



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

CLARISSA CEZAR MENEZES GUSMÃO

**ESTUDO COMPARATIVO DO FUNCIONAMENTO DE ELETROLISADORES DO
TIPO PEM, AWE E SOE E CRIAÇÃO DE SISTEMAS SUPERVISÓRIOS
ESPECÍFICOS PARA CADA TECNOLOGIA.**

Recife
2023

CLARISSA CEZAR MENEZES GUSMÃO

**ESTUDO COMPARATIVO DO FUNCIONAMENTO DE ELETROLISADORES DO
TIPO PEM, AWE E SOE E CRIAÇÃO DE SISTEMAS SUPERVISÓRIOS
ESPECÍFICOS PARA CADA TECNOLOGIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Controle e Automação da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia de
Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa

Coorientador(a): M.Sc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Gusmão, Clarissa Cezar Menezes.

Estudo comparativo do funcionamento de eletrolisadores do tipo PEM, AWE e SOE e criação de sistemas supervisórios para cada tecnologia / Clarissa Cezar Menezes Gusmão. - Recife, 2024.

72 p. : il., tab.

Orientador(a): Douglas Contente Pimentel Barbosa

Cooorientador(a): Valdemar Moreira Cavalcante Junior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e Automação - Bacharelado, 2024.

Inclui referências, apêndices.

1. AWE. 2. Eletrólise . 3. Hidrogênio Verde. 4. PEM. 5. SCADA. I. Barbosa, Douglas Contente Pimentel. (Orientação). II. Junior, Valdemar Moreira Cavalcante. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

CLARISSA CEZAR MENEZES GUSMÃO

**ESTUDO COMPARATIVO DO FUNCIONAMENTO DE ELETROLISADORES
DO TIPO PEM, AWE E SOE E CRIAÇÃO DE SISTEMAS SUPERVISÓRIOS
ESPECÍFICOS PARA CADA TECNOLOGIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação
em Engenharia de Controle e
Automação da Universidade Federal
de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Controle
e Automação.

Aprovado em: 25/07/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

M.Sc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Marcio Rodrigo Santos de Carvalho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

M.Sc. Antônio Gustavo Evangelista Muniz Santo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, meus pais, Geraldo Gusmão e Betânia Menezes, que sempre me apoiaram ao longo de toda a minha vida e minha jornada de graduação, servindo sempre de exemplo e inspiração, e à minha irmã, Isadora Gusmão, que esteve sempre ao meu lado me inspirando a ser sempre a melhor versão de mim.

Agradeço à minha melhor amiga, Helena Maia, que me acompanha há mais de 20 anos. Obrigada por sempre acreditar em mim e me fazer companhia durante todos esses anos, eu não seria quem sou hoje sem você. Mesmo distantes, você sempre estará pertinho de mim, no meu coração.

Agradeço ao meu namorado, Tiago Alves, que esteve comigo e me ajudou durante todas as incontáveis horas de trabalho ao longo deste TCC, sempre me fazendo companhia e me tranquilizando nos momentos mais difíceis. Sua paciência, atenção, carinho e companheirismo foram essenciais para que eu pudesse concluir essa etapa. Espero dividir muitos outros momentos como esse com você.

Um agradecimento especial aos meus amigos do colégio, que me acompanham e me apoiam há tantos anos: aos meninos, Dante Queiroz, Filipe Mendonça, Geraldo Siqueira Neto, José Pedro Arraes e Ricardo Brendel; e às meninas, Beatriz Oriá, Letícia Godoy, Maria Carolina Albuquerque, Maria Eduarda Aquino, Mariana Cavalcanti e Mariana Soares. A companhia e o apoio de vocês tornaram momentos difíceis mais leves.

Agradeço aos meus amigos Fernanda Fernandes e Don Aragão, presentes que a França me deu e que guardo no meu coração até hoje, que me apoiaram continuamente, mesmo distantes, diretamente da Paraíba, sempre me incentivando e torcendo por mim.

Agradeço às grandes amigas que fiz ao longo da minha graduação, aos meus companheiros de Controle e Automação, Arthur Teodósio e Beatriz Ramos, sem vocês, eu não teria chegado tão longe. Agradeço também às minhas parcerias que trago comigo desde os meus tempos de Área II: Mariana Soares, Marcela Coutinho e Isabella Rolim, a companhia de vocês ao longo desses anos foi um grande privilégio.

Um agradecimento especial aos meus colegas de laboratório, que me ajudaram ao longo do TCC e proporcionaram sempre um ambiente de trabalho leve e divertido: Beatriz Almeida, Camila Bandeira, Eduardo Augusto, Eduardo Barbosa, Éricles Barbosa, Felipe José, Gustavo Azevedo, Igor Veloso, Nathan Pinheiro, Pedro Henrique Eustachio, Rafael Cavalcanti, Renato Freitas, Tiago Alves, Valdemar Cavalcante e Vinícius Fialho.

Agradeço também aos meus orientadores, Douglas Barbosa e Valdemar Cavalcante, que me guiaram ao longo de toda a confecção deste trabalho e cujo apoio foi essencial durante essa etapa final. Por fim, agradeço a UFPE, por me receber com tanto carinho ao longo desses anos, e me dar tantas oportunidades.

RESUMO

Mudanças climáticas recentes têm imposto cada vez mais a necessidade de diversificação das matrizes energéticas e aplicação de fontes de energia renováveis, impulsionando um movimento global em direção a descarbonização. Nesse contexto, o hidrogênio verde vem ganhando destaque como uma das principais alternativas, representando uma fonte de energia limpa, versátil e promissora. O seguinte estudo visa conduzir uma análise comparativa entre três das principais tecnologias de eletrolisadores presentes atualmente no mercado para a obtenção do hidrogênio verde: *Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis* (PEM), *Alkaline Water Electrolysis* (AWE) e *Solid Oxide Electrolyzer Cell* (SOE), observando seus respectivos princípios de funcionamento, eficiência e características gerais de cada um. Posteriormente, a partir de tais análises comparativas, o estudo pretende fornecer uma base para o desenvolvimento de sistemas supervisórios específicos para cada uma das três tecnologias abordadas, almejando o monitoramento e controle de desempenho em tempo real dos eletrolisadores. A pesquisa tem como objetivo criar sistemas de interfaces simples e intuitivas, de modo a garantir o funcionamento ótimo dos eletrolisadores em plantas de hidrogênio verde, de maneira a prolongar sua vida útil, reduzir gastos com manutenção e otimizar sua eficiência operacional.

Palavras-chaves: AWE; Eletrólise; Hidrogênio Verde; PEM; SCADA; SOE; Supervisório.

ABSTRACT

Recent climate changes have been increasingly imposing the need for diversification of energy matrices and the application of renewable energy sources, driving a global movement towards decarbonization. In this context, Green Hydrogen has been gaining prominence as one of the main alternatives, representing a clean, versatile, and promising energy source. The following study aims to conduct a comparative analysis among three of the main electrolyzer technologies currently present in the market for obtaining green hydrogen: Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis (PEM), Alkaline Water Electrolysis (AWE), and Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOE), observing their respective operating principles, efficiency, and general characteristics of each. Subsequently, based on such comparative analyses, the study intends to provide a foundation for the development of specific supervisory systems for each of the three technologies addressed, aiming at real-time monitoring and control of electrolyzer performance. The research aims to create simple and intuitive interface systems to ensure the optimal operation of electrolyzers in green hydrogen plants, thus prolonging their lifespan, reducing maintenance costs, and optimizing their operational efficiency.

Keywords: AWE; Electrolysis; Green Hydrogen; PEM; SCADA; SOE; Supervisory..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração esquemática de uma célula eletroquímica.	19
Figura 2 – Ilustração esquemática do eletrolizador AWE.	21
Figura 3 – Ilustração esquemática do eletrolizador SOE.	22
Figura 4 – Ilustração esquemática do eletrolizador PEM.	23
Figura 5 – Interface gráfica do <i>software Elipse E3</i>	26
Figura 6 – Esquema de conexão dos programas Elipse E3.	27
Figura 7 – Etapas do processo P2G.	30
Figura 8 – Telas principais desenvolvidas para o sistema supervisorio.	36
Figura 9 – Telas auxiliares desenvolvidas para o sistema supervisorio.	36
Figura 10 – Representação da arquitetura de navegação estreita e profunda.	39
Figura 11 – Representação da arquitetura de navegação ampla e rasa.	39
Figura 12 – Padrão de navegação adotado para o supervisorio do processo P2G.	39
Figura 13 – Cores escolhidas para compor as telas do sistema P2G.	41
Figura 14 – Cores escolhidas para compor as telas do sistema P2G.	42
Figura 15 – Representação da fonte Montserrat em suas variações sobre a cor #003452	42
Figura 16 – Representação da fonte Montserrat em suas variações sobre a cor #005280	43
Figura 17 – Ilustração das turbinas eólicas nos <i>status</i> ativada e desativada sobre as cores #003452 e #005280.	44
Figura 18 – Ilustração do eletrolizador PEM nos <i>status</i> ativado e desativado sobre as cores #003452 e #005280.	44
Figura 19 – Ilustração dos cilindros de hidrogênio sobre as cores #003452 e #005280.	44
Figura 20 – Ilustração dos lotes e transporte de hidrogênio sobre as cores #003452 e #005280.	44
Figura 21 – Ilustração dos eletrolisadores (a) PEM; (b) AWE e (c) SOE, respectivamente.	45
Figura 22 – Ícones utilizados no sistema supervisorio P2G desenvolvido.	45
Figura 23 – Guia de posicionamento de informações no sistema supervisorio.	46
Figura 24 – Quadro e divisores implementados para a interface do sistema supervisorio.	47
Figura 25 – Tela Menu do sistema P2G desenvolvido.	49
Figura 26 – <i>Script</i> criado para realizar a troca entre as telas Menu e de Geração de Energia.	50
Figura 27 – Associação direta utilizada para a implementação da animação das turbinas eólicas.	50
Figura 28 – Tela da etapa de Geração de Energia do processo P2G.	51

Figura 29 – <i>Script</i> associado as <i>check-boxes</i> da tela, para controle dos dados representados no <i>E3Chart</i>	51
Figura 30 – Comparação entre a representação de uma turbina eólica em funcionamento e desligada.	52
Figura 31 – Tela <i>Pop-Up</i> dos dados de funcionamento da Turbina 1.	52
Figura 32 – <i>Script</i> associado ao botão de parada e emergência para a troca de valores no <i>status</i> da turbina.	53
Figura 33 – <i>Script</i> para a abertura de uma Tela Modal dentro da tela de Geração de Energia.	53
Figura 34 – Tela da etapa de Eletrólise da Água - Eletrolisador AWE.	55
Figura 35 – Comparação da representação do eletrolisador AWE ligado e desligado.	55
Figura 36 – <i>Script</i> implementado para controle do eletrolisador AWE.	55
Figura 37 – Tela da etapa de Eletrólise da Água - Eletrolisador SOE.	56
Figura 38 – Tela da etapa de Eletrólise da Água - Eletrolisador PEM.	56
Figura 39 – Tela de Armazenamento de Hidrogênio do sistema P2G.	57
Figura 40 – Tela de monitoramento de dados do sistema P2G.	58
Figura 41 – Configurações do banco de dados criado dentro do Elipse E3.	59
Figura 42 – Banco de dados e históricos criados para a aplicação P2G.	59
Figura 43 – <i>Template</i> criado para o relatório da etapa de eletrólise da água.	60
Figura 44 – <i>Script</i> para a geração de relatórios.	60
Figura 45 – Tela de <i>Login</i> do sistema P2G desenvolvido.	61
Figura 46 – <i>Script</i> associado ao botão de <i>LOGIN</i>	62
Figura 47 – <i>Script</i> associado ao botão SAIR, para o fechamento da aplicação.	62
Figura 48 – Tela de Cabeçalho do sistema P2G desenvolvido.	62
Figura 49 – Tela de Botões do sistema P2G desenvolvido com legenda.	63
Figura 50 – Tela de Alarmes do sistema P2G desenvolvido.	64
Figura 51 – Lista de alarmes implementados dentro do sistema supervisorio P2G.	64
Figura 52 – Associação bidirecional para a realização do filtro de alarmes.	65
Figura 53 – Interface de <i>Login</i> do sistema supervisorio P2G.	70
Figura 54 – Interface de Menu do sistema supervisorio P2G.	70
Figura 55 – Interface de Geração de Energia do sistema supervisorio P2G.	71
Figura 56 – Interface de Eletrólise da Água do sistema supervisorio P2G.	71
Figura 57 – Interface de Armazenamento de Hidrogênio do sistema supervisorio P2G.	71
Figura 58 – Interface de Dados do sistema supervisorio P2G.	72
Figura 59 – Interface de <i>Logout</i> do sistema supervisorio P2G.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos hidrogênios na escala de cores	19
Tabela 2 – Características típicas do eletrolisador AWE.	21
Tabela 3 – Características típicas do eletrolisador SOE.	22
Tabela 4 – Características típicas do eletrolisador PEM.	24
Tabela 5 – Caracterização da persona de geração de energia.	32
Tabela 6 – Caracterização da persona de geração de eletrólise.	32
Tabela 7 – Caracterização da persona de armazenamento de gás hidrogênio.	33
Tabela 8 – Caracterização da persona do engenheiro geral.	33
Tabela 9 – Caracterização da persona do executivo.	34
Tabela 10 – Detalhamento das telas principais do supervísório.	37
Tabela 11 – Detalhamento das telas auxiliares do supervísório.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWE	<i>Alkaline Water Electrolysis</i> - Eletrólise Alcalina da Água
GEE	Gases de Efeito Estufa
HMI	<i>Human Machine Interface</i> - Interface Humano Máquina
ICS	<i>Industry Control Systems</i> - Sistemas de Controle Industrial
ISA	<i>International Society of Automation</i> - Sociedade Internacional de Automação
PEM	<i>Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis</i> - Eletrolisador de Membrana Polimérica
P2G	<i>Power-To-Gas</i>
P2P	<i>Power-To-Power</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> - Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados
SOE	<i>Solid Oxide Electrolyzer Cell</i> - Eletrolisador de Óxido Sólido
UI	<i>User Interface</i> - Interface de Usuário
UX	<i>User Experience</i> - Experiência de Usuário
VBScript	<i>Visual Basic Scripting Edition</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

H^+	Íon de Hidrogênio
H_2	Gás Hidrogênio
H_2O	Água
KOH	Hidróxido de Potássio
O_2	Gás Oxigênio
OH^-	Ânion de Hidróxido
O^{2-}	Íon de Óxido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVAS	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivos Gerais	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL	18
2.1.1	Tipos de Hidrogênio	18
2.2	ELETRÓLISE	19
2.2.1	Processo de Eletrólise	19
2.2.2	Tipos de Eletrolisador	20
2.2.2.1	<i>Alkaline Water Eletrolysis</i> (AWE)	20
2.2.2.2	<i>Solid Oxide Electrolyzer cell</i> (SOE)	21
2.2.2.3	<i>Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis</i> (PEM)	23
2.3	SISTEMAS SUPERVISÓRIOS	24
2.3.1	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)	24
2.3.1.1	Vantagens da aplicação de Sistemas SCADA	25
2.3.2	<i>Software Eclipse E3</i>	25
2.3.2.1	<i>VBScript</i>	27
3	DESENVOLVIMENTO	29
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	29
3.1.1	<i>Power to Gas</i>	29
3.1.2	Etapas do processo	30
3.1.3	Personas	30
3.1.3.1	A importância das personas para o desenvolvimento do sistema supervisorio	31
3.1.3.2	Personas desenvolvidas	31
3.2	ARQUITETURA	35
3.2.1	Tipos de tela	35
3.2.2	Telas do processo	35
3.2.3	Padrão de navegação	38
3.3	DESIGN	40
3.3.1	UX/UI	40
3.3.2	Cores escolhidas	40
3.3.3	Tipografia	42
3.3.4	Elementos gráficos	43
3.3.4.1	Ilustrações	43

3.3.4.2	Ícones	45
3.3.5	Quadros e Divisores	46
3.4	DADOS	48
4	RESULTADOS	49
4.1	TELAS PRINCIPAIS	49
4.1.1	Menu	49
4.1.2	Geração de Energia	50
4.1.2.1	Telas <i>Pop-Up</i>	52
4.1.3	Eletrólise da Água	54
4.1.3.1	AWE	54
4.1.3.2	SOE	56
4.1.3.3	PEM	56
4.1.4	Armazenamento de Hidrogênio	57
4.1.5	Dados	57
4.1.5.1	Relatórios	58
4.2	TELAS AUXILIARES	61
4.2.1	<i>Login</i>	61
4.2.2	Cabeçalho	62
4.2.3	Botões	62
4.2.4	Alarmes	64
4.3	INTERFACE COMPLETA	65
5	CONCLUSÕES	66
5.1	TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE A – INTERFACE COMPLETA DO SUPERVI- SÓRIO	70

1 INTRODUÇÃO

O aumento demográfico contínuo da população global, aliado ao progresso tecnológico exponencial testemunhado nos últimos anos, tem resultado em uma demanda crescente por energia (LEONG et al., 2018). Porém, no cenário atual, a oferta energética ainda é extremamente dependente de combustíveis fósseis, os quais representam fontes de energia não renováveis e altamente poluentes, não representando alternativas viáveis em longo prazo.

Em 2015, todos os 195 países participantes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas comprometeram-se, por meio do Acordo de Paris, a reduzir suas emissões de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera (SILVA, s.d). Esse desafio impulsionou desde então o desenvolvimento de alternativas de fontes de energia limpa e renovável, visando à descarbonização das matrizes energéticas (MILANEZ et al., 2017).

O hidrogênio é considerado como uma alternativa promissora à utilização de combustíveis fósseis, uma vez que representa uma opção eficiente e ambientalmente interessante. Além disso, o hidrogênio representa uma alternativa altamente versátil, uma vez que pode ser produzido através de diversos insumos, e pode ser aplicado em diversos setores, desde energético ao veicular, podendo integrar diversas tecnologias (CAPURSO et al., 2022).

Contudo, apesar de sua abundância quando combinado a outros elementos, o hidrogênio (H_2) não é encontrado em sua forma pura na natureza. Uma das formas para a obtenção do hidrogênio puro é através da eletrólise da água, um processo que faz uso da oxirredução para, através da aplicação de uma corrente elétrica, separar o hidrogênio do oxigênio de uma molécula de água. Atualmente, destacam-se no mercado três principais tecnologias para esse fim: Eletrolisador de Membrana Polimérica (*Polymer Electrolyte Membrane Electrolisis* - PEM), Eletrólise Alcalina da Água (*Alkaline Water Electrolisis* - AWE) e Eletrolisador de Sólido Óxido (*Solid Oxide Electrolyzer Cell* - SOE).

Esse trabalho de conclusão de curso faz uma análise comparativa do funcionamento de cada uma dessas três tecnologias, destacando suas respectivas características, reações e eficiência, observando como se encaixam em uma planta de produção de hidrogênio verde.

1.1 JUSTIFICATIVAS

A coleta e processamento de dados para o controle remoto de dispositivos tornou-se algo essencial no controle moderno (GAUSHELL; DARLINGTON, 1987). Sistemas que desempenham essas funções são classificados como Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (*Supervisory Control and Data Acquisition* – SCADA) e tem como objetivo realizar o controle em tempo real de equipamentos e processos produtivos por meio da coleta de dados dos mesmos, permitindo que possíveis falhas de funcionamento ou irregularidades

no processo sejam rapidamente e facilmente identificadas.

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de sistemas supervisórios responsáveis por monitorar o funcionamento de eletrolisadores PEM, AWE e SOE, levando em consideração as características e princípios de funcionamento de cada um. A criação de sistemas supervisórios específicos para cada tecnologia de eletrolisador não apenas aprimorará sua eficiência individual, otimizando sua eficiência operacional, prolongando sua vida útil e reduzindo os custos de manutenção, mas também contribuirá para a integração eficaz desses sistemas em infraestruturas de energia renovável mais amplas. Isso, por sua vez, promoverá a adoção mais ampla de tecnologias de hidrogênio verde, acelerando a transição global para uma economia de baixo carbono e sustentável.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são resumidas as principais contribuições deste trabalho.

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de protótipos de sistemas supervisórios específicos para o monitoramento de cada um dos três tipos de tecnologia de eletrolisadores estudados; PEM, AWE e SOE, por meio da utilização do *software Eclipse E3*.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral descrito anteriormente, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão da literatura sobre o processo de eletrólise da água para a obtenção de hidrogênio verde, com foco nas três tecnologias principais: PEM, AWE e SOE;
- Definir os requisitos e funcionalidades demandados por cada tecnologia de eletrolisador para o monitoramento em tempo real via sistema supervisório;
- Determinar e classificar as telas a serem desenvolvidas e a arquitetura de navegação aplicada ao sistema, baseando-se nos tipos de dados desejados para análise em cada um dos casos;
- Desenvolver os três sistemas supervisórios propostos através da utilização do *software Eclipse E3*.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso é organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2:** Neste capítulo, será abordada a utilização do hidrogênio verde como uma fonte de energia renovável e os tipos de hidrogênio existentes. Ademais, será realizado uma explicação do processo de eletrólise da água e serão apresentadas as tecnologias de eletrólise AWE, SOE e PEM, estudadas por este trabalho. Por fim, será discutida a aplicação e vantagens de sistemas supervisórios, com enfoque no *software Elipse E3*;
- **Capítulo 3:** Neste capítulo, será abordado o processo de desenvolvimento do sistema supervisório proposto. Serão discutidas todas as decisões tomadas com relação as etapas de escolha das personas do processo, arquitetura de navegação e *design* do sistema;
- **Capítulo 4:** Neste capítulo, serão apresentadas as telas finais desenvolvidas para o sistema supervisório proposto, e todas as funcionalidades implementadas de acordo com as demandas e necessidades de cada usuário;
- **Capítulo 5:** Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e também as possibilidades de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo contempla o embasamento teórico acerca da utilização do gás hidrogênio como uma fonte de energia renovável, com enfoque no hidrogênio verde e as principais tecnologias presentes no mercado para a sua obtenção. Serão apresentadas as tecnologias de eletrólise da água do tipo AWE, SOE e PEM, em um estudo acerca de suas características e princípios de funcionamento. Por fim, serão apresentados conceitos e vantagens da utilização de sistemas SCADA, com enfoque no *software* Elipse E3.

2.1 HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL

Durante os últimos anos, o hidrogênio surgiu como uma fonte promissora de energia renovável. Isso se deve, sobretudo, a sua viabilidade para produção a partir de fontes renováveis como energia solar e eólica, e a sua capacidade de armazenamento para utilização em uma variedade de setores, incluindo transporte, indústria e geração de eletricidade (LEBROUHI et al., 2022).

As perspectivas dessa tecnologia são consideráveis, uma vez que o hidrogênio tem o potencial de desempenhar um papel fundamental na transição para uma economia de baixo carbono. Ele enfrenta desafios relacionados ao armazenamento e distribuição de energia, além de contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Contudo, desafios técnicos, econômicos e regulatórios persistem para se alcançar plenamente seu potencial, incluindo a necessidade de redução dos custos de produção.

2.1.1 Tipos de Hidrogênio

Apesar do hidrogênio ser o elemento químico mais abundante no universo, o gás hidrogênio em sua forma pura, H_2 , não é encontrado na natureza. A depender do processo que é utilizado para obter-se o hidrogênio, esse será classificado em nove diferentes categorias, baseadas em uma escala de cores conforme descrito na Tabela 1.

O trabalho desenvolvido por este projeto focará apenas no hidrogênio verde, proveniente do processo de eletrólise da água, a partir do uso de fontes de energia renováveis, mais comumente solar ou eólica.

Tabela 1 – Classificação dos hidrogênios na escala de cores

Classificação dos tipos de Hidrogênio na escala de cores	
Cor	Processo
Hidrogênio Preto	Gaseificação do carvão mineral (antracito) sem captura com utilização do carbono
Hidrogênio Marrom	Gaseificação do carvão mineral (hulha) sem captura com utilização do carbono
Hidrogênio Cinza	Reforma do vapor do gás natural sem captura com utilização do carbono
Hidrogênio Azul	Reforma do vapor do gás natural com captura com utilização do carbono
Hidrogênio Turquesa	Pirólise do metano (Sem gerar CO ₂)
Hidrogênio Verde	Eletrólise da água (Com energias de fontes renováveis)
Hidrogênio Musgo	Reformas catalíticas, gasificação de plásticos residuais ou bio-digestão anaeróbica de biomassa (com ou sem captura com utilização de carbono)
Hidrogênio Rosa	Fonte de energia nuclear
Hidrogênio Amarelo	Energia da rede elétrica

Fonte: Adaptado de (EPE, 2021).

2.2 ELETRÓLISE

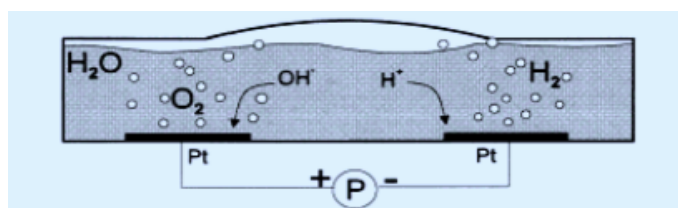
Esta seção aborda como funciona o processo de eletrólise da água e as tecnologias de eletrolisadores em destaque no mercado. Em seguida, é realizada uma análise mais aprofundada sobre o princípio de funcionamento e características das três principais tecnologias: AWE, SOE e PEM.

2.2.1 Processo de Eletrólise

A eletrólise da água é um processo oxirredução resultante da passagem de uma corrente elétrica contínua para a obtenção de gás oxigênio e hidrogênio a partir da molécula de água. Esse processo foi originalmente descoberto em 1800 por Anthony Carlisle e William Nicholson e vem desde então sendo continuamente adaptado e aprimorado para uma variedade de aplicações.

Segundo (KUMAR; HIMABINDU, 2019), a eletrólise da água é considerada a maneira mais eficiente de produção de hidrogênio, uma vez que faz uso de água, um recurso renovável, e tem unicamente o gás oxigênio como subproduto. A Figura 1 apresenta o esquema de uma célula eletroquímica.

Figura 1 – Ilustração esquemática de uma célula eletroquímica.



Fonte: (ZOULIAS et al., 2004).

A célula eletroquímica consiste na parte principal de uma unidade de eletrólise e é composta por dois eletrodos conectados por uma fonte externa e separados por um eletrólito. Quando a tensão entre os eletrodos atinge um ponto crítico, eles iniciam a produção de gás hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). O gás hidrogênio é produzido no cátodo, enquanto o gás oxigênio no ânodo, os polos negativo e positivo respectivamente. A quantidade de gás produzido vai depender da corrente que é aplicada na célula (ZOULIAS et al., 2004).

No contexto da sustentabilidade, a eletrólise da água é considerada o processo mais limpo para a obtenção de hidrogênio puro, principalmente se a fonte que alimenta o processo for uma fonte renovável (tipicamente solar ou eólica). No entanto, atualmente apenas cerca de 4% de todo o hidrogênio produzido vem da eletrólise da água, devido ao seu custo elevado, enquanto por volta de 95% é produzido por meio de fontes de combustíveis fósseis (MERGEL; CARMO; FRITZ, 2013).

2.2.2 Tipos de Eletrolisador

Desde a descoberta do processo de eletrólise durante a primeira revolução industrial, várias diferentes tecnologias de eletrólise da água foram desenvolvidas. De maneira geral, essas tecnologias são diferenciadas entre si a partir do tipo de eletrólito utilizado na célula eletroquímica. Para o propósito deste trabalho, serão analisados três das principais tecnologias de eletrólise presentes atualmente no mercado: eletrolisadores por membrana polimérica (PEM), Eletrolisadores alcalinos (AWE) e eletrolisadores de óxido sólido (SOE).

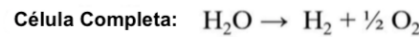
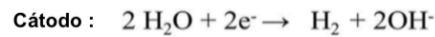
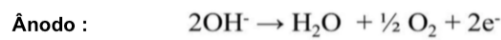
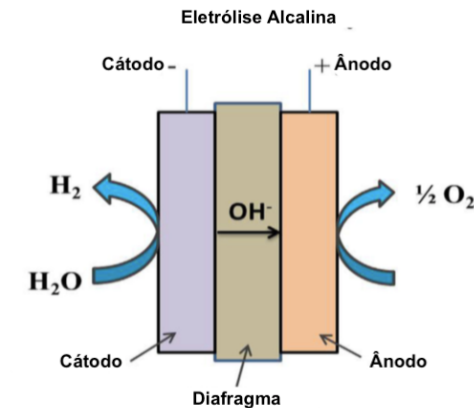
2.2.2.1 Alkaline Water Electrolysis (AWE)

A Eletrólise Alcalina da Água é a mais antiga dentre as tecnologias de eletrólise desenvolvidas, presente desde a descoberta do processo em 1789 por Troostwijk e Diemann. Nesse processo, a célula é composta por dois eletrodos separados entre si por um diafragma preenchido por uma solução alcalina, geralmente hidróxido de potássio (KOH) em uma concentração entre 20-30%. O diafragma tem como objetivo separar os gases separados, garantindo a segurança e eficiência do processo (SANTOS; SEQUEIRA; FIGUEIREDO, 2013).

Na reação, duas moléculas de H_2O são divididas no cátodo, produzindo o hidrogênio puro, H_2 , e duas moléculas de ânions de hidróxido, OH^- . Os ânions de hidróxido atravessam o diafragma, formando O_2 e H_2O no ânodo. O esquema do eletrolisador e reação da célula completa estão ilustrados na Figura 2. As principais características de operação da eletrólise alcalina estão descritas na Tabela 2.

No entanto, apesar de sua grande variedade de aplicações comerciais e sua tecnologia bem estabelecida, eletrolisadores tipo AWE possuem alguns pontos negativos: baixa densidade de corrente (limitada a 400 mA/cm²) e baixa pressão de operação (WANG; CAO; JIAO, 2022).

Figura 2 – Ilustração esquemática do eletrolizador AWE.



Fonte: Adaptado de (KUMAR; HIMABINDU, 2019).

Tabela 2 – Características típicas do eletrolisador AWE.

Eletrólise Alcalina da Água (AWE)	
Temperatura de Operação (°C)	30 - 90
Eficiência (%)	62 - 82
Densidade de corrente (A/cm ²)	0,2 - 0,4
Consumo de energia da eletrólise (kWh/Nm ³)	4,5 - 5,5
Pressão máxima (bar)	30
Tempo de resposta	Minutos
Vida do eletrolisador (h)	60.000
Aplicabilidade	Variedade de aplicações comerciais

Fonte: adaptado de (WANG; CAO; JIAO, 2022).

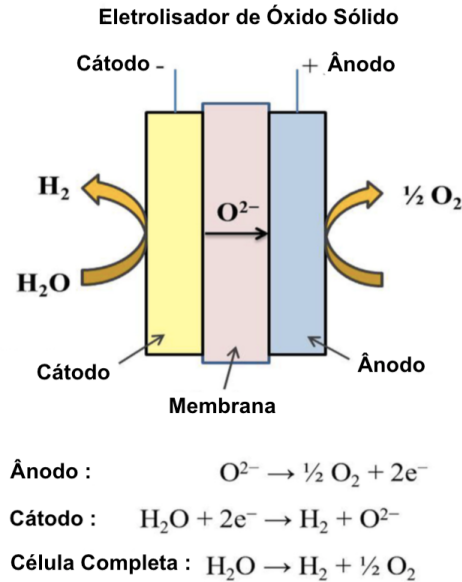
A pressão entre o ânodo e cátodo deve ser mantida sempre balanceada, de modo a evitar que ambos o hidrogênio puro ou o oxigênio gerados pelo processo de eletrólise ultrapassem para o lado oposto através do diafragma. A transferência desses gases pelo diafragma pode resultar em explosões, representando um risco de segurança (KUMAR; HIMABINDU, 2019).

2.2.2.2 Solid Oxide Electrolyzer cell (SOE)

Utilizado pela primeira vez em 1980 por Donitz e Erdle, o Eletrolisador de Óxido Sólido (SOE) chama muita atenção devido a sua capacidade em obter hidrogênio puro com alto nível de eficiência (KUMAR; HIMABINDU, 2019). Nos eletrolisadores SOE é utilizada água na forma de vapor em altas temperaturas (entre 500 - 850°C) e alta pressão.

O vapor de água é aplicado no cátodo, resultando no produto de gás hidrogênio e íons de óxido, O^{2-} . Estes íons de óxido, gerados pela reação no cátodo, atravessam pela membrana de eletrólito sólido, formando oxigênio no ânodo. O esquema do eletrolisador e reação da célula completa estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Ilustração esquemática do eletrolisador SOE.



Fonte: Adaptado de (KUMAR; HIMABINDU, 2019).

O material eletrólito utilizado é normalmente condutores de O^{2-} , comumente consistentes de níquel e zircônia estabilizada com ítria. No entanto, pesquisas destacam as vantagens da utilização de materiais cerâmicos devido a sua alta eficiência e maior condutividade iônica em altas temperaturas (CARMO et al., 2013). As principais características de operação dos eletrolisadores SOE estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características típicas do eletrolisador SOE.

Eletrolisador de Sólido Óxido (SOE)	
Temperatura de Operação ($^{\circ}C$)	500 - 850
Eficiência (%)	81 - 92
Densidade de corrente (A/cm^2)	0,3 - 0,5
Consumo de energia da eletrólise (kWh/Nm^3)	< 3,5
Pressão máxima (bar)	-
Tempo de resposta	-
Vida do eletrolisador (h)	< 20.000
Aplicabilidade	Aplicação de escala laboratorial

Fonte: Adaptado de (WANG; CAO; JIAO, 2022).

Atualmente, eletrolisadores SOE são aplicados apenas em escala laboratorial devido a problemas de segurança, relacionados à falta de estabilidade do processo e a alta de-

gradação que impedem sua comercialização em larga escala (WANG; CAO; JIAO, 2022). As altas temperaturas resultam na rápida deterioração da performance catalítica e afetam a durabilidade dos materiais cerâmicos. No contexto atual, o maior desafio é alcançar a operação em longo prazo dos eletrolisadores SOE.

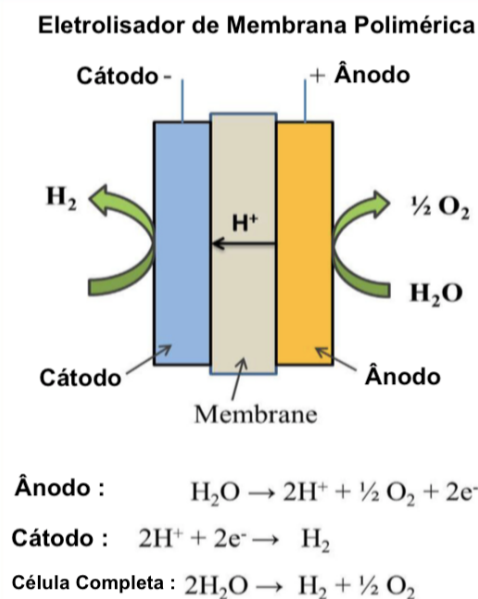
Apesar dos problemas observados, essa tecnologia é capaz de produzir hidrogênio com elevados níveis de pureza e com alta eficiência energética. De acordo com (CARMO et al., 2013), os eletrolisadores SOE têm grande potencial para a produção de hidrogênio em massa, salvo que sejam aprimorados os desafios de durabilidade e estabilidade observados.

2.2.2.3 Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis (PEM)

Desenvolvido nos anos 1960 pela *General Electric*, os Eletrolisadores de Membrana Polimérica (PEM), como sugere seu nome, fazem uso de uma membrana de polímero sólido como eletrólito. Essa membrana garante uma alta condutividade de prótons e baixa transferência de gases entre os lados do ânodo e cátodo do sistema, tudo isso dentro de um *design* compacto (CARMO et al., 2013).

Diferentemente dos eletrolisadores AWE e SOE, no eletrolisador PEM a molécula de água é aplicada no ânodo, onde será decomposta em oxigênio, O_2 , e prótons de hidrogênio H^+ . Os prótons de hidrogênio produzido no ânodo vão então atravessar a membrana polimérica até o cátodo, onde será finalmente formado o gás hidrogênio puro H_2 . O esquema do eletrolisador e reação da célula completa estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4 – Ilustração esquemática do eletrolisador PEM.



Fonte: Adaptado de (KUMAR; HIMABINDU, 2019).

As principais características de operação dos eletrolisadores PEM estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Características típicas do eletrolisador PEM.

Eletrolisador de Membrana Polimérica (PEM)	
Temperatura de Operação ($^{\circ}C$)	20 - 80
Eficiência (%)	67 - 82
Densidade de corrente (A/cm^2)	1 - 3
Consumo de energia da eletrólise (kWh/Nm^3)	4 - 5
Pressão máxima (bar)	-
Tempo de resposta	Segundos
Vida do eletrolisador (h)	80.000
Aplicabilidade	Variedade de aplicações comerciais

Fonte: Adaptado de (WANG; CAO; JIAO, 2022).

Quando comparado aos eletrolisadores alcalinos, observa-se que a tecnologia PEM pode operar com uma densidade de corrente consideravelmente maior, fator que diminui os custos de operação do mesmo. Ademais, o eletrólito sólido permite que o design do sistema seja compacto, mantendo ainda sua resistência estrutural, permitindo que sejam atingidas altas pressões de operação (CARMO et al., 2013). Além disso, os eletrolisadores PEM possuem um tempo de resposta rápido e uma maior vida útil.

Contudo, apesar das vantagens mencionadas, devido à acidez corrosiva da membrana de troca de prótons, se faz necessária a aplicação de metais específicos que têm a capacidade de resistir ao ambiente criado no eletrolisador PEM. Esses materiais são no geral escassos e, portanto, caros (Pt, Ir, Ru), o que torna o custo de investimento de eletrolisadores PEM maior do que aquele de eletrolisadores AWE (WANG; CAO; JIAO, 2022).

2.3 SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

A seguinte seção aborda conceitos importantes relacionados a sistemas SCADA e as vantagens relacionadas a sua utilização no monitoramento de processos. Ademais, a seção tem como foco principal apresentar o *software* Elipse E3 e a linguagem *VBScript*, utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

2.3.1 Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA)

A constante evolução e acelerado avanço da indústria impõem a necessidade de que sejam desenvolvidos dispositivos e soluções capazes de acompanhar as necessidades específicas de cada setor. Com a ascensão da indústria 4.0, tem-se testemunhado um crescimento significativo na aplicação de tecnologias avançadas, como robótica, internet das coisas, sistemas de automação, computação e inteligência artificial (INDUSTRIA, s.d).

Durante esse período, surgiram os Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados, mais comumente conhecidos como SCADA ou sistemas supervisórios. Em (Zanghi, 2019),

define-se sistemas SCADA como *softwares* com capacidade de coletar e armazenar dados de diversos processos, possibilitando sua supervisão em tempo real e, conseqüentemente, o controle eficaz.

Os sistemas SCADA contribuem para a eficácia dos Sistemas de Controle Industrial (ICS), oferecendo uma proteção superior aos equipamentos utilizados. Estruturas SCADA fornecem identificação válida e alertas rápidos a partir do uso de sensores e comunicações avançadas, aprimorando a eficiência do projeto (YADAV; PAUL, 2021).

2.3.1.1 Vantagens da aplicação de Sistemas SCADA

A partir das funcionalidades de um sistema supervisório, é possível destacar algumas de suas vantagens (ANDERSON, 2021):

- **Análise de tendências:** é possível tomar decisões e ações proativas com base nos dados coletados, permitindo otimizar o funcionamento da planta;
- **Operação remota:** realizar intervenções e supervisão do processo à distância;
- **Alarmes:** sinalização em tempo real de possíveis falhas no processo, permitindo uma ação rápida;
- **Geração de relatórios e gráficos:** a partir do banco de dados coletados, é possível gerar relatórios e gráficos com as informações de interesse, como os alarmes e tendências da planta.

Além disso, sistemas supervisórios são altamente customizáveis, sendo possível adequá-los para uma variedade de setores e aplicações. Cada aplicação irá demandar uma configuração diferente com base nos objetivos a serem alcançados em seus elementos, com o desenvolvimento de interfaces de acordo com o processo específico (ZANGHI, 2019).

2.3.2 *Software Elipse E3*

A *Elipse Software* trata-se de uma empresa focada no desenvolvimento de ferramentas de *software* para o gerenciamento e controle em tempo real de processos, consagrando-se como a líder nacional em soluções nesse meio, estando presente na maioria das áreas da indústria.

A Elipse possui uma série de produtos em seu catálogo, focados em diferentes setores, como processos industriais, energia, saneamento e infraestrutura, esses são:

- *Elipse E3*;
- *Elipse Power*;
- *Elipse Plant Manager*;

- *Eclipse FlexControl*;
- *Eclipse Water*;
- *Eclipse F4*;
- *Eclipse Mobile*;
- *Eclipse DCIM*.

Um dos maiores destaques dessa arquitetura é o *Eclipse E3*. Trata-se de uma plataforma HMI/SCADA para monitoramento de processos em tempo real, oferecendo alta capacidade de comunicação, modelagem de dados e flexibilidade e uma interface gráfica bastante evoluída, conforme ilustrado na Figura 5. Esses fundamentos são de extrema importância na construção de um sistema supervisorio, onde a diminuição de riscos e o aumento da estabilidade são pontos essenciais.

Figura 5 – Interface gráfica do *software Eclipse E3*.



Fonte: (ELIPSE, s.d).

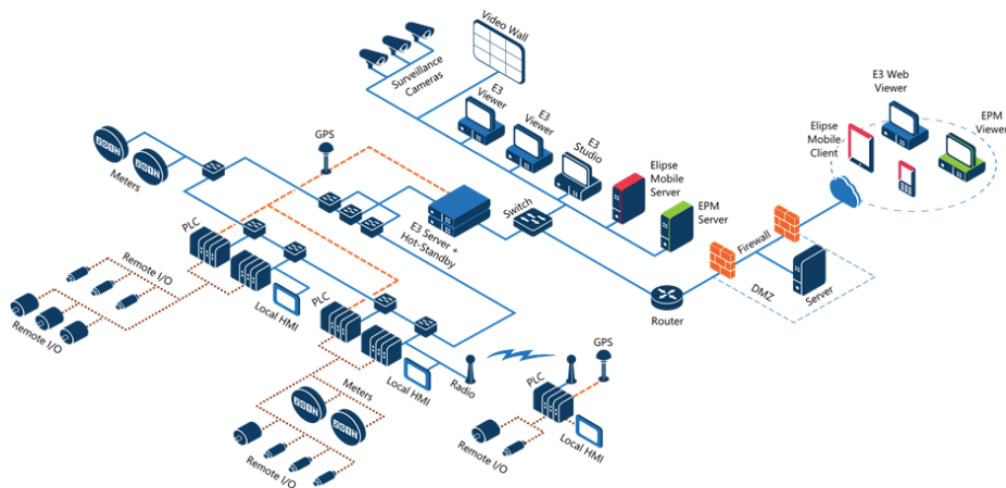
O Elipse E3 faz uso de *Drivers* de Comunicação para escrever e ler dados dos dispositivos monitorados, possibilitando, a partir desses, o desenvolvimento de diferentes abordagens para analisar, controlar, gerir e armazenar essas informações de acordo com os objetivos principais do sistema supervisorio e interesses do cliente. Entre essas abordagens, incluem-se telas, alarmes, históricos e relatórios (ELIPSE, s.d).

O Elipse E3 possui três programas principais para a aplicação final de um sistema supervisorio: *E3 Server*, *E3 Studio* e *E3 Viewer* (Figura 6).

- **E3 Server:** representa um servidor de aplicações, responsável pelo processamento da comunicação em tempo real com os equipamentos de controle, funcionando como uma interface entre esses. Esse programa também é responsável por enviar todas as informações gráficas e dados para todos os clientes em qualquer ponto da rede, servindo como um ponto central para a comunicação com o supervisorio;

- **E3 Studio:** é a plataforma universal de desenvolvimento do sistema supervisório, ou seja, o local onde ele será verdadeiramente construído. Esse sistema inclui em sua estrutura um editor gráfico completo e um editor de *scripts* (*VBScript*), permitindo que seja criado todo o design e estruturação do supervisório;
- **E3 Viewer:** funciona como uma interface de operação com o usuário, permitindo que esse visualize e opere a partir de qualquer computador a aplicação desenvolvida presente no servidor. Esse programa possui dois modos de operação, *Viewer Control*, possibilitando a visualização do sistema e sua operação, e o *Viewer Only*, que por sua vez permite unicamente a visualização e consultas do sistema.

Figura 6 – Esquema de conexão dos programas Elipse E3.



Fonte: (ELIPSE, s.d).

O *software* do Elipse E3 requer a aquisição de uma licença para seu uso completo, contudo a empresa oferece também uma versão do sistema de uso livre. O modo demonstração tem suas funcionalidades reduzidas, porém permite a criação de protótipos e o teste dos mesmos, o que é suficiente para o trabalho proposto por esse projeto.

2.3.2.1 VBScript

Scripts são módulos de programação associados a elementos específicos de um sistema supervisórios que vão permitir a criação de determinados eventos específicos. O software Elipse E3 *Studio* usa a linguagem *VBScript* em seus *scripts*.

O *VBScript* (*Visual Basic Scripting Edition*) trata-se de um subconjunto da linguagem de programação *Visual Basic* desenvolvida pela *Microsoft*. Tal linguagem foi desenvolvida originalmente para a programação de documentos a serem exibidos em navegadores para a internet, de forma leve, rápida e segura.

A linguagem *VBScript* faz uso da tecnologia *ActiveX Scripting* para realizar a troca de informações com as aplicações desenvolvidas. O *ActiveX Scripting* permite que aplicações como o Elipse E3 *Viewer* chamem funções e compilem *scripts* dentre outros procedimentos.

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo tem como objetivo elucidar todo o processo e escolhas envolvidas no desenvolvimento do sistema supervisor. Em um primeiro momento, será explicado o processo *Power-To-Gas* (P2G) que será monitorado pelo sistema supervisor desenvolvido, destacando as suas principais etapas e personas do processo. Em seguida, o capítulo se aprofunda nas escolhas referentes à arquitetura de navegação implementada e às telas conceitualizadas para a aplicação em questão. Por fim, é dado enfoque nos elementos de design do sistema, tendo como objetivo a criação da melhor experiência para o usuário.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Conforme realizado durante a fundamentação teórica deste trabalho, o estudo e entendimento do processo a ser representado pelo sistema supervisor é imprescindível para a criação do mesmo. Dessa maneira, é preciso realizar um estudo do processo escolhido, de modo a conhecer suas etapas e as personas envolvidas, reconhecendo os objetivos e necessidades de cada uma. Uma vez que o presente trabalho tem como foco o estudo do funcionamento e particularidades de eletrolisadores, foi escolhida uma planta de produção de hidrogênio verde do tipo P2G para a criação dos sistemas supervisórios.

3.1.1 *Power to Gas*

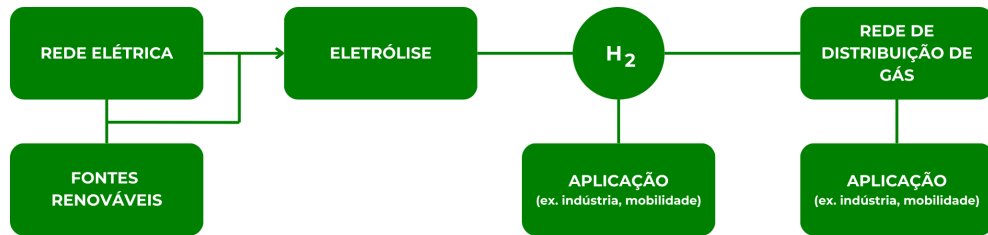
No cenário global atual, o processo P2G tem se mostrado uma proposta promissora para sistemas energéticos futuros que enfrentam metas de descarbonização, permitindo a flexibilização em sistemas energéticos e representando uma alternativa à utilização de combustíveis fósseis (IKAHEIMO et al., 2022).

Conforme descrito pelo seu nome, o processo P2G trata-se de uma tecnologia que conecta à rede elétrica para a produção de combustível gasoso através da conversão do excesso de eletricidade proveniente de fontes renováveis em gás, permitindo seu armazenamento na rede de gás natural, conforme ilustrado pela Figura 7. Essa tecnologia desempenha um papel importante na transição energética e é compatível com as três tecnologias de eletrolisadores abordadas ao longo deste trabalho (GOTZ et al., 2016).

A tecnologia P2G faz uso tipicamente de fontes de energia de baixa ou zero emissão carbônica, como energia eólica ou fotovoltaica, ajudando, dessa forma, tanto no alcance das metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris, como nos objetivos das políticas climáticas (TICHLER; BAUER; BOHM, 2022).

Tendo em vista esse processo, o presente trabalho tem como proposta desenvolver um sistema supervisionado responsável por acompanhar os processos de uma planta P2G para três casos distintos, PEM, AWE e SOE.

Figura 7 – Etapas do processo P2G.



Fonte: Adaptado de (TICHLER; BAUER; BOHM, 2022).

3.1.2 Etapas do processo

O processo da tecnologia P2G é composto de três principais etapas:

1. A geração de energia através de uma fonte renovável;
2. O processo de eletrólise da água para a produção do gás hidrogênio;
3. O processo de armazenamento do hidrogênio verde produzido.

Conforme especificado anteriormente, o processo de geração de energia, realizado na primeira etapa do processo, é feito através da utilização de fontes de energias renováveis. A energia fornecida por meio dessas fontes é direcionada para que seja utilizada como fonte de alimentação para o processo de eletrólise da água, que faz uso da energia elétrica recebida para gerar o H_2 . Por fim, o hidrogênio produzido pela etapa de eletrólise é armazenado para que possa ser utilizado nas mais diversas aplicações, como na indústria ou na mobilidade.

Os sistemas supervisórios desenvolvidos como produto deste trabalho irão supervisionar uma planta P2G, focando na coleta de dados e acompanhamento dessas três etapas descritas acima para as três tecnologias de eletrolisador escolhidas para o estudo. O reconhecimento das etapas que compõem o processo escolhido é de extrema importância para determinar a estrutura do sistema supervisório e qual a arquitetura que melhor se adequa às necessidades desejadas.

3.1.3 Personas

Durante o processo de concepção de um sistema SCADA, é desejável que o projeto seja moldado aos usuários da aplicação, e não o contrário. Dessa maneira, antes da construção do sistema é necessário reconhecer quem serão os seus usuários, quais as suas classes e, mais importante, quais os objetivos e necessidades de cada um.

Nesse contexto, as personas de um processo são personagens fictícios que representam um usuário padrão do sistema. As personas são baseadas em pesquisas e dados de usuários reais e são utilizadas para garantir que o sistema seja eficaz e adequado para seus clientes finais. Quanto mais detalhada for a análise e o entendimento das necessidades

das personas, mais fácil será compreendê-las e de criar um sistema que vai atender suas necessidades e objetivos (HOLLIFIELD, 2012).

3.1.3.1 A importância das personas para o desenvolvimento do sistema supervisorio

A identificação das personas é de extrema importância para garantir que o sistema desenvolvido seja eficiente na performance das funções desejadas, a partir do reconhecimento dos objetivos de cada um. Nesse aspecto, a criação de personas é necessária para a compreensão integral das necessidades específicas de cada grupo de usuários que vão interagir com o supervisorio, incluindo operadores, técnicos de manutenção, engenheiros e gestores, cada um com suas próprias demandas e expectativas. Além disso, a noção das personas auxilia em melhorias de usabilidade do sistema, promovendo a criação de telas mais intuitivas e pensadas tendo em mente o usuário final das mesmas, garantindo a eficiência operacional do sistema e segurança do mesmo.

Finalmente, as escolhas de design Experiência do Usuário e Interface do Usuário (UX/UI, do inglês, *User Experience* e *User Interface*) são também guiadas pelas personas, levando em consideração as características de cada grupo de usuários para priorizar esforços e recursos que tenham mais impacto na satisfação do usuário final. Isso inclui o posicionamento de telas, botões, alarmes, *dashboards* e entre outros.

3.1.3.2 Personas desenvolvidas

Para a criação de cada persona, é importante responder três questões importantes: qual o seu papel na empresa, qual o ambiente de trabalho onde ela está inserida e, mais importante, quais os seus objetivos e necessidades. Com isso em mente, foram definidas 5 personas atuantes no processo P2G em estudo: Operador da etapa de geração de energia, Operador da etapa de eletrólise, Operador da etapa de armazenamento de gás hidrogênio, Engenheiro geral e Executivo, descritas conforme as Tabelas de 5 a 9.

Definidas e caracterizadas as personas envolvidas no processo, torna-se possível estabelecer as diretrizes a serem seguidas pelo projeto, ou seja, a arquitetura a ser adotada, as telas a serem criadas e funcionalidades implementadas para atender as demandas especificadas anteriormente. Esse processo permite que seja desenvolvido um sistema supervisorio específico para o cliente final, garantindo sua satisfação e que todas as metas serão atingidas.

Tabela 5 – Caracterização da persona de geração de energia.

Operador de etapa de geração de energia	
Ambiente de trabalho	· Próximo ao processo de geração de energia; · Sala de controle.
Objetivos/Necessidades	· Observar todas as turbinas em funcionamento; · Acompanhar a geração de energia geral do processo e de cada turbina especificamente; · Ter acesso a dados específicos de cada turbina; · Ficar alerta a qualquer problema e responder de maneira eficaz à cada situação; · Ser capaz de efetuar paradas no processo em casos de emergência.
Soluções demandadas	· Alerta claros; · Interface intuitiva; · Indicação de alarmes a todo momento; · Telas <i>pop-up</i> com informações específicas de cada turbina; · Observar o <i>status</i> de cada turbina.

Fonte: (Própria autora, 2024).

Tabela 6 – Caracterização da persona de geração de eletrólise.

Operador de etapa de geração de eletrólise	
Ambiente de trabalho	· Próximo ao processo de eletrólise.
Objetivos/Necessidades	· Observar o eletrolisador em funcionamento; · Ser capaz de iniciar o processo de eletrólise; · Ter acesso a dados específicos de funcionamento do eletrolisador; · Ficar alerta a qualquer problema e responder de maneira eficaz à cada situação; · Ser capaz de efetuar paradas no processo em casos de emergência.
Soluções demandadas	· Alertas claros; · Interface intuitiva; · Indicação de alarmes a todo momento; · Acompanhamento em tempo real através de gráficos das variáveis de mais importância do processo de eletrólise.

Fonte: (Própria autora, 2024).

Tabela 7 – Caracterização da persona de armazenamento de gás hidrogênio.

Operador de etapa de armazenamento de gás hidrogênio	
Ambiente de trabalho	· Próximo a etapa de armazenamento do gás hidrogênio produzido.
Objetivos/Necessidades	· Observar a linha de produção do envasamento do gás hidrogênio; · Ser capaz de iniciar o processo de envasamento; · Ficar alerta a qualquer problema e responder de maneira eficaz à cada situação; · Ser capaz de efetuar paradas no processo em casos de emergência.
Soluções demandadas	· Alertas claros; · Interface intuitiva; · Indicação de alarmes a todo momento; · Observar o <i>status</i> do eletrolisador; · Acompanhamento de todos os cilindros de hidrogênio produzido, supervisionados e enviados.

Fonte: (Própria autora, 2024).

Tabela 8 – Caracterização da persona do engenheiro geral.

Engenheiro geral	
Ambiente de trabalho	· Pode estar presente em todas as etapas do processo; · Sala de controle
Objetivos/Necessidades	· Ter uma visão geral do processo completo; · Ver possíveis alertas e interrupções no processo; · Pode acessar dados de maneira remota; · Ficar alerta a qualquer problema e responder de maneira eficaz a cada situação; · Ser capaz de efetuar paradas em qualquer parte do processo em casos de emergência.
Soluções demandadas	· Alertas claros; · Interface intuitiva; · Indicação de alarmes a todo momento; · Capacidade de criação e monitoramento de usuários; · Acompanhamento em tempo real através de gráficos das variáveis de maior importância do processo; · Painéis com indicadores-chave de desempenho; · Gráficos de acompanhamento e elementos de fácil interpretação

Fonte: (Própria autora, 2024).

Tabela 9 – Caracterização da persona do executivo.

Executivo	
Ambiente de trabalho	· Escritório executivo; · Acesso à distância.
Objetivos/Necessidades	· Ter acesso às informações de produção de todo o processo; · Ter acesso a indicadores chave de desempenho; · Ter acesso a dados de forma remota; · Interface com exibição de diagramas.
Soluções demandadas	· Interface amigável e intuitiva; · Painéis com indicadores-chave de desempenho; · Gráficos de acompanhamento e elementos de fácil interpretação; · Geração automática de relatórios.

Fonte: (Própria autora, 2024).

3.2 ARQUITETURA

Nesta seção, são apresentados todos os aspectos referentes ao processo de desenvolvimento das telas e a escolha do padrão de navegação adotado para o sistema supervisório desenvolvido.

3.2.1 Tipos de tela

A escolha e a quantidade das telas que compõem o sistema supervisório vão estar diretamente relacionadas à quantidade de etapas contempladas pelo processo em análise. De maneira geral, a ISA-101 descreve quatro níveis básicos para um sistema SCADA, conforme descritos a seguir.

- **Nível 1: Visão Geral do Processo** - oferece uma visão macroscópica e de alto nível do processo ou sistema, sem detalhes específicos de cada etapa, mas proporcionando um acompanhamento completo da planta em análise;
- **Nível 2: Visão de Área** - oferece uma visão mais focada em etapas específicas do processo, com mais detalhes e uma visão mais específica, permitindo ao usuário acessar informações adicionais e observar mais de perto o que está acontecendo em uma determinada etapa;
- **Nível 3: Controle de Processo Detalhado** - é onde ocorre a maior interação com o usuário, permitindo o controle e envolvimento ativo do usuário com o processo, incluindo a capacidade de interagir e controlar elementos individuais;
- **Nível 4: Manutenção, Diagnósticos e Configuração** - foca em informações detalhadas e fornece diagnósticos úteis para o sistema, sendo frequentemente restrito a certos usuários.

A abordagem através de níveis da ISA-101 não se trata de uma regra obrigatória a ser cumprida por todos os sistemas supervisórios, trata-se apenas de uma guia que tem como objetivo a criação de sistemas organizados e efetivos. Nesse sistema, cada tela é projetada para atender as necessidades operacionais específicas a depender do papel do usuário, evitando que sejam mostrados dados desnecessários e permitindo um sistema mais limpo e de fácil interpretação (AUTOMATION, 2015).

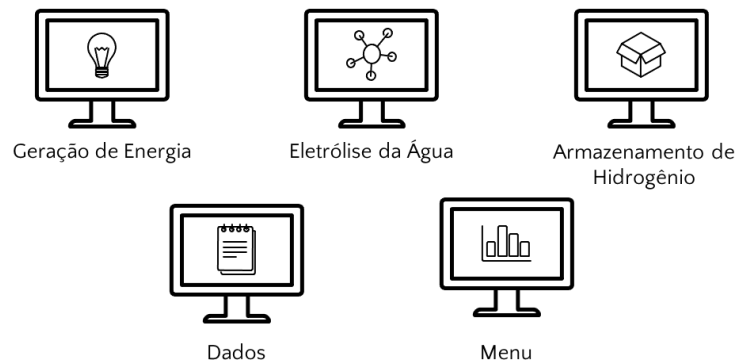
3.2.2 Telas do processo

Levando em consideração o processo P2G escolhido, juntamente com as personas criadas anteriormente e as recomendações da ISA-101, foram elaboradas cinco telas principais para compor o sistema supervisório da planta em estudo. Essas cinco telas, ilustradas na

Figura 8, acompanham as três etapas do processo e vão de acordo com as necessidades e objetivos de cada persona.

A Tabela 10, demonstrada a seguir, explica de forma mais detalhada cada um das cinco telas principais, juntamente com seus objetivos e funções e a categoria de cada uma de acordo com os níveis hierárquicos definidos pela ISA-101.

Figura 8 – Telas principais desenvolvidas para o sistema supervisor.

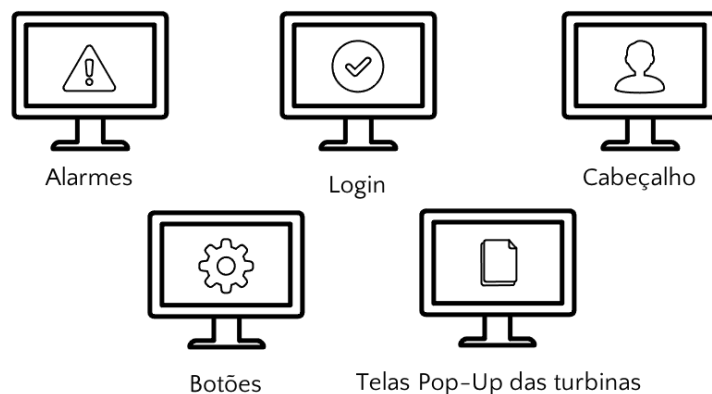


Fonte: (Própria autora, 2024).

Uma vez que este trabalho de conclusão de curso propõe a criação de sistemas supervisórios específicos para cada uma das três tecnologias de eletrolisadores estudadas no Capítulo 2 (AWE, SOE e PEM) a única tela que sofrerá alterações é aquela referente à etapa de eletrólise da água. Dessa forma, a tela será adaptada de maneira a contar com o monitoramento dos dados considerados de mais importância para cada eletrolisador. As demais telas descritas pela Tabela 10 permanecerão inalteradas.

Além das telas principais especificadas anteriormente, foram criadas também cinco telas auxiliares, que complementam as cinco telas demonstradas na Figura 8. As telas auxiliares, ilustradas na Figura 9, por sua vez são para a representação de informações do sistema, *links* de navegação ou telas do tipo *Pop-Up*, para o detalhamento de processos específicos.

Figura 9 – Telas auxiliares desenvolvidas para o sistema supervisor.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Tabela 10 – Detalhamento das telas principais do supervisor.

Tela	Objetivos e funções	Categoria
Menu	· Fornecer uma visão geral da planta, demonstrando todas as três etapas que compõem o processo P2G; · Mostrar informações básicas sobre cada etapa; · Permitir acesso à telas específicas de cada etapa.	Nível 1
Geração de Energia	· Fornecer dados específicos da etapa de geração de energia da planta; · Permitir controle das turbinas eólicas e informações sobre o seu funcionamento; · Mostrar informações detalhadas, como o <i>status</i> e geração de energia de cada turbina e geração de energia total.	Nível 2 e 3
Eletrólise da Água	· Fornecer dados específicos da etapa de eletrólise da água da planta · Permitir controle do eletrolisador; · Mostrar informações detalhadas da etapa (os dados representados vão depender do eletrolisador em questão e das prioridades de cada um).	Nível 2 e 3
Armazenamento	· Fornecer dados específicos da etapa de armazenamento de hidrogênio da planta e envio; · Permitir controle da linha de produção; · Mostrar informações detalhadas da etapa, como a quantidade de cilindros preenchidos e supervisionados e de lotes completos e enviados.	Nível 2 e 3
Dados	· Concentrar os dados de maior importância de todas as etapas de uma única interface; · Apresentar elementos gráficos que ajudem na interpretação dos dados; · Permitir a geração de relatórios de dados de interesse.	Nível 4

Fonte: (Própria autora, 2024).

A Tabela 11 detalha cada uma das telas auxiliares e seus objetivos e funções. As telas auxiliares criadas para este projeto por sua vez ajudam a compor a interface juntamente com as telas principais, por essa razão elas não são nesse caso niveladas pela ISA-101.

Tabela 11 – Detalhamento das telas auxiliares do supervisor.

Telas	Objetivos e funções
Login	· Tela inicial do sistema supervisor; · Receber as informações do nome do usuário e senha.
Alarmes	· Apresentar todos os alarmes vinculados às variáveis do processo; · Permitir que o usuário filtre e reconheça os alarmes.

Tabela 11 Continuação da página anterior.

Cabeçalho	· Apresentar informações do sistema, como data, hora e usuário logado.
Botões	· Fornecer <i>links</i> de navegação do sistema, permitindo que o usuário acesse outras telas, acesse configurações ou vá para outras telas, a depender da sua classe.
Telas <i>Pop-up</i>	· Fornecer informações mais detalhadas sobre o funcionamento de cada turbina; · Permitir o controle e parada das turbinas em casos de emergência.

(Fonte: Própria autora, 2024).

3.2.3 Padrão de navegação

É indispensável para uma interface homem-máquina uma organização eficaz de navegação, criando um método intuitivo para apresentar as informações para o usuário final. Dessa forma, determinadas todas as principais telas de um projeto, é necessário determinar a estrutura do sistema supervisorio. Existem dois tipos principais de padrões de navegação que podem ser adotados: de maneira estreita e profunda, conforme ilustrado na Figura 10, ou de maneira ampla e rasa, presente na Figura 11 (SENSENBACH, 2018).

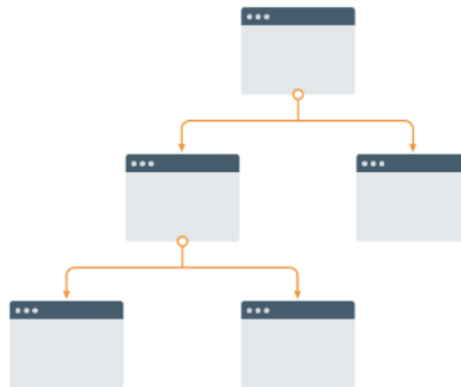
A estrutura de navegação estreita e profunda envolve menos *links*, sendo considerada assim melhor para direcionar um caminho em particular a ser seguido pelo usuário. Por outro lado, tal padrão envolve mais cliques, o que pode ser em alguns determinados casos mais cansativo para o usuário.

De forma contrária ao observado para o padrão de navegação estreito e profundo, a estrutura ampla e rasa requer mais *links*, proporcionando certa dificuldade em avaliar as opções existentes e observar o que é relevante. Porém, envolve menos cliques, possibilitando um acesso mais rápido ao conteúdo, com menos cliques.

Com base nessas estruturas e nas telas conceitualizadas para a essa aplicação, foi desenvolvida a seguinte arquitetura de navegação entre as telas principais para o sistema supervisorio desenvolvido, ilustrado na Figura 12.

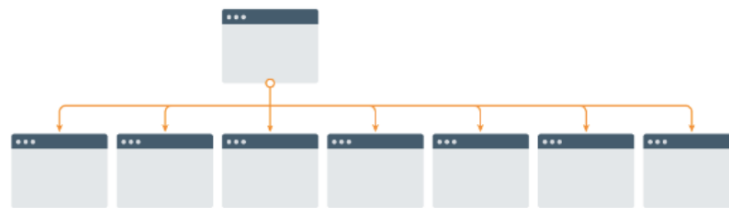
O padrão de navegação desenvolvido para este trabalho foi baseado principalmente na arquitetura ampla e rasa, permitindo o acesso de maneira fácil e rápida às telas de conteúdo e controle de cada uma das etapas de maior importância para o processo P2G, levando em consideração as personas envolvidas que vão interagir com o sistema.

Figura 10 – Representação da arquitetura de navegação estreita e profunda.



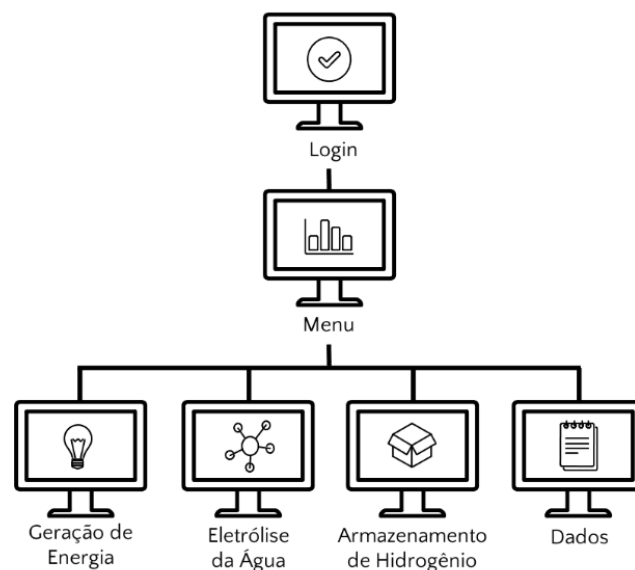
Fonte: (SENSENBACH, 2018).

Figura 11 – Representação da arquitetura de navegação ampla e rasa.



Fonte: (SENSENBACH, 2018).

Figura 12 – Padrão de navegação adotado para o supervisão do processo P2G.



Fonte: (Própria autora, 2024).

3.3 DESIGN

Nesta seção serão abordadas as escolhas realizadas no que diz respeito ao *design* das interfaces desenvolvidas. Serão esclarecidas as escolhas realizadas referentes ao posicionamento de quadros e divisores, escolha de tipografia, ícones e cores, e *design* das ilustrações implementadas.

3.3.1 UX-UI

A elaboração de um *design* organizado e alinhado com os objetivos propostos é fundamental em um sistema SCADA de forma a garantir a eficiência das operações monitoradas. O planejamento cuidadoso do *design* tem como objetivo principal facilitar as interações dos usuários com o sistema desenvolvido por meio de interfaces claras e intuitivas, que não apenas têm objetivos estéticos, mas também ajudam na produtividade e na mitigação de erros e tomada de decisões.

Dessa maneira, os conceitos de *User Interface* (UI) e *User Experience* (UX) não podem andar muito distantes da concepção de um sistema supervisório, visto que são essenciais para a criação de um projeto coeso e bem estruturado.

A UI, conforme seu nome sugere, está relacionada a interface do sistema, a parte tangível e visual de um projeto, com a qual o cliente final vai poder interagir diretamente. A UI pode ser descrita como a área onde os requisitos do processo serão transformados em interações funcionais com o usuário (KAMIZI, 2021). A concepção da UI leva em consideração muitos aspectos estéticos, como a escolha de cores, tipografia e elementos visuais para a criação de uma interface intuitiva e agradável.

A UX, por sua vez, está relacionada à etapa anterior, realizada no momento inicial do projeto. Essa área é responsável pelas pesquisas que vão auxiliar na concepção de um sistema que é adequado e personalizado para os clientes em questão, como por exemplo análises competitivas, testes, ou o desenvolvimento de personas, conforme realizado anteriormente.

De maneira concisa, pode-se afirmar que o design UX faz o uso de pesquisas e estudos para criar um produto que será útil ao usuário, enquanto o design UI garante o aspecto estético do sistema, criando interfaces usáveis.

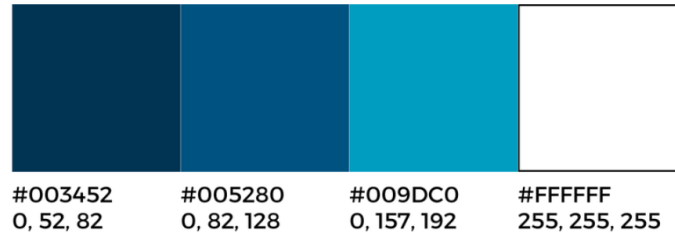
3.3.2 Cores escolhidas

A escolha das cores que vão compor a identidade visual do sistema supervisório é de extrema importância, uma vez que essas, além da questão estética, desempenham um papel fundamental no design e na experiência do usuário.

No caso do desenvolvimento de sistemas supervisórios, é recomendado que sejam utilizadas uma quantidade mínima de cores e com certa moderação. De forma contrária a como por exemplo anúncios ou páginas da internet, que fazem uso de cores vibrantes para

chamar a atenção do indivíduo, sistemas supervisórios devem ser compostos de cores mais neutras e suaves, de maneira a não fatigar a vista do usuário ou aumentar sua tensão muscular. Com isso em mente, foram escolhidas as cores representadas pela Figura 13 para compor a identidade visual das telas do sistema supervisório P2G desenvolvido.

Figura 13 – Cores escolhidas para compor as telas do sistema P2G.



Fonte: (Própria autora, 2024).

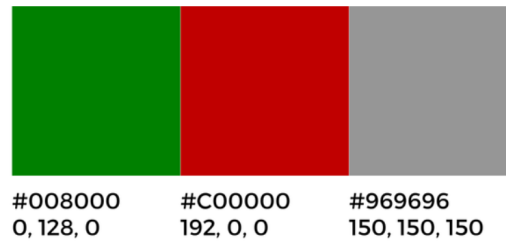
Das cores demonstradas acima, as cores mais neutras e escuras, representadas pelos códigos hexadecimais #003452 e #005280 respectivamente, foram as escolhidas para compor os maiores espaços das telas, como planos de fundo. As respectivas cores foram selecionadas justamente pelo seu aspecto mais suave aos olhos, evitando qualquer fadiga visual por parte do operador que passe longas horas focado na interface.

As demais cores, de códigos hexadecimais #009DC0 e #FFFFFF, foram selecionadas para compor outros aspectos das telas que necessitavam de maior destaque, como botões ou *displays* de texto. Esses elementos ocupam menos espaço na interface, permitindo que essas cores forneçam destaque às informações consideradas mais importantes, ao mesmo tempo que mantêm a identidade visual das cores mais suaves.

Além disso, as cores ilustradas pela Figura 14 foram utilizadas em elementos pontuais para indicação de *status* dos processos monitorados. Por convenção, a cor verde, representada pelo código hexadecimal #008000, de maneira geral indica um *status* positivo, no caso da aplicação desenvolvida, *status* "ligado", para o caso das turbinas ou eletrolisador. Tal cor foi utilizada em diferentes telas para indicar o *status* de cada uma das turbinas eólicas quando estavam ligadas, bem como do eletrolisador. Seguindo esse mesmo raciocínio, a cor vermelha, de código hexadecimal #C00000, foi aplicada para a indicação de *status* negativo, ou nesse caso *status* "desligado" ou para situações críticas ou paradas de emergência, que exigem a ação rápida dos usuários.

Por fim, representada pelo código #969696, a cor cinza foi aplicada nas três etapas para indicar quando determinado elemento estava "desativado". Essa lógica foi utilizada para as turbinas eólicas, o eletrolisador e para a linha de envasamento de cilindros de hidrogênio. Dessa maneira, representando de forma clara para o operador quando o sistema estava ativo ou não.

Figura 14 – Cores escolhidas para compor as telas do sistema P2G.



Fonte: (Própria autora, 2024).

3.3.3 Tipografia

O processo de escolha da tipografia que irá compor um sistema supervisorio deve levar em consideração principalmente o fator de legibilidade. É extremamente importante que a fonte de texto escolhida permita que o operador consiga ler com facilidade as informações exibidas nas interfaces propostas, mesmo que em tamanhos diferentes ou em resoluções de tela menores.

No caso do sistema supervisorio proposto por esse trabalho, foi escolhida a fonte Montserrat, uma fonte que atende os requisitos de legibilidade e clareza e propõe uma alternativa mais esteticamente interessante para o produto final. A fonte Montserrat possui traços limpos e equilibrados, sendo adequada para diversos tamanhos e aplicações, além de possibilitar diversas variações de peso e largura.

As Figuras 15 e 16, representam como a fonte escolhida em suas diversas variações pode ser observada sobre as cores da identidade visual do sistema supervisorios, destacadas na seção anterior. Desta maneira, é fácil observar a legibilidade da fonte escolhida e como o contraste dela ficará nas cores selecionadas para representar o sistema, validando a eficácia da mesma.

Figura 15 – Representação da fonte Montserrat em suas variações sobre a cor #003452



Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 16 – Representação da fonte Montserrat em suas variações sobre a cor #005280



Fonte: (Própria autora, 2024).

3.3.4 Elementos gráficos

Esta seção explica o processo de escolha e tomada de decisão no que diz respeito à criação das ilustrações e ícones implementados nas interfaces desenvolvidas.

3.3.4.1 Ilustrações

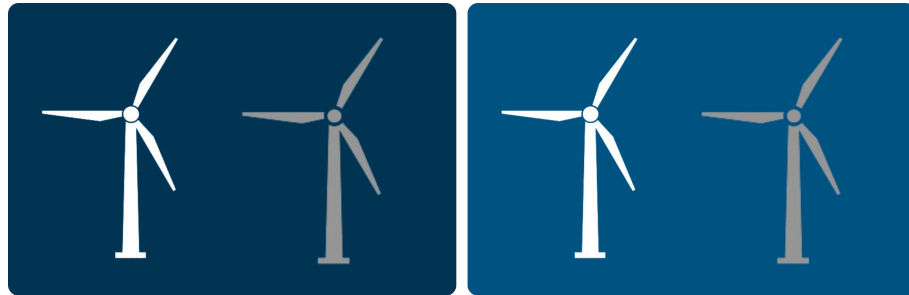
As ilustrações desempenham um papel relevante na criação de sistemas supervisórios, pois são responsáveis por permitir que os operadores visualizem o processo em monitoramento na tela do sistema de forma clara e compreensível. Nesse contexto, é essencial saber como escolher os elementos a serem ilustrados e como representá-los de forma a não sobrecarregar a interface.

No caso do sistema P2G, foram escolhidos elementos de cada uma das três principais etapas para serem ilustrados no sistema através de elementos gráficos: as turbinas eólicas, a célula do eletrolisador e os cilindros de hidrogênio.

Definidos quais os elementos a serem criados, foi preciso escolher qual o estilo no qual essas seriam ilustradas. Representações com alto nível de detalhamento e mais realistas são em muitos casos desnecessárias e podem muitas vezes fatigar o operador. Com isso em mente, foi escolhida uma abordagem mais minimalista na criação das ilustrações, de modo a garantir o entendimento dos processos sem sobrecarregar o usuário com informações visuais desnecessárias. Foi utilizado o próprio software do Elipse E3 e suas ferramentas de ilustração para criar todos os elementos. As Figuras 17 - 20 ilustram os elementos desenvolvidos.

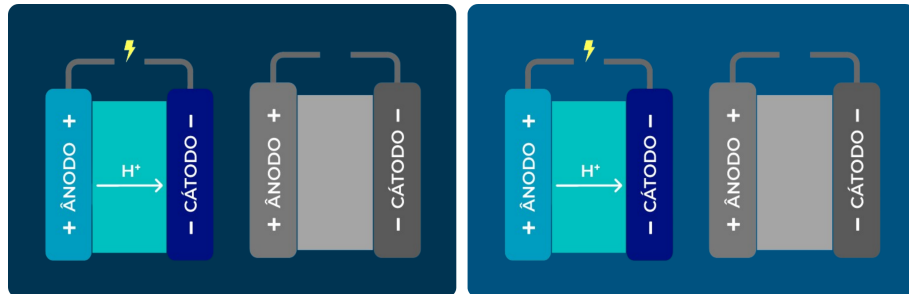
Para a ilustração dos eletrolisadores, foi escolhida a representação através da célula de eletrolise, em oposição ao eletrolisador físico. Essa decisão foi tomada com o intuito de que fosse possível apresentar o máximo de informações de interesse possíveis para o cliente final, possibilitando um melhor entendimento do processo. A ilustração dos três eletrolisadores em estudo está representada na Figura 21.

Figura 17 – Ilustração das turbinas eólicas nos *status* ativada e desativada sobre as cores #003452 e #005280.



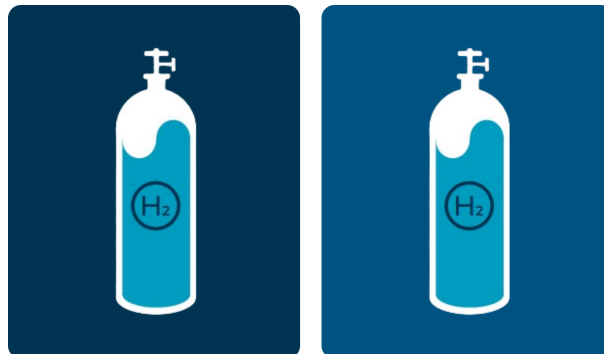
Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 18 – Ilustração do eletrolisador PEM nos *status* ativado e desativado sobre as cores #003452 e #005280.



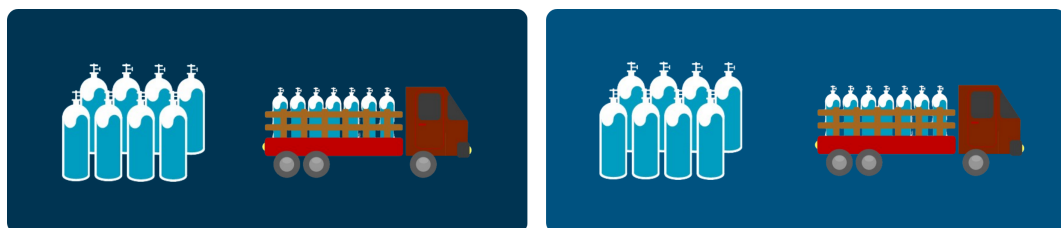
Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 19 – Ilustração dos cilindros de hidrogênio sobre as cores #003452 e #005280.



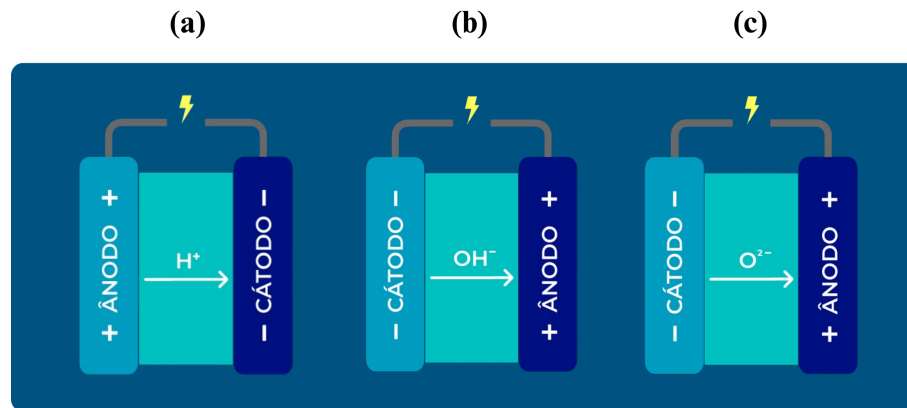
Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 20 – Ilustração dos lotes e transporte de hidrogênio sobre as cores #003452 e #005280.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 21 – Ilustração dos eletrolisadores (a) PEM; (b) AWE e (c) SOE, respectivamente.



Fonte: (Própria autora, 2024).

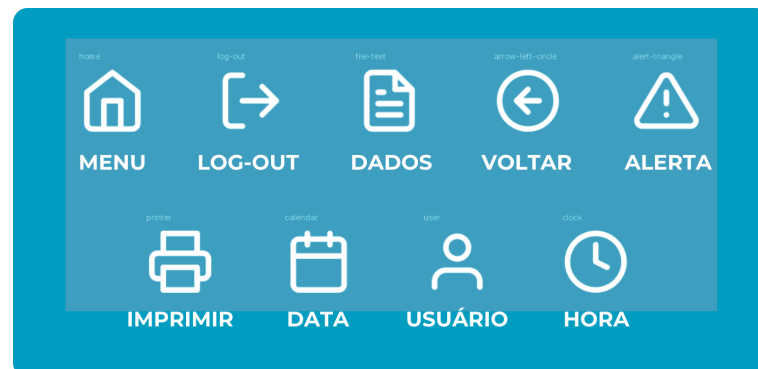
Além disso, foram implementadas animações associadas a algumas das ilustrações do sistema supervisor. Seguindo o mesmo raciocínio que foi aplicado para a criação das ilustrações, as animações ajudam na visualização do processo para o cliente final, porém devem ser feitas de forma a não sobrecarregar a visão do mesmo. Dessa forma, foram aplicadas animações pontuais e minimalistas ao processo, de maneira a engrandecer a experiência visual do usuário, sem causar distrações excessivas.

3.3.4.2 Ícones

O processo de escolha dos ícones que vão estar presentes nas telas do sistema supervisor segue o mesmo raciocínio que foi aplicado para a escolha do design das ilustrações, isto é, representações minimalistas que representem de forma clara a informação que se deseja passar.

A escolha dos ícones deve ser feita de maneira que sejam familiar ao usuário, ou seja, reconhecíveis e fáceis de compreender. Para a aplicação P2G desenvolvida, foram utilizados os ícones representados na Figura 22.

Figura 22 – Ícones utilizados no sistema supervisor P2G desenvolvido.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Dessa maneira, pode-se perceber que os ícones escolhidos, ilustrados na Figura 22, representam de maneira clara quais as informações que são repassadas, criando assim uma experiência menos confusa e mais familiar ao usuário final, mantendo-se esteticamente interessante e consistente com os demais elementos criados.

3.3.5 Quadros e Divisores

O planejamento e a organização do *layout* das telas que irão compor o sistema supervisor são partes fundamentais para a criação da melhor experiência de usuário possível. Tal escolha não é baseada apenas em quesitos estéticos, mas principalmente em estudos e guias sobre onde o usuário procura visualmente determinadas informações na tela (SENSENBACH, 2018). A Figura 23 ilustra um guia básico sobre o posicionamento de informações na tela.

Figura 23 – Guia de posicionamento de informações no sistema supervisor.



Fonte: (SENSENBACH, 2018).

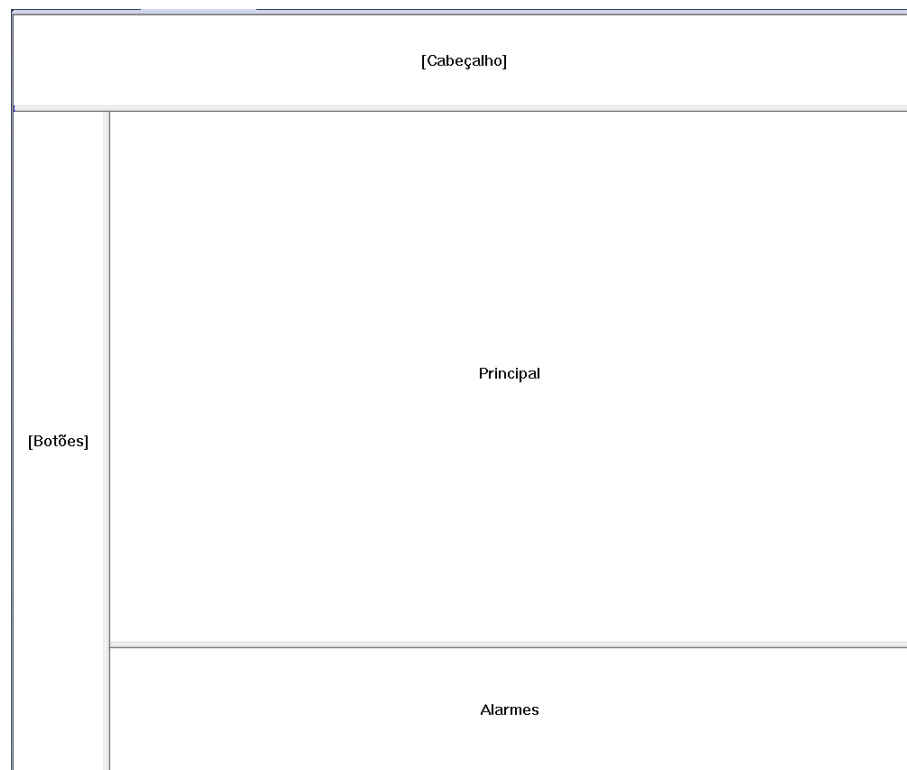
No software *Eclipse E3*, o processo de organização do *layout* da aplicação desenvolvida é feito através de quadros. O objeto "Quadro" é utilizado para estruturar a interface do sistema supervisor desenvolvido, permitindo a criação de interfaces compostas por várias telas simultaneamente dentro da janela principal do *Eclipse E3 Viewer*. Dessa maneira, é possível criar uma organização de telas principais e auxiliares que permita que o usuário tenha acesso a diferentes informações ao mesmo tempo.

Tipicamente, os quadros são organizados em uma região principal central, destinada ao conteúdo, no caso em estudo para o monitoramento e controle das etapas do processo P2G, detalhadas anteriormente, e diversas sub-divisões, as quais vão conter informações do sistema e *links* de navegação, nesse caso destinadas para alarmes, botões de navegação e cabeçalho. A organização do *layout* do quadro da aplicação desenvolvida está ilustrada na Figura 24.

O quadro desenvolvido, ilustrado na Figura 24, conta com quatro divisões, que são as seguintes: Principal, Cabeçalho, Botões e Alarmes. A seção Principal, que ocupa a maior parcela do quadro, como seu próprio nome já indica, é onde serão exibidas as informações mais relevantes do sistema, isto é, o menu, com a visão geral da planta, a tela de dados e as telas específicas de cada uma das etapas principais do processo: geração de energia, eletrólise da água e o armazenamento do hidrogênio.

Os demais quadros são fixos, ou seja, não haverá alternância de telas neles, e é onde serão exibidas as telas auxiliares do supervisor, ajudando a compor as principais. O nome dos quadros já é indicativo das telas que vão compor cada um desses: as telas de Cabeçalho, no divisor superior, a tela de Botões, no divisor à esquerda, e a tela de Alarmes no divisor inferior.

Figura 24 – Quadro e divisores implementados para a interface do sistema supervisor.



Fonte: (Própria autora, 2024).

3.4 DADOS

Devido as limitações impostas pelo modo demonstração do *software* Elipse E3, utilizado para o desenvolvimento do sistema supervisório proposto, os dados exibidos por este protótipo não são provenientes de uma planta real, mas sim dados fictícios gerados pelo sistema para demonstrar o seu funcionamento.

As informações exibidas pelo sistema supervisório foram geradas através da utilização de *tags* do sistema. O *software* Elipse E3 possui dentro de suas ferramentas um Servidor de Dados, responsável por abrigar a execução das variáveis do sistema, como *tags* do tipo Demo, Internas ou Contador, utilizadas para gerar os dados da planta supervisionada neste protótipo.

Cada tipo de *tag* possui um modo de funcionamento. A *Tag* Demo trata-se de um objeto que gera valores de acordo com a forma de ondas pré-definidas ou dados aleatórios, utilizadas para a simulação de valores. No desenvolvimento deste trabalho, *Tags* Demo foram utilizadas para a implementação do movimento das animações e geração de valores ligados ao funcionamento da planta, como por exemplo a geração de energia das turbinas e dados de funcionamento dos eletrolisadores.

A *Tag* Interna é um objeto de propósito genérico, aplicada no sistema para guardar valores de qualquer tipo, como números e textos. Foram utilizadas *Tags* Internas do tipo *booleanas* para representar os *status*, ligado (1) ou desligado (0), dos elementos monitorados pelo processo, como turbinas e eletrolisadores.

Por fim, foram utilizadas também *Tags* Contador, objeto que realiza a contagem de tempo até que seja atingido um valor pré-determinado. Esse tipo de *tag* foi aplicada no sistema para simular a contagem dos cilindros de hidrogênio preenchidos e supervisionados, e lotes completos e enviados.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentadas as telas finais desenvolvidas para o sistema supervisor do processo P2G, ilustrando todas as interfaces criadas e todas as funcionalidades implementadas em cada uma das telas, de acordo com as necessidades e objetivos de seus respectivos operadores.

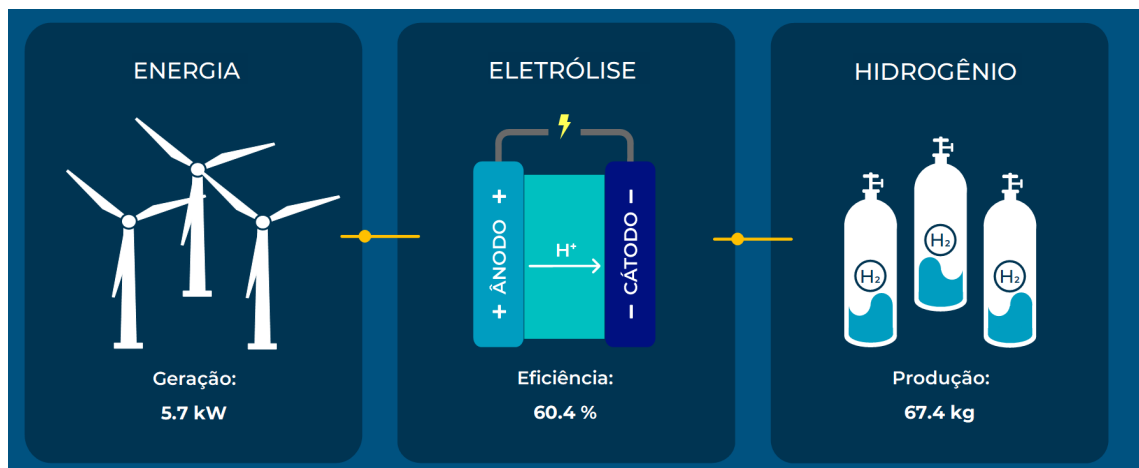
4.1 TELAS PRINCIPAIS

Nesta seção serão apresentadas as telas principais criadas para o sistema supervisor P2G: as telas menu, geração de energia, de eletrólise da água, armazenamento de hidrogênio e de dados, respectivamente. Ademais, serão discutidas as funcionalidades aplicadas em cada uma das telas e como essas foram implementadas.

4.1.1 Menu

Conforme descrito no Capítulo 3, o principal objetivo da tela Menu é fornecer ao usuário uma visão geral da planta do processo P2G, demonstrando de forma simples todas as três etapas da produção. A Figura 25 representa a tela Menu desenvolvida.

Figura 25 – Tela Menu do sistema P2G desenvolvido.



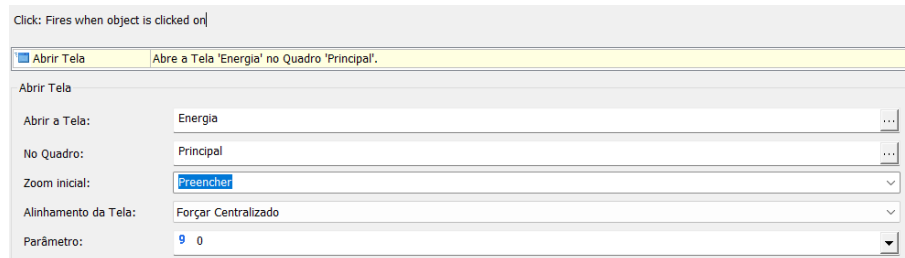
Fonte: (Própria autora, 2024).

Algumas das funcionalidades aplicadas nesta tela foram a utilização de *displays* para demonstrar as informações de maior interesse de cada uma das etapas, nesse caso a geração total das turbinas na primeira etapa, a quantidade de hidrogênio em quilogramas produzido pela etapa de eletrólise e, por fim, a quantidade de cilindros preenchidos durante a etapa de armazenamento.

Como ilustrado pela arquitetura de navegação escolhida para o sistema, e apresentada no capítulo anterior, a tela de Menu serve também como ponto de entrada para as telas

específicas de cada processo. A partir disso, cada seção serve também como um botão que leva o usuário a sua respectiva tela. Essa funcionalidade foi aplicada através da utilização de *scripts*, conforme ilustrado na Figura 26.

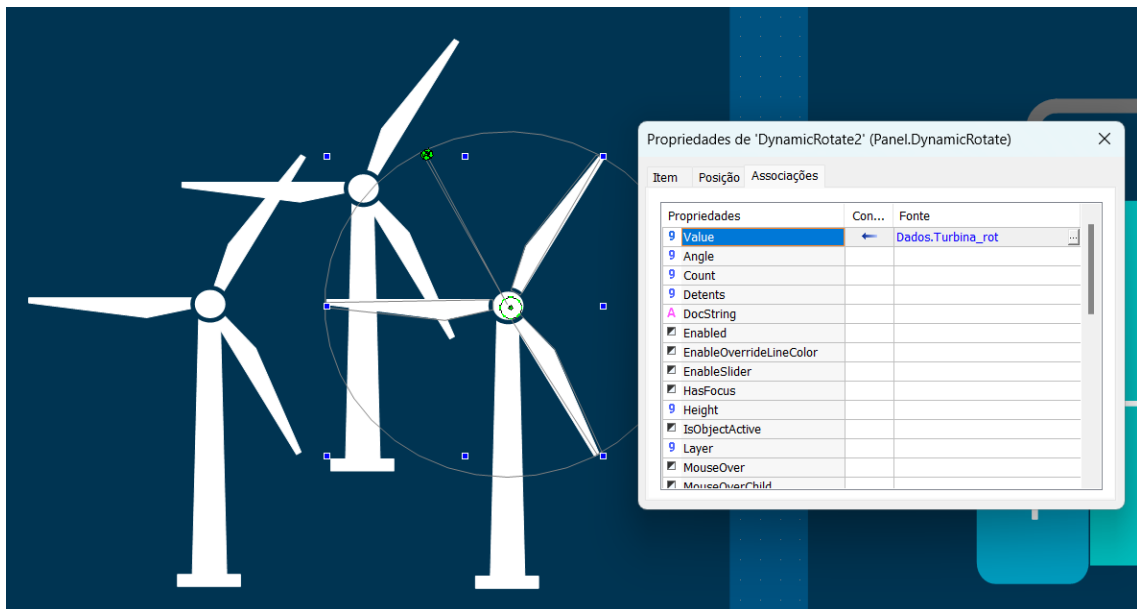
Figura 26 – *Script* criado para realizar a troca entre as telas Menu e de Geração de Energia.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Assim, foram implementadas na tela em questão animações nas ilustrações características de cada uma das etapas, representando a rotação das turbinas eólicas, a energia no eletrolisador e o enchimento dos cilindros de energia, respectivamente. Essas animações foram realizadas através de associações diretas em cada um dos objetos com *tags* demo específicas criadas para representar cada movimento, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Associação direta utilizada para a implementação da animação das turbinas eólicas.



Fonte: (Própria autora, 2024).

4.1.2 Geração de Energia

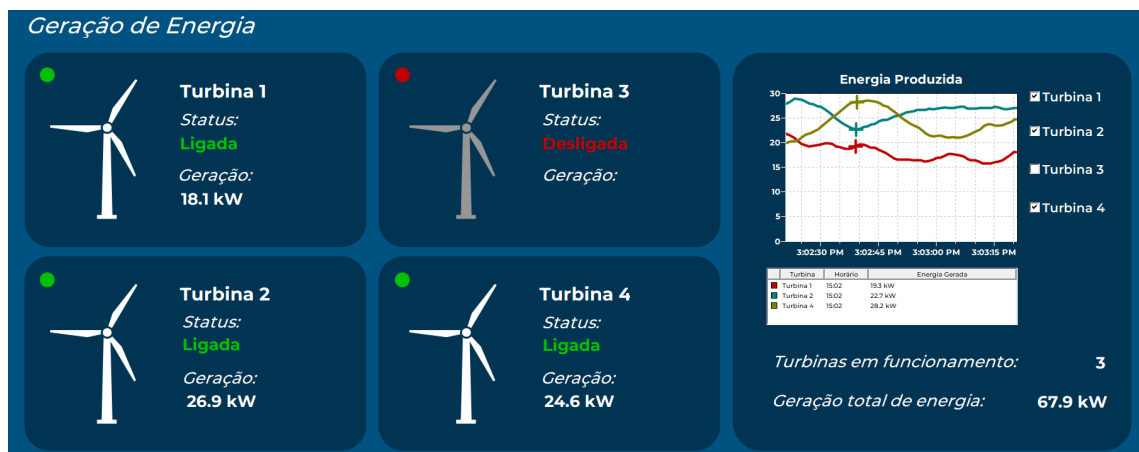
A tela de Geração de Energia representa a primeira etapa do processo P2G. Nessa tela, o usuário deve ser capaz e monitorar dados específicos de *status* e geração de cada

turbina, bem como a geração total de energia da etapa. A Figura 28 ilustra a tela de Geração de Energia desenvolvida.

A tela conta com funcionalidades como *displays* para a representar o *status* de cada turbina, seja essa ligada ou desligada, além de dados de geração de energia de cada uma. Além disso, a tela conta com uma seção gráfica da geração de energia, um elemento *E3Chart*, onde o usuário pode acompanhar em tempo real a geração de cada turbina. As *check boxes* permitem, através do uso de *scripts*, demonstrados na Figura 29, que sejam escolhidas quais as penas a serem representadas no gráfico, de forma a auxiliar a visualização e necessidades do usuário.

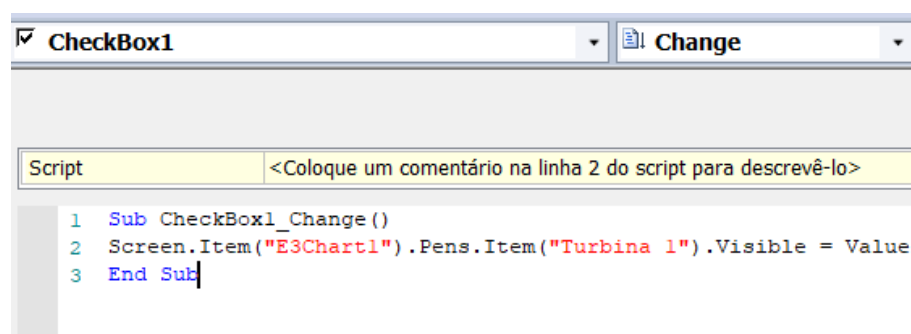
O uso de associações permite que o supervisor também ilustre de forma clara quais as turbinas em funcionamento e quais as desligadas, através da mudança de cor das mesmas, como demonstrado na Figura 30. Foram utilizadas associações do tipo digital para realizar a mudança de cores com base no valor de uma *tag* interna representando o *status* de cada turbina.

Figura 28 – Tela da etapa de Geração de Energia do processo P2G.



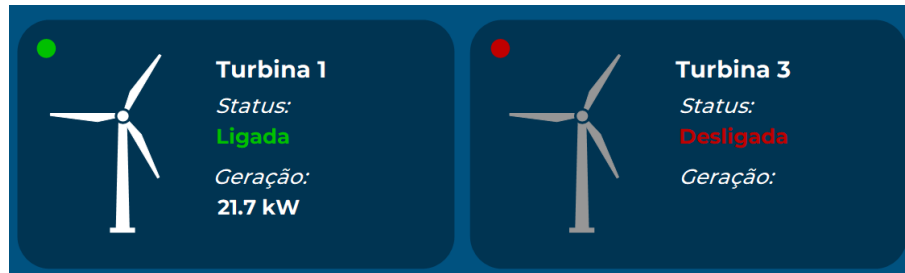
Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 29 – Script associado as *check-boxes* da tela, para controle dos dados representados no *E3Chart*.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 30 – Comparação entre a representação de uma turbina eólica em funcionamento e desligada.

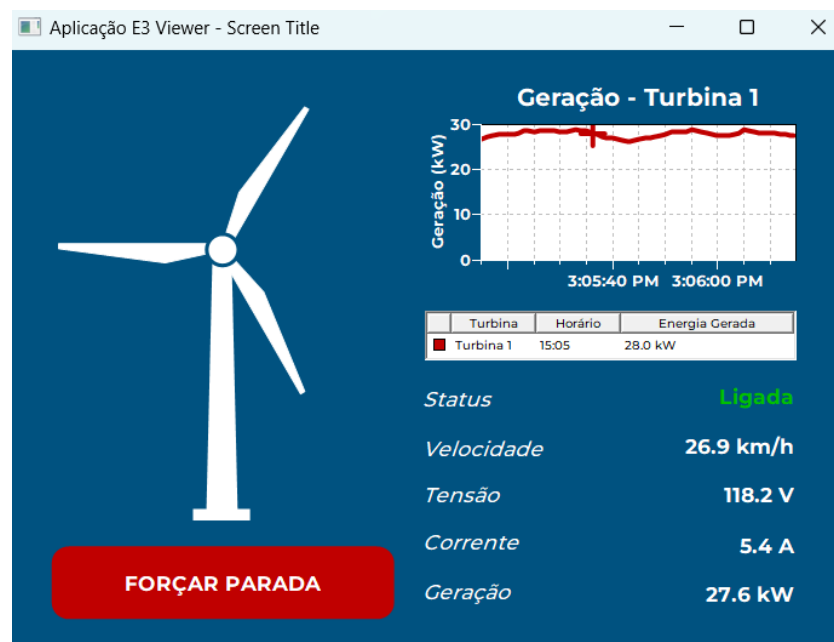


Fonte: (Própria autora, 2024).

4.1.2.1 Telas *Pop-Up*

Dentro da tela de Geração de Energia, foram implementadas telas auxiliares do tipo *pop-up*, conforme demonstrado na Figura 31, com o objetivo de fornecer informações mais detalhadas sobre o funcionamento de cada turbina e permitir o controle em casos de emergência.

Figura 31 – Tela *Pop-Up* dos dados de funcionamento da Turbina 1.



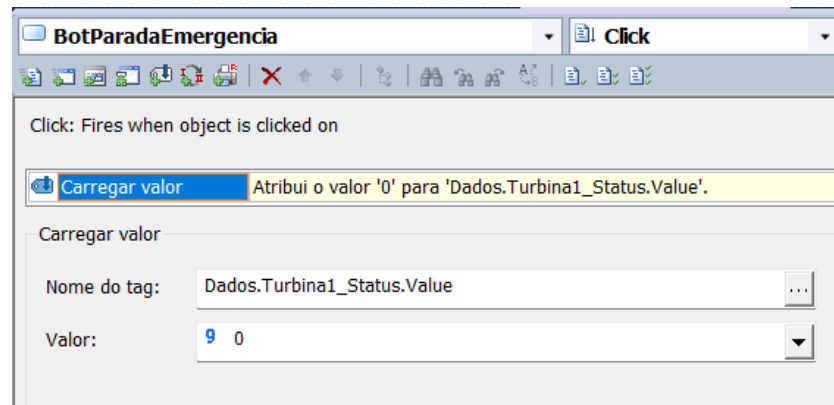
Fonte: (Própria autora, 2024).

Cada tela exibe informações mais específicas de cada turbina, como *status*, velocidade, tensão, corrente e geração de cada uma, além de também contar com uma interface gráfica *E3Chart*, possibilitando o acompanhamento dos dados de geração da turbina em tempo real.

Ademais, a tela permite também o controle da turbina em casos emergenciais por meio de um botão. Nesse caso, o sistema permite que o operador faça uma parada emergencial do funcionamento da turbina caso essa esteja exibindo algum comportamento fora do

esperado. Esse processo foi realizado através de *scripts*, representado na Figura 32, que permitem o carregamento do valor "0", representando seu desligamento, dentro da variável que representa o *status* da turbina, por meio de um clique.

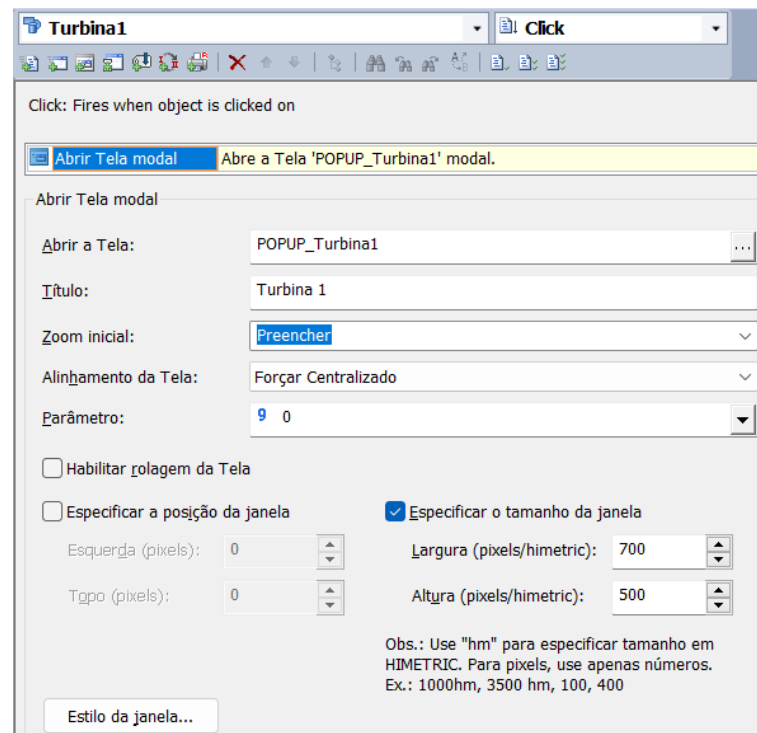
Figura 32 – *Script* associado ao botão de parada e emergência para a troca de valores no *status* da turbina.



Fonte: (Própria autora, 2024).

As telas *pop-up* foram implementadas através do uso de *scripts*, permitindo a abertura de telas modais quando realizado o clique em cada turbina específica. O *script* em questão está representado na Figura 33.

Figura 33 – *Script* para a abertura de uma Tela Modal dentro da tela de Geração de Energia.



Fonte: (Própria autora, 2024).

4.1.3 Eletrólise da Água

No decorrer deste trabalho, foram desenvolvidas telas personalizadas para cada um dos eletrolisadores abordados no Capítulo 2 (AWE, SOE e PEM). Além da criação das interfaces personalizadas, foi estabelecido um conjunto específico de variáveis a serem monitoradas ao longo do processo de eletrólise da água. Isso inclui aspectos como eficiência do processo, densidade de corrente, temperatura de operação, consumo de energia e a produção de hidrogênio e subprodutos.

Para cada um dos eletrolisadores, foram ajustados os intervalos de operação e configurados alarmes adequados. Essas configurações foram elaboradas com base nas particularidades de cada tecnologia, conforme detalhado nas Tabelas 2 - 4.

4.1.3.1 AWE

Conforme estabelecido no Capítulo 3, a tela de eletrólise da água deve ser capaz de fornecer ao usuário dados específicos da etapa e permitir também o controle do processo. Levando em consideração a interface ilustrada pela Figura 34, foi desenvolvido, representando a tela de monitoramento do eletrolisador na planta, neste caso, um eletrolisador do tipo AWE.

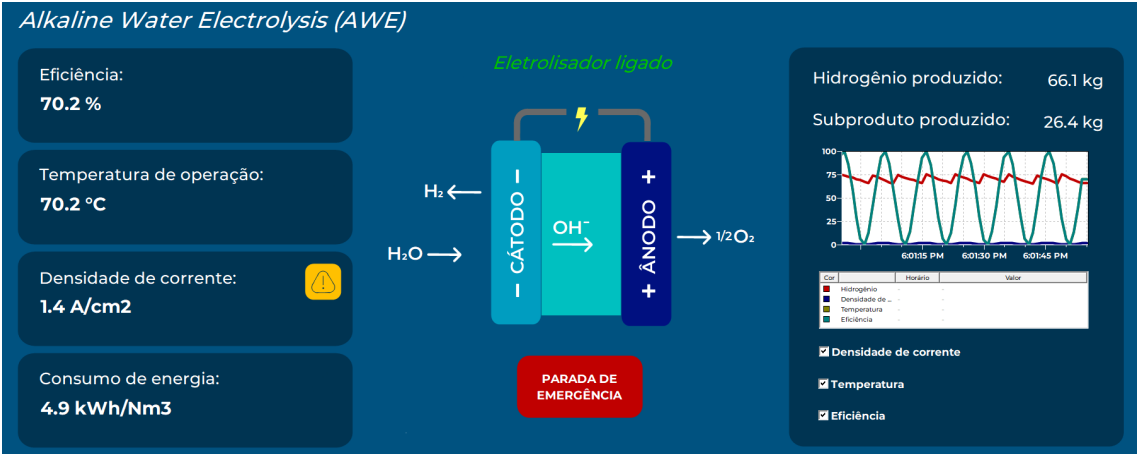
A tela conta com funcionalidades como a utilização de *displays* para a exibição dos dados de interesse do sistema e representação do *status* do eletrolisador, seja ele ligado ou desligado, além de um gráfico que permite a comparação e visualização da evolução dos dados em tempo real.

Ademais, foram utilizados elementos gráficos ilustrativos para realizar a sinalização de alertas nos dados do eletrolisador. A definição dos parâmetros de alerta foram realizadas com base nos dados estudados e representados pela Tabela 2. Pode-se observar na Figura 34 que o parâmetro de densidade de corrente do eletrolisador está fora da área de operação especificada para o mesmo, por esta razão é acionado o alerta, transmitindo ao operador a informação de que pode-se existir um possível problema. Uma vez que os demais dados ilustrados estão dentro da faixa de operação normal do eletrolisador, nenhum alerta é mostrado.

A tela permite que operador efetue também o controle do eletrolisador, ou seja, este pode ativar o eletrolisador e, se necessário, efetuar sua parada de emergência, as diferentes representação do eletrolisador estão ilustradas na Figura 35. Esse processo é realizado através da utilização de um *script* para troca do valor booleano associado ao *status* do eletrolisador, “1” para ligado e “0” para desligado, conforme demonstrado pela Figura 36.

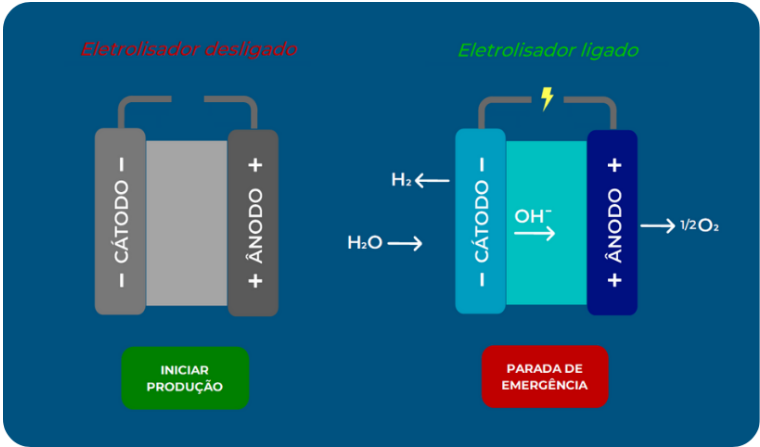
Por fim, pequenas animações também foram implementadas na tela para ilustrar o funcionamento do eletrolisador, e por onde cada insumo, produto e subproduto está entrando e saindo do mesmo, conforme descrito pelas equações químicas que regem o funcionamento da célula de eletrólise.

Figura 34 – Tela da etapa de Eletrólise da Água - Eletrolisador AWE.



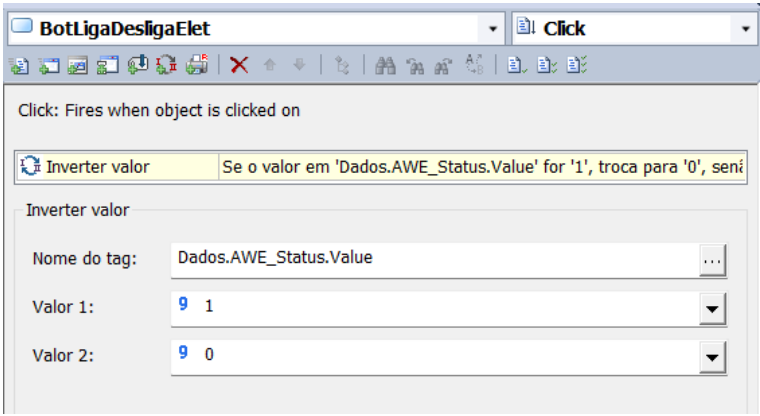
Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 35 – Comparação da representação do eletrolisador AWE ligado e desligado.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 36 – Script implementado para controle do eletrolisador AWE.

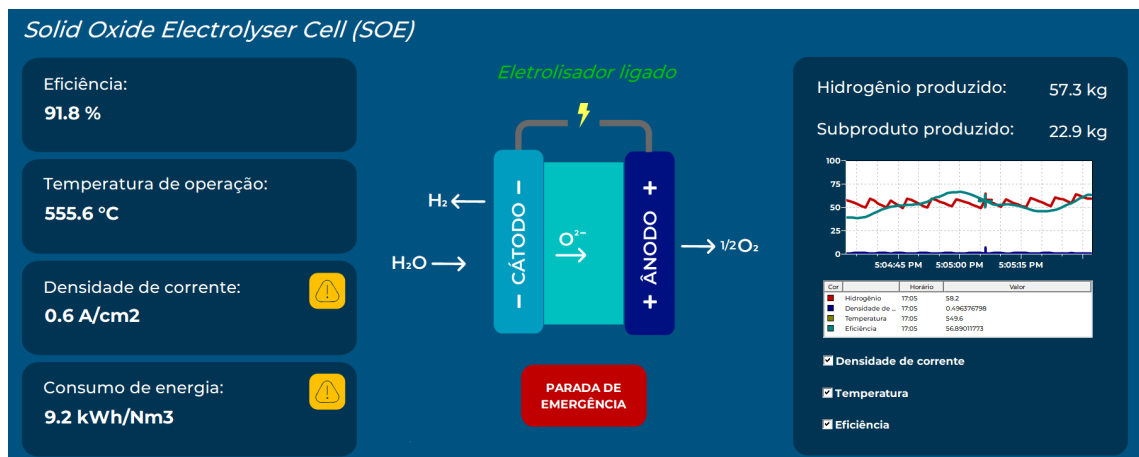


Fonte: (Própria autora, 2024).

4.1.3.2 SOE

A tela desenvolvida para o monitoramento do eletrolisador SOE segue os mesmos princípios e possui as mesmas funcionalidades descritas na subseção anterior, referentes ao eletrolisador AWE. Neste caso, foram apenas ajustados os parâmetros para que fossem adequados a faixa de operação normal do eletrolisador SOE, descritas pela Tabela 3, e a representação da célula de eletrólise. A Figura 37 ilustra a tela desenvolvida.

Figura 37 – Tela da etapa de Eletrólise da Água - Eletrolisador SOE.

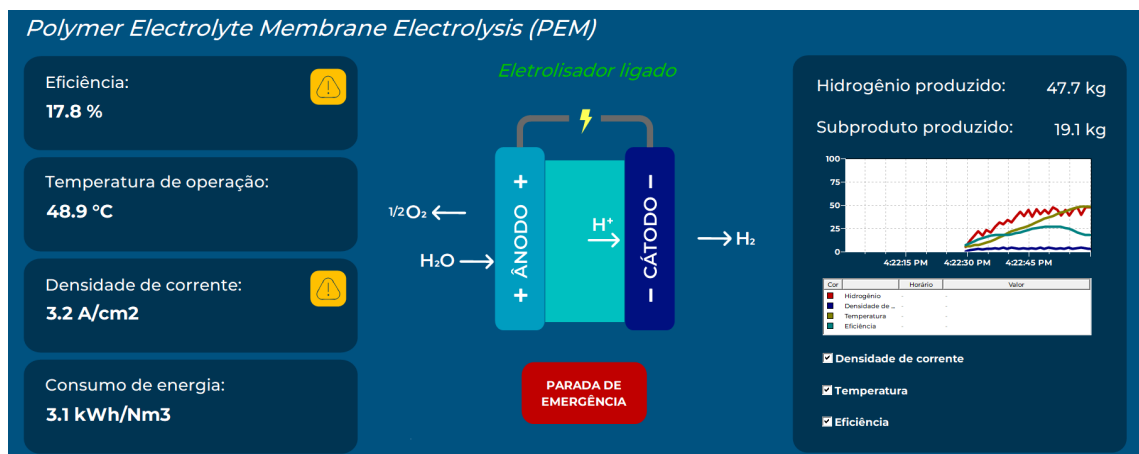


Fonte: (Própria autora, 2024).

4.1.3.3 PEM

O desenvolvimento da tela do eletrolisador PEM seguiu o mesmo raciocínio aplicado nas seções anteriores, resultando na tela demonstrada pela Figura 38. Para o ajuste dos parâmetros foi utilizada como base a Tabela 4.

Figura 38 – Tela da etapa de Eletrólise da Água - Eletrolisador PEM.

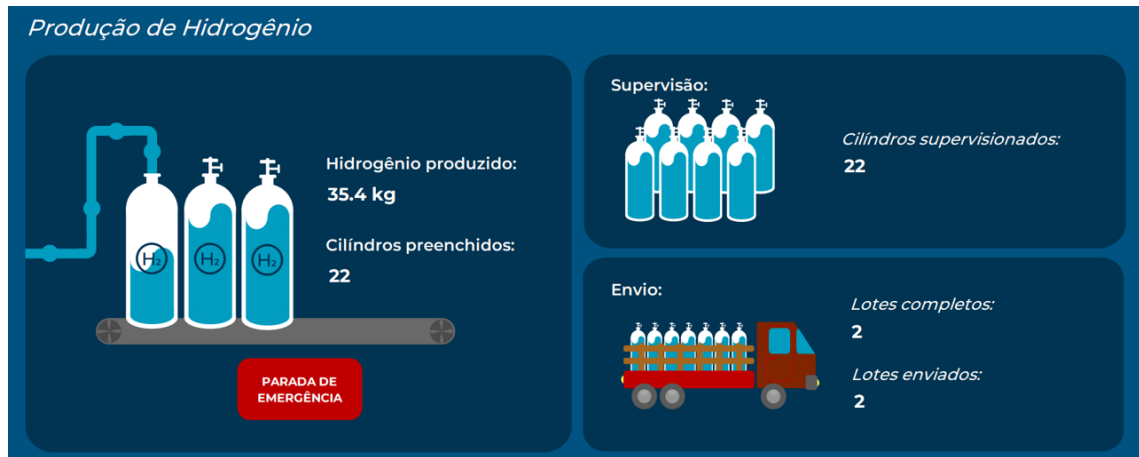


Fonte: (Própria autora, 2024).

4.1.4 Armazenamento de Hidrogênio

Conforme detalhado no capítulo anterior, a interface da etapa de Armazenamento de Hidrogênio, ilustrada na Figura 39, deve fornecer ao operador informações relacionadas ao hidrogênio produzido, à quantidade de cilindros preenchidos, à quantidade de cilindros supervisionados, de lotes formados e à quantidade de lotes enviados ao destino final.

Figura 39 – Tela de Armazenamento de Hidrogênio do sistema P2G.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Ademais, a tela também permite que o operador controle a linha de produção do envasamento dos cilindros de hidrogênio, permitindo que esse efetue a parada emergencial do processo, ou inicie o mesmo, de maneira similar ao realizado no controle dos eletrolisadores, ilustrado na Figura 36.

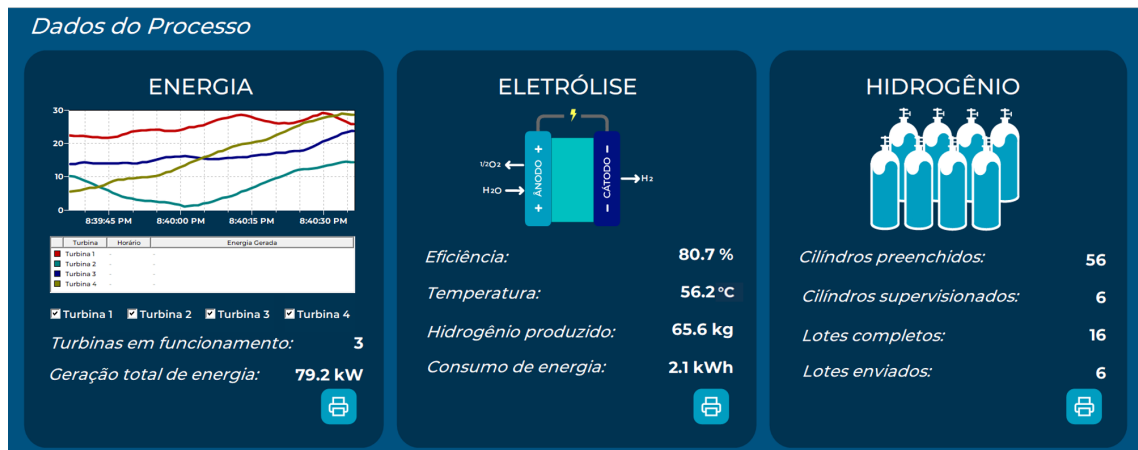
4.1.5 Dados

Conforme estabelecido no Capítulo 3, a tela de dados tem como principal objetivo concentrar em sua interface os dados de maior importância que serão monitorados pelo sistema P2G. Esta é uma tela cujo acesso tipicamente é restrito a personas de maior hierarquia dentro do processo, como o Engenheiro Geral e o Executivo.

As informações apresentadas pela tela de dados devem permitir uma análise do sistema por completo através de elementos que auxiliem na interpretação dos dados, como por exemplo gráficos de tendência. A Figura 40 ilustra a tela de monitoramento de dados criada para o sistema.

Dentre as funcionalidades aplicadas na tela ilustrada pela Figura 40, estão a demonstração de dados na tela através de *displays*, o uso do *E3Chart* para o acompanhamento em gráfico das variáveis de geração de energia, e a geração de relatórios.

Figura 40 – Tela de monitoramento de dados do sistema P2G.



Fonte: (Própria autora, 2024).

4.1.5.1 Relatórios

Como descrito no processo de definição de personas e de telas realizado no Capítulo 3, a geração de relatórios é um fator de extrema importância dentro do processo, pois permite que o usuário tenha acesso de forma fácil e organizada a todas as variáveis e como essas se comportaram ou foram alteradas dentro de um determinado espaço de tempo. Nesse contexto, foram implementadas dentro da interface três possibilidades de geração de relatórios, vinculadas a cada uma das etapas do processo.

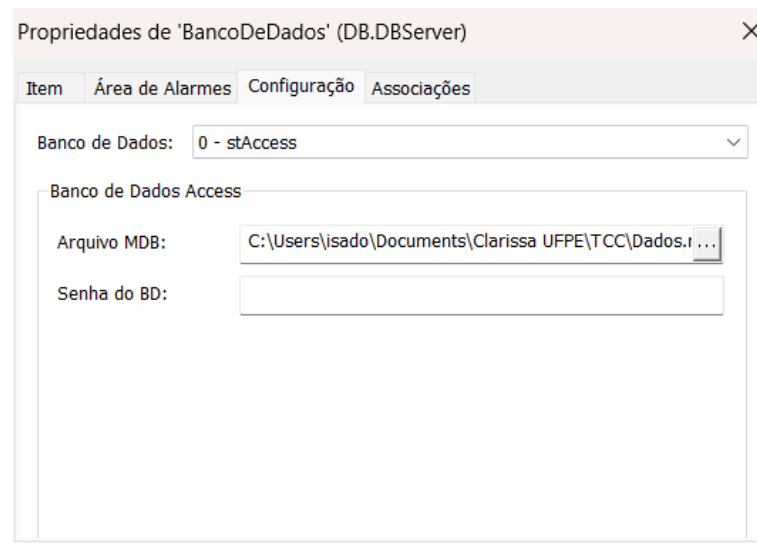
A geração dos relatórios é feita por meio da utilização de bancos de dados e históricos dentro do sistema. O processo de armazenamento de dados dentro do Elipse E3 é utilizado para guardar informações do projeto sendo desenvolvido através de fórmulas, históricos e alarmes. Para a aplicação desenvolvida, foi criado um banco de dados do tipo *stAccess*, possibilitando que todas as informações de interesse fossem armazenadas dentro de um arquivo MDB, conforme ilustrado pela Figura 41.

Uma vez criado o banco de dados do sistema, foram então implementados no mesmo três históricos, conforme ilustrado na Figura 42, um para cada uma das etapas do processo, e selecionadas dentro desses os dados de interesse a serem guardados e consequentemente exibidos nos relatórios.

Com os históricos definidos, foram por fim criados os *templates* dos relatórios que seriam gerados pelo sistema supervisor e implementados na interface por meio da utilização de *scripts*. As Figuras 43 e 44 ilustram o *template* criado para o relatório de monitoramento dos dados do eletrolisador, nesse caso exemplificando com o eletrolisador PEM, e o *script* implementado na tela de dados para a geração dos relatórios.

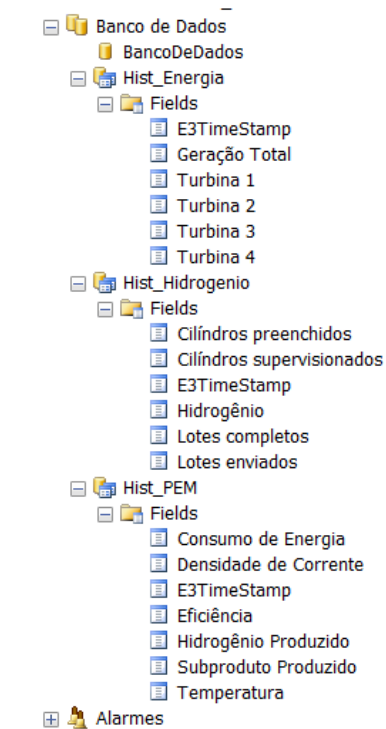
O processo para a criação dos *templates* e implementação dos *scripts* foi então replicado para as demais etapas do processo, possibilitando assim ao usuário a criação de três tipos de relatório com informações essenciais de todo o processo P2G.

Figura 41 – Configurações do banco de dados criado dentro do Elipse E3.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 42 – Banco de dados e históricos criados para a aplicação P2G.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 43 – *Template* criado para o relatório da etapa de eletrólise da água.

POWER-TO-GAS Relatório - Eletrolisador PEM						
Data/Hora	Eficiência (%)	Temperatura (°C)	Densidade de Corrente (A/cm2)	Hidrogênio (kg)	Subproduto (kg)	
E3TimeStamp	Eficiência	Temperatura	Densidade de Corrente	Hidrogênio Produzido	Subproduto Produzido	
1						
2						
3						
TCC - Clarissa			Cezar Menezes Gusmão		Universidade Federal de Pernambuco	

Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 44 – *Script* para a geração de relatórios.

RelatorioPEM

Click

Click: Fires when object is clicked on

Imprimir Relatório

Mostra o Relatório 'Relatorio_PEM' na tela.

Imprimir Relatório

Imprimir Relatório:

Relatorio_PEM

Saída:

☐ Impressora
 ☒ Tela

☐ Especificar a posição da janela
 ☐ Especificar o tamanho da janela

Esquerda (pixels): 0

Largura (pixels/himetric): 0

Topo (pixels): 0

Altura (pixels/himetric): 0

Obs.: Use "hm" para especificar tamanho em HIMETRIC. Para pixels, use apenas números.
Ex.: 1000hm, 3500 hm, 100, 400

Fonte: (Própria autora, 2024).

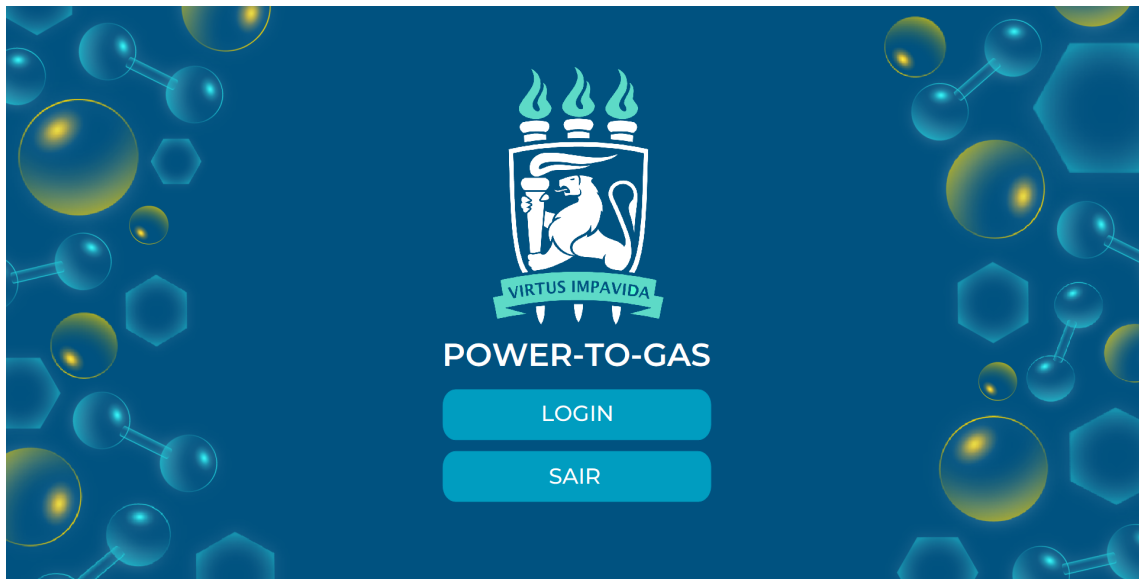
4.2 TELAS AUXILIARES

Esta seção tem como objetivo apresentar as telas auxiliares criadas para o sistema supervisorio em desenvolvimento, juntamente com as funcionalidades aplicadas em cada interface e como essas foram implementadas.

4.2.1 *Login*

Diferentemente das demais telas auxiliares, que permanecem fixas dentro do sistema supervisorio, ajudando a compor a interface juntamente com as telas principais, a tela de *Login* funciona apenas como a tela inicial do sistema supervisorio, conforme ilustrado na Figura 45.

Figura 45 – Tela de *Login* do sistema P2G desenvolvido.

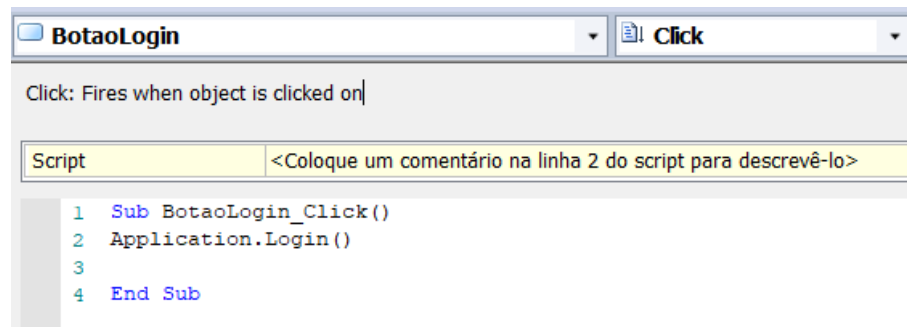


Fonte: (Própria autora, 2024).

A tela é responsável por coletar o nome do usuário e senha do mesmo, permitindo a entrada dentro do sistema, implementando dentro do mesmo as restrições de acesso a depender da hierarquia e necessidades do operador. Uma vez que o usuário insere seu nome e senha, ele é transportado para o quadro principal. O *script* responsável por essa transição encontra-se na Figura 46.

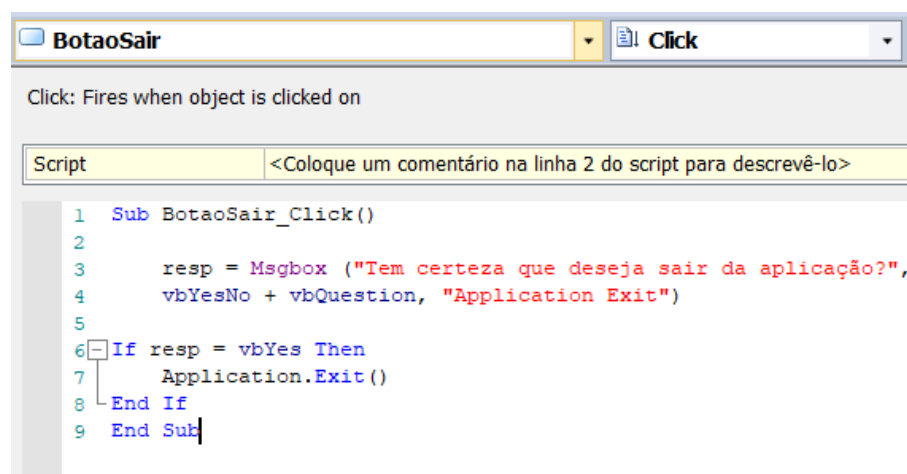
A tela de *login* é também responsável pelo fechamento da aplicação, através do botão "sair", utilizando o *script* ilustrado na Figura 47. Ao pressionar esse botão, o sistema exibe uma caixa de mensagem perguntando se o usuário realmente deseja sair da aplicação. Se a resposta for "Sim", a aplicação é fechada. Se a opção escolhida for "Não", o usuário permanece na tela de *Login*.

Figura 46 – *Script* associado ao botão de *LOGIN*.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 47 – *Script* associado ao botão SAIR, para o fechamento da aplicação.



Fonte: (Própria autora, 2024).

4.2.2 Cabeçalho

A tela de Cabeçalho tem como função apresentar informações do sistema como a data, horário e qual o usuário logado no supervisor, assim como título do processo monitorado. A tela encontra-se representada na Figura 48.

Figura 48 – Tela de Cabeçalho do sistema P2G desenvolvido.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Os dados de data e hora do sistema são adquiridos através de *tags* dentro do sistema e são utilizados *displays* para apresentá-los na tela. O nome do usuário logado, por sua vez, é coletado pelo sistema no momento de *login* do usuário.

4.2.3 Botões

A tela de Botões, ilustrada pela Figura 49, reúne em sua interface uma série de *links* de navegação, implementados através de *scripts* que possibilitam que o usuário transite

com facilidade entre as telas da aplicação.

Figura 49 – Tela de Botões do sistema P2G desenvolvido com legenda.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Cada um dos ícones dispostos na tela, conforme ilustrados pela Figura 49, desempenha uma função específica dentro do sistema. Foram escolhidos ícones convencionais e consequentemente de fácil interpretação por parte do usuário, de forma a proporcionar uma experiência mais intuitiva ao mesmo. Conforme indicado na Figura 49, cada botão tem a seguinte função:

- A: Permite que o usuário retorne para a tela anterior da aplicação;
- B: Redireciona o usuário diretamente para a tela Menu;
- C: Redireciona o usuário diretamente para a tela de Dados;
- D: Permite que, para usuários categorizados como administradores, nesse caso o Engenheiro Geral e Executivo, que efetuem configurações e mudanças nos usuários do sistema;
- E: Permite que o usuário faça o *log-out* da aplicação;
- F: Ícone ilustrativo (sem função implementada) utilizado para indicar o posicionamento da seção de alarmes dentro da interface.

4.2.4 Alarmes

A tela de Alarmes, como seu nome sugere, tem como objetivo apresentar ao usuário de maneira permanente na interface todos os alarmes vinculados as variáveis monitoradas pelo sistema. A Figura 50 demonstra a tela criada.

Figura 50 – Tela de Alarmes do sistema P2G desenvolvido.

Operador	Área	Mensagem	Severidade	Nome da Fonte	Valor	DataHora (Entrada)	DataHora (Reconhecido)	DataHora (Saida)	Predio Ack
PEM		Densidade de corrente baixa	Média	Densidade de Corr. - 0,020		06/19/2024 03:07:19 PM			Sim
PEM		Eficiência baixa	Média	Eficiência	53,38833041	06/19/2024 03:07:13 PM			Sim
Energia		Geração baixa	Baixa	Geração - Turbina 3	5,62059420	06/19/2024 03:07:08 PM			Sim
Energia		Geração baixa	Baixa	Geração - Turbina 4	5,291710864	06/19/2024 03:06:56 PM			Sim
P2G		Temperatura muito alta	Critica	Temperatura	127,2261013	06/19/2024 03:06:53 PM			Sim
Energia		Geração normalizada	Baixa	Geração - Turbina 2	13,77580628	06/19/2024 03:06:40 PM		06/19/2024 03:05:54 PM	Sim
Energia		Geração normalizada	Baixa	Geração - Total	45,34468589	06/19/2024 03:04:18 PM		06/19/2024 03:04:33 PM	Sim

Fonte: (Própria autora, 2024).

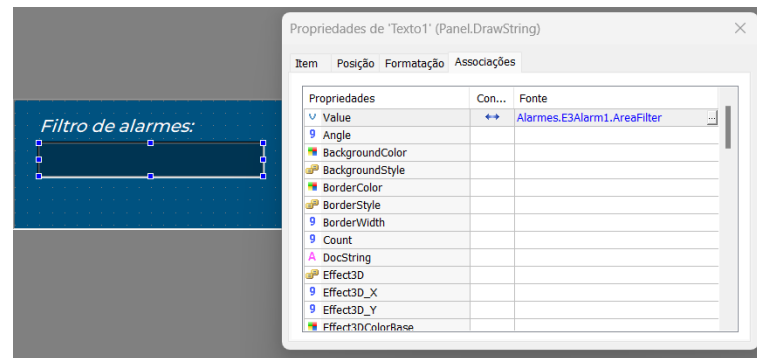
Para atender as funções esperadas pela tela, foi implementada na mesma a função *E3Alarm*, própria do Eclipse E3, que permite que sejam definidos todos os alarmes a serem monitorados pelo sistema, demonstrados na Figura 51. Ademais, foi também aplicado na tela um filtro de alarmes, possibilitando assim que o usuário possa selecionar por etapa quais os alarmes de interesse para o mesmo, divididos entre as seções: Energia, para os alarmes vinculados a etapa de geração de energia, e AWE/SOE/PEM, no caso dos alarmes vinculados ao processo de eletrólise da água. A etapa final do processo P2G, o armazenamento do gás hidrogênio produzido, não possui alarmes vinculados a mesma. O processo de filtragem de alarmes é possível através da utilização de um *script*, ilustrado na Figura 52.

Figura 51 – Lista de alarmes implementados dentro do sistema supervisor P2G.

Nome	Fonte
ConfigAlarmes1	
Energia	
Geração - Turbina 1	Dados.[Turbina1_Geração].Value
Geração - Turbina 2	Dados.[Turbina2_Geração].Value
Geração - Turbina 3	Dados.[Turbina3_Geração].Value
Geração - Turbina 4	Dados.[Turbina4_Geração].Value
Geração - Total	Dados.[Geração_Total].Value
PEM	
Eficiência	Dados.[PEM_Eficiência].Value
Temperatura	Dados.PEM_Temperatura.Value
Densidade de Corrente	Dados.PEM_Densidade_Corrente.Value
Consumo de Energia	Dados.PEM_Consumo_Energia.Value
Turbina 1	
Velocidade 1	Dados.Turbina1_Velocidade.Value
Corrente 1	Dados.Turbina1_Corrente.Value
Tensão 1	Dados.[Turbina1_Tensão].Value
Turbina 2	
Velocidade 2	Dados.Turbina2_Velocidade.Value
Corrente 2	Dados.Turbina2_Corrente.Value
Tensão 2	Dados.[Turbina2_Tensão].Value
Turbina 3	
Velocidade 3	Dados.Turbina3_Velocidade.Value
Corrente 3	Dados.Turbina3_Corrente.Value
Tensão 3	Dados.[Turbina3_Tensão].Value
Turbina 4	
Velocidade 4	Dados.Turbina4_Velocidade.Value
Corrente 4	Dados.Turbina4_Corrente.Value
Tensão 4	Dados.[Turbina4_Tensão].Value

Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 52 – Associação bidirecional para a realização do filtro de alarmes.



Fonte: (Própria autora, 2024).

4.3 INTERFACE COMPLETA

Considerando todas as funcionalidades abordadas nos supervisórios desenvolvidos para as três tecnologias de catalisador, a interface completa do sistema está detalhadamente descrita na seção de Anexo A deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, realizou-se um estudo comparativo entre as três principais tecnologias de eletrolisadores presentes no mercado, AWE, SOE e PEM. O objetivo foi compreender os princípios de funcionamento e características de operação de cada uma dentro de uma planta P2G, visando propor sistemas supervisórios específicos e adaptados para cada tipo de eletrolisador, facilitando sua integração dentro da planta em análise.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, conduziu-se um estudo detalhado do processo de criação de um sistema supervisório, desde a determinação do processo e identificação das personas envolvidas, até o desenvolvimento da interface final, a partir da definição das telas e escolhas de design e arquitetura para propor a melhor experiência do usuário possível.

Nesse contexto, foram determinadas as melhores abordagens e estratégias para a criação do sistema supervisório do processo P2G. O resultado obtido foi uma interface coesa e ambos esteticamente e funcionalmente interessantes para o usuário final, sendo atingidos todos os objetivos e necessidades propostos para cada uma das personas definidas, através de funcionalidades aplicadas em cada uma das telas, e mantendo-se estruturalmente e esteticamente coerente.

Portanto, pode-se concluir que os sistemas supervisórios desenvolvidos cumprem com todos os requisitos previamente estabelecidos por este trabalho. Ou seja, foram atendidos todos os objetivos e necessidades e todas as funcionalidades planejadas foram implementadas nas interfaces, respeitando os critérios de criação de um design UX/UI de alta performance e criando um produto interessante ao cliente final.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A seguir, destacam-se algumas sugestões de trabalhos futuros relacionados ao que foi desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso:

- **Aquisição de licença do *software Eclipse E3*:** Com o intuito realizar a conexão efetiva do sistema supervisório desenvolvido como produto deste trabalho à uma planta P2G, o que não foi possível devido às limitações da versão *demo* do *software*;
- **A ampliação do sistema supervisório:** Expansão para abranger sistemas maiores, como plantas do tipo *Power-To-Power* (P2P);
- **Avaliar os aspectos referentes à inserção de uma planta solar fotovoltaica como fonte de energia renovável:** Expansão do sistema para atender a mais fontes de energia renovável, como o caso da solar fotovoltaica;

- **Análises de eficácia e eficiência:** Desenvolvimento de análises práticas para avaliar como a eficácia e a eficiência de uma planta P2G são impactadas pela implementação de um sistema supervisor.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. *O que são Sistemas Supervisórios?* 2021. Acesso em Fevereiro de 2024. Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/o-que-sao-sistemas-supervisorios/>>.
- AUTOMATION, I. S. of. *ANSI/ISA-101.01-2015, Human Machine Interfaces for Process Automation Systems*. 2015. Acesso em Junho de 2024. Disponível em: <<https://www.isa.org/products/ansi-isa-101-01-2015-human-machine-interfaces-for>>.
- CAPURSO, T.; STEFANIZZI, M.; TORRESI, M.; CAMPOREALE, S. Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy Conversion and Management*, v. 251, p. 114898, 2022. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421010748>>.
- CARMO, M.; FRITZ, D. L.; MERGEL, J.; STOLTEN, D. A comprehensive review on pem water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 38, n. 12, p. 4901–4934, 2013. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913002607>>.
- ELIPSE. *Elipse E3*. s.d. Acesso em Março de 2024. Disponível em: <<https://www.elipse.com.br/produto/elipse-e3/>>.
- EPE. *Balanco Energético Nacional 2021*. [S.l.], 2021.
- GAUSHELL, D. J.; DARLINGTON, H. T. Supervisory control and data acquisition. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 75, n. 12, p. 1645–1658, 1987.
- GOTZ, M.; LEFEBVRE, J.; MÖRS, F.; McDaniel Koch, A.; GRAF, F.; BAJOHR, S.; REIMERT, R.; KOLB, T. Renewable power-to-gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, v. 85, p. 1371–1390, 2016. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115301610>>.
- HOLLIFIELD, B. A high performance hmi: Better graphics for operations effectiveness. In: *2012 Water/Wastewater and Automation Controls Symposium*. [S.l.: s.n.], 2012.
- IKAHEIMO, J.; WEISS, R.; KIVILUOMA, J.; PURSIHEIMO, E.; LINDROOS, T. J. Impact of power-to-gas on the cost and design of the future low-carbon urban energy system. *Applied Energy*, v. 305, p. 117713, 2022. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921010643>>.
- INDUSTRIA, P. da. *Indústria 4.0: Entenda seus conceitos e fundamentos*. s.d. Acesso em Fevereiro de 2024. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/>>.
- KAMIZI, S. A. Ui/ux of human-machine interface for industrial application: Review and preliminary design. In: . [S.l.: s.n.], 2021.
- KUMAR, S. S.; HIMABINDU, V. Hydrogen production by pem water electrolysis—a review. *Materials Science for Energy Technologies*, Elsevier, v. 2, n. 3, p. 442–454, 2019.

LEBROUHI, B.; DJOUPO, J.; LAMRANI, B.; BENABDELAZIZ, K.; KOUSKSOU, T. Global hydrogen development - a technological and geopolitical overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, n. 11, p. 7016–7048, 2022. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921047765>>.

LEONG, D.; TEO, K.; RANGARAJAN, S.; LOPEZ-JARAMILLO, P.; JR, A. A.; ORLANDINI, A. et al. World population prospects 2019. department of economic and social affairs population dynamics. new york (ny): United nations; 2019 (<https://population.un.org/wpp/download/>, accessed 20 september 2020). the decade of healthy ageing. geneva: World health organization. *World*, JSTOR, v. 73, n. 7, p. 362k2469, 2018.

MERGEL, J.; CARMO, M.; FRITZ, D. Status on technologies for hydrogen production by water electrolysis. In: _____. [S.l.: s.n.], 2013. p. 423–450. ISBN 9783527332397.

MILANEZ, A. Y.; MANCUSO, R. V.; GODINHO, R. D.; POPPE, M. K. O acordo de paris e a transição para o setor de transportes de baixo carbono: o papel da plataforma para o biofuturo. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017.

SANTOS, D. M.; SEQUEIRA, C. A.; FIGUEIREDO, J. L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 36, p. 1176–1193, 2013.

SENSENBACH, R. *HMI Extreme Makeover: Customizing a Navigation System for Your Industrial Interface*. 2018. Acesso em Fevereiro de 2024. Disponível em: <<https://inductiveautomation.com/blog/hmi-extreme-makeover-customizing-a-navigation-system-for-your-industrial-interface>>.

SILVA, M. F. *Acordo de Paris*. s.d. Acesso em Março de 2024. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html#:~:text=No%20que%20diz%20respeito%20ao>>.

TICHLER, R.; BAUER, S.; BOHM, H. 25 - power-to-gas. In: LETCHER, T. M. (Ed.). *Storing Energy (Second Edition)*. Second edition. Elsevier, 2022. p. 595–612. ISBN 978-0-12-824510-1. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128245101000106>>.

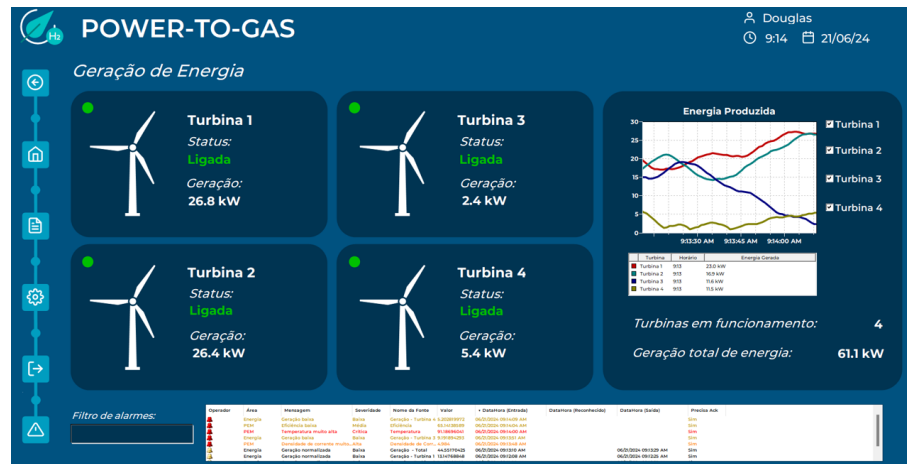
WANG, T.; CAO, X.; JIAO, L. Pem water electrolysis for hydrogen production: fundamentals, advances, and prospects. *Carbon Neutrality*, Springer, v. 1, n. 1, p. 21, 2022.

YADAV, G.; PAUL, K. Architecture and security of scada systems: A review. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Elsevier, v. 34, p. 100433, 2021.

ZANGHI, E. Sistemas scada: Conceitos. *Proteção e Comunicação de Sistemas Elétricos de Potência*, 2019.

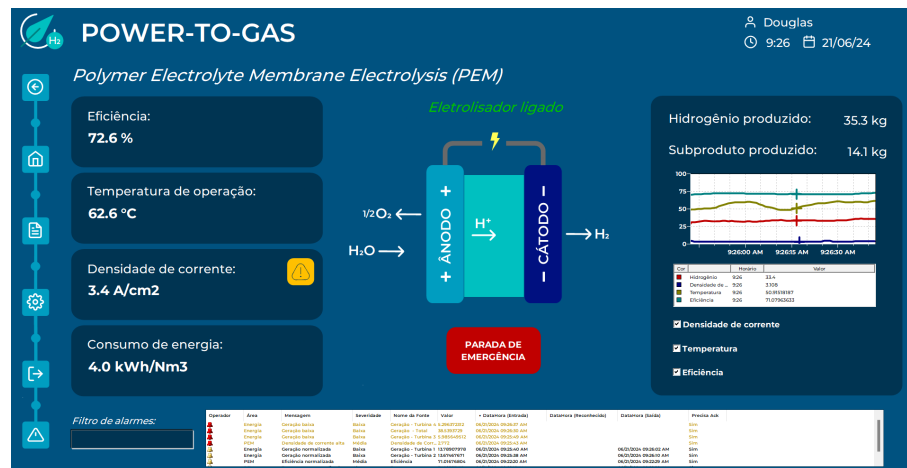
ZOULIAS, E.; VARKARAKI, E.; LYMBEROPOULOS, N.; CHRISTODOULOU, C. N.; KARAGIORGIS, G. N. A review on water electrolysis. *Tcjt*, v. 4, n. 2, p. 41–71, 2004.

Figura 55 – Interface de Geração de Energia do sistema supervisorio P2G.



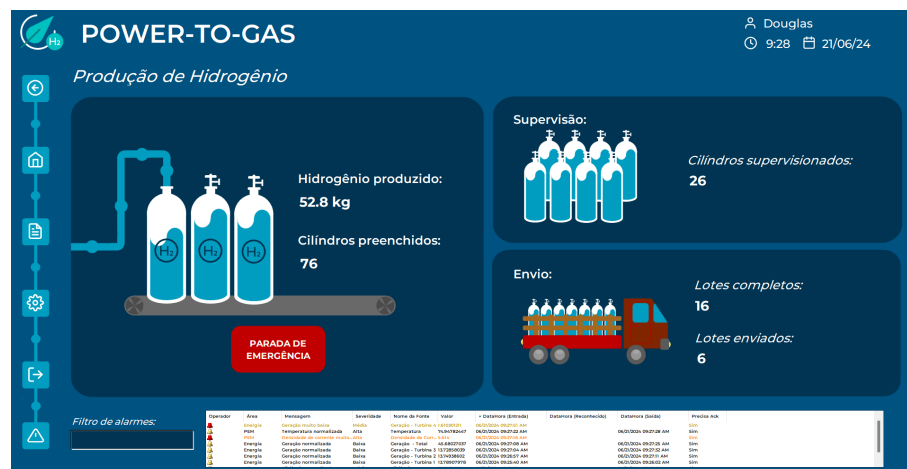
Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 56 – Interface de Eletrólise da Água do sistema supervisorio P2G.



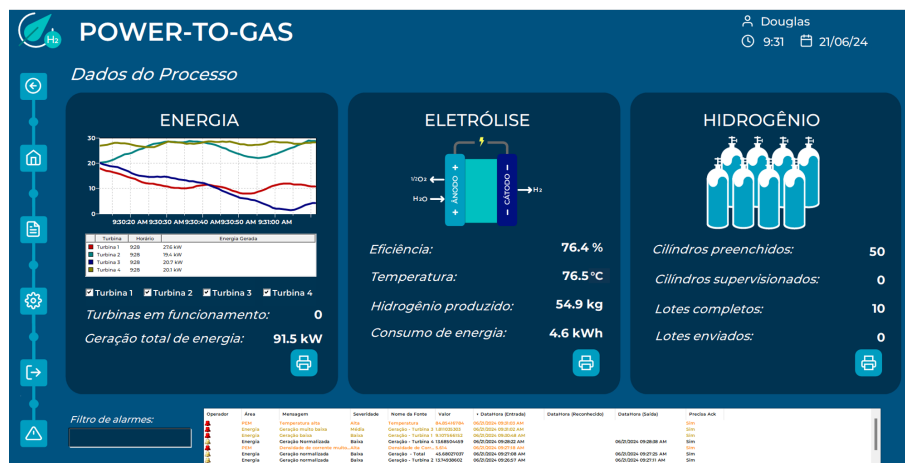
Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 57 – Interface de Armazenamento de Hidrogênio do sistema supervisorio P2G.



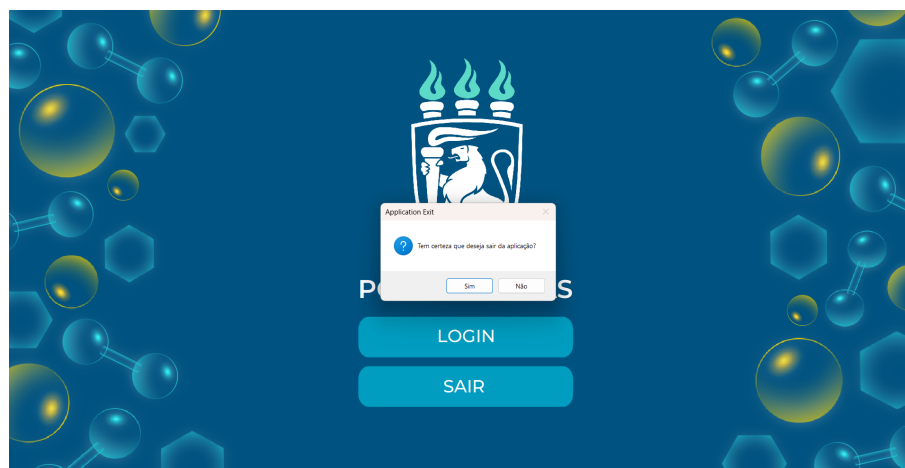
Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 58 – Interface de Dados do sistema supervisorio P2G.



Fonte: (Própria autora, 2024).

Figura 59 – Interface de Logout do sistema supervisorio P2G.



Fonte: (Própria autora, 2024).