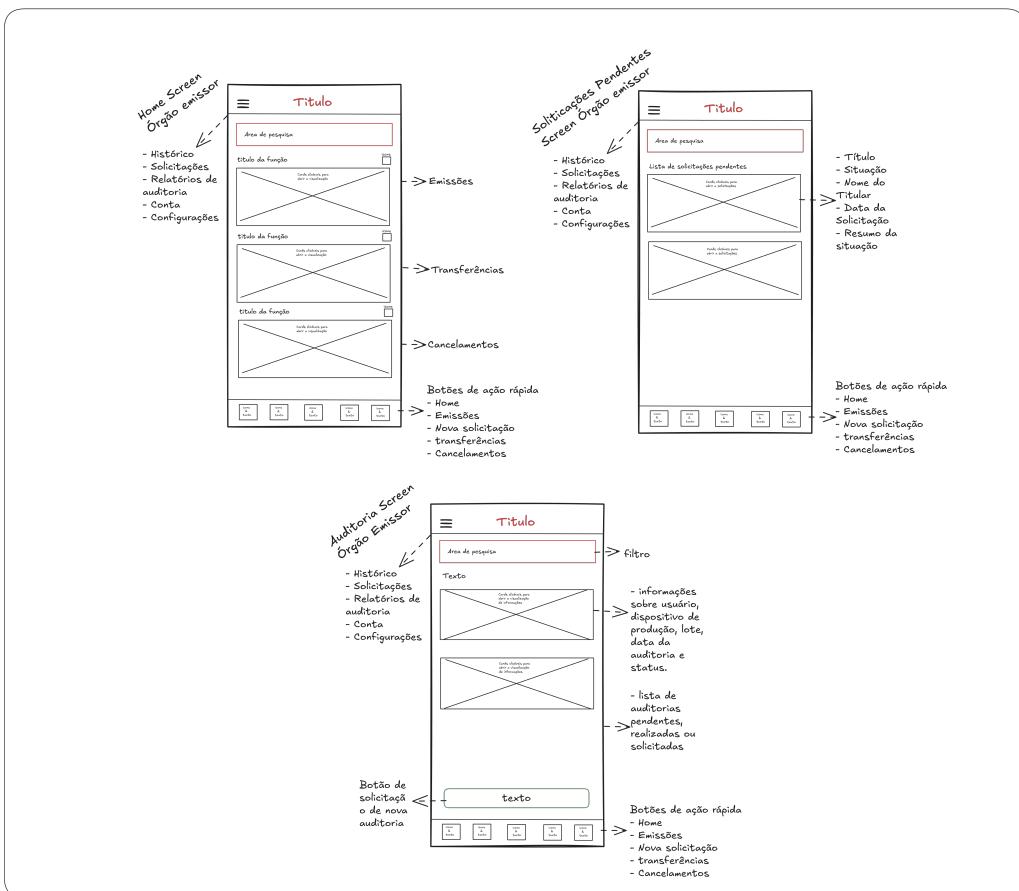


Figura 3. Telas do protótipo para Órgão Emissor

Fonte: Autoria própria.

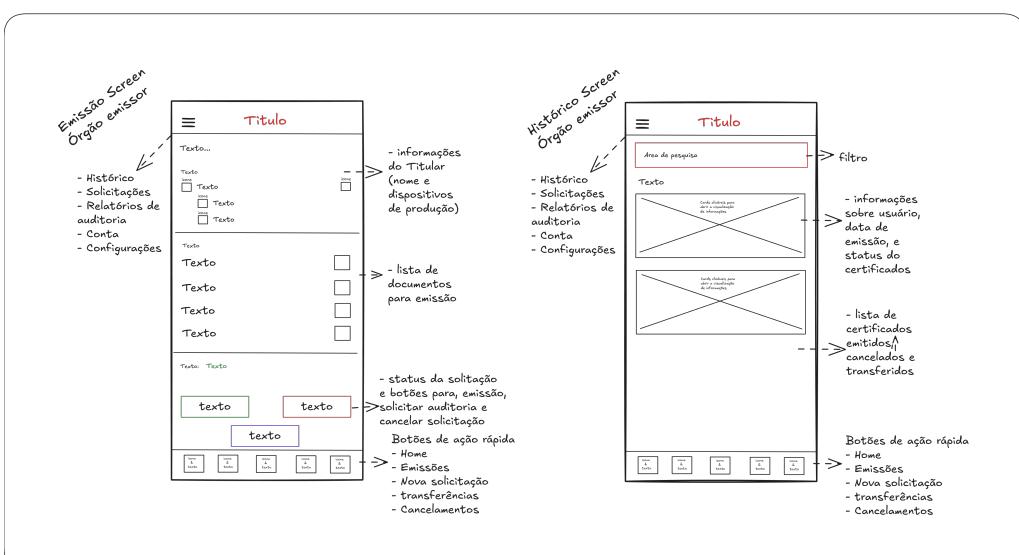


Figura 4. Telas do protótipo para Órgão Emissor

Fonte: Autoria própria.

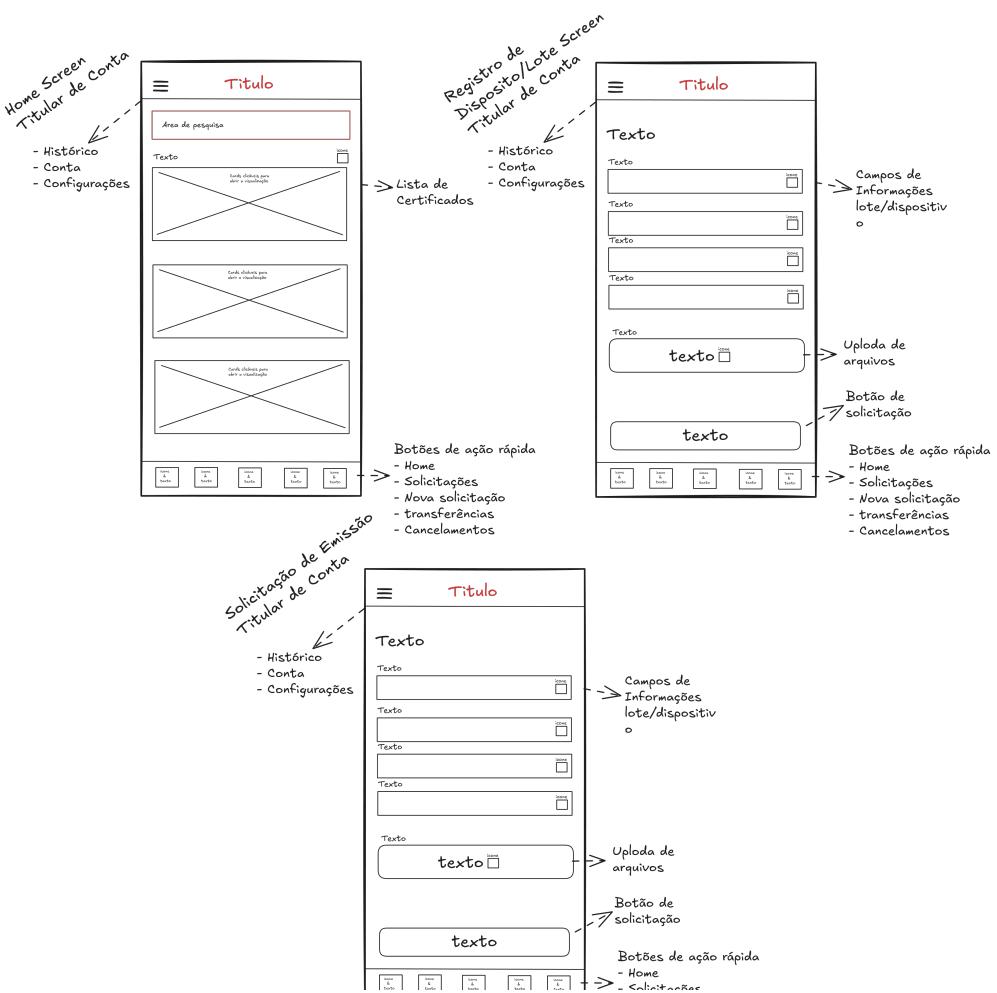


Figura 5. Telas do protótipo para *Titular de Conta*

Fonte: Autoria própria.

Características do protótipo de baixa fidelidade:

- *Simplicidade*: Os protótipos de baixa fidelidade geralmente são feitos com ferramentas simples, como papel e caneta (protótipos em papel), quadros brancos, wireframes ou softwares de design que não buscam alta qualidade visual, mas sim foco na funcionalidade e nos fluxos de interação.
- *Interatividade limitada*: Normalmente, esses protótipos não possuem funcionalidades completas, ou seja, a interação é muito básica e serve para explorar como o usuário interage com o sistema em termos gerais.
- *Baixo custo e rápida execução*: São rápidos de criar e modificáveis, o que permite ajustes rápidos durante a validação de conceitos.
- *Foco em conceitos e ideias*: A ênfase está na organização da interface e nos fluxos de interação, e não no design visual detalhado.

O metamodelo de certificação de hidrogênio verde, descreve um modelo para representar uma abstração em mais alto nível de diagramas UML para modelagem de sistemas a partir de um modelo em comum, tornando ele escalável, adaptável e padronizado para diferentes utilizações, o metamodelo proposto como parte do sistema de

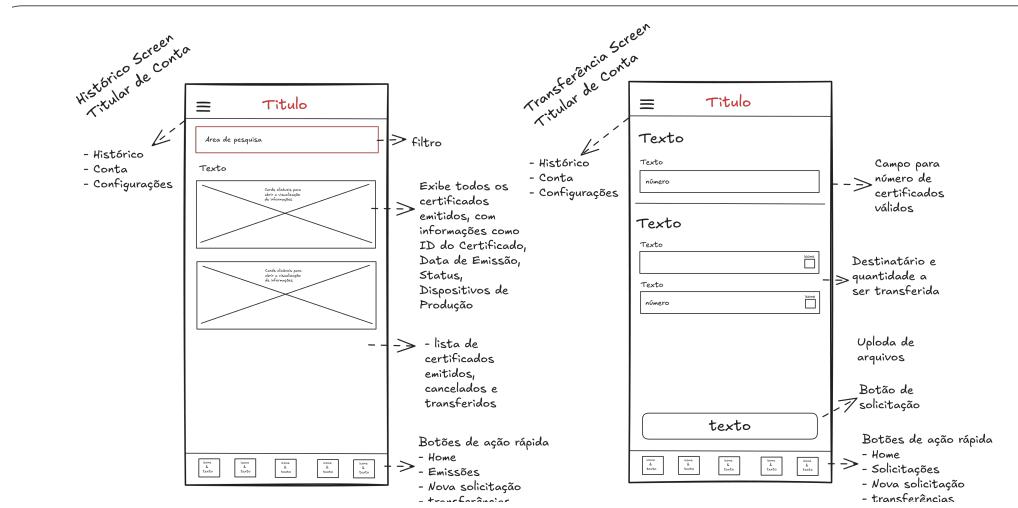


Figura 6. Telas do protótipo para Titular de Conta

Fonte: Autoria própria.

gestão de certificação, buscou-se mapear os processos, atores e interações envolvidos na certificação. Para validar esse modelo, é essencial simular a experiência do usuário, garantindo que o fluxo de trabalho, as ações de cada ator e os requisitos funcionais estejam adequados com a proposta.

Para isto, o protótipo desenhado no estilo *wireframe* contemplou dois atores essenciais no processo de certificação, *Órgão Emissor* e *Titular de Conta* escolha esta feita por seus papéis centrais no esquema ao qual o *Órgão Emissor* faz a “ponte” entre os demais atores para emissão, transferência e cancelamento dos certificados verdes. De acordo com as histórias elaboradas para cada ator representado no protótipo, estão descritas funcionalidades fundamentais para cada processo descrito nas seções anteriores. As Figuras 3 e 4 descrevem as principais funcionalidades do aplicativo mobile para certificação do hidrogênio verde para *Órgãos Emissores*, já a Figura 6 descrevem as funções essenciais para um *Titular de Conta* realizar sua atuação no processo de certificação. O foco do protótipo desenhado são os seguintes, emissão e consulta de certificados para *Órgão Emissores* e *Titulares de Conta*, para o *Órgão Emissor* as seguintes funcionalidades básicas estão descritas no protótipo, na tela inicial contendo uma listagem de certificados, sejam eles para emissões, transferências ou cancelamentos. As demais telas pendentes com as solicitações pendentes de análise, tela de auditoria no qual o *Órgão emissor* solicita auditorias, tela de Emissão onde listam as informações referentes ao usuário, documentações de lotes e as respectivas ações para solicitação e por último tela de histórico onde contém a listagem de certificados já emitidos, cancelados ou transferidos onde também existem opções de filtro para facilitar a busca. Para *Titulares de Conta* as funções descritas são as seguintes, tela inicial com listagem dos seus certificados, tela para solicitar nova emissão para lotes de hidrogênio, telas para solicitação de emissão, transferência e cancelamento além de histórico para consulta.

7. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

O metamodelo apresentado, em conjunto com o protótipo de baixa fidelidade, representa um avanço significativo na simplificação e padronização dos processos de certificação de

hidrogênio verde. Ao fornecer uma base sólida e escalável, este trabalho contribui para o desenvolvimento de novas abordagens regulatórias e tecnológicas, com potencial de promover maior transparência e eficiência na cadeia de suprimento. Além de promover um material base para produção da certificação nacional que, a [LeiN°14948 2024] pretende estabelecer o marco das energias a base de hidrogênio e suas respectivas, aliado ao protótipo de baixa fidelidade desenvolvido, baseado nas especificações extraídas da literatura, oferece um modelo inicial para o software de certificação de hidrogênio verde. Esse protótipo simula as funcionalidades descritas nas histórias de usuário, como o registro de dispositivos de produção, a solicitação de emissão de certificados e a interação entre os diferentes atores envolvidos no processo de certificação. Embora seja uma representação inicial, o protótipo serve como uma base sólida para futuras iterações do sistema, permitindo aos *stakeholders* visualizar e entender melhor como o software pode ser utilizado para atender às necessidades do processo de certificação. A validação das histórias de usuário e o alinhamento com os requisitos legais e normativos, como a RED II e as ISOs, reforçam a viabilidade do modelo proposto, promovendo uma certificação de hidrogênio verde mais confiável e acessível para as partes envolvidas.

Como trabalhos futuros para este projeto seriam a implementação de um sistema de completo para certificação de hidrogênio verde, o aprimoramento do metamodelo para diferentes produções de hidrogênio, validação do metamodelo com casos reais, integração e rastreabilidade utilizando a tecnologia *blockchain*.

Referências

- Atteya, A. I., Ali, D., Hossain, M., and Sellami, N. (2023). A comprehensive review on the potential of green hydrogen in empowering the low-carbon economy: development status, ongoing trends and key challenges. *Green energy and environmental technology*, 2.
- Barroso, A. M. R., Rocha, B. V. S., ALVES, L. F. L., and MEIRELES FILHO, M. R. (2022). Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis.
- CertifHy (2023). Certifhy ngc certification process. <https://www.certifhy.eu/ngc-certification-process/>. Acessado: 11/2024.
- Chrysikopoulos, S. K., Chountalas, P. T., Georgakellos, D. A., and Lagodimos, A. G. (2024). Green certificates research: bibliometric assessment of current state and future directions. *Sustainability*, 16(3):1129.
- de Lara, D. M. and Richter, M. F. (2023). Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. *Novos Cadernos NAEA*, 26(1).
- Fernandes, I. M. Z., Del Grossi, J., da Silva, M. G., Perassoli, D. M., and Marques, E. O. (2023). Hidrogênio verde. *Simpósio de Tecnologia Fatec Jaboticabal*, 13(1):e1313–e1313.
- for Standardization, I. O. (2019). Iso 14064-3: 2019 greenhouse gases—part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements.
- Goodwin, D., Gale, F., Lovell, H., Beasy, K., Murphy, H., and Schoen, M. (2024). Certificação de sustentabilidade para hidrogênio renovável: uma pesquisa internacional de profissionais de energia. *Política Energética*, 192:114231.

LeiN°14948 (2024). marco legal do hidrogênio. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acessado: 11/2024.

Oliveira, A. M., Beswick, R. R., and Yan, Y. (2021). A green hydrogen economy for a renewable energy society. Current Opinion in Chemical Engineering, 33:100701.

OMG, O. M. G. (2016). About the meta object facility specification version 2.5.1. <https://www.omg.org/spec/MOF/>. Acessado:10/2024.

ONU, U. N. (2015). Conference of the parties twenty-first session paris, 30 november to 11 december 2015. <https://unfccc.int/documents/9064>. Acessado: 11/2024.

Regulator, A. G. T. C. E. (2023). Guarantee of origin (go). <https://cer.gov.au/schemes/guarantee-origin>. Acessado: 11/2024.

Svitanko, V. (2024). Who is mr. h2? or expanding the view on hydrogen economy. International Journal of Hydrogen Energy, 51:79–86.

UEPARLAMENT (2018). Directive (eu) 2018/2001 of the european parliament and of the council of 11 december 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (text with eea relevance.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001&qid=1731026142145>. Acessadoac: 09/2024.

UPDATE, P. (2018). Final recast renewable energy directive for 2021-2030 in the european union. POLICY.

Valente, M. T. (2020). Engenharia de Software Moderna: Princípios e Práticas para Desenvolvimento de Software com Produtividade. Editora: Independente.

Yamaguchi, J. A. R., Santos, T. R., and Carvalho, A. P. d. (2021). Blockchain technology in renewable energy certificates in brazil. BAR - Brazilian Administration Review, 18(spe):e200069.