



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE CAMPUS MARACANAÚ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS
MESTRADO ACADÊMICO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

GLAUBER JEAN ALVES NARCISO

**APLICAÇÃO DE CIÊNCIA DE DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS
PARÂMETROS IDEAIS DE OPERAÇÃO DE UM ELETROLISADOR DE
HIDROGÊNIO VERDE**

**MARACANAÚ
2024**

GLAUBER JEAN ALVES NARCISO

APLICAÇÃO DE CIÊNCIA DE DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS
PARÂMETROS IDEAIS DE OPERAÇÃO DE UM ELETROLISADOR DE
HIDROGÊNIO VERDE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria

Coorientador: Prof. Dr. Bruno César Barroso Salgado

MARACANAÚ

2024

GLAUBER JEAN ALVES NARCISO

APLICAÇÃO DE CIÊNCIA DE DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS
PARÂMETROS IDEAIS DE OPERAÇÃO DE UM ELETROLISADOR DE
HIDROGÊNIO VERDE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria (Orientador)
Departamento de Indústria, Campus Fortaleza (IFCE)

Prof. Dr. Bruno César Barroso Salgado (Coorientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE)

Prof.º Dr. Enio Pontes de Deus
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nélio Costa Freitas
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE)

A Deus.

A minha esposa.

A minha filha.

Aos meus pais.

Ao meu irmão, irmãs e demais familiares.

Aos mestres.

“Acredito que um dia a água será usada como combustível, que o hidrogênio e o oxigênio que a constituem, usados de forma isolada ou simultânea, oferecerão uma fonte inesgotável de calor e luz a uma intensidade superior à do carvão mineral.”

(Júlio Verne, A Ilha Misteriosa (1875))

RESUMO

A aplicação de *Data Science* tem se expandido consideravelmente no ambiente corporativo, possibilitando a extração de insights valiosos e a otimização de resultados a partir de grandes volumes de dados, comumente referidos como *big data*. No campo da engenharia de confiabilidade, a maximização da eficiência e da capacidade produtiva dos ativos é um fator crucial para garantir a sustentabilidade econômica e operacional das empresas. Diante desse contexto, o presente estudo faz uso de técnicas de *Data Science* com o objetivo de determinar os parâmetros operacionais ideais de um eletrolisador de hidrogênio verde do tipo *Proton Exchange Membrane (PEM)*, uma tecnologia emergente e de grande relevância para os esforços globais de descarbonização. Para alcançar esse objetivo, primeiramente, foi calculada a eficiência do eletrolisador. Em seguida, foi realizada uma análise das variáveis que influenciam essa eficiência, com base nos dados de telemetria coletados das máquinas. Posteriormente, foram conduzidas avaliações estatísticas, incluindo o cálculo dos coeficientes de correlação linear de Pearson juntamente com análise estatística descritiva, análise exploratória e dispersão dos dados, para identificar correlações fortes e fracas entre as variáveis. Com essas análises, foi possível determinar o conjunto de variáveis operacionais-chave que impactam diretamente o desempenho do eletrolisador. O método utilizado foi baseado no processo de *Knowledge Discovery in Databases (KDD)*, um procedimento iterativo para identificar padrões válidos, novos, úteis e interpretáveis a partir de grandes bases de dados. Para a manipulação e análise desses dados, foi empregada a linguagem de programação Python, utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, SciPy, Matplotlib, Seaborn, Plotly, Pandas Profiling e Sweetviz. Além disso, foi desenvolvido um algoritmo capaz de retornar os valores máximos, mínimos e médios dos parâmetros operacionais que devem ser obedecidos para alcançar a máxima eficiência do eletrolisador, que, no equipamento estudado, foi de 72,7%.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Eletrolisador PEM. Ciência de Dados. Eficiência Operacional. Estatística.

ABSTRACT

The application of *Data Science* has considerably expanded in the corporate environment, enabling the extraction of valuable insights and the optimization of results from large volumes of data, commonly referred to as *big data*. In the field of reliability engineering, maximizing the efficiency and productive capacity of assets is a crucial factor in ensuring the economic and operational sustainability of companies. In this context, the present study uses *Data Science* techniques with the objective of determining the optimal operational parameters of a green hydrogen electrolyzer of the *PEM* type, an emerging technology of great relevance to global decarbonization efforts. To achieve this objective, the efficiency of the electrolyzer was first calculated. Next, an analysis of the variables influencing this efficiency was conducted, based on telemetry data collected from the machines. Subsequently, statistical evaluations were performed, including the calculation of Pearson's linear correlation coefficients along with descriptive statistical analysis, exploratory data analysis, and data dispersion, to identify strong and weak correlations between variables. Through these analyses, it was possible to determine the set of key operational variables that directly impact the electrolyzer's performance. The method used was based on the *KDD* process, an interactive procedure for identifying valid, novel, useful, and interpretable patterns from large databases. For data manipulation and analysis, the Python programming language was employed, using libraries such as Pandas, NumPy, SciPy, Matplotlib, Seaborn, Plotly, Pandas Profiling, and Sweetviz. Additionally, an algorithm was developed to return the maximum, minimum, and average values of the operational parameters that should be followed to achieve the maximum efficiency of the electrolyzer, which, in the studied equipment, was 72.7%.

Keywords: Green Hydrogen. PEM Electrolyzer. Data Science. Operational Efficiency. Statistic

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Temperatura Média Global da Superfície	19
Figura 2 – O aquecimento nos últimos 30 anos é muito mais rápido do que a tendência de longo prazo	21
Figura 3 – Estrutura política abrangente para a transição energética	23
Figura 4 – A geração de energia precisa mais que triplicar até 2050 no cenário de 1,5°C	24
Figura 5 – Cadeia de Produção e Aplicações do <i>Hidrogênio Verde</i> (H_2V)	25
Figura 6 – Progresso no segmento de energia para alcançar o cenário de 1,5 °C até 2050	26
Figura 7 – Princípio de Operação do eletrolisador <i>PEM</i>	27
Figura 8 – Desenho esquemático simplificado de uma <i>stack PEM</i> da classe de potência inferior até 100 kW.	28
Figura 9 – Esquemático de uma Usina de Produção de H_2V	29
Figura 10 – Codificação dos tipos de hidrogênio pelo tipo de obtenção	34
Figura 11 – Classificação do hidrogênio por cores	34
Figura 12 – Cronograma de desenvolvimento da tecnologia de eletrólise de água.	35
Figura 13 – Representação esquemática do processo de eletrólise	36
Figura 14 – Diferentes tipos de tecnologias de eletrólise disponíveis comercialmente	38
Figura 15 – Eletrolisador alcalino de baixa temperatura	40
Figura 16 – Projeto de uma <i>stack</i> para produção de H_2V	41
Figura 17 – Esquemático de montagem da célula PEM	43
Figura 18 – Gráfico Mapa de Calor ou Heatmap	48
Figura 19 – Gráfico Pair Plot	48
Figura 20 – Gráficos de Dispersão	49
Figura 21 – Diagrama de Venn aplicado na Ciência de Dados	51
Figura 22 – Nuvem de Palavras da Ciência de Dados	53
Figura 23 – Registro Aéreo da Usina Fotovoltaica	56
Figura 24 – Módulos Jinko da Usina Fotovoltaica	57
Figura 25 – Inversor Sungrow SG250HX	58
Figura 26 – Transformador de Tensão	58
Figura 27 – Tracker- Sistema de Basculamento dos Painéis	59
Figura 28 – Estação Meteorológica	60
Figura 29 – <i>Circuito Fechado de Televisão (CFTV)</i> e Vigilância	60
Figura 30 – Planta de Produção de H_2V	61
Figura 31 – Retificador Weg	62
Figura 32 – Gráfico de Dispersão da Corrente Elétrica x Produção de H_2V	62
Figura 33 – Sistema de Produção e Tratamento de Água	63

Figura 34 – Tanque de Separação de Água Oxigênio e Regua de Nível	64
Figura 35 – Transmissor de pressão diferencial inteligente Modelo PSI.EX.H.DIF	64
Figura 36 – Módulo <i>PEM</i> de Produção de H_2V	66
Figura 37 – Tanque Separador de <i>Hidrogênio</i> (H_2)	68
Figura 38 – Configuração dos <i>stacks</i> do Eletrolisador	68
Figura 39 – <i>Stack</i> Allagash	70
Figura 40 – <i>Stack</i> Merrimack	70
Figura 41 – Analisadores de Oxigênio Bruto e Purificado	71
Figura 42 – Sistema de Análise de Gases	72
Figura 43 – Supervisório de Controle de Produção	73
Figura 44 – Registro de um termovisor medindo a temperatura de combustão da chama no dia da produção da primeira molécula de H_2V do estado	75
Figura 45 – Reportagem do jornal Diário do Nordeste anunciando o lançamento da 1ª planta de hidrogênio verde do estado	76
Figura 46 – Curva da Banheira	76
Figura 47 – Processo de <i>KDD</i>	78
Figura 48 – Diagrama da Arquitetura do Sistema de Telemetria	78
Figura 49 – Dataframe contendo dados brutos	79
Figura 50 – Etapa de Análise Estatística Descritiva	80
Figura 51 – Análise Estatística Descritiva da Eficiência	85
Figura 52 – Modelo da Divisão do Dataframe em Subgrupos	85
Figura 53 – Bibliotecas Python utilizadas na pesquisa	86
Figura 54 – Matriz de Correlação Linear de Person	87
Figura 55 – Histograma Padrão e Acumulado da Eficiência	91
Figura 56 – Matriz de Correlação: Variáveis com maior impacto à eficiência	92
Figura 57 – Infográfico da matriz de correlação linear utilizando uma disposição radial.	95
Figura 58 – Eficiência x Capacidade de Produção)	96
Figura 59 – Eficiência x Condutividade Elétrica	97
Figura 60 – Eficiência x Nível do Tanque de O_2 +Água	97
Figura 61 – Eficiência X Medidor de Pureza de Hidrogênio	98
Figura 62 – Eficiência x Corrente do Motor da <i>Stack</i>	98
Figura 63 – Eficiência x Velocidade do Motor da <i>Stack</i>	99
Figura 64 – Eficiência x Abertura Válvula Filtro Coalescente	100
Figura 65 – Eficiência x Percentual de Abertura Válvula [PV327 (%)]	100
Figura 66 – Eficiência x Corrente DC do Retificador	101
Figura 67 – Eficiência x Tensão 01	101
Figura 68 – Eficiência x Tensão 02	101
Figura 69 – Eficiência x Pressão Gerenciamento Térmico Polimento [PT300 (bar)]	102

Figura 70 – Eficiência x Pressão Bomba Circuito Gerenciamento Térmico [PT304 (bar)]	103
Figura 71 – Eficiência x Pressão Tanque O2-Água [PT307 (bar)]	103
Figura 72 – Eficiência x Pressão Bomba Alimentação do <i>Stack</i> [PT314 (bar)]	104
Figura 73 – Eficiência x Pressão Tanque H2 [PT323 (bar)]	104
Figura 74 – Eficiência x Pressão Saída H2 [PT325 (bar)]	105
Figura 75 – Eficiência x Temp. Saída Gerenciamento Térmico Polimento [TT300 (°C)]	106
Figura 76 – Eficiência x Temp. Saída Trocador LD frio - Gerenciamento Térmico Tanque O2-Água (°C) [TT303 (°C)]	106
Figura 77 – Eficiência x Temperatura Saída <i>Stack</i> Lado Anódico (°C) [TT309 (°C)]	107
Figura 78 – Eficiência x Temperatura Entrada <i>Stack</i> Lado Anódico (°C) [TT310 (°C)]	107
Figura 79 – Eficiência x Temperatura Saída <i>Stack</i> Lado Catódico (°C) [TT311 (°C)]	108
Figura 80 – Eficiência x Temperatura Saída Bomba Polimento (°C) [TT328 (°C)] .	109
Figura 81 – Eficiência x Delta T Anódico da <i>Stack</i> (°C)	109
Figura 82 – Eficiência x Delta T Catódico da <i>Stack</i> (°C)	110
Figura 83 – Parâmetros ideais de operação do eletrolisador	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção global de hidrogênio por fonte	33
Tabela 2 – Especificações para o módulo JKM535M-72HL4-BDVP	57
Tabela 3 – Considerações para uso nos Cálculos de Eficiência	81
Tabela 4 – Variáveis e Constantes da Equação de Eficiência	84
Tabela 5 – Variáveis e Constantes da Equação de Eficiência - Parte 1	89
Tabela 6 – Variáveis e Constantes da Equação de Eficiência - Parte 2	90
Tabela 7 – Estatística Descritiva da Eficiência	91
Tabela 8 – Correlação entre variáveis e eficiência	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AEM</i>	Anion Exchange Membrane Electrolysis
<i>AWE</i>	Alkaline Water Electrolyzer
<i>BoP</i>	Balance of Plant
<i>CA</i>	Alternating Current
<i>CCM</i>	Catalyst-Coated Membrane
<i>ETL</i>	Extract, Transform, Load
<i>HHV</i>	Higher Heating Value
<i>KDD</i>	Knowledge Discovery in Databases
<i>MEA</i>	Membrane Electrode Assembly
<i>PEMWE</i>	Proton Exchange Membrane Water Electrolysis
<i>PEM</i>	Proton Exchange Membrane
<i>SOE</i>	Solid Oxide Electrolyser
<i>SPE</i>	Solid Polymer Electrolyte
<i>TCP/IP</i>	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
<i>VPN</i>	Virtual Private Network
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
C.E	Consumo Específico de Energia
CC	Corrente Contínua
CFTV	Circuito Fechado de Televisão
CH ₄	Metano
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CLP	Controlador Lógico Programável
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
COP21	Conferência das Partes de Paris
COVID-19	coronavírus SARS-CoV-2
CP	Capacidade de Produção
DI	Água Deionizada
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gt	Gigatoneladas
GW	Gigawatt
H ₂	Hidrogênio
H ₂ V	Hidrogênio Verde
HER	Reação de Evolução do Hidrogênio
IHM	Interface Homem-Máquina
KOH	Hidróxido de Potássio

MT	Média Tensão
N ₂ O	Óxido Nitroso
Ni	Óxidos de níquel
O ₂	Oxigênio
OER	Reação de Evolução de Oxigênio
OH-	Íons Hidroxila
OR	Osmose Reversa
PBT	Peso Bruto Total
PCS	Poder Calorífico Superior
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PTL	Camadas Porosas de Transporte
UFV	Unidade Fotovoltaica
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
v/v	Volume por Volume
XIX	Século 19
XVIII	Século 18
XX	Século 20
XXI	Século 21

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Tensão
E	Potencial Máximo entre dois Eletrodos
F	Constante de Faraday
η	Número de elétrons
ΔH	Variação de Entalpia
ΔG	Energia Livre de Gibbs
ΔS	Variação de Entropia
Q	Parcela Térmica
T	Temperatura
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$^{\circ}\text{F}$	Graus Fahrenheit
V_{rev}	Tensão Reversível
V_{tn}	Tensão Termoneutra
$V_{\Delta H}$	Tensão de Entalpia
ΔH°	Variação de Entalpia padrão
ΔG°	Energia Livre de Gibbs padrão
ΔS°	Variação de Entropia padrão
Wp	Watt-pico
A	Ampere
V_{DC}	Tensão
V_{oc}	Tensão de Circuito Aberto
I_{sc}	Corrente de Curto-Circuito
Nm^3/h	Normal metro cúbico por hora
I_{DC}	Corrente DC do Retificador
\dot{m}	Vazão mássica
I_{max}	Corrente máxima do <i>stack</i>
I_{1A}	Corrente <i>stack</i> Allagash 1A
I_{2A}	Corrente <i>stack</i> Allagash 2A
I_{1BC}	Corrente <i>stack</i> Merrimack 1BC
I_{2BC}	Corrente <i>stack</i> Merrimack 2BC
V_{1A}	Tensão <i>stack</i> Allagash 1A

V_{2A}	Tensão <i>stack</i> Allagash 2A
V_{1BC}	Tensão <i>stack</i> Merrimack 1BC
V_{2BC}	Tensão <i>stack</i> Merrimack 2BC

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	29
1.2	Objetivos	30
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	30
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	30
1.3	Organização da Dissertação	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	O potencial do hidrogênio	31
2.1.1	<i>O hidrogênio</i>	31
2.1.2	<i>Produção global de hidrogênio por fonte</i>	32
2.1.3	<i>Classificação do hidrogênio por cores</i>	33
2.2	A eletrólise e o eletrolisador	35
2.2.1	<i>O princípio da eletrólise e a termodinâmica</i>	35
2.2.2	<i>Tipos de eletrolisadores</i>	38
2.2.3	<i>Eletrolisador alcalino</i>	39
2.2.4	<i>Eletrolisador PEM</i>	40
2.2.5	<i>Eletrolisador Óxido Solido</i>	43
2.2.6	<i>Membrana de troca aniônica</i>	44
2.3	A estatística aplicada a engenharia de confiabilidade	45
2.3.1	<i>Covariância</i>	45
2.3.2	<i>Correlação linear</i>	45
2.4	Teste de hipóteses	49
2.4.1	<i>Correlação e causalidade</i>	50
2.5	<i>Data Science</i> ou Ciências de Dados	51
2.5.1	<i>O cientista de dados</i>	53
2.5.2	<i>Técnicas de Ciência de Dados</i>	54
2.5.3	<i>Ferramentas e Linguagens de Programação</i>	55
3	METODOLOGIA	56
3.1	Sistema de Produção de Hidrogênio Verde	56
3.1.1	<i>Sistema Solar Fotovoltaico</i>	56
3.1.1.1	<i>Módulos</i>	57
3.1.1.2	<i>Inversor de Frequência</i>	58
3.1.1.3	<i>Transformadores</i>	58
3.1.1.4	<i>Tracker</i>	59
3.1.1.5	<i>Estação Meteorológica</i>	59
3.1.1.6	<i>CFTV e Vigilância</i>	60
3.1.2	<i>Unidade de Eletrólise para Produção de H₂V</i>	61

3.1.2.1	<i>Retificador e Controle de Potência</i>	62
3.1.2.2	<i>Produção e Tratamento de Água</i>	63
3.1.2.3	<i>Módulo PEM</i>	65
3.1.2.4	<i>Stack PEM</i>	68
3.1.2.5	<i>Purificação e Secagem de H₂</i>	70
3.1.2.6	<i>Análise de Gases</i>	71
3.1.2.7	<i>Painel de Controle e Supervisão de Processo</i>	72
3.1.2.8	<i>Utilidades</i>	74
3.2	Desenvolvimento de algoritmo para cálculo da eficiência e identificação do ponto ideal de operação do eletrolisador tipo PEM	74
3.2.1	Marco Zero	74
3.2.2	Fases da Análise de Dados tipo KDD	78
3.2.2.1	<i>Coleta dos Dados</i>	78
3.2.2.2	<i>Pré-Processamento: Limpeza dos Dados</i>	79
3.2.2.3	<i>Pré-Processamento: Integração dos Dados</i>	80
3.2.2.4	<i>Pré-Processamento: Seleção dos Dados</i>	80
3.2.2.5	<i>Transformação dos Dados</i>	81
3.2.2.5.1	<i>Cálculo da Eficiência do Eletrolisador</i>	82
3.2.2.6	<i>Limpeza dos Dados dentro da fase de Transformação dos Dados</i>	84
3.2.2.7	<i>Mineração de Dados, Modelagem e Desenvolvimento</i>	85
3.2.2.8	<i>Avaliação do Padrão, Avaliação do Conhecimento, Interpretação e Comunicação dos Resultados</i>	90
4	RESULTADOS	91
4.1	Eficiência do Eletrolisador	91
4.2	O impacto das variáveis na eficiência	92
4.2.1	Uma análise da Matriz de Correlação de Person	92
4.2.1.1	<i>Eficiência x Capacidade de Produção (Correlação Forte e Negativa de 92%)</i>	96
4.2.1.2	<i>Eficiência x Condutividade Elétrica (Correlação Moderada e Negativa de 32%)</i>	96
4.2.1.3	<i>Eficiência x Nível do Tanque de O₂+Água (Correlação Fraca e Positiva de 17%)</i>	97
4.2.1.4	<i>Eficiência x Medidor de Pureza de H₂ (Correlação Moderada e Positiva de 47%)</i>	97
4.2.1.5	<i>Eficiência x Corrente do Motor (Correlação Forte e Negativa de 68%)</i>	98
4.2.1.6	<i>Eficiência X Frequência do Motor (Correlação Forte e Negativa de 77%)</i>	98
4.2.1.7	<i>Eficiência x Percentual de Abertura Válvula [PV306 (%)] (Correlação Forte e Negativa de 71%)</i>	99

4.2.1.8	<i>Eficiência x Percentual de Abertura Válvula [PV327 (%)] (Correlação Moderada e Negativa de 32%)</i>	100
4.2.1.9	<i>Eficiência x Corrente DC do Retificador (Correlação Forte e Negativa de 91%)</i>	101
4.2.1.10	<i>Eficiência x Tensão 01 e Tensão 02 (Correlação Perfeita e Negativa de 100%)</i>	101
4.2.1.11	<i>Eficiência x Pressão Gerenciamento Térmico Polimento [PT300 (bar)] (Correlação Fraca e Positiva de 15%)</i>	102
4.2.1.12	<i>Eficiência x Pressão Bomba Circuito Gerenciamento Térmico [PT304 (bar)] (Correlação Moderada e Negativa de 33%)</i>	102
4.2.1.13	<i>Eficiência x Pressão Tanque O₂-Água [PT307 (bar)] (Correlação Moderada e Negativa de 42%)</i>	102
4.2.1.14	<i>Eficiência x Pressão Bomba Alimentação do Stack [PT314 (bar)] (Correlação Forte e Negativa de 80%)</i>	103
4.2.1.15	<i>Eficiência x Pressão Tanque H₂ [PT323 (bar)] (Correlação Moderada e Negativa de 37%)</i>	104
4.2.1.16	<i>Eficiência x Pressão Saída H₂ [PT325 (bar)] (Correlação Moderada e Negativa de 35%)</i>	104
4.2.1.17	<i>Eficiência x Temp. Saída Gerenciamento Térmico Polimento [TT300 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 62%)</i>	105
4.2.1.18	<i>Eficiência x Temp. Saída Trocador LD frio - Gerenciamento Térmico Tanque O₂-Água (°C) [TT303 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 59%)</i>	106
4.2.1.19	<i>Eficiência x Temperatura Saída Stack Lado Anódico (°C) [TT309 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 68%)</i>	106
4.2.1.20	<i>Eficiência x Temperatura Entrada Stack Lado Anódico (°C) [TT310 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 63%)</i>	107
4.2.1.21	<i>Eficiência x Temperatura Saída Stack Lado Catódico (°C) [TT311 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 63%)</i>	108
4.2.1.22	<i>Eficiência x Temperatura Saída Bomba Polimento (°C) [TT328 (°C)] (Correlação Moderada e Negativa de 46%)</i>	108
4.2.1.23	<i>Eficiência x Delta T Anódico da Stack (°C) (Correlação Forte e Negativa de 56%)</i>	109
4.2.1.24	<i>Eficiência x Delta T Catódico da Stack (°C) (Correlação Fraca e Positiva de 17%)</i>	109
4.3	Limites operacionais para se obter a máxima eficiência	111
5	CONCLUSÃO	112
5.1	Limitações	112
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	112

REFERÊNCIAS	114
ANEXOS	124

1 INTRODUÇÃO

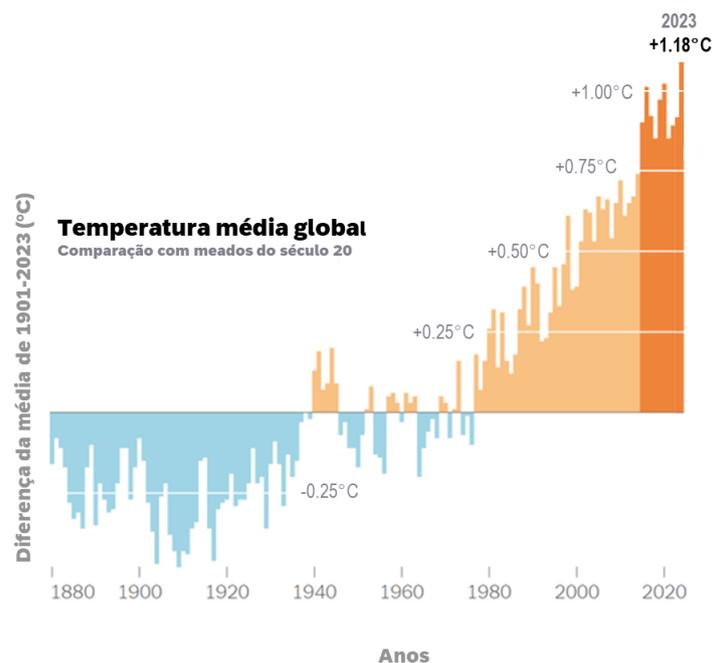
De acordo com [Climate \(2024\)](#), a temperatura média da Terra aumentou em média 0,06 °C por década desde 1850. No entanto, a partir de 1982, a taxa de aquecimento acelerou, chegando a 0,20 °C por década, uma taxa três vezes mais rápida do que a anterior.

[IPCC \(2023\)](#) enfatiza, que a temperatura média global da superfície terrestre registrou um aumento de 1,09 °C durante o período de 2011 a 2020, em comparação com o intervalo de 1850 a 1900, com maiores incrementos em regiões terrestres (1,59 °C) do que em áreas oceânicas (0,88 °C). Estima-se que o aumento total da temperatura média global, atribuído à atividade humana, no período de 1850 a 2019 seja de 1,07 °C.

No entanto, foi no ano de 2023 que a temperatura da superfície terrestre registrou a marca de 1,18 °C acima da média do século 20 (1901 a 2000) que era de 57,0 °F (13,9 °C). Foi o ano mais quente desde 1850, período que se iniciou o acompanhamento dos registos. Nessa tendência, o planeta Terra atingiu a marca histórica dos 10 anos mais quentes na última década (2014-2023) ([CLIMATE, 2024](#)).

O gráfico apresentado na Figura 1 trata-se de uma comparação das diferenças das médias das temperaturas entre o *Século 19 (XIX)*, *Século 20 (XX)* e *Século 21 (XXI)*. As barras azuis indicam anos mais frios do que a média; as barras vermelhas mostram anos mais quentes que a média. A figura usa uma barra de cores, com tons de azul representando períodos em que as temperaturas estavam abaixo da média e tons de laranja/vermelho indicando períodos em que as temperaturas estavam acima da média.

Figura 1 – Temperatura Média Global da Superfície



Fonte: adaptado de [NASA:Goddard Institute for Space Studies \(2022\)](#).

O gráfico da Figura 1 pode ser dividido em quatro períodos:

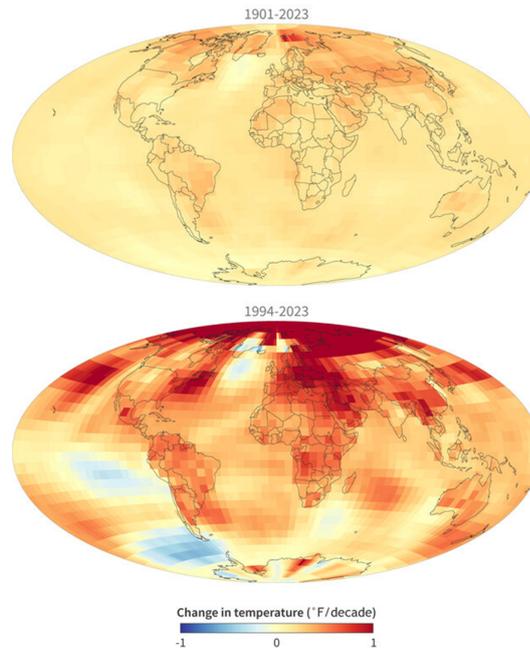
- **1880-1930: Zona de Resfriamento** - As temperaturas estavam abaixo da média, fatores como uma menor atividade industrial (em comparação com períodos posteriores) e erupções vulcânicas podem ter contribuído para este resfriamento, lançando partículas na atmosfera que refletem a luz solar e reduzem a temperatura.
- **1940-1970: Zona de Estabilização** - Durante a Segunda Guerra Mundial e os anos seguintes, houve um pequeno aumento nas temperaturas, seguido por uma estabilização. Esse período foi marcado pelo crescimento econômico pós-guerra, aumento da atividade industrial e emissão de poluentes. A estabilização das temperaturas também coincidiu com a crise de 1973, quando o embargo do petróleo no conflito árabe-israelense provocou uma alta nos preços, inflação global, e uma desaceleração econômica, levando muitos países à recessão.
- **1980-2000: Aquecimento Acelerado** - As temperaturas subiram significativamente, impulsionadas pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa, como *Dióxido de Carbono* (CO_2) e metano, provenientes da intensificação das atividades industriais e uso de combustíveis fósseis.
- **2000-2023: Recorde de Aquecimento** - A temperatura atingiu $+1,18\text{ }^\circ\text{C}$ em 2023, refletindo a continuidade das emissões globais e a insuficiência das medidas de mitigação para reverter a tendência de aquecimento.

Sabe-se que nos últimos milênios, a temperatura da Terra experimentou flutuações naturais, refletindo processos climáticos intrínsecos e variações orbitais. No entanto, o advento da Revolução Industrial marcou o início de uma era de mudanças abruptas e sem precedentes na temperatura global (KACPRZYK; KUCHTA, 2020). De acordo com Khan *et al.* (2021), a questão do aquecimento global emerge como um dos desafios mais prementes do XXI, impulsionado pela crescente emissão de *Gases de Efeito Estufa* (GEE) resultantes das atividades humanas. As principais causas desse fenômeno são amplamente reconhecidas na literatura científica, destacando-se a queima de combustíveis fósseis, desmatamento, agricultura intensiva e processos industriais. Tais atividades liberam quantidades significativas de CO_2 , *Metano* (CH_4) e *Óxido Nitroso* (N_2O) na atmosfera, contribuindo para o aumento da temperatura média global e consequentes mudanças climáticas adversas (IPCC, 2023).

Afirma-se em IEA (2023), que o aumento da temperatura média global da superfície vem desencadeando uma série de eventos climáticos extremos, como ondas de calor cada vez mais frequentes e intensas. O setor de energia emerge como um dos principais contribuintes para a poluição do ar, afetando mais de 90% da população mundial. Esta poluição atmosférica está associada a um impacto devastador na saúde, conectada em mais de 6 milhões de mortes prematuras anualmente. É fato que o planeta terra está aquecendo de forma acelerada, como pode ser visto na ilustração do mapa apresentado na

Figura 2, em que denota que as áreas terrestres têm experimentado um aquecimento mais rápido do que as áreas oceânicas em geral, e a região do Ártico está aquecendo a uma taxa ainda mais acelerada em comparação com outras partes do mundo (SARROUKH *et al.*, 2024).

Figura 2 – O aquecimento nos últimos 30 anos é muito mais rápido do que a tendência de longo prazo



Fonte: adaptado de Climate (2024).

Estudos recentes da NASA (2023) confirmam que as variações no campo magnético da Terra, embora afetem as camadas superiores da atmosfera, como a termosfera e a ionosfera, não desempenham um papel significativo no aquecimento global atual. O campo magnético, vital para proteger o planeta da radiação cósmica e dos ventos solares, passa por flutuações e inversões, conhecidas como "História de Adão e Eva", em média a cada 300.000 anos (CNOSSEN, 2020). Durante essas inversões, o campo magnético enfraquece, mas continua a proteger a Terra, e não há evidências de que esses eventos históricos tenham causado mudanças climáticas significativas ou extinções em massa (ScienceDaily, 2023).

A pesquisa científica aponta que, embora as mudanças no campo magnético possam alterar a densidade e a temperatura da atmosfera superior, resultando em tendências de resfriamento nessas regiões, essas alterações não afetam as temperaturas superficiais ou os padrões climáticos globais. As evidências geológicas e fósseis não mostram impactos climáticos notáveis associados a inversões anteriores. O consenso entre os cientistas é claro: o aquecimento global contemporâneo é causado predominantemente pelas emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, e não por mudanças geomagnéticas. Portanto, a ideia de que a inversão dos polos poderia contribuir para o

aquecimento global não tem fundamento científico (NASA, 2023; ScienceDaily, 2023).

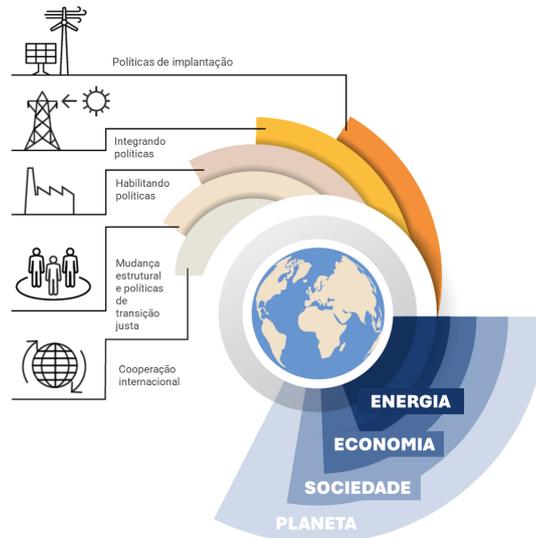
Com a crescente conscientização da comunidade internacional de que as atividades humanas são a principal causa do aquecimento global, e com as temperaturas planetárias atingindo níveis alarmantes, surgiu a necessidade urgente de ações coordenadas. Um ponto crucial na conscientização global das mudanças climáticas foi o *Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA)*, realizada em Estocolmo, em 1972. Este evento pioneiro reconheceu a interconexão entre as atividades humanas e os padrões climáticos em rápida mudança, estabelecendo as bases para futuras negociações internacionais sobre o clima (PNUMA, 1972).

Subsequentemente, a comunidade internacional se reuniu em uma série de conferências e cúpulas ambientais para abordar os desafios climáticos emergentes, com destaque para a ***Conferência das Partes (COP)***, proeminente fórum de discussão sobre o meio ambiente. As COP são eventos anuais realizados sob a égide da ***Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)***, um tratado internacional voltado para o combate às mudanças climáticas. Essas conferências congregam representantes de quase todos os países do mundo, além de organizações não governamentais, cientistas, jornalistas e outros interessados (KEONG, 2021).

A UNFCCC foi adotada em 1992 durante a Cúpula da Terra no Rio de Janeiro, mas sua primeira ocorrência foi a COP1, realizada em Berlin-Alemanha no ano de 1995. No entanto, somente na COP3, realizada em Kyoto-Japão, foi que o primeiro tratado internacional para controle da emissão de GEE foi assinado (COP3, 1997). Ao longo de quase duas décadas as ações se mostraram tímidas, paralelo ao aumento gradual da temperatura do planeta, exigindo que durante a *Conferência das Partes de Paris (COP21)*, realizado na França, o Acordo de Paris fosse assinado, se tornando um marco internacional que estabelece metas ambiciosas para limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, buscando esforços para limitar o aumento a 1,5 °C (TOBIN *et al.*, 2018). Este acordo reflete um reconhecimento coletivo da urgência de ações coordenadas e abrangentes para mitigar os impactos das mudanças climáticas (COP21, 2015).

Os acordos e conferências, desempenharam papéis cruciais na formulação de políticas e diretrizes para reduzir as emissões de GEE e promover a transição energética para fontes de energia mais limpas e renováveis (SCHENUIT, 2023). A transição energética requer um quadro político abrangente e holístico exigindo de maneira geral uma estrutura, conforme a Figura 3. Essas iniciativas devem ser complementadas por estratégias de cooperação internacional que favoreçam a transferência de tecnologias e o compartilhamento de melhores práticas entre os países. Além disso, a integração de setores econômicos diversos é essencial para assegurar uma transição justa e equilibrada, minimizando os impactos sociais e econômicos decorrentes das mudanças no paradigma energético.

Figura 3 – Estrutura política abrangente para a transição energética



Fonte: adaptado de [IRENA \(2023\)](#).

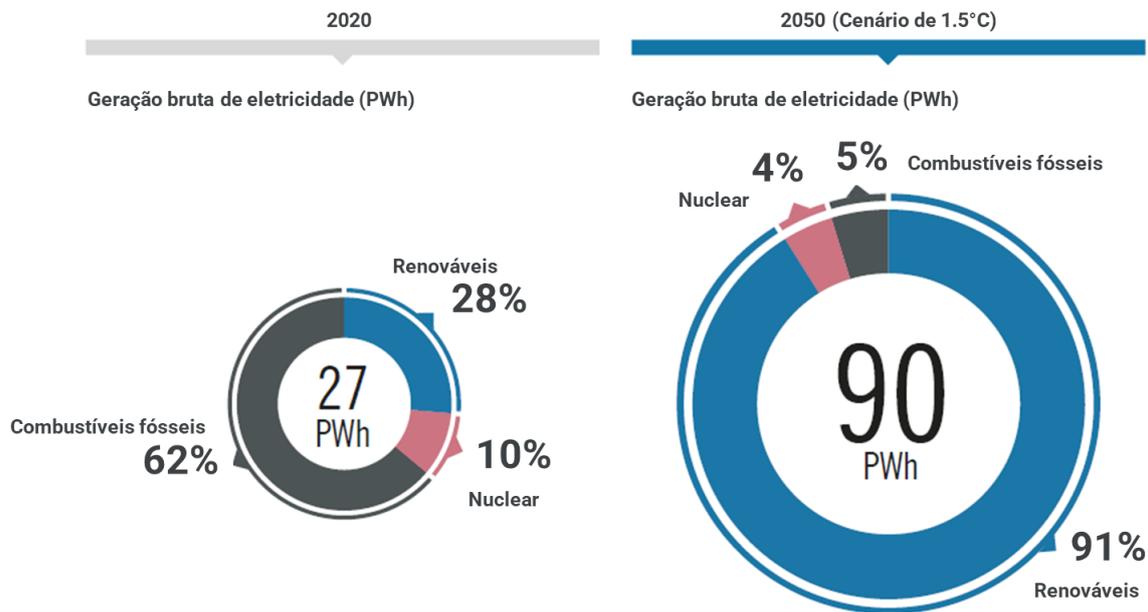
Apesar de 194 países se comprometerem ao acordo de Paris na *COP21*, a transição energética enfrenta obstáculos significativos em meio aos impactos da pandemia de *coronavírus SARS-CoV-2 (COVID-19)* e às complexidades decorrentes da guerra Rússia-Ucrânia, acentuando ainda mais os desafios já existentes. Os riscos associados são substanciais, uma vez que, cada fração de grau Celsius no aumento da temperatura global pode desencadear consequências profundas e de longo prazo para os ecossistemas naturais, as comunidades humanas e as economias globais ([IRENA, 2023](#)).

Conforme [IEA \(2023\)](#) para limitar o aquecimento global a 1,5 °C, é imperativo reduzir as emissões de CO_2 em cerca de 37 *Gigatoneladas (Gt)* em comparação com os níveis de 2022, além de alcançar emissões líquidas zero no setor energético até 2050.

Apesar dos avanços registrados, persistem lacunas significativas entre a implementação atual das tecnologias de transição energética e os níveis exigidos para cumprir o objetivo estabelecido no Acordo de Paris.

Conforme [IRENA \(2018\)](#), um cenário alinhado com o limite de 1,5 °C exige transformação profunda, passando de um sistema amplamente baseado em combustíveis fósseis para um sistema energético eficiente, renovável e de baixo carbono. Essa mudança requer a implantação anual de cerca de 1 000 *Gigawatt (GW)* de energia renovável para permanecer na trajetória de 1,5 °C ([IRENA, 2023](#)), tornando a representatividade da energia renovável de 28% em 2020 para 91% em 2050, conforme Figura 4. Nesse contexto, o H_2V emerge como uma solução promissora e sustentável para atender às crescentes demandas energéticas globais.

Figura 4 – A geração de energia precisa mais que triplicar até 2050 no cenário de 1,5°C

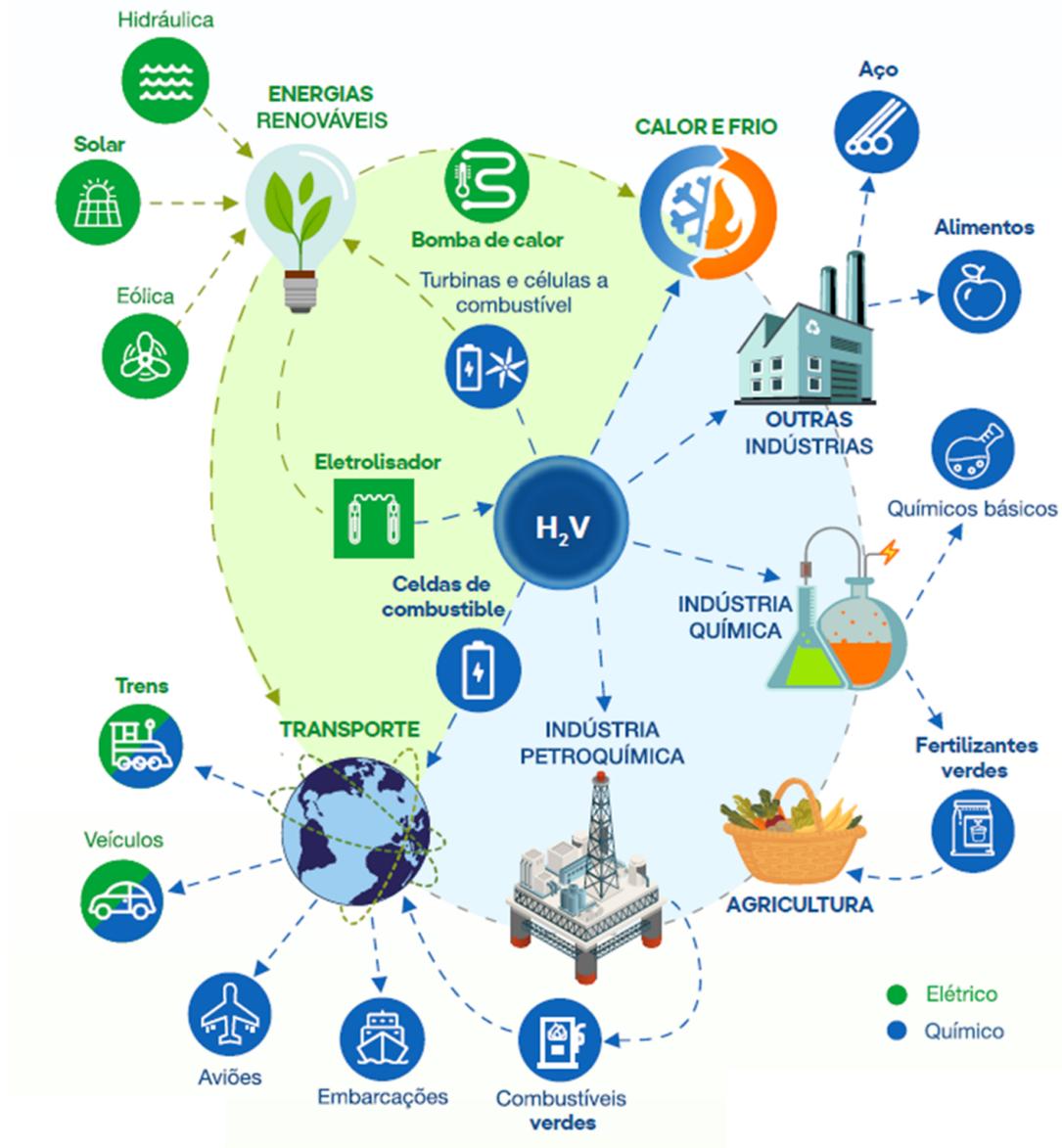


Nota: PWh = petawatt hora.

Fonte: adaptado de [IRENA \(2023\)](#).

De acordo com [Miller *et al.* \(2020\)](#), o H_2V é produzido por meio da eletrólise da água utilizando eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como solar, eólica ou hidrelétrica. Esse processo é caracterizado pela ausência de emissões de carbono, tornando o hidrogênio produzido uma fonte de energia sustentável e aplicável em múltiplos setores, como transporte, indústria e geração elétrica. Adicionalmente, o hidrogênio serve como meio de armazenamento para energia renovável, contribuindo para mitigar a intermitência inerente às fontes solar e eólica. Contudo, assegurar que a eletricidade utilizada na produção do hidrogênio seja exclusivamente de fontes renováveis é essencial para maximizar os benefícios climáticos dessa tecnologia. ([BADE *et al.*, 2024](#)).

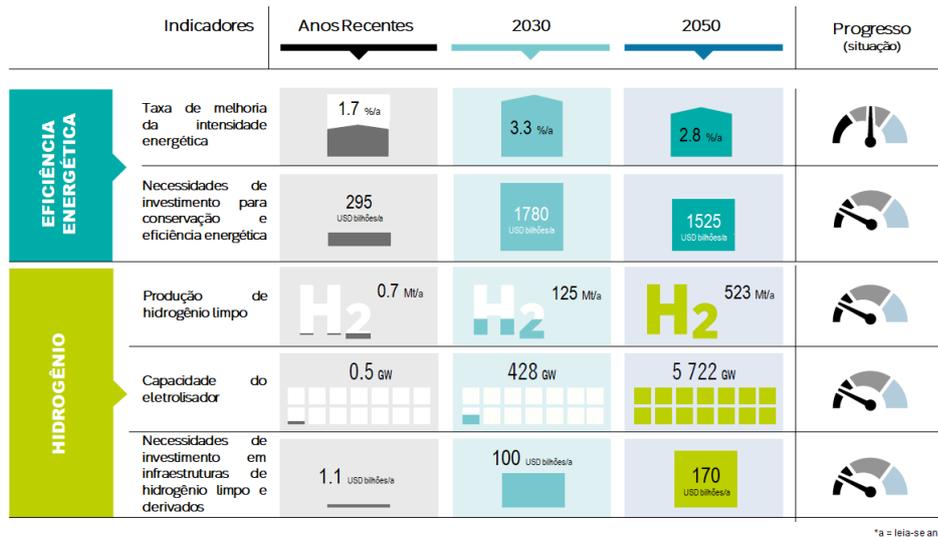
[DOE \(2020\)](#) comenta que várias vantagens acompanham o uso do H_2V . Além de ser uma fonte de energia limpa, sua produção e uso podem ajudar a estabilizar a rede elétrica, reduzir a dependência de combustíveis fósseis em setores-chave, múltiplas aplicações de transporte, matéria-prima para a indústria, aquecimento em sistemas e edifícios industriais; geração de energia e armazenamento de energia. A Figura 5 apresenta a cadeia que abrange o uso estratégico do H_2V .

Figura 5 – Cadeia de Produção e Aplicações do H_2V 

Fonte: Iberdrola (2022 apud SIEMENS, 2021).

Com o avanço da tecnologia e políticas de apoio adequadas, espera-se que o H_2V desempenhe um papel cada vez mais importante na transição global para um sistema energético mais sustentável e resiliente. Contudo, apesar de seu enorme potencial, o H_2V enfrenta desafios significativos, incluindo custos de produção elevados, infraestrutura limitada e questões relacionadas à segurança e armazenamento (IRENA, 2021). Alguns dos desafios que precisam ser alcançados até 2050 no que tange a eficiência energética e Infraestrutura de H_2V para cumprimento das metas são expostos no quadro ilustrativo da Figura 6.

Figura 6 – Progresso no segmento de energia para alcançar o cenário de 1,5 °C até 2050



Fonte: adaptado de IRENA (2023).

- **Eficiência Energética**

- **Taxa de Melhoria da Intensidade Energética:** A meta para 2030 é uma melhoria de 3,3% ao ano e, para 2050, 2,8% ao ano. Atualmente, a taxa está em 1,7% ao ano, indicando que é necessário um progresso significativo para atingir as metas.
- **Investimento em Conservação e Eficiência:** Os investimentos atuais são de \$295 bilhões de dólares. No entanto, é necessário aumentar este valor para \$1.780 bilhões até 2030 e \$1.525 bilhões até 2050 para atender às demandas energéticas e climáticas.

- **Hidrogênio**

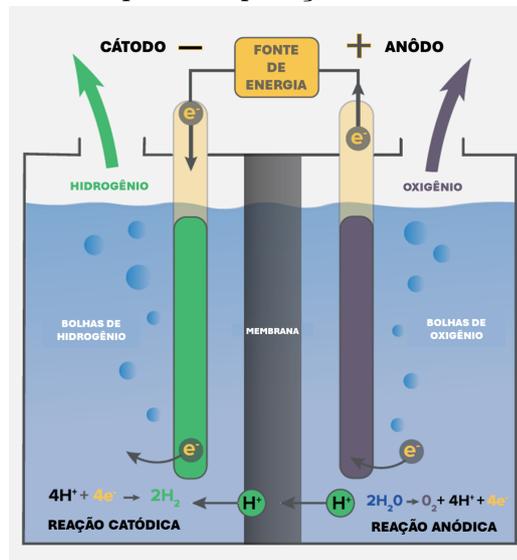
- **Produção de Hidrogênio Verde:** A produção atual é de 0,7 Mt/ano, muito abaixo das metas, que exigem 125 Mt/ano até 2030 e 523 Mt/ano até 2050. Este é um grande desafio para a transição energética.
- **Capacidade de Eletrolisadores:** A capacidade atual instalada é de 0,5 GW, enquanto as metas são 428 GW até 2030 e 5.722 GW até 2050, o que demanda uma expansão massiva.
- **Investimento em Infraestrutura de Hidrogênio:** Os investimentos atuais em infraestrutura de hidrogênio são de \$1,1 bilhões de dólares, mas será necessário ampliar para \$100 bilhões até 2030 e \$170 bilhões até 2050.

- **Progresso Geral**

- **Indicador de Progresso:** A figura sugere que o progresso em cada um desses setores está abaixo do esperado, indicando que serão necessárias ações mais agressivas e investimentos substanciais para alcançar o cenário de 1,5 °C até 2050.

O hidrogênio pode ser produzido comercialmente por diversos métodos eletroquímicos. De acordo com levantamentos recentes de Squadrito *et al.* (2023) e Chisholm *et al.* (2022), as tecnologias mais amplamente utilizadas incluem o Eletrolisador Alcalino de Água ou *Alkaline Water Electrolyzer (AWE)* e o Eletrolisador de Membrana de Troca de Prótons ou *PEM*. Esses dispositivos são as principais opções para produção de hidrogênio, sendo ecologicamente sustentáveis, embora ainda apresentem desafios econômicos. Para fins de comparação, o *AWE* pode produzir H_2V com até 99,5% de pureza, enquanto o eletrolisador *PEM* é capaz de atingir purezas de até 99,995% (ZENG; ZHANG, 2010a). A Figura 7 apresenta o princípio operacional de reação do eletrolisador tipo *PEM*.

Figura 7 – Princípio de Operação do eletrolisador *PEM*

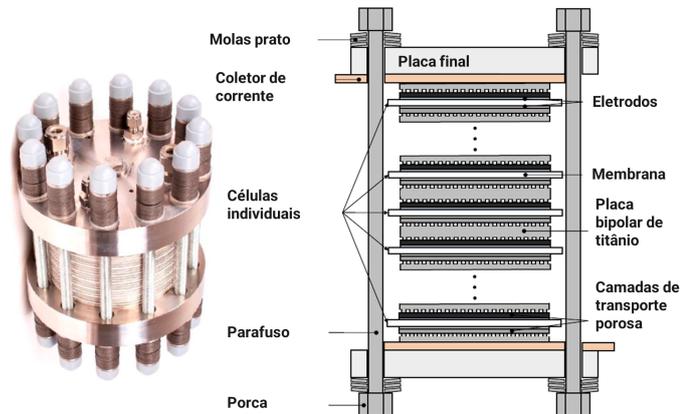


Fonte: adaptado de Nelson *et al.* (2020b).

Os eletrolisadores *PEM* possuem um potencial tecnológico relevante devido à alta eficiência, design compacto, simplicidade do sistema auxiliar, fácil manutenção, resposta rápida e ampla faixa dinâmica de operação (CARMO *et al.*, 2013a; AYERS *et al.*, 2012a; AYERS *et al.*, 2012b; BARBIR, 2005). No entanto, o elevado custo do investimento dificulta a comercialização generalizada da tecnologia à escala de Mega ou Terawatt.

O módulo é o local no qual o insumo de processo (água líquida) é dissociada eletroquimicamente em seus constituintes, dando origem às correntes de H_2 e Oxigênio (O_2) geradas separadamente. Esta transformação é realizada num reator eletroquímico, denominado módulo eletrolítico ou, simplesmente, pilha ou *stack*, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Desenho esquemático simplificado de uma *stack* PEM da classe de potência inferior até 100 kW.



Fonte: Bareiß *et al.* (2019)

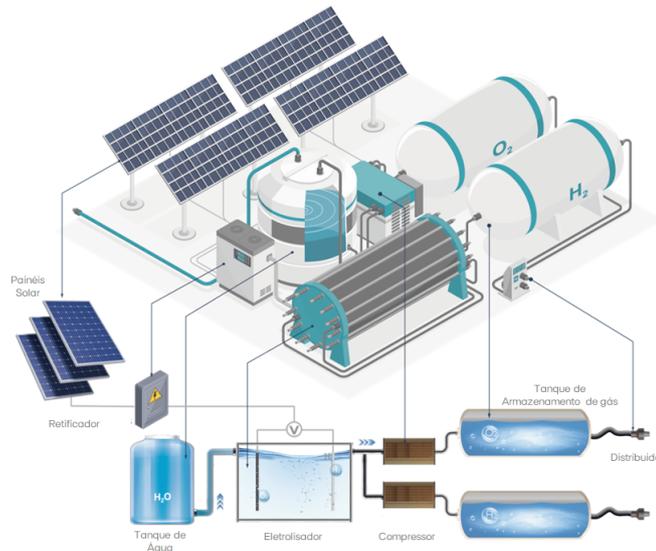
Segundo Salehmin *et al.* (2022), para que o retorno financeiro seja viável e os custos operacionais sejam controlados, é crucial manter os eletrolisadores operando com sua máxima capacidade e eficiência durante todo o seu ciclo de vida. No entanto, para alcançar o máximo rendimento, é essencial entender quais são os principais fatores operacionais que afetam a eficiência do eletrolisador e, em seguida, definir o ponto ótimo de operação, garantindo assim que o equipamento funcione sempre com a melhor capacidade e eficiência possível que varia de 65% a 70% para eletrolisadores tipo PEM (FOGLIATTO; DUARTE, 2011).

Com isso, um estudo de caso que analisa diversas variáveis físico-químicas de um eletrolisador tipo PEM é fundamental para compreender a importância e o impacto dessas variáveis na eficiência do equipamento. O objetivo deste trabalho é também definir a faixa operacional ideal, otimizando assim a produção e a eficiência do eletrolisador. Este trabalho oferece orientações práticas que visam contribuir para que as empresas maximizem a capacidade de produção dos eletrolisadores de hidrogênio verde, apoiando, assim, a transição energética sustentável.

O futuro da produção de hidrogênio depende da otimização dos eletrolisadores. Ao alcançar maior eficiência e menor custo, pode-se desbloquear o potencial ilimitado do hidrogênio como um energético limpo e sustentável.

De modo a ilustrar a usina de H_2V em que o estudo foi realizado, adicionou-se a Figura 9 que contém o esquemático de uma planta de produção de hidrogênio para servir de modelo e auxiliar o entendimento. A única exceção para o equipamento em estudo é que não há um compressor na usina de H_2V de Pecém.

Figura 9 – Esquemático de uma Usina de Produção de H_2V



Fonte: [Jenning-Anodes-Company \(2024\)](#).

1.1 Justificativa

Com a crescente pressão mundial pela descarbonização das fontes de energia proveniente de combustível fóssil, a produção de hidrogênio verde emerge como uma das principais soluções para produção de energia limpa em larga escala.

O processo baseado na eletrólise da água permite a produção de hidrogênio utilizando eletricidade e água como insumo. A eletrólise é um processo químico bem conhecido que requer adoção mais ampla para reduzir custos de produção. De acordo com [EPO e IRENA \(2022\)](#), uma redução nos custos do sistema eletrolisador é essencial e a inovação tecnológica é crucial para este fim. Segundo [IRENA \(2020b\)](#), os custos de investimento para instalações de eletrolisadores podem ser reduzidos em 40% a curto prazo e 80% a longo prazo através de estratégias-chave, tais como melhor concepção e construção de eletrolisadores, economias de escala, substituição de materiais escassos por metais abundantes, **aumento da eficiência**, flexibilidade de operações e taxas de aprendizagem com implantação de alta tecnologia alinhada com uma meta climática de 1,5 °C. Os eletrolisadores sofrem uma degradação rápida, o que significa que o desenvolvimento também é necessário para aumentar a eficiência do processo e o ciclo de vida da tecnologia.

Nesse sentido, para que o retorno financeiro seja viável e as companhias consigam manter os custos operacionais sob controle, se faz necessário desmistificar quais os principais fatores operacionais que afetam a eficiência do eletrolisador e definir qual o ponto ótimo de operação para que o equipamento opere sempre em melhor capacidade e performance.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral desta dissertação é estimar os parâmetros ideais de operação de um eletrolisador do tipo *PEM*, utilizando técnicas de ciência de dados com o intuito de maximizar tanto a eficiência da *stack* quanto a capacidade de produção de H_2V .

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- a) Analisar as variáveis que interagem com a eficiência da *stack* do eletrolisador do tipo *PEM* utilizando telemetria baseada em dados operacionais durante a produção de H_2V .
- b) Avaliar estatisticamente as correlações lineares positivas e negativas, identificando tanto as correlações fortes quanto as fracas, entre as variáveis monitoradas.
- c) Identificar entre as correlações fortes o conjunto das principais variáveis operacionais que impactam diretamente a eficiência do eletrolisador.
- d) Determinar os parâmetros ideais de operação do eletrolisador para assegurar a máxima de eficiência da *stack* durante sua operação.

1.3 Organização da Dissertação

Este documento está estruturado da seguinte forma: Na seção dedicada à fundamentação teórica, são abordados os conceitos de produção de hidrogênio, com destaque para a produção por eletrólise da água; são discutidas suas principais características, pontos positivos e negativos, além de serem revisados alguns trabalhos relacionados ao tema. Na seção referente aos materiais e métodos, são detalhados os recursos e procedimentos empregados no desenvolvimento do projeto. Os resultados obtidos são apresentados em uma seção específica, seguida pela discussão e análise. Por fim, são expostas as conclusões alcançadas e sugestões para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O potencial do hidrogênio

2.1.1 O hidrogênio

Descoberto em 1766 por Henry Cavendish e nomeado em 1783 por Antoine Lavoisier, o hidrogênio é amplamente reconhecido como o elemento mais simples e abundante do universo. Estima-se que componha mais de 90% dos átomos e aproximadamente 75% da massa total do universo, obtido a partir do estudo dos espectros de estrelas e nebulosas (HAYNES, 2014; MARIOLAKOS *et al.*, 2007).

A abundância do hidrogênio, está associada à sua presença normalmente em outros elementos químicos. É extremamente raro na atmosfera terrestre, na qual encontra-se em concentração de 0,00005%. A molécula de hidrogênio é a menor e mais leve do universo: ela é 5.000 vezes menor que a espessura de um fio de cabelo. A molécula de hidrogênio caracteriza-se como um vetor energético versátil, podendo ser utilizado em várias aplicações e com papel estratégico para a transição energética (THYMOS, 2023).

Como explanado por Estevão (2008), o hidrogênio é um elemento fundamental, composto por um próton em seu núcleo e um elétron orbitando em torno dele, não se enquadra em uma família específica na Tabela Periódica, embora compartilhe semelhanças de natureza eletropositiva com os metais alcalinos devido ao seu subnível mais externo (s^1) e também com os halogêneos, por possuir comportamento semelhante, aceitando um segundo elétron para formar um íon mono negativo. O hidrogênio é encontrado predominantemente na forma molecular H_2 , sendo notável por sua natureza gasosa, inodora, insípida, incolor, insolúvel em água, mais leve que o ar e extremamente inflamável à temperatura e pressão normais de 0°C e 1 atm. Para ser mantido em estado líquido, deve ser armazenado em temperaturas criogênicas abaixo de -253 °C. Caso a temperatura seja maior que esse limite, permanecerá em forma de gás podendo ser armazenado em cilindros de alta pressão na forma de gás comprimido (BURTON *et al.*, 2021).

O hidrogênio apresenta propriedades atraentes como transportador de energia, com uma densidade energética mais de duas vezes superior à dos combustíveis sólidos típicos (ZHANG *et al.*, 2015; Shiva Kumar; HIMABINDU, 2019). Atualmente, a produção mundial de hidrogênio é de aproximadamente 500 bilhões de metros cúbicos por ano. Sua densidade em massa é extremamente baixa, 0,08967 kg/m³, tornando-o 14,4 vezes menos denso que o ar, cuja densidade é 1,2928 kg/m³ (BURTON *et al.*, 2021).

O hidrogênio também é um bom combustível para ser usado em aplicações de aquecimento doméstico e industrial (DODDS *et al.*, 2015). Provou sua capacidade de fornecer uma excelente fonte de energia na indústria aeroespacial, pois a combustão de hidrogênio e oxigênio libera a maior quantidade de energia por peso de combustível

(RAMACHANDRAN; MENON, 1998). Por exemplo, a energia térmica produzida a partir da combustão do hidrogênio é de 142,26 kJ/g, em comparação com o petróleo que produz uma energia térmica de 35,15–43,10 kJ/g e a madeira que produz 17,57 kJ/g (ZHANG *et al.*, 2015).

A chama do hidrogênio tem uma peculiaridade interessante: é praticamente invisível à luz do dia devido à sua baixa emissividade, que varia entre 17% e 25%. Isso significa que sua luz é menos brilhante na faixa do espectro visível em comparação com outros combustíveis como butano, propano ou gasolina, cuja emissividade varia entre 34% e 43% (ESTEVIÃO, 2008). Essa característica não apenas reduz o risco de acidentes, devido à menor radiação emitida, mas também pode tornar difícil detectar sua presença. Apesar disso, sua chama é incrivelmente quente, com uma densidade energética de 39,4 kWh/kg, muito superior à da gasolina, que é de apenas 14 kWh/kg (SCHEFER *et al.*, 2009). Além disso, o hidrogênio é altamente inflamável quando presente no ar. A quantidade de energia necessária para inflamá-lo é ínfima e, em certas condições, pode até ocorrer autoignição. Essa combinação de características faz do hidrogênio um elemento fascinante e potencialmente perigoso (XIAO *et al.*, 2018).

O gás H_2 é um combustível com emissão líquida zero de carbono, sem quaisquer poluentes e gases de efeito estufa porque sua combustão produz apenas calor e vapor de água. Possui a maior energia específica entre todos os combustíveis que é de 143 MJ/kg ou 39,4 kWh/kg, sendo mais conhecido como *Poder Calorífico Superior (PCS)* ou *Higher Heating Value (HHV)* (DURBIN; MALARDIER-JUGROOT, 2013).

2.1.2 Produção global de hidrogênio por fonte

De acordo com Balat (2008), mais de 99% do hidrogênio produzido atualmente é gerado a partir de combustíveis fósseis, enquanto 96% do hidrogênio comercialmente disponível é proveniente diretamente de combustíveis fósseis. Esses números podem ser visualizados de forma detalhada na Tabela 1, em que apresenta a produção global de hidrogênio por tipo de fonte, volume, vantagens e desvantagens.

Tabela 1 – Produção global de hidrogênio por fonte

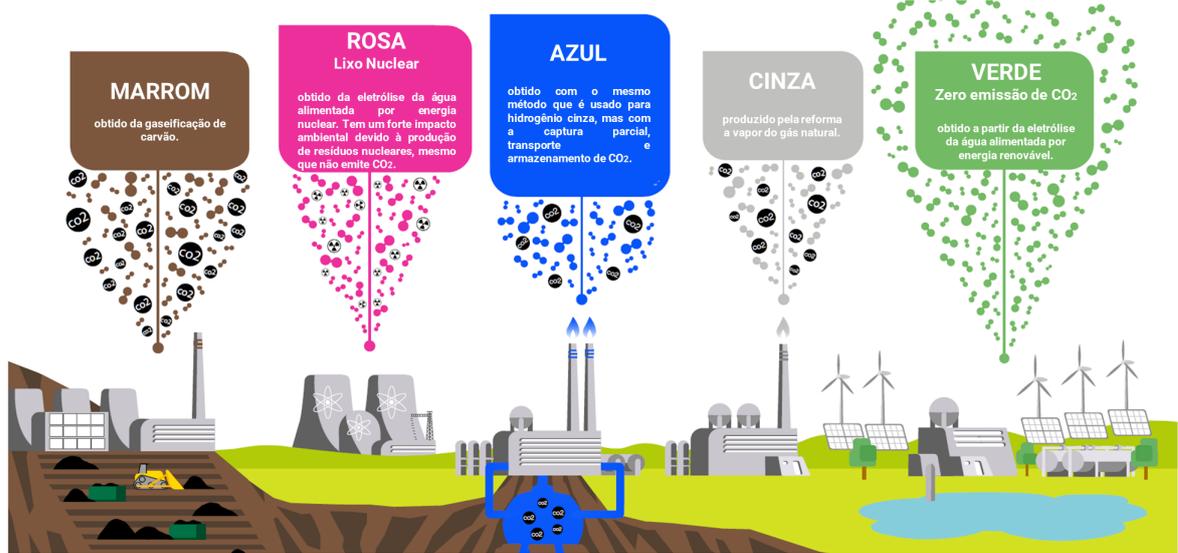
Fonte	Bilhões de m ³ /ano	Participação (%)	Vantagens	Desvantagens
Gás natural	240	48%	Baixo custo de produção; infraestrutura acessível;	Impactos ambientais durante a extração de gás natural; produção de gases de efeito estufa;
Óleo	150	30%	Baixo custo de produção; infraestrutura acessível;	Impactos ambientais durante a extração de petróleo; produção de gases de efeito estufa;
Carvão	90	18%	Baixo custo de produção; infraestrutura acessível;	Impactos ambientais durante a extração de carvão; produção de gases de efeito estufa;
Eletrólise	20	4%	Pode ser produzido com baixas emissões de gases de efeito estufa ao usar fontes de energia renováveis;	Baixa eficiência, alto custo de produção, infraestrutura limitada, produção de gases de efeito estufa quando alimentado com combustíveis fósseis;
Total	500	100%		

Fonte: [Burton et al. \(2021\)](#)

2.1.3 Classificação do hidrogênio por cores

Firma-se em [Noussan et al. \(2021\)](#) e [Newborough e Cooley \(2020\)](#), que as tecnologias de geração de hidrogênio estão sendo cada vez mais codificadas por referência a um esquema baseado em cores diferentes. De acordo com [Nelson et al. \(2020a\)](#) para determinar o tipo de produção de hidrogênio, considera-se, a matéria-prima de hidrogênio; a entrada de energia no processo de produção e o tratamento das emissões de carbono que possam surgir. As principais cores que estão sendo consideradas pela academia estão dispostas na Figura 10 que apresenta o que se discute amplamente na academia científica por [ENEL \(2023\)](#) e [RMI \(2022\)](#) e [IRENA \(2020a\)](#) e [Nelson et al. \(2020a\)](#) e [\(IEA, 2019\)](#) e [Newborough e Cooley \(2020\)](#):

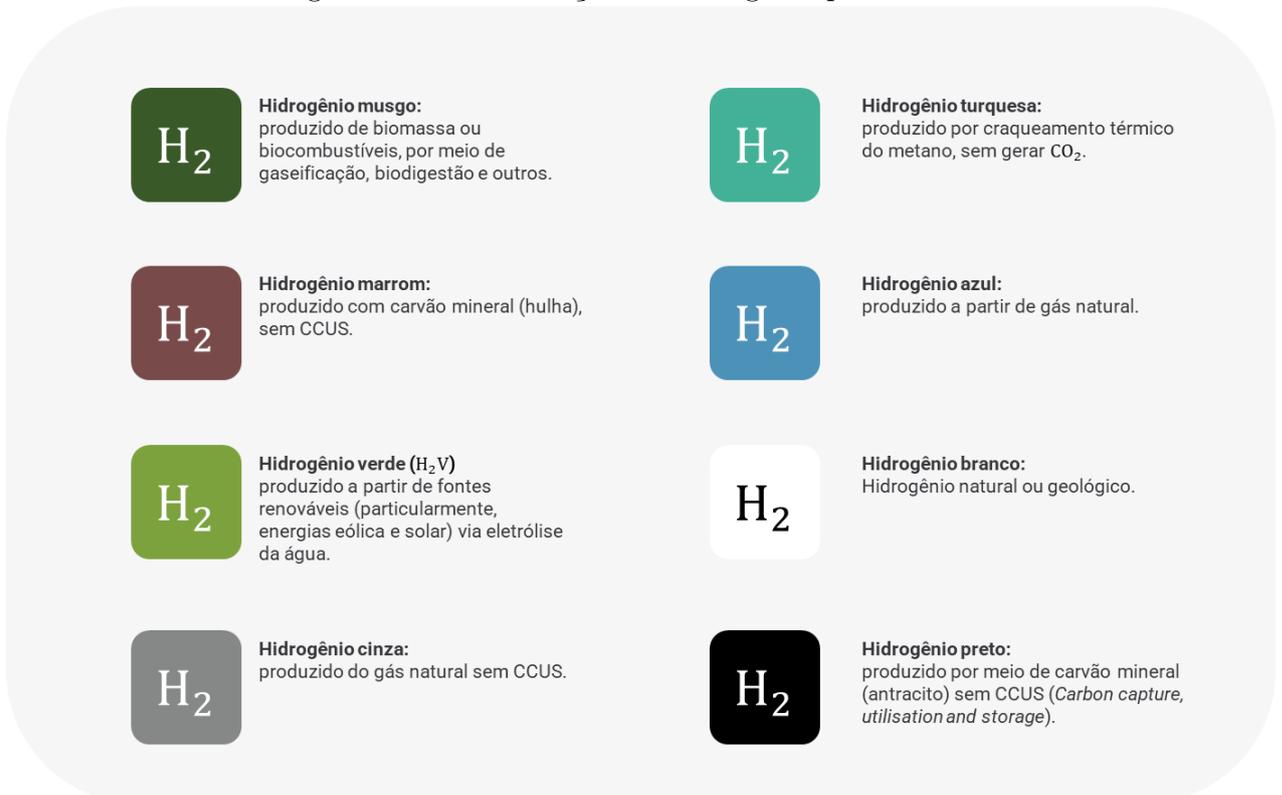
Figura 10 – Codificação dos tipos de hidrogênio pelo tipo de obtenção



Fonte: adaptado de ENEL (2023 apud IEA, 2021).

No entanto, percebe-se que na iniciativa privada a classificação denota um avanço na segmentação dos tipos de hidrogênio e uma maior pluralidade, conforme apresentado na Figura 11:

Figura 11 – Classificação do hidrogênio por cores



Fonte: Thymos (2023)

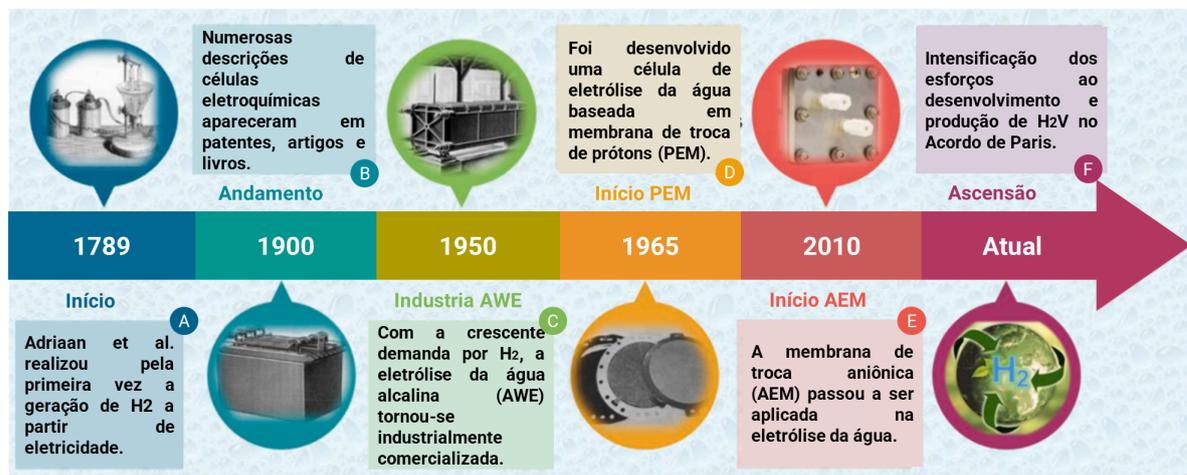
O sucesso de uma futura economia do hidrogênio exigirá a abordagem de múltiplos aspectos, melhorando as tecnologias atuais para fornecer hidrogênio aos utilizadores interessados a um custo competitivo. Pretende-se ter uma transição do atual sistema energético para alternativas de baixo carbono. Assim, o hidrogênio comporta-se como uma componente chave de um quadro mais amplo, e é importante que as estratégias futuras para a sua implementação estejam bem integradas com outras soluções (NOUSSAN *et al.*, 2021).

2.2 A eletrólise e o eletrolisador

2.2.1 O princípio da eletrólise e a termodinâmica

A eletrólise da água foi descrita no fim do *Século 18 (XVIII)* na sequência de estudos realizada por William Nicholson (1753-1815), Anthony Carlisle (1768-1840), Allesandro Volta (1745-1827) e Humphry Davy (1778-1840). No entanto, somente em 1834, Michael Faraday (1791-1867) introduziu o termo eletrólise que deriva do grego *electro* + *lysis* e significa decomposição por ação da eletricidade (FERNANDES, 2015). A Figura 12 denota uma breve linha do tempo que apresenta uma sequência de eventos históricos acerca da eletrólise.

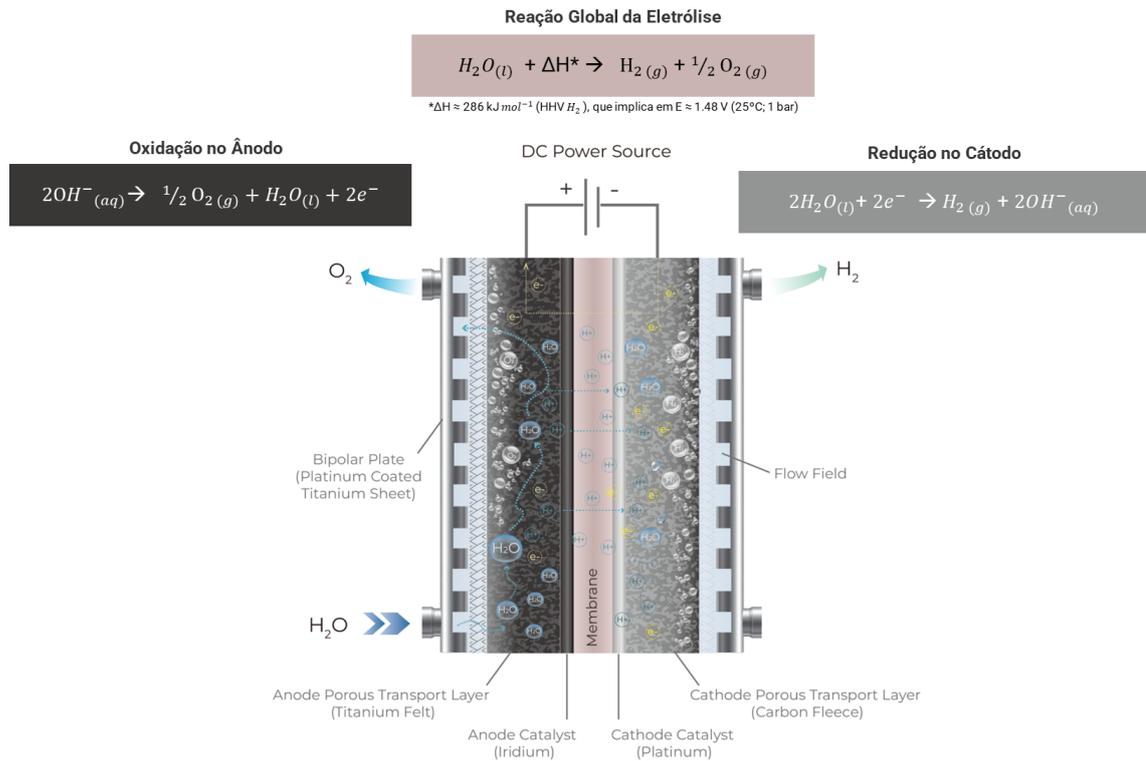
Figura 12 – Cronograma de desenvolvimento da tecnologia de eletrólise de água.



Fonte: Adaptado de Xu *et al.* (2022)

De acordo com Lujano-Rojas *et al.* (2023), a eletrólise de água é a reação química de oxirredução provocada pela passagem de *Corrente Contínua (CC)*, correspondente à dissociação da molécula de água em hidrogênio e oxigênio, na presença de um eletrólito, como se representa esquematicamente na Figura 13.

Figura 13 – Representação esquemática do processo de eletrólise



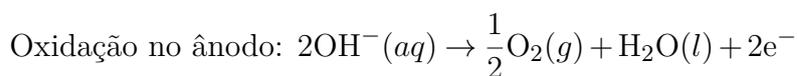
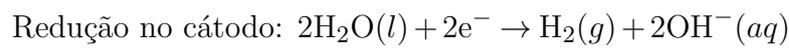
Considerando água pura, no cátodo, carregado negativamente, acontece uma reação de redução com o fornecimento de elétrons para cations de hidrogênio para formar o hidrogênio gasoso ([URSUA et al., 2012](#); [BAREISS et al., 2019](#)):



No ânodo, carregado positivamente, ocorre uma reação de oxidação, gerando oxigênio gasoso e fornecendo elétrons ao ânodo para fechar o circuito:



ou seja,



Resultando na equação global da eletrólise:



ou ainda,



Portanto, o hidrogênio é gerado no cátodo e o oxigênio do ânodo. Sendo a produção de hidrogênio notavelmente o dobro da produção de oxigênio, conforme observado na Equação 2.3 (GOMES, 2022).

Conhecendo a a variação da Energia Livre de Gibbs como:

$$\Delta G = -nFE \quad (2.5)$$

Na Equação 2.5, Observa-se potencial máximo entre dois eletrodos representado por E em Volts, o qual ocorre quando não há corrente circulando no sistema. A Constante de Faraday F ($1F = 96.485,3\text{C/mol}$) e n envolvidos na reação.

Ursua *et al.* (2012) afirmam que num processo eletrolítico mantido a temperatura e pressão constantes, a energia necessária para conduzir a eletrólise é determinada pela Variação de Entalpia ΔH do sistema. Essa energia é composta por duas partes distintas: a contribuição elétrica, representada pela Energia Livre de Gibbs ΔG , e a Parcela Térmica Q , resultante do produto da Temperatura T pela Variação de Entropia ΔS . Essas grandezas estão relacionadas pela Equação 2.6.

$$\Delta G = \Delta H - Q = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (2.6)$$

A menor tensão requerida para que se inicie o processo de eletrólise da água é denominada tensão reversível, V_{rev} , dada pela Equação 2.7, obtida rearranjando-se a Equação 2.5 (KARAYEL *et al.*, 2022):

$$V_{\text{rev}} = \frac{\Delta G}{nF} \quad (2.7)$$

Quando a energia térmica T é suprida por meio de energia elétrica, a mínima tensão necessária para a eletrólise é denominada de tensão termoneutra, V_{tn} . Em um cenário ideal, essa tensão termoneutra é equivalente à tensão de entalpia, $V_{\Delta H}$, que é determinada pela variação total de entalpia da reação, conforme demonstrado pelas Equações 2.8 e 2.9 (URSUA *et al.*, 2012).

$$V_{\Delta H} = V_{\text{tn}} \quad (2.8)$$

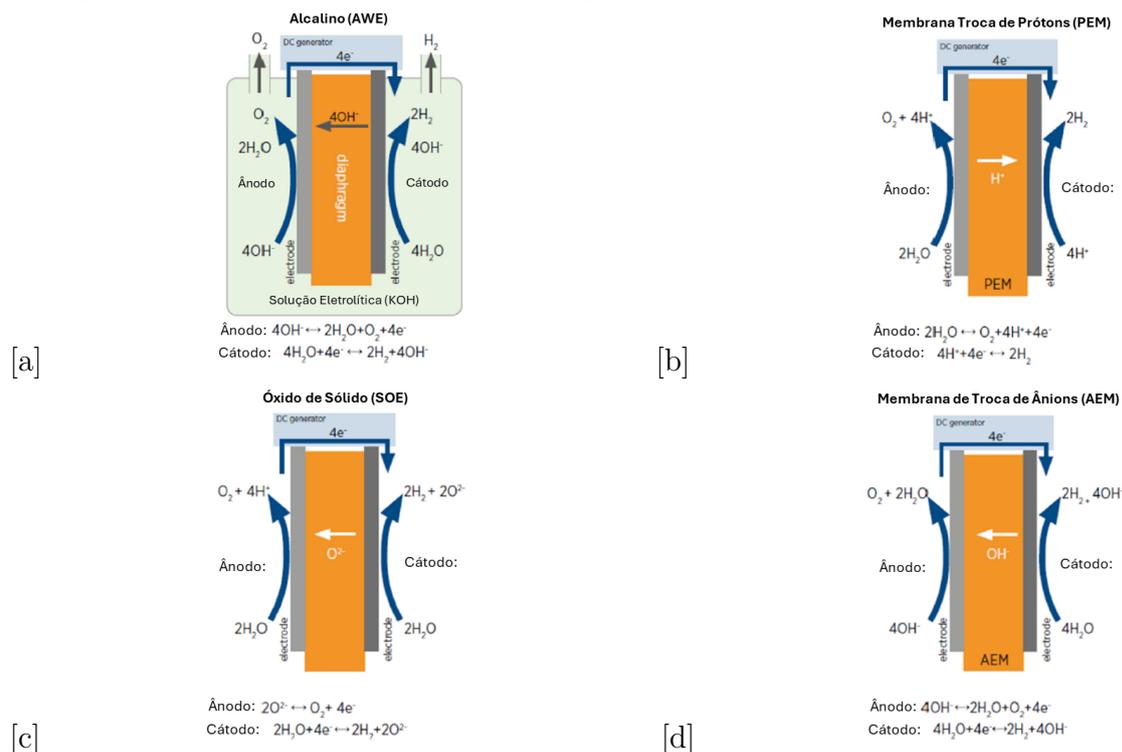
$$V_{\Delta H} = \frac{\Delta H}{nF} \quad (2.9)$$

Em condições padrão de temperatura e pressão ($T = 298,15 \text{ K}$ e $P = 1 \text{ atm}$), os valores das propriedades termodinâmicas são: $\Delta G^0 = 237,21 \text{ kJ/mol}$, $\Delta S^0 = 0,1631 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $\Delta H^0 = 285,84 \text{ kJ/mol}$. Substituindo-se os valores de ΔG^0 e ΔH^0 nas Equações 2.7 e 2.9, obtêm-se os valores de $V_{\text{rev}} = 1,229 \text{ V}$ e $V_{\text{tn}} = 1,481 \text{ V}$, respectivamente (URSUA *et al.*, 2012; IEA, 2021; GOMES, 2022).

2.2.2 Tipos de eletrolisadores

A tecnologia essencial para a produção de H_2V é denominada como eletrolisador. Existem diferentes tipos de eletrolisadores conforme apresentado na Figura 14, alguns já disponíveis no mercado e outros em fase de pesquisa e desenvolvimento (SQUADRITO *et al.*, 2023). Os principais tipos de eletrolisadores para produção de hidrogênio são: eletrolisador de água alcalina (AWE) (ZENG; ZHANG, 2010b; RASHID *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2012), eletrolisador com membranas de troca de prótons (PEM) (CARMO *et al.*, 2013b; LANGEMANN *et al.*, 2015), eletrolisador com membranas de troca de ânions alcalinos (Anion Exchange Membrane Electrolysis (AEM)) (HALEEM *et al.*, 2021; PIANA *et al.*, 2010) e eletrolisador de água de óxido sólido (Solid Oxide Electrolyser (SOE)) (VINCENT; BESSARABOV, 2018). Embora esses sistemas utilizem diferentes materiais e condições operacionais, eles compartilham princípios de funcionamento semelhantes. Além disso, considerando as diversas faixas de temperatura de operação, é possível realizar a eletrólise da água em condições de baixa e alta temperatura (CHI; YU, 2018).

Figura 14 – Diferentes tipos de tecnologias de eletrólise disponíveis comercialmente



Fonte: El-Shafie (2023)

Entre as tecnologias de divisão de água, a eletrólise é o método mais eficiente. O tipo mais antigo e maduro é o eletrolisador alcalino. Consiste em um cátodo e um ânodo separados por um fino diafragma cerâmico poroso submerso em um eletrólito alcalino. Uma geração mais recente de eletrolisadores, também conhecidos como eletrolisadores de água com membrana de troca de prótons ou *Proton Exchange Membrane Water Electrolysis (PEMWE)*, não usa um eletrólito líquido, mas sim um eletrólito de polímero sólido fino (membrana).

2.2.3 Eletrolisador alcalino

Eletrolisadores de água alcalina são comumente usados para produzir hidrogênio em aplicações em larga escala. A eficiência energética dos eletrolisadores alcalinos pode alcançar 73%, levando em consideração o maior valor de aquecimento *HHV* do hidrogênio, que é de aproximadamente 3,5 kWh por Nm³ (URSUA *et al.*, 2009). Essa alta eficiência destaca o potencial desses sistemas para a produção de hidrogênio verde, contribuindo significativamente para a transição energética e a redução das emissões de carbono. A capacidade de operar com eficiência elevada é crucial para tornar a produção de hidrogênio uma alternativa viável e sustentável às fontes de energia convencionais.

Óxidos de níquel (*Ni*) e cobalto são utilizados para formar os materiais do ânodo e do cátodo, respectivamente. Além disso, o eletrólito de *Hidróxido de Potássio (KOH)* é o mais utilizável com 30-40% e a alcalinidade é gerada pela circulação do eletrólito em ambos os eletrodos (GANLEY, 2009; URSUA *et al.*, 2012). A Figura 14, letra a, mostra um desenho esquemático de uma célula eletrolisadora de água alcalina (IRENA, 2020b).

As reações anódica e cátodo ocorrem para produzir hidrogênio e oxigênio. O diafragma poroso de separação é instalado entre os dois eletrodos, e os *Íons Hidroxila (OH⁻)* são gerados e passados através dos materiais porosos do diafragma, constituídos de materiais de óxido cerâmico, como amianto e polímeros (WENDT; HOFMANN, 1989; KJARTANSDÓTTIR *et al.*, 2013). O hidrogênio e o hidróxido são produzidos no cátodo em temperaturas operacionais moderadas de 65–100°C; o oxigênio é então gerado no ânodo pela reação do hidróxido. A eficiência de conversão dos eletrolisadores de água alcalina é de 60 a 80% e a tensão de operação da célula é de 1,8 a 2,4 V (GUTIÉRREZ-MARTÍN *et al.*, 2015). As vantagens dos eletrolisadores alcalinos são que eles podem operar em baixas temperaturas e não necessitam de catalisadores para ativar e produzir hidrogênio (FERRERO *et al.*, 2013). Em contraste, a corrosão do eletrodo do eletrolisador alcalino é considerada o principal desafio devido à presença de uma solução alcalina. As grandes unidades hidroeletrólisadoras têm capacidade de 485 Nm³/h com disponibilidade superior a 98% e com consumo de energia de 4,1 kWh/Nm³. A Figura 15 apresenta alguns modelos de eletrolisadores alcalinos.

Figura 15 – Eletrolisador alcalino de baixa temperatura



Fonte: IAEA (2013)

2.2.4 Eletrolisador PEM

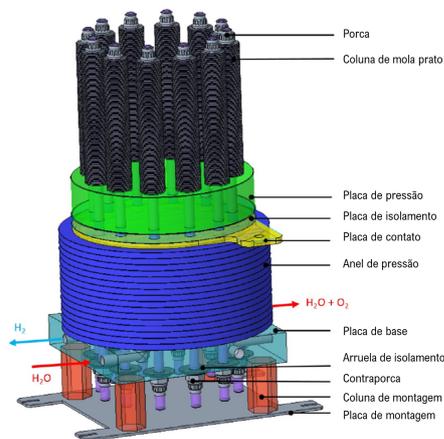
Segundo [Selamet et al. \(2011\)](#), em um eletrolisador de membrana de troca de prótons *PEM*, ocorre a dissociação da água em gases de hidrogênio e oxigênio. Esse tipo de eletrolisador possui eficiência energética da *stack* de até 75% de acordo com ([TABANJAT et al., 2015](#)). Enquanto o oxigênio é produzido no ânodo, os núcleos de hidrogênio migram para o cátodo para formar moléculas de hidrogênio. O princípio de funcionamento e uma representação esquemática desse tipo de eletrolisador são ilustrados na Figura 14, letra b. Além disso, o termo eletrolise *PEM* também é chamada de eletrólito de polímero sólido ou *Solid Polymer Electrolyte (SPE)* ou membrana de eletrólito de polímero (também, *PEM*), todos referindo-se a um sistema que incorpora uma membrana sólida que conduz prótons de forma iônica. Esta membrana desempenha uma dupla função, atuando como dispositivo de separação de gases e condutor de íons (prótons). A utilização de *Água Deionizada (DI)* é essencial nesses eletrolisadores, sendo recomendada uma aplicação de resistividade para prolongar a vida útil das *stacks*. Vale ressaltar que a tecnologia *PEM* teve sua origem no programa espacial Gemini ([KONOPKA; GREGORY, 1975](#)). No funcionamento do eletrolisador *PEM*, o eletrólito é contido em uma membrana fina e sólida condutora de íons, ao contrário da solução aquosa encontrada nos eletrolisadores alcalinos. Essa configuração permite a transferência de íons H^+ (prótons) ou moléculas de água hidratada (H_3O^+) do ânodo para o cátodo, separando assim os gases de hidrogênio e oxigênio. Os prótons (H^+) são conduzidos através da membrana por um campo elétrico, em que se unem aos elétrons provenientes da fonte de energia no cátodo, formando o gás hidrogênio H_2 .

De acordo com [Konopka e Gregory \(1975\)](#), embora haja uma similaridade no princípio de funcionamento (mas inversa) em comparação com as células a combustível *PEM*, os componentes individuais, como as camadas de difusão de gás, camadas de catalisador, campo de fluxo e placas bipolares, assim como os materiais de vedação,

geralmente diferem em eletrolisadores *PEM* bem montados. Como a água é utilizada em estado líquido em um eletrolisador *PEM*, materiais suscetíveis à corrosão não podem ser empregados na seção anódica devido ao alto potencial anódico. O titânio, comumente utilizado como distribuidor de corrente e campo de fluxo em eletrolisadores *PEM*, é resistente à corrosão devido à formação de um filme de passivação, embora a camada de óxido aumente a perda ôhmica. Dado que a tensão de operação (1,8 V a 2,0 V) de um eletrolisador *PEM* está na faixa de corrosão do titânio (POURBAIX, 1974), os componentes anódicos devem ser pré-processados, como o revestimento com platina, para prevenir a corrosão e garantir um bom contato.

As células individuais do mesmo princípio, mostradas na Figura 16, são separadas por placas bipolares de titânio. Nas extremidades superior e inferior da pilha de células são instalados coletores de corrente, principalmente feitos de cobre ou alumínio (BERNT; GASTEIGER, 2016), para a conexão elétrica. Placas de extremidade espessas construídas de alumínio ou aço, juntamente com vários parafusos e conjuntos de molas planas empilhadas, são usadas para garantir uma compressão uniforme das células. A vida útil da pilha de sistemas comerciais é normalmente de 40.000 a 60.000 horas e está planejada para atingir 90.000 horas ou aproximadamente 10 anos de serviço contínuo em sistemas futuros próximos (SCHMIDT *et al.*, 2017). As principais partes propensas à degradação são o *Membrane Electrode Assembly (MEA)* e o PTL anódico (FENG *et al.*, 2017). Estes podem ser substituídos por novos componentes num processo de revisão. A espessura da placa bipolar de titânio nos atuais eletrolisadores *PEM* de última geração é de cerca de 3 mm (GAGO *et al.*, 2015), pois existem canais usinados ou gravados em ambos os lados das placas bipolares com profundidades de cerca de 1 mm cada (ITO *et al.*, 2010). Membranas de ácido polissulfônico para condução de prótons (principalmente Nafion) com espessura de cerca de 200 μm são usadas como eletrólito (BABIC *et al.*, 2017).

Figura 16 – Projeto de uma *stack* para produção de H_2V



Fonte: adaptado de Haas *et al.* (2021).

Os eletrolisadores de água *PEM* podem produzir hidrogênio de alta pureza em faixas de temperatura mais baixas, de 70 a 90°C. IrO₂ e Pt são usados como materiais catalisadores de ânodo e cátodo, respectivamente (MILLET *et al.*, 2010; SUTHERLAND, 2012). A membrana Nafion é normalmente usada para conduzir os íons hidrogênio (H⁺); é aplicado como um eletrólito sólido, em oposição ao eletrólito líquido em eletrolisadores alcalinos. Um diagrama esquemático da célula do eletrolisador *PEM* e o mecanismo de reação são mostrados na Figura 16 . Os íons de hidrogênio migram através da membrana sólida para formar moléculas de hidrogênio. Devido à natureza ácida do eletrólito e às superfícies metálicas do eletrodo, a cinética da reação dos eletrolisadores *PEM* é rapidamente induzida em comparação com a de uma célula alcalina (ROSSMEISL *et al.*, 2007). Como resultado, os eletrolisadores PEM são mais seguros e podem operar à pressão atmosférica no lado do ânodo, enquanto o lado do cátodo está exposto a pressões mais altas (GODULA-JOPEK, 2015; BESSARABOV *et al.*, 2016).

De acordo com Haas *et al.* (2021) a célula anódica compreende um distribuidor de corrente, uma camada de transporte porosa *Camadas Porosas de Transporte (PTL)*, uma camada microporosa (MPL), uma vedação e uma estrutura anódica. O distribuidor de corrente, também conhecido como PTL, é responsável por fornecer água deionizada de forma contínua e uniforme ao local da reação. Ele também atua como condutor elétrico para transferência de elétrons na zona de reação. A eficiência do processo de eletrólise depende da prevenção do bloqueio da superfície do eletrodo por bolhas de oxigênio, destacando a importância de um bom design do campo de fluxo, que influencia a distribuição espacial de temperatura, pressão, velocidade e concentração de oxigênio.

Uma camada microporosa adicional (MPL) posicionada entre o distribuidor e o MEA permite a distribuição uniforme da água e a remoção do gás oxigênio e dos elétrons, além de dissipar o calor de reação gerado no eletrodo devido à sua alta condutividade térmica. O calor é conduzido através do distribuidor de corrente para a placa bipolar e, em seguida, para o fluxo de água. Os canais de entrada e saída de água são integrados à estrutura anódica de plástico, que é selada para evitar vazamentos.

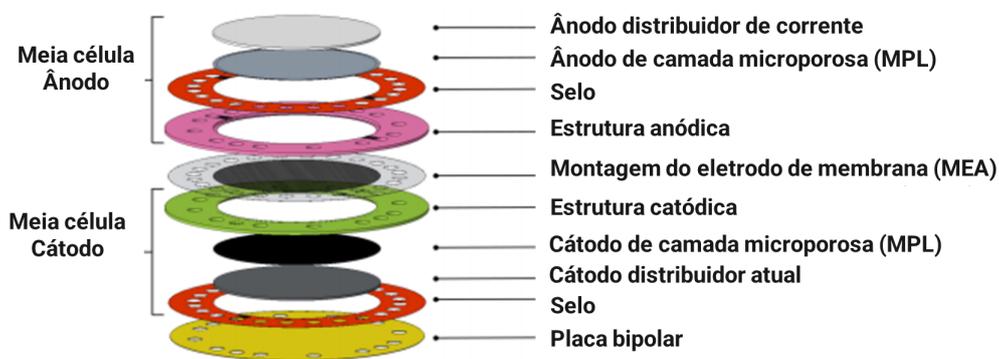
O componente central do eletrolisador *PEM* é o conjunto de eletrodo de membrana (MEA), que consiste em uma membrana polimérica não corrosiva como eletrólito, com camadas catalíticas fixadas nas superfícies laterais para as reações eletroquímicas. A membrana tem a função de conduzir prótons de hidrogênio do ânodo para o cátodo, sendo sua capacidade de absorver água crucial para a condutividade. A membrana mais comumente utilizada é a Nafion® da DuPont (NAFION... , 2010). Além disso, o diafragma reduz as taxas de permeação de hidrogênio e oxigênio devido às altas diferenças de pressão.

Os prótons de hidrogênio transportados são reduzidos com elétrons para formar hidrogênio gasoso na meia célula do cátodo. Os componentes da meia célula do cátodo são semelhantes aos do ânodo, com pequenas variações nos requisitos de material. Para o distribuidor de corrente no cátodo, foi utilizado papel carbono de meia célula, garantindo

alta condutividade elétrica e térmica. Um MPL hidrofóbico à base de carbono separa a água do lado do ânodo, enquanto a estrutura do cátodo é idêntica à do ânodo, servindo principalmente para acomodar o MPL, o distribuidor de corrente e os canais de saída.

As células adjacentes são conectadas eletricamente através de placas bipolares, que têm a função de conduzir os elétrons para a meia célula adjacente com a menor resistência elétrica possível. Além disso, as placas bipolares absorvem cargas mecânicas e distribuem uniformemente a pressão aos componentes, proporcionando a separação entre hidrogênio e oxigênio e evitando a formação de uma mistura inflamável. A Figura 17 apresenta uma ilustração expandida da montagem dos internos de uma célula eletrolítica PEM.

Figura 17 – Esquemático de montagem da célula PEM



Fonte: adaptado de [Haas et al. \(2021\)](#).

2.2.5 Eletrolisador Óxido Sólido

Em eletrolisadores de óxido sólido, a célula opera em temperaturas substancialmente mais altas do que os eletrolisadores alcalinos e PEM na faixa de 900–1000°C. Os eletrodos da célula são construídos de níquel e menos eletricidade é necessária para o processo de separação do hidrogênio, ilustrado na Figura 14 ([PI et al., 2016](#)). Diferentes fontes de entrada de calor, como calor residual e energia nuclear, podem ser usadas para reduzir a dependência da eletricidade para aquecimento ([HINO et al., 2004](#); [UTGIKAR](#); [THIESEN, 2006](#)). Além disso, a eficiência da célula aumenta com temperaturas operacionais mais altas. Infelizmente, as altas temperaturas também aumentam a taxa de degradação do eletrólito e reduzem a vida útil do SOEC. Além disso, as demonstrações existentes do SOEC só podem operar na escala de quilowatts.

2.2.6 Membrana de troca aniônica

AEM é a mais recente tecnologia de eletrólise de água, impulsionada principalmente por aplicações eletroquímicas para produção de hidrogênio nos últimos anos. Os eletrolisadores AEM combinam as vantagens dos eletrolisadores de água alcalina e PEM (VARCOE *et al.*, 2014). O mecanismo de reação de uma célula AEM é ilustrado na Figura 14. Como pode ser visto, o hidrogênio e a hidroxila são gerados no lado do cátodo. Além disso, materiais catalisadores não nobres podem ser usados para células AEM, levando a custos mais baixos de produção de hidrogênio (LENG *et al.*, 2012). No entanto, o desempenho do AEM ainda é baixo devido à fraca atividade do catalisador e à menor condutividade da membrana AEM. Portanto, a eletrólise da água AEM requer investigações adicionais, especificamente em relação aos materiais da membrana, custo da célula e eficiência. É claro que os eletrolisadores SOEC e AEM ainda estão na fase de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e estão menos maduros em comparação com as tecnologias alcalinas e PEM. Além disso, os benefícios do AEM incluem menor custo geral e alta estabilidade de produção de H₂ (PAVEL *et al.*, 2014)]. No entanto, a tecnologia AEM requer um desenvolvimento significativo para ser utilizada na produção de H₂ em escala industrial no curto prazo. Além disso, as diferentes tecnologias de eletrólise da água apresentam desafios diferentes, como desempenho da célula, durabilidade, materiais de membrana, catalisadores e custo da célula (DU *et al.*, 2022).

2.3 A estatística aplicada a engenharia de confiabilidade

Sabe-se que o uso de dados estatísticos remonta aos censos realizados na antiga Babilônia, Egito e, mais tarde, no Império Romano, quando os dados coletados eram sobre assuntos relacionados ao Estado, tais como nascimentos e óbitos (LARSON; FARBER, 2015). Por sua vez, a palavra Estatística é derivada da palavra latina status, que significa “estado”, enquanto sua definição é considerada como a ciência que trata da coleta, organização, análise e interpretação dos dados para a tomada de decisões. Já a definição de Dados, consistem em informações provenientes de observações, contagens, medições ou respostas (MOLIN; JEE, 2021).

As principais métricas de correlação para variáveis quantitativas são a covariância e o coeficiente de correlação Linear.

2.3.1 Covariância

De acordo com Larson e Farber (2015), a análise estatística multivariada permite quantificar os relacionamentos entre variáveis. Isso nos possibilita examinar correlações, ou seja, como uma variável se comporta em relação a outra, além de realizar previsões sobre comportamentos futuros. Um conceito fundamental para mensurar essa relação é a covariância, que quantifica o relacionamento entre variáveis medindo a variação conjunta entre duas variáveis quantitativas X e Y . Sua expressão é dada por

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n - 1} \quad (2.10)$$

- X_i : i -ésimo valor de X ;
- Y_i : i -ésimo valor de Y ;
- \bar{X} : média dos valores de X ;
- \bar{Y} : média dos valores de Y ;
- n : tamanho da amostra.

Segundo Jaokar *et al.* (2016), uma das desvantagens da covariância é que seu valor varia de acordo com o tamanho da amostra, o que pode resultar em estimativas imprecisas quando o número de dados é pequeno. Para contornar essa limitação, o coeficiente de correlação de Pearson é uma solução mais apropriada.

2.3.2 Correlação linear

Conforme Larson e Farber (2016), a correlação é uma medida estatística que descreve a associação entre variáveis aleatórias. Existem vários métodos para calcular o coeficiente de correlação, cada um adequado a diferentes tipos de associações.

- **Correlação de Pearson:** Mede a associação linear entre variáveis contínuas. Esse coeficiente quantifica a extensão em que a relação entre duas variáveis pode ser descrita por uma linha reta.
- **Correlação de Spearman:** Um coeficiente não paramétrico que mede a relação monotônica (não necessariamente linear) entre variáveis, sendo apropriado quando os dados apresentam uma distribuição não normal ou contêm valores ordinais.
- **Tau de Kendall:** Similar à correlação de Spearman, mas baseado em concordâncias e discordâncias entre pares de observações, sendo particularmente útil para pequenos conjuntos de dados ou quando há muitos empates.

Neste trabalho foi adotado o método de Pearson devido a natureza contínua dos dados analisados. Sabe-se que a força de uma associação entre duas variáveis quantitativas pode ser avaliada por meio de um coeficiente de correlação. O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida que quantifica a intensidade da associação linear entre essas variáveis. Recebeu este nome em homenagem a Karl Pearson, que desenvolveu sua fórmula em 1896. O coeficiente é geralmente denotado por ρ , enquanto sua estimativa é representada por r (LARSON; FARBER, 2015).

O coeficiente de correlação de Pearson varia entre -1 e 1. Valores negativos indicam uma correlação inversa (ou negativa), o que significa que, em média, quando uma variável x aumenta, a variável y tende a diminuir (ou vice-versa). Valores positivos, por outro lado, sugerem uma correlação direta (ou positiva), indicando que x e y tendem a variar na mesma direção.

O valor máximo de ρ é alcançado quando todos os pontos em um diagrama de dispersão estão alinhados perfeitamente ao longo de uma linha reta inclinada, o que caracteriza uma correlação perfeita (com $\rho = +1$ ou $\rho = -1$). Em contraste, a ausência de correlação é evidenciada quando os pontos se distribuem aleatoriamente em uma nuvem circular. Caso os pontos formem uma nuvem com um eixo principal curvo, o coeficiente r pode não refletir adequadamente a associação entre as variáveis (FAVERO; BELFIORE, 2017).

- A fórmula para se obter o coeficiente de correlação de Pearson em uma amostra é

$$r = \frac{COV_{xy}}{s_x s_y} \quad (2.11)$$

em que,

$$COV_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (2.12)$$

é a covariância de x e y , e

$$s_x = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.13)$$

$$s_y = \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.14)$$

são os desvios-padrões de x e y , respectivamente.

Desta forma, a equação completa para o coeficiente de correlação de Pearson é dada por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.15)$$

Em que: n é o número de pares de dados, \bar{x} e \bar{y} são as médias das variáveis X e Y , e x_i e y_i são os valores individuais das variáveis X e Y .

Todavia a seguinte equação para calcular r é mais conveniente, pois exige um número menor de operações aritméticas:

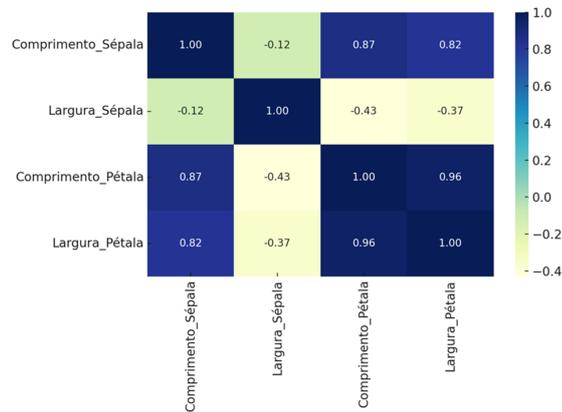
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \right]}} \quad (2.16)$$

Segundo [Navlani e Idris \(2021\)](#), a correlação linear mede a força e a direção da relação entre duas variáveis, sendo expressa por um coeficiente que varia entre -1 e 1. Esse coeficiente, calculado pela equação da correlação linear de Pearson, avalia a covariância normalizada entre as variáveis. Quando se trabalha com um conjunto de múltiplas variáveis, os coeficientes de correlação podem ser organizados em uma matriz de correlação, na qual cada elemento representa a relação entre dois pares de variáveis.

Um *heatmap*, conforme ilustrado na Figura 18, é uma representação gráfica bidimensional em grade, em que cada célula reflete um valor da matriz de correlação linear. Esse gráfico é amplamente utilizado para visualizar as relações entre variáveis, com valores que variam de -1 a 1, sendo que a diagonal principal sempre apresenta valor igual a um, indicando correlação perfeita de uma variável consigo mesma ([FAVERO; BELFIORE, 2017](#)).

Os *heatmaps* utilizam gradientes de cor para representar diferentes níveis de correlação, facilitando a identificação de padrões em grandes conjuntos de dados. A simetria da matriz e as anotações numéricas nas células enriquecem a interpretação, oferecendo uma visão detalhada das correlações e da estrutura geral do relacionamento entre as variáveis. Assim, o *heatmap* é uma ferramenta visual eficiente para a análise de correlações lineares em diversos contextos científicos ([NAVLANI; IDRIS, 2021](#)).

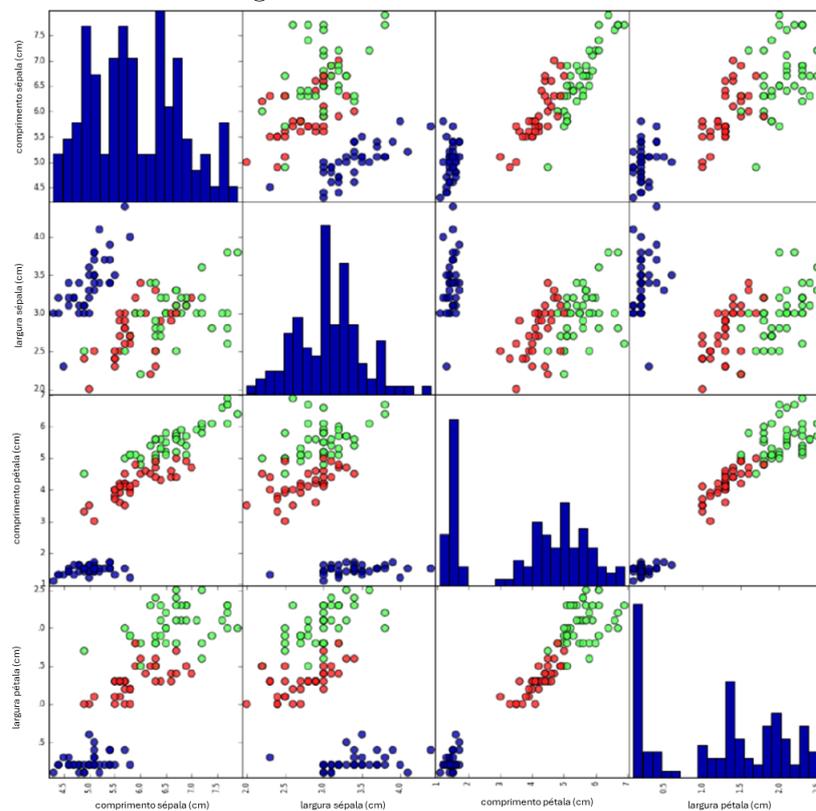
Figura 18 – Gráfico Mapa de Calor ou Heatmap



Fonte: [Navlani e Idris \(2021\)](#)

Ainda sobre formas de visualização, o gráfico de pares, também conhecido como *pair plot* demonstrado na Figura 19, é uma ferramenta gráfica utilizada para a análise exploratória de dados, proporcionando uma visualização simultânea das relações entre múltiplas variáveis e suas distribuições individuais. Ele combina dois tipos de gráficos: histogramas, que representam as distribuições de variáveis individuais, e gráficos de dispersão *scatter plots*, que mostram a relação entre pares de variáveis ([KIRK, 2016](#)).

Figura 19 – Gráfico Pair Plot



Fonte: [Müller e Guido \(2016\)](#)

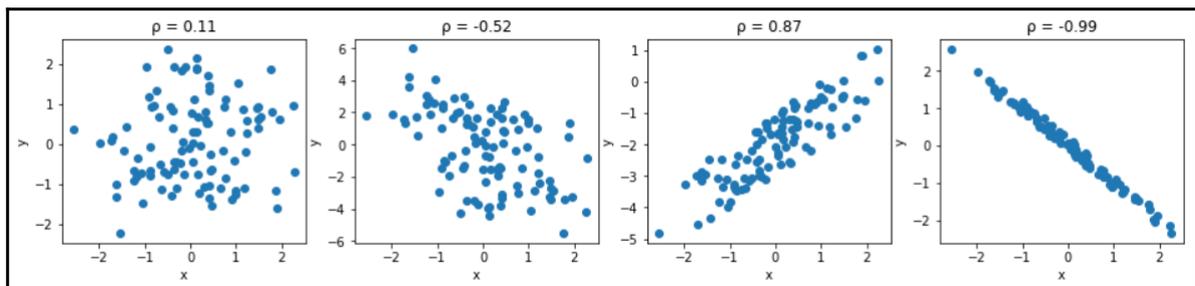
Um *pair plot* consiste em uma matriz de gráficos, em que a diagonal exibe a distribuição de cada variável e os elementos fora da diagonal mostram gráficos de dispersão, permitindo a análise das inter-relações entre as variáveis. Esse formato facilita a identificação de padrões e correlações nos dados (MOLIN; JEE, 2021).

Além disso, segundo Molin e Jee (2021), os gráficos de pares são valiosos em análises exploratórias, pois oferecem uma visão abrangente do comportamento dos dados, destacando distribuições e relacionamentos bivariados. Essa abordagem é amplamente utilizada em estudos científicos com múltiplas variáveis, proporcionando uma compreensão mais profunda das interdependências nos dados.

Em continuidade sobre formas alternativas de visualização, o gráfico de dispersão apresentado na Figura 20 apresenta diferentes relações entre as variáveis. No gráfico à esquerda, com $\rho = 0,11$, observa-se a ausência de correlação entre as variáveis, que se comportam como ruído aleatório, sem exibir padrões discerníveis. O gráfico da Figura 20 apresenta uma correlação negativa moderada, com $\rho = -0,52$. Neste, as variáveis tendem a se mover em conjunto: à medida que a variável x aumenta, a variável y diminui, embora ainda haja elementos de aleatoriedade presentes (MOLIN; JEE, 2021).

No terceiro gráfico da esquerda, com $\rho = 0,87$, evidencia-se uma correlação positiva forte, em que ambas as variáveis, x e y , aumentam simultaneamente. Por fim, no gráfico à extrema direita, com $\rho = -0,99$, a correlação negativa é quase perfeita. Nesse caso, a variável x aumenta enquanto a variável y diminui, e os pontos formam uma linha quase reta, indicando uma forte relação linear.

Figura 20 – Gráficos de Dispersão



Fonte: Navlani e Idris (2021)

2.4 Teste de hipóteses

De acordo com Larson e Farber (2016) Um teste de hipóteses é uma ferramenta estatística amplamente utilizada em diversas áreas da ciência para avaliar se há evidências suficientes nos dados de uma amostra que suportem uma determinada afirmação sobre uma população. No contexto da correlação entre variáveis, o teste de hipóteses pode ser empregado para verificar se o coeficiente de correlação amostral r , que mede a força e a

direção da relação entre duas variáveis em uma amostra, é um reflexo de uma correlação significativa no nível populacional, representado pelo coeficiente R .

O procedimento começa com a formulação de duas hipóteses: a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_a). A hipótese nula geralmente assume que não há efeito ou relação significativa — neste caso, que o coeficiente de correlação populacional é igual a zero. A hipótese alternativa, por outro lado, sugere a existência de uma correlação significativa, positiva ou negativa, dependendo do teste realizado (LARSON; FARBER, 2015). Os testes podem ser unilaterais ou bilaterais. No teste unilateral, busca-se evidências de uma correlação em uma direção específica. Por exemplo:

- Para testar se há uma correlação negativa significativa entre duas variáveis, a hipótese nula seria $H_0 : r \geq 0$, indicando que não há correlação negativa. A hipótese alternativa seria $H_a : r < 0$, sugerindo que existe uma correlação negativa significativa.
- De forma semelhante, para testar uma correlação positiva, a hipótese nula seria $H_0 : r \leq 0$, enquanto a hipótese alternativa seria $H_a : r > 0$, buscando evidências de uma correlação positiva significativa.

No teste bilateral, o objetivo é verificar se há qualquer correlação significativa, sem definir uma direção específica. Nesse caso, a hipótese nula seria $H_0 : r = 0$, e a hipótese alternativa seria $H_a : r \neq 0$, o que indicaria a existência de uma correlação, positiva ou negativa. Em resumo, o teste de hipóteses é um método essencial para avaliar a validade de uma correlação observada em uma amostra, permitindo que pesquisadores infiram se uma relação semelhante ocorre na população de interesse.

2.4.1 Correlação e causalidade

O fato de duas variáveis serem fortemente correlacionadas não implica, por si só, numa relação de causa e efeito entre elas. Um estudo mais aprofundado é geralmente necessário para determinar se há uma relação causal entre as variáveis (LARSON; FARBER, 2016). Quando há uma correlação significativa entre duas variáveis, um pesquisador deve considerar as seguintes possibilidades:

- A correlação é coincidência.
- Ambas as variáveis são influenciadas por uma terceira variável.
- Uma variável causa a outra.

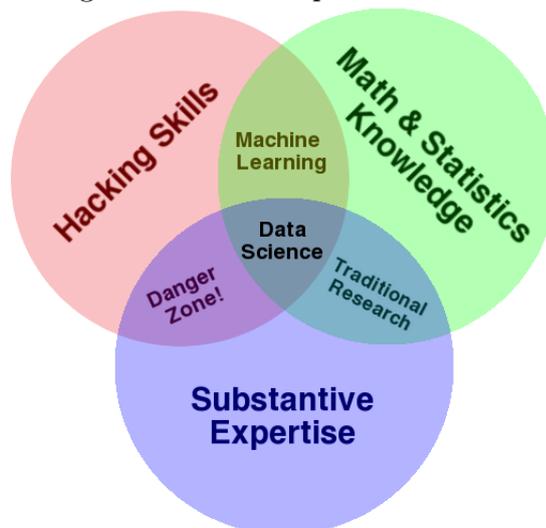
2.5 *Data Science* ou Ciências de Dados

A ciência de dados, conhecida como *Data Science*, tem se destacado como uma área de grande relevância e crescimento, especialmente em setores industriais e tecnológicos. Conforme Conway (2013), a crescente quantidade de dados gerados apresenta um desafio significativo: a extração de valor desses dados para a otimização de processos e a tomada de decisões. No setor de energia, tem sido aplicada para prever falhas em equipamentos críticos, por meio de modelos preditivos que analisam dados operacionais e padrões históricos. A correta interpretação desses dados permite a economia de recursos, aumento da eficiência energética e melhoria na segurança operacional. Na engenharia, a ciência de dados também desempenha um papel essencial no desenvolvimento de soluções inovadoras, como o controle preditivo e otimização de processos de manutenção, garantindo maior confiabilidade e prolongamento da vida útil dos ativos. Dessa forma, o uso da ciência de dados tem se tornado fundamental para a transformação digital da indústria, contribuindo diretamente para o aumento da competitividade e eficiência.

A ciência de dados é uma área interdisciplinar que combina habilidades em tecnologia, matemática e conhecimento especializado em um domínio, conforme ilustrado na Figura 21. Essa integração abrange técnicas como *machine learning*, *data mining*, *big data* e *data visualization*.

A definição exata das competências necessárias para atuar na área ainda gera debates na comunidade acadêmica e no mercado profissional. Um dos modelos mais aceitos para ilustrar as competências de um cientista de dados é o Diagrama de Venn, que propõe a interseção de três áreas principais (CONWAY, 2013).

Figura 21 – Diagrama de Venn aplicado na Ciência de Dados



Fonte: Conway (2013)

- **Habilidades de Hacker:** As habilidades de *hacker* referem-se à capacidade de programação e manipulação de dados em formatos não estruturados ou incomuns. Essas habilidades são essenciais para coletar, preparar e limpar os dados, além de aplicá-los em soluções computacionais. A codificação é particularmente importante para realizar operações algorítmicas, acessar bancos de dados e aplicar ferramentas estatísticas aos problemas (CONWAY, 2013).
- **Conhecimento em Matemática e Estatística:** Após a coleta e preparação dos dados, a matemática e a estatística desempenham um papel central na extração de informações. Ferramentas matemáticas, como probabilidade e álgebra, são utilizadas para a análise dos dados. O conhecimento estatístico permite a escolha adequada de abordagens analíticas e a aplicação correta de modelos para resolver problemas específicos. Entender conceitos como regressão linear e métodos estatísticos avançados é fundamental para extrair *insights* precisos e evitar erros interpretativos (KIRK, 2016).
- **Expertise Substancial:** A *expertise*¹ substancial refere-se ao conhecimento aprofundado de um domínio específico, como negócios, saúde, finanças, ou educação, entre outros. Esse conhecimento é crucial para a formulação das perguntas corretas e para a definição dos problemas que serão resolvidos com o auxílio da ciência de dados (CONWAY, 2013).
- **Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*):** O aprendizado de máquina é uma disciplina estreitamente ligada à ciência de dados, que envolve a aplicação de modelos matemáticos e computacionais para fazer previsões (MÜLLER; GUIDO, 2016).
- **Pesquisa Tradicional:** Na pesquisa tradicional, há uma forte ênfase no conhecimento em matemática, estatística e expertise de domínio. Essa abordagem permite aos pesquisadores focarem exclusivamente na interpretação dos dados e na extração de *insights*², sem a necessidade de manipulação tecnológica dos mesmos (LACHTERMACHER, 2007).
- **Interseções e Zonas de Perigo:** As interseções incompletas das áreas do Diagrama de Venn podem ser problemáticas. Uma das áreas mais perigosas, denominada "zona de perigo", combina habilidades de *hacker* e conhecimento substancial, mas sem o devido domínio de matemática e estatística. Nessa área, pessoas podem gerar análises aparentemente complexas e confiáveis, porém sem a compreensão adequada dos métodos estatísticos subjacentes, o que pode levar a conclusões errôneas e potencialmente prejudiciais (CONWAY, 2013).

¹ Expertise refere-se ao conhecimento, habilidades e experiência especializadas em um determinado campo ou área de atuação.

² O termo *insights* refere-se a compreensões profundas ou percepções claras sobre um assunto, que vão além do conhecimento superficial. Em geral, envolvem a capacidade de entender uma situação, problema ou conceito de maneira mais clara e significativa.

A combinação de matemática, estatística e *hacking* resulta em aprendizado de máquina, que, embora útil, não é necessariamente ciência de dados, pois carece da dimensão investigativa e de construção de conhecimento inerente à ciência. A verdadeira ciência de dados, como sugerido pelo Diagrama de Venn, surge da interseção dessas três áreas.

Para melhor ilustração a Figura 22 demonstra uma nuvem de palavras que destaca os principais conceitos que compõem a área de *Data Science*. Esses conceitos envolvem a coleta, processamento, análise e interpretação de grandes volumes de dados com o objetivo de gerar conhecimento e apoiar a tomada de decisões. Ferramentas estatísticas, habilidades computacionais e a compreensão de domínios específicos são essenciais para que cientistas de dados possam extrair *insights* valiosos de dados complexos (KIRK, 2016).

Figura 22 – Nuvem de Palavras da Ciência de Dados



Fonte: *The Data Scientist* (2024, apud Dantas (2023))

2.5.1 O cientista de dados

De acordo com Kirk (2016) o cientista de dados é um profissional que atua na interseção entre tecnologia, estatística e conhecimento de negócios, sendo responsável por extrair *insights* valiosos a partir de grandes volumes de dados (*Big Data*). Esse papel tornou-se central em muitas organizações devido à crescente dependência de decisões orientadas por dados. O trabalho do cientista de dados envolve não apenas a análise, mas também a capacidade de estruturar e interpretar dados, transformando informações brutas em conhecimento aplicável para impulsionar estratégias e resolver problemas complexos.

Os cientistas de dados são frequentemente comparados a unicórnios, devido à ampla gama de habilidades que se espera que possuam. Eles devem dominar um conjunto

extenso de competências, que inclui a coleta, manipulação, análise e apresentação de dados, frequentemente de grande volume e complexidade. Esses profissionais combinam habilidades avançadas em matemática, estatística e ciência da computação, aliadas a um profundo entendimento do contexto empresarial em que atuam. Além disso, são exigidas as chamadas *soft skills*, como a capacidade de resolver problemas de forma criativa, comunicar-se eficazmente e apresentar suas conclusões de forma clara e convincente.

A multiplicidade de competências que um cientista de dados deve possuir o torna um dos profissionais mais requisitados no mercado atual, desempenhando um papel essencial no desenvolvimento de soluções inovadoras e na tomada de decisões baseadas em dados.

2.5.2 *Técnicas de Ciência de Dados*

As principais técnicas que um cientista de dados aplica durante sua jornada de trabalho são:

- **Machine Learning:** [Hackeling \(2017\)](#) define o aprendizado de máquina como o estudo e desenvolvimento de algoritmos e programas que aprimoram seu desempenho em uma tarefa específica a partir da aprendizagem baseada na experiência.
- **Data Mining:** Mineração de dados é a extração de informações implícitas, previamente desconhecidas e potencialmente úteis de dados. A ideia é construir programas de computador que vasculhem bancos de dados automaticamente, buscando regularidades ou padrões. Padrões fortes, se encontrados, provavelmente serão generalizados para fazer previsões precisas sobre dados futuros ([WITTEN et al., 2011](#)).
- **Big Data:** O conceito de *Big Data* tem se tornado cada vez mais popular, embora sua definição não seja universalmente aceita. [Puts et al. \(2015, apud McNicholas e Tait \(2019\)\)](#) destacam três características fundamentais, conhecidas como os três V's: volume, variedade e velocidade, que descrevem as qualidades dos dados considerados como *Big Data*. Além dessas, outros termos como veracidade também têm sido sugeridos. A discussão sobre o que caracteriza *Big Data* é complexa, envolvendo questões sobre a quantidade, a origem e o formato dos dados.
- **Data Visualization:** [Kirk \(2016\)](#) enfatiza que a visualização de dados deve ser, acima de tudo, representativa de um fenômeno real, em vez de se restringir a uma técnica ou ao formato dos dados. Essa perspectiva tem um grande impacto na compreensão do processo criativo e seus resultados.

2.5.3 Ferramentas e Linguagens de Programação

Segundo [McKinney \(2022\)](#), no campo da ciência de dados, diversas linguagens de programação desempenham papéis cruciais, cada uma oferecendo características que atendem a diferentes necessidades e preferências dos profissionais. Entre as linguagens mais destacadas estão R, MATLAB, SAS, Stata e Python. O R é amplamente reconhecido por suas capacidades estatísticas e visualização de dados, tornando-o uma escolha popular entre estatísticos e analistas de dados. MATLAB, por outro lado, é frequentemente utilizado em ambientes acadêmicos e industriais para cálculos numéricos complexos, enquanto SAS e Stata são preferidos em setores que requerem análise de dados e relatórios robustos.

Entretanto, a linguagem que mais se destaca nesse cenário é o Python. Desde seu lançamento em 1991, Python consolidou-se como uma das linguagens interpretadas mais populares, especialmente após 2005, quando ganhou proeminência no desenvolvimento web, em parte devido a *frameworks* como Django. Embora frequentemente referida como uma "linguagem de *scripting*", essa classificação pode subestimar seu potencial para o desenvolvimento de *software* complexo ([GRUS, 2019](#)).

Nos últimos anos, Python evoluiu de uma opção inovadora em computação científica para uma das linguagens mais importantes em ciência de dados e aprendizado de máquina, tanto no ambiente acadêmico quanto no mercado. O suporte aprimorado a bibliotecas, como Pandas e Scikit-learn, transformou Python em uma escolha preferencial para tarefas de análise de dados, processamento interativo e visualização. Sua versatilidade e robustez fazem dela uma excelente opção como linguagem principal para o desenvolvimento de aplicações orientadas a dados, consolidando-se como um recurso valioso no arsenal de profissionais da área ([MCKINNEY, 2022](#)).

3 METODOLOGIA

De acordo com abordagem de [Kauark *et al.* \(2010\)](#) esta Pesquisa Científica deve ser classificada como um Estudo de Caso, Descritiva, Aplicada e Quantitativa.

Sendo Pesquisa Quantitativa, quanto a abordagem do problema, Aplicada quanto a natureza, Descritiva quanto aos objetivos, Estudo de Caso quanto aos procedimentos técnicos aplicados.

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizado neste trabalho, com a finalidade de fornecer um detalhamento efetivo para os leitores e pesquisadores reproduzirem o procedimento. Inicialmente, é detalhado o sistema de geração fotovoltaica, o sistema de retificação, e o sistema de eletrólise utilizado no estudo. Em seguida, será apresentado a forma de coleta dos dados, pré-processamento, análise exploratória, e por fim, a modelagem e desenvolvimento. Ao longo do texto, será apresentado a metodologia usada para cálculo da eficiência do eletrolisador de hidrogênio verde tipo *PEM*, o método proposto para identificar as principais variáveis que afetam a eficiência, e por fim, identificar os parâmetros operacionais ideais para obtenção da máxima eficiência.

3.1 Sistema de Produção de Hidrogênio Verde

3.1.1 Sistema Solar Fotovoltaico

Figura 23 – Registro Aéreo da Usina Fotovoltaica



Fonte: O Autor

A unidade fotovoltaica representada na Figura 23 fica localizada no *Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP)* – São Gonçalo do Amarante - Ceará. A usina visa produzir energia elétrica a partir do recurso solar, assim como contribuir para a diversificação da matriz energética brasileira, com a utilização de tecnologia sustentável para a geração de energia elétrica a partir da irradiação solar. A energia gerada visa

alimentar um eletrolisador tipo *PEM*, com o intuito de produzir H_2V .

A área destinada a *Unidade Fotovoltaica (UFV)* é de aproximadamente 7,5 hectares contendo sistema de drenagem e possuindo perímetro de área cercada de 1450 metros. A usina solar tem capacidade instalada de, aproximadamente, 2,5MW de potência *Alternating Current (CA)* e 2,97 MW de potência *CC* instalada.

3.1.1.1 Módulos

A *UFV* conta com um sistema de energia solar composto por 5.568 módulos fotovoltaicos de silício monocristalino (m-Si) da marca Jinko, modelo Tiger Pro JKM535M-72H4-BDVP, utilizando tecnologia bifacial. Cada módulo possui uma potência de 535Wp, resultando em uma potência instalada total de 2,97 MWp. Esses módulos estão distribuídos em 192 conjuntos, chamados strings, compostos por 29 módulos cada. Cada módulo contém 144 células em série, resultando em uma tensão de circuito aberto (V_{oc}) de 49,54 V e uma corrente de curto-circuito (I_{sc}) de 13,83 A. Os módulos possuem potência de 535 Wp, em que cada *string* tem a potência de 15,51 kWp. Demais especificações estão disposta na Tabela 2 e Figura 24.

Tabela 2 – Especificações para o módulo JKM535M-72HL4-BDVP

Especificação	1000 W/m ²	800 W/m ²
Potência Máxima (Pmax)	535Wp	398Wp
Tensão de Potência Máxima (Vmp)	40.94V	37.94V
Corrente de Potência Máxima (Imp)	13.07A	10.49A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	49.54V	46.76V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	13.83A	11.17A
Eficiência do Módulo STC (%)	20.75%	
Temperatura de Operação (C)	-40C a +85C	
Tensão Máxima do Sistema	1500VDC (IEC)	
Classificação Máxima do Fusível em Série	30A	
Fator Bifacial de Referência	70% ~ 55%	

Fonte: Adaptado do manual do fabricante.

Figura 24 – Módulos Jinko da Usina Fotovoltaica

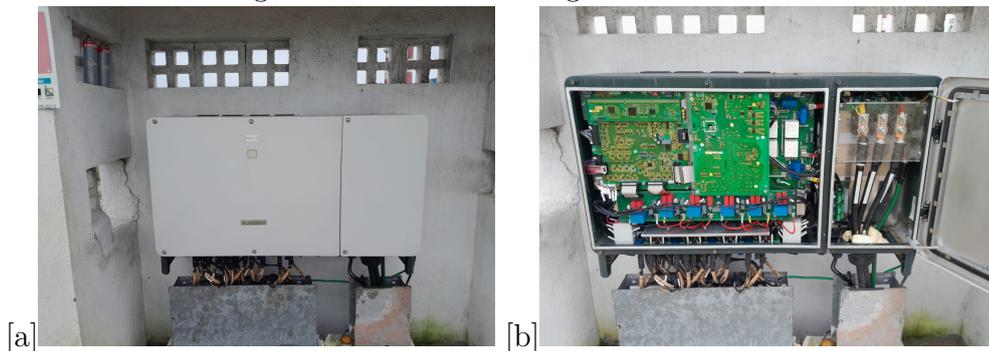


Fonte: O Autor

3.1.1.2 Inversor de Frequência

São utilizados 10 inversores Sungrow SG250HX de 250 kW/800 V, conforme Figura 25, totalizando 2.500 kW de potência. O inversor converte a corrente contínua *CC* gerada pelos painéis solares em corrente alternada *CA*, compatível com a rede elétrica. As strings foram conectadas diretamente nos inversores através de terminal tipo MC4 para até 1.500 V_{DC} . Dos 10 inversores, 6 tem 20 strings conectadas (total de 310,2 kWp) e 4 possuem 18 *string* conectadas (total de 279,18 kWp).

Figura 25 – Inversor Sungrow SG250HX



Fonte: O Autor

3.1.1.3 Transformadores

A *UFV* é composta por dois transformadores de potência trifásico tipo a seco de 1,5 MVA, Tensão 6,6 kV, conforme Figura 26.

Figura 26 – Transformador de Tensão



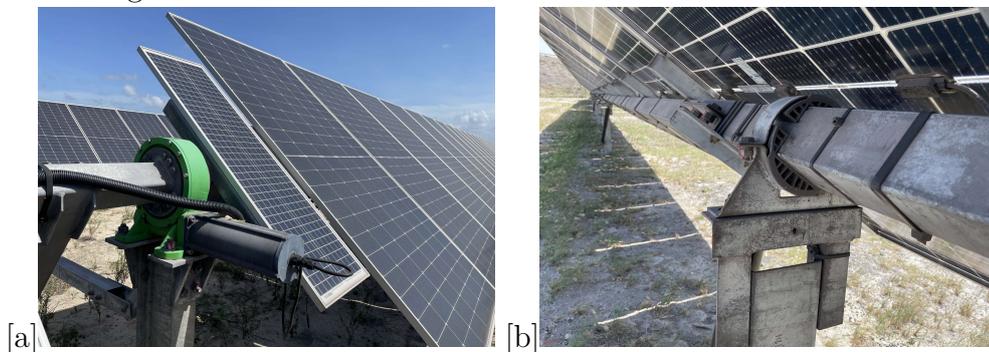
Fonte: O Autor

3.1.1.4 Tracker

Os módulos fotovoltaicos estão montados em estruturas metálicas do tipo tracker bifileira, orientadas no sentido Norte-Sul, permitindo o acompanhamento dos raios solares ao longo do dia, com movimentação no eixo Leste-Oeste, conforme ilustrado na Figura 27. Para a conversão da energia captada, são utilizados dez inversores fotovoltaicos, cada um com potência de 250 kW e tensão de operação de 800 V, resultando em um total de 2.500 kW de potência instalada. A elevação da tensão de 800 V dos inversores para 6,6 kV é realizada por meio de dois transformadores elevadores de tensão a seco, cada um com potência de 1.400 kVA. Essa elevação de tensão é necessária para possibilitar a conexão com o barramento interno do eletrolisador.

O sistema de fixação dos módulos é fabricado pela empresa Brametal, utilizando trackers bifileira que suportam até 116 módulos, dispostos em duas fileiras. Cada tracker é equipado com um motor de corrente contínua, responsável pelo acionamento das fileiras principal e secundária, e inclui um sistema autônomo de alimentação para o controlador e o motor, permitindo uma rotação de até 110° (55° em cada direção). A comunicação entre os controladores é realizada por meio do protocolo sem fio Zigbee. A instalação das bases dos módulos é do tipo concretada.

Figura 27 – Tracker- Sistema de Basculamento dos Painéis



Fonte: O Autor

3.1.1.5 Estação Meteorológica

A estação meteorológica UFV, conforme ilustrado na Figura 28, é responsável pelo registro de parâmetros fundamentais para a avaliação do desempenho da usina solar e o monitoramento das condições ambientais. Entre os principais sensores, destacam-se três piranômetros de classe C, que medem a irradiação solar horizontal, a irradiância no plano dos painéis solares e a irradiância refletida no solo. A estação também conta com sensores de temperatura PT-100, um destinado à medição da temperatura dos módulos e outro para a temperatura ambiente. Além disso, são utilizados um anemômetro e um anemoscópio para monitorar, respectivamente, a velocidade e a orientação do vento. Para

o registro de chuvas, a estação está equipada com um pluviômetro. O sistema inclui um painel de controle com *logger*, uma fonte de energia e dispositivos de proteção, além de uma torre metálica de 3 metros de altura para a instalação dos sensores.

Figura 28 – Estação Meteorológica



Fonte: O Autor

3.1.1.6 CFTV e Vigilância

Um sistema de *CFTV* e sensores de vigilância foi implementado na usina com o objetivo de assegurar a segurança e prevenir invasões nas áreas adjacentes ao cercamento perimetral. O sistema, conforme ilustrado na Figura 29, conta com câmeras instaladas em locais estratégicos, proporcionando cobertura quase total do perímetro da usina.

Figura 29 – *CFTV* e Vigilância



Fonte: O Autor

Entre os equipamentos, destaca-se uma câmera do tipo *speed dome*, que possibilita o monitoramento em 360°, além de câmeras fixas posicionadas de maneira a focar em áreas críticas e de acesso à usina, como o portão de entrada e a área interna.

3.1.2 Unidade de Eletrólise para Produção de H_2V

A planta de H_2V , apresentada na Figura 30, consiste no sistema de eletrólise da água de tecnologia *PEM*. O eletrolisador *PEM* é um gerador de hidrogênio de alta pureza, destinado a diversos usos industriais e energéticos.

Figura 30 – Planta de Produção de H_2V



Fonte: Fonte: [O Povo \(2023\)](#)

Sua capacidade máxima de produção é de $250 \text{ Nm}^3/\text{h}$ de hidrogênio, enquanto sua pressão operacional máxima é de 35 barg, resultando em hidrogênio com um alto grau de pureza (99,999%; *Volume por Volume (v/v)*). Vale ressaltar que a notação Nm^3/h é relevante, pois os gases variam de volume conforme a temperatura e a pressão. Ao utilizá-la, especifica-se a quantidade de hidrogênio produzido em um volume padronizado, o que possibilita comparações consistentes e precisas, independentemente das condições locais de temperatura e pressão ([GOLDENERGY, 2024](#)). Quanto ao consumo máximo, a planta consome 1,52 MW para o sistema de Retificação *Média Tensão (MT)* e 100 kW *Baixa Tensão (BT)* para o sistema de Controle e Consumo do sistema integrado *Balance of Plant (BoP)*.

O eletrolisador utilizado como laboratório de experimentos neste trabalho está disposto em um container ISO HC de 40 pés, com um *Peso Bruto Total (PBT)* estimado em 23 toneladas. O padrão de montagem e a filosofia de "empacotamento" do sistema seguem os padrões normativos ISO 22734-1. O sistema possui três *stacks* ou pilhas distintas: uma de 57 células, outra de 85 células e uma terceira de 129 células. Neste trabalho, será considerada apenas a pilha de 129 células, denominada Allagash, devido à falta de histórico suficiente de operação e produção das demais pilhas, referidas como Merrimack. O *stack* Allagash opera com uma corrente nominal de 3750 A e uma tensão que varia de 257 V a 310 V.

Dentre os módulos existentes num sistema de eletrólise da água tipo *PEM* para

a produção de hidrogênio destacam-se: Retificador e Controle de Potência, Módulo de Produção e Tratamento de Água, Módulo *PEM*, *stack PEM*, Módulo de Purificação e Secagem de H_2 , Módulo de Análise de Gases, Painel de Controle e Supervisão e Utilidades.

3.1.2.1 Retificador e Controle de Potência

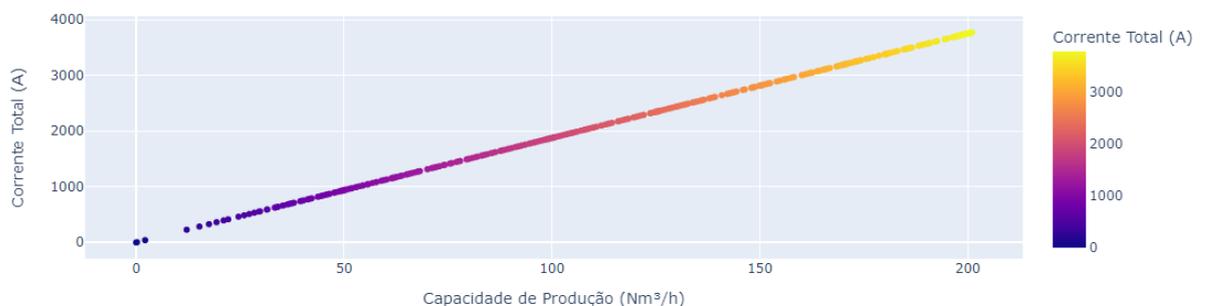
Figura 31 – Retificador Weg



Fonte: G1 Ceará (2023)

A Figura 31 representa o retificador. Por padrão, a entrada em média tensão trifásica da rede de alimentação elétrica *CA* é retificada para o formato *CC*. A taxa de produção de hidrogênio é diretamente proporcional à corrente elétrica fornecida ao *stack*, conforme pode ser visto na Figura 32, módulo ou empilhamento de células eletrolíticas. Assim, ao ajustar a corrente elétrica, seja de forma local ou remota, também se ajusta a produção instantânea de hidrogênio pelo eletrolisador.

Figura 32 – Gráfico de Dispersão da Corrente Elétrica x Produção de H_2V



Fonte: O Autor

3.1.2.2 Produção e Tratamento de Água

A água de processo é um aspecto especialmente importante para a tecnologia *PEM* de eletrólise da água. A água desmineralizada de baixa condutividade é assegurada pela operação integrada de dois subsistemas embarcados no sistema de eletrólise da água. A partir da fonte de água local, o primeiro subsistema, denominado Módulo de Produção de Água de Processo, é representado na Figura 33 e é responsável pelo tratamento da água bruta fornecida ao sistema, por meio de etapas sequenciais. É relevante destacar que existem bombas distintas para a produção de água e a alimentação das pilhas ou *stack*, as quais pressurizam o sistema de eletrólise.

Figura 33 – Sistema de Produção e Tratamento de Água



Fonte: O Autor

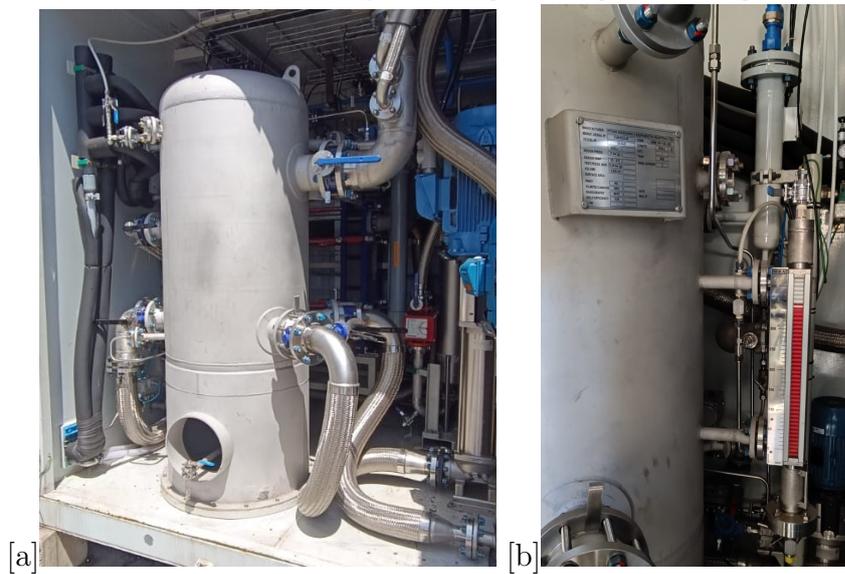
A geração de água pura é composta pela pré-filtração da corrente com uma malha de 10 micras, seguida por um leito de carvão ativado, que tem como função a remoção do cloro e de possíveis substâncias orgânicas. Após esta etapa, realiza-se uma nova filtração, agora com maior retenção, de 1 micra. A água pré-tratada alimenta a *Osmose Reversa (OR)* por meio de uma bomba de pressurização.

A corrente permeada da *OR* alimenta o sistema de deionização, responsável pela remoção dos íons restantes e pela produção de água com baixa condutividade. Quando necessário, considera-se a inclusão, antes da deionização, de leitos de ultrafiltração para aumentar a vida útil do processo, removendo preliminarmente o ferro e a sílica, especialmente quando suas concentrações iniciais são superiores a 1 mg/L e 130 mg/L, respectivamente. Após a deionização, ainda na etapa de produção de água de processo, um leito UV é utilizado para a irradiação da água produzida por luz com comprimento

de onda de 254 nm, o que promove a esterilização bacteriológica e inibe o crescimento de biofilmes biológicos.

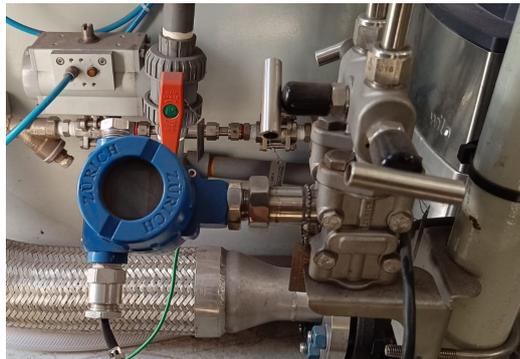
Essa corrente abastece o Tanque de Água de Processo, que possui um sistema de controle de nível e é localizado na Área de Processo. A água produzida permanece em constante polimento (deionização), sem a opção de funcionamento simplificado. Sem esse circuito fechado de polimento, a qualidade da água produzida seria gradualmente comprometida. Essa água é o insumo que alimenta o circuito de eletrólise propriamente dito.

Figura 34 – Tanque de Separação de Água Oxigênio e Regua de Nível



Fonte: O Autor

Figura 35 – Transmissor de pressão diferencial inteligente Modelo PSI.EX.H.DIF



Fonte: O Autor

O circuito de gerenciamento térmico e tratamento contínuo da água de processo é responsável por manter a qualidade da água contida no Vaso Separador de Oxigênio (O₂-GLS), conforme ilustrado na Figura 34. A água também abastece o Módulo *PEM* e, conseqüentemente, os módulos eletrolíticos *stacks*. Neste circuito, a água de processo

passa por um trocador de calor, que é resfriado com água das utilidades locais. Após essa etapa, a corrente resfriada de água de processo é direcionada a seis leitos de deionização, dispostos em paralelo, para a manutenção contínua da condutividade da água de processo, que deve ser inferior a $0,13 \text{ /cm}$.

O tanque de separação de água e oxigênio, desempenha um papel fundamental no controle e manutenção do nível de água necessário para o abastecimento das duas bombas responsáveis pela alimentação das *stacks*, em que ocorre o processo de eletrólise. Este tanque opera como um vaso de pressão especializado, no qual ocorre a separação física entre o oxigênio gasoso e água (O₂-GLS). O tanque possui duas formas de medição de nível, sendo através da régua de nível e por transmissor de pressão, conforme Figura 34 e 35.

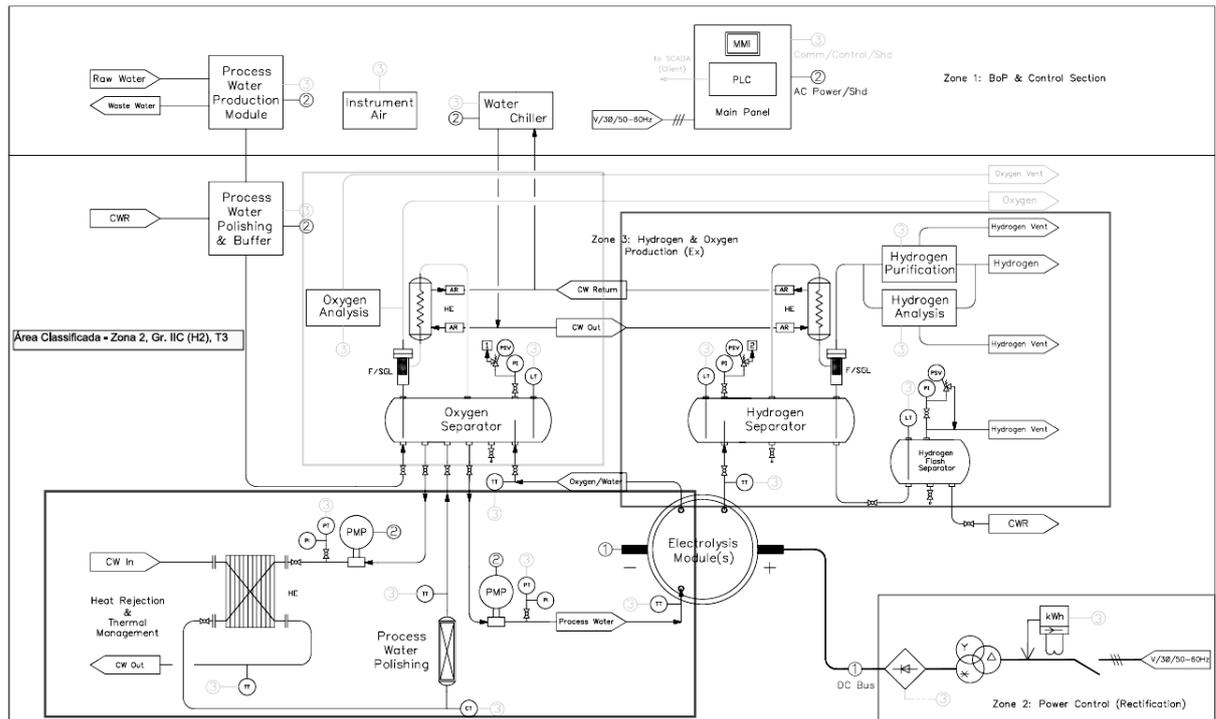
O processo de separação é facilitado por um sistema interno de chicanas e defletores, projetado para induzir a condensação dos fluidos de retorno. As chicanas direcionam o fluxo do fluido, aumentando a eficiência da separação por meio de alterações no padrão de escoamento e proporcionando mais tempo de residência do fluido no tanque. Dessa forma, o oxigênio gasoso é segregado na parte superior do tanque, enquanto o líquido de retorno é direcionado para o fundo, pronto para ser recirculado no sistema. Este projeto garante que o oxigênio não se misture com o fluido de trabalho, preservando a eficiência do processo e a integridade dos equipamentos subsequentes evitando turbilhamento do fluido na tomada de saída de água para sucção das bombas.

3.1.2.3 Módulo PEM

Este é o módulo no qual o insumo de processo (água líquida) é dissociada eletroquimicamente em seus constituintes, dando origem às correntes de H_2 e O_2 geradas separadamente. Esta transformação é realizada num reator eletroquímico, denominado módulo eletrolítico ou, simplesmente, *stack*. Simplificadamente, o processo de eletrólise da água é representado pela equação de reação global:



Deve-se destacar que a reação requer o fornecimento de energia para sua ocorrência (caráter endotérmico), a qual é fornecida como eletricidade.

Figura 36 – Módulo *PEM* de Produção de H_2V 

Fonte: Adaptado Manual do Fabricante

O Módulo *PEM* exemplificado na Figura 36 é idealizado tendo o módulo eletrolítico como elemento central. A produção de H_2 e O_2 ocorre através da passagem de corrente *CC* através da *stack*, o que é viabilizado pelo retificador de processo, eletrônica de potência destinada à retificação da eletricidade disponível na rede de distribuição (no padrão *CA*) para o padrão *CC*. Como já mencionado, a produção dos gases é diretamente proporcional ao valor da corrente elétrica que atravessa o *stack*, sendo, o controle instantâneo de produção oriundo da integração do retificador ao *Controlador Lógico Programável (CLP)* de processo.

Ambas as correntes de gases (H_2 e O_2) são produzidas na presença de água líquida, a qual também é responsável pela remoção de calor residual de processo originado no *stack PEM*. Estas correntes bifásicas (gás-líquido) seguem para vasos separadores, responsáveis pela recuperação de água de processo. Destes vasos evoluem as correntes gasosas, as quais são resfriadas em trocadores de calor operados contra água gelada (proveniente da Unidade de Água Gelada, utilidade incluída no sistema integrado) e seguem para as próximas etapas de processo.

O nível de água nos vasos separadores é constantemente monitorado. Com base nos limites operacionais impostos pelo *CLP* de processo, água é reposta ao Vaso Separador de Oxigênio, equipamento responsável por conter o maior inventário de água no sistema e interfacear não somente o processo de produção dos gases como também o circuito de gerenciamento térmico e tratamento contínuo da água de processo.

No caso do Vaso Separador de H_2 apresentado na Figura 37, também com base nos limites operacionais impostos pelo *CLP* de processo, água é drenada ao Tanque de Água, neste caso, um equipamento voltado à recuperação de água catódica.

O sistema de eletrólise deste fabricante é projetados com a consideração primária pela segurança da operação. O estoque de gases é limitado e nenhuma operação manual pode colocar os envolvidos em contato com riscos não gerenciados.

O Módulo *PEM*, exemplificado na Figura 36, é idealizado com o módulo eletrolítico como elemento central. A produção de H_2 e O_2 ocorre por meio da passagem de corrente *CC* através da *stack*, um processo viabilizado pelo retificador de processo, que é uma eletrônica de potência destinada a converter a eletricidade disponível na rede de distribuição, que opera no padrão *CA*, para o padrão *CC*. Como mencionado anteriormente, a produção dos gases é diretamente proporcional ao valor da corrente elétrica que atravessa o *stack*, sendo o controle instantâneo da produção oriundo da integração do retificador ao *CLP* de processo.

Ambas as correntes de gases (H_2 e O_2) são geradas na presença de água líquida, a qual também desempenha um papel crucial na remoção do calor residual gerado no *stack PEM*. Essas correntes bifásicas (gás-líquido) são direcionadas para vasos separadores, responsáveis pela recuperação da água de processo. A partir desses vasos, as correntes gasosas evoluem, sendo resfriadas em trocadores de calor operados com água gelada (proveniente da Unidade de Água Gelada, uma utilidade integrada ao sistema) e, em seguida, seguem para as próximas etapas do processo.

O nível de água nos vasos separadores é constantemente monitorado. Com base nos limites operacionais definidos pelo *CLP* de processo, a água é repostada ao Vaso Separador de Oxigênio, que é responsável por manter o maior inventário de água no sistema e por interagir não apenas com o processo de produção dos gases, mas também com o circuito de gerenciamento térmico e o tratamento contínuo da água de processo.

No caso do Vaso Separador de H_2 , apresentado na Figura 37, a água é drenada para o Tanque de Água, que é um equipamento voltado à recuperação da água catódica, também com base nos limites operacionais estabelecidos pelo *CLP* de processo.

O sistema de eletrólise deste fabricante é projetado com uma consideração primária pela segurança operacional. O estoque de gases é limitado, e nenhuma operação manual pode expor os envolvidos a riscos não gerenciados.

Figura 37 – Tanque Separador de H_2

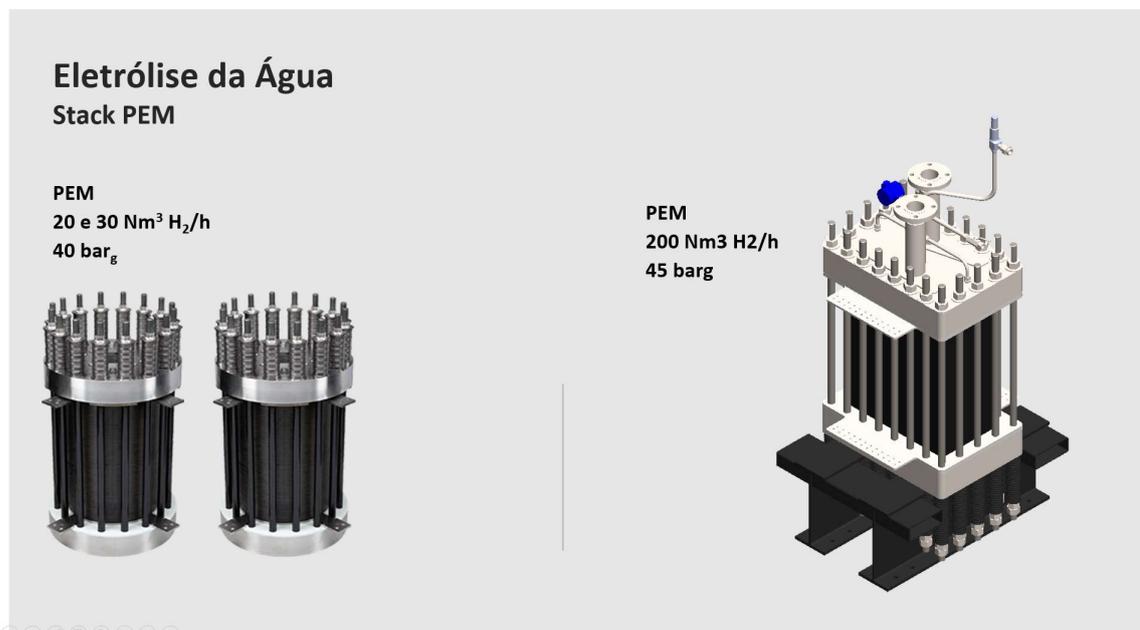


Fonte: O Autor

3.1.2.4 Stack PEM

A tecnologia de eletrólise da água do tipo *PEM* (Proton Exchange Membrane), demonstrada na Figura 38, é configurada por células zero-gap. Isso significa que os eletrodos são empilhados diretamente ou depositados sobre a própria membrana de troca de prótons, resultando no chamado *Catalyst-Coated Membrane (CCM)*. Os gases produzidos (H_2 e O_2) são removidos na parte traseira das camadas mencionadas.

Figura 38 – Configuração dos *stacks* do Eletrolisador



Fonte: Adaptado Manual do Fabricante

O componente central da célula eletroquímica é a membrana condutora de prótons, que precisa estar hidratada para manter a condutividade protônica. Essa necessidade de hidratação impõe limitações à relação “temperatura x pressão” durante a operação.

Nanopartículas de platina são geralmente utilizadas no lado do cátodo, para a Reação de Evolução de Hidrogênio (*Reação de Evolução do Hidrogênio (HER)*). No lado do ânodo, o dióxido de irídio (IrO_2) é empregado principalmente para a Reação de Evolução de Oxigênio (*Reação de Evolução de Oxigênio (OER)*). Ambas as camadas catalíticas são microscopicamente porosas, o que permite a evolução dos gases. Essas camadas contêm uma mistura de partículas de catalisadores, partículas de suporte e ionômeros, que atuam como ligantes e promovem um maior contato iônico com a membrana.

O *CCM* é fixado entre os *PTL*, que têm a função de distribuir água e remover gás. Enquanto discos de titânio sinterizado são usados no ânodo, especialmente em células que operam sob pressão diferencial, *PTL* carbonáceo é empregado no lado do cátodo (região de alta pressão). Os *PTL* estão sujeitos à degradação em razão de gradientes de temperatura, *hotspots*, e à presença de um ambiente ácido, resultado da natureza da eletrólise do *PEM* e da degradação da membrana, a qual também está associada à liberação de ácido fluorídrico. Adicionalmente, a degradação mecânica pode ocorrer devido aos efeitos de ciclos de pressão.

Espaçadores de células, malhas ou grades podem ser inseridos entre as placas bipolares e os *PTLs*. Essas estruturas abertas facilitam o fluxo de água deionizada através da célula, alimentando o processo e gerenciando o calor gerado, além de permitir a remoção de gás da célula.

Durante a operação, os prótons hidratados (H_3O) migram do lado do ânodo, atravessando a membrana, até o lado do cátodo, em que são reduzidos a gás hidrogênio. Durante essa migração, e em função das altas densidades de corrente da tecnologia *PEM* (além de outros fatores, como a estrutura do polímero, temperatura e pressão de operação), os prótons “arrastam” moléculas de água do ânodo para o cátodo, mesmo contra um gradiente de pressão positivo, em um processo conhecido como arraste osmótico iônico.

Para alcançar maiores taxas de produção de hidrogênio, várias células individuais são conectadas eletricamente em série e hidraulicamente em paralelo, formando um empilhamento (daí o termo *stack*). As placas bipolares separam duas células adjacentes e funcionam simultaneamente como ânodo de um lado e cátodo da célula adjacente. Os flanges das extremidades fornecem a força de fechamento, por meio de parafusos, molas-prato e porcas roscadas, garantindo uma montagem estanque ao longo do tempo, mesmo quando submetida a ciclos de pressão. As Figuras 39 e 40 demonstram os *stacks* Allagash e Merrimack, respectivamente. Nota-se que o Allagash possui um único corpo, enquanto o Merrimack apresenta dois corpos hidraulicamente conectados.

Figura 39 – *Stack* Allagash

Fonte: O Autor

Figura 40 – *Stack* Merrimack

Fonte: O Autor

3.1.2.5 Purificação e Secagem de H_2

A tecnologia de eletrólise da água tipo *PEM* pode produzir hidrogênio com pureza superior a 99,9% (vol.) diretamente a partir do *stack*. Para atender aplicações que exigem pureza maior, é adicionado um módulo de purificação catalítica, seguido de secagem por adsorção.

Os principais contaminantes no hidrogênio do *stack PEM* são oxigênio e água residual. Na purificação catalítica, o Reator Deoxo converte o oxigênio em água, utilizando uma pequena quantidade do hidrogênio gerado. Esse processo é facilitado pelo pré-aquecimento a 80°C, tornando a reação espontânea e exotérmica. Após essa etapa, a água formada é removida por secagem por adsorção (PSA), aumentando a pureza do hidrogênio para mais de 99,999%.

Após a reação no Reator Deoxo, a corrente de hidrogênio é resfriada para condensar a água formada e preparar para a próxima etapa de purificação. A única impureza restante é a água, que é removida no secador por adsorção, garantindo o fornecimento contínuo de hidrogênio de alta pureza. O processo é monitorado por analisadores de oxigênio e medidores de ponto de orvalho.

No sistema de adsorção, composto por duas colunas, as etapas são:

Adsorção: O leito, sob pressão de operação, recebe o hidrogênio e adsorve a água.

Despressurização: A coluna é despressurizada para liberar os contaminantes adsorvidos.

Purga: Parte do hidrogênio é usada para limpar a coluna regenerada. Pressurização

Final: A coluna regenerada é repressurizada com hidrogênio, ficando pronta para voltar à operação. Essas etapas garantem a continuidade do processo e a alta pureza do hidrogênio fornecido.

3.1.2.6 Análise de Gases

Para análise de desempenho ao longo de toda a vida útil do sistema, como forma de atestar a qualidade dos gases produzidos e para se atestar as condições necessárias de segurança operacional, o sistema integrado possui pontos de amostragem associados aos instrumentos analíticos descritos e apresentado na Figura 41.

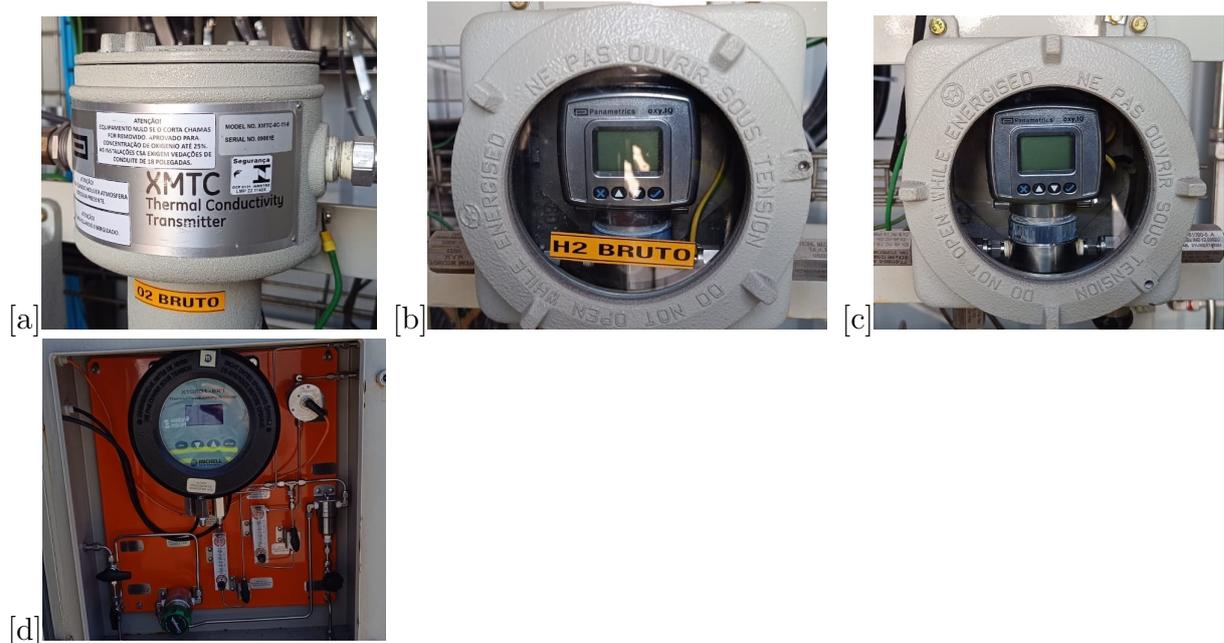
Item a: Analisador de oxigênio bruto (sensor de condutividade térmica) modelo XMTC-6C-11-0;

Item b: Analisador de oxigênio na corrente de hidrogênio bruto (analisador eletroquímico) modelo: oxy.IQ Transmissor de oxigênio de 4 to 20 mA;

Item c: Analisador de oxigênio na corrente de hidrogênio purificado (analisador eletroquímico) modelo: oxy.IQ Transmissor de oxigênio de 4 to 20 mA;

Item d: Analisador de ponto-de-orvalho na corrente de hidrogênio purificado. Modelo: XTX601-EX1.

Figura 41 – Analisadores de Oxigênio Bruto e Purificado



Fonte: O Autor

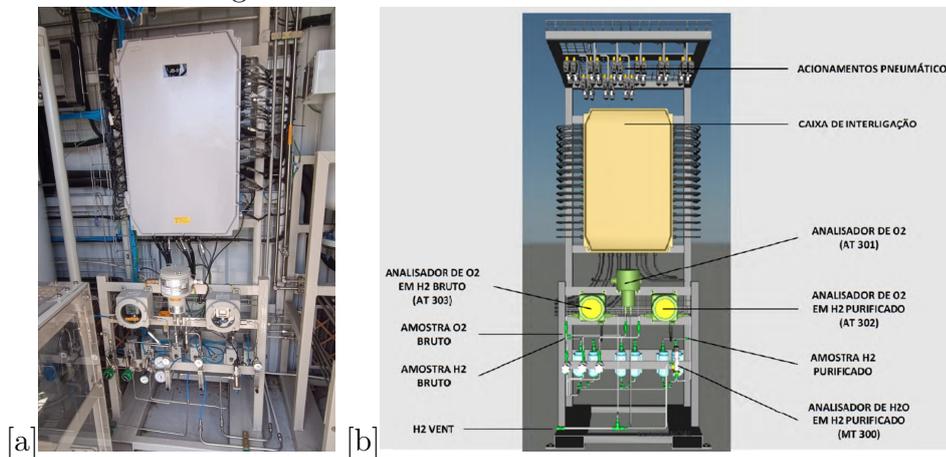
Todos os analisadores acima descritos são continuamente utilizados durante operação estacionária do sistema apresentando na Figura 42. O mencionado analisador de ponto-de-orvalho dedicado à determinação do teor residual de umidade na corrente do produto (H_2), encontra-se inserido na mesma linha de amostragem dedicada ao analisador de oxigênio na corrente de hidrogênio purificado, após este.

Para o ponto de amostragem (a) utiliza-se célula eletroquímica para a determinação do teor de O_2 contaminante da corrente de H_2 .

O ponto de amostragem (b) utiliza sensor de condutividade térmica para a determinação do teor total de O_2 .

Finalmente, o ponto de amostragem (c) utiliza, novamente, célula eletroquímica para a determinação do teor de O_2 contaminante da corrente de H_2 .

Figura 42 – Sistema de Análise de Gases

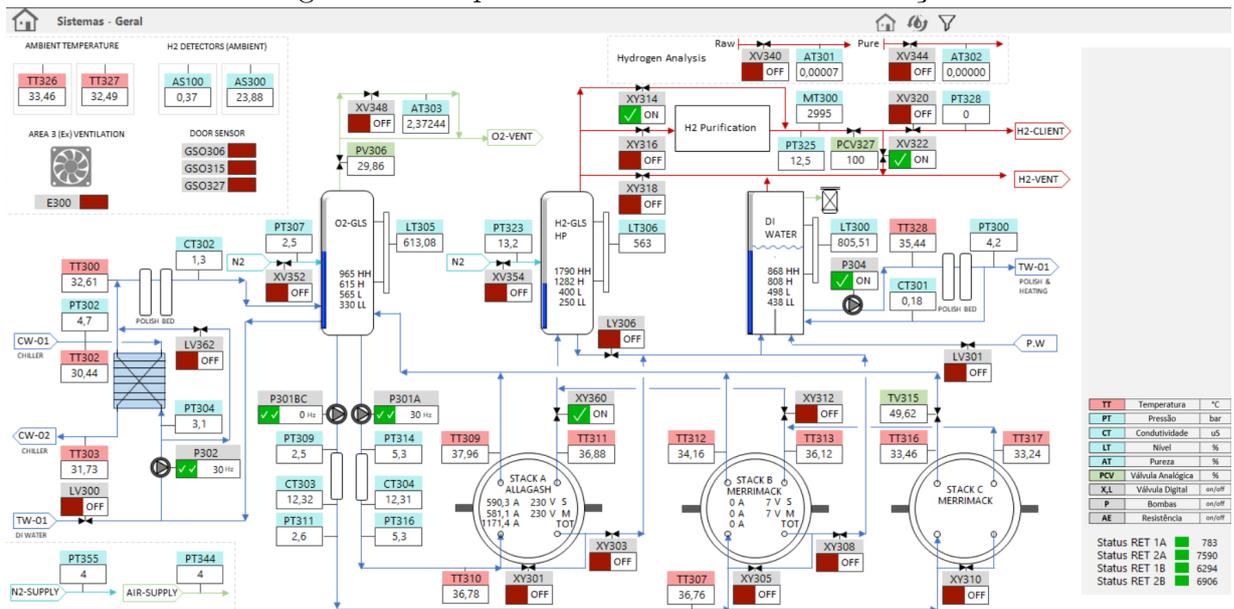


Fonte: adaptado do manual do fabricante

3.1.2.7 Painel de Controle e Supervisão de Processo

Todos os dados coletados pela rede de sensores são centralizados no Painel de Controle e Supervisão do Processo demonstrado na Figura 43. Este painel inclui o *CLP*, todos os demais componentes elétricos e *drivers* de controle do sistema, assim como a *Interface Homem-Máquina (IHM)*, janela virtual para visualização dos parâmetros de processo em tempo real.

Figura 43 – Supervisório de Controle de Produção



Fonte: adaptado do supervisório

Como padrão, está disponível no *CLP* uma porta de comunicação para supervisão remota do sistema de produção de hidrogênio, a qual utiliza protocolo de comunicação ModBus *Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP)*. Adicionalmente, o hardware de controle inclui memória local para armazenamento de dados, tipicamente com capacidade de 16 GB, a qual é capaz de armazenar dados operacionais por até dois anos.

Através desta mesma porta de comunicação os dados podem ainda ser armazenados num servidor, local ou remoto. O fabricante disponibiliza uma interface computacional amigável e intuitiva, permitindo que a equipe técnica envolvida na operação do sistema possa acessar informações em distintos níveis de permissão, se necessário, protegidos por senha. Embora o sistema integrado de produção de hidrogênio possua funcionamento autônomo (Modo Automático), e integrado às demandas locais relacionadas à utilização do hidrogênio, o Painel de Controle e Supervisão possui também um Modo Manual de Operação, utilizado somente por equipe técnica treinada e em situações de comissionamento, descomissionamento e manutenção do sistema. Parâmetros como temperaturas, pressões, níveis de líquidos, condutividade da água de processo, qualidade dos gases produzidos bem como as condições de fornecimento de energia são entradas para o *CLP* de processo, o qual gera sinais de saída direcionados aos dispositivos de controle adequados. Caso as condições do processo se afastem de sua condição nominal, além dos limites permitidos, o *CLP* bloqueará com segurança a produção de gás, e informará a natureza dos alarmes ocorridos à *IHM* ou ao centro de operações ao qual o eletrolisador esteja vinculado.

3.1.2.8 Utilidades

As demandas de utilidades industriais do sistema de eletrólise da água para a produção de hidrogênio purificado estão compiladas:

- Água de Processo: água de alta pureza é utilizada como matéria-prima para a produção de H_2 e O_2 , bem como meio de remoção de calor no processo de eletrólise tipo *PEM*. Devido à criticidade deste insumo, relacionada à alta qualidade dele demandada, a produção de água de processo está contemplada no sistema integrado.
- Nitrogênio: utilizado para inertização das linhas de processo durante comissionamentos e manutenções, como agente de inertização em desligamentos de emergência (E-Stop) e para fins analíticos.
- Água Gelada: Unidade de Água Gelada configura utilidade integrada. Água gelada é demandada por 3 trocadores de calor de placas paralelas destinados exclusivamente ao resfriamento das correntes de H_2 e O_2 em distintos pontos do sistema. Com a condensação promovida pelo resfriamento recupera-se água de processo e se protege o subsistema PSA com relação a presença de líquidos. O ajuste de processo da Unidade de Água Gelada resume-se ao setpoint de 20°C imposto como máxima temperatura para a água gelada à saída de chiller (dada a máxima carga térmica imposta pelo sistema, a temperatura de retorno da água gelada ao chiller nunca deverá exceder o valor de 24°C).
- Ar Comprimido: utilizado somente para pilotagens pneumáticas associadas à instrumentação de controle de processo. Esta utilidade deve atender à classe 1.2.1 da norma ISO 8573.1, 2010.
- Eletricidade: utilidade demandada pelo processo de produção de H_2 propriamente dito, além da necessidade imposta pelo *BoP* (monitoramento, controle e acionamento do balanço-de-planta do sistema).

3.2 Desenvolvimento de algoritmo para cálculo da eficiência e identificação do ponto ideal de operação do eletrolisador tipo *PEM*

3.2.1 Marco Zero

Para uma melhor compreensão e contextualização deste trabalho, é fundamental que o leitor esteja ciente da situação da planta de H_2V , em que toda a pesquisa foi realizada. O projeto em questão é um piloto que implementou uma planta de eletrólise em Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante, Ceará, no ano de 2023. Esta instalação foi viabilizada por meio de fundos provenientes da P&D da *Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)*, conforme estabelecido pela Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. A inauguração da planta ocorreu em 19 de janeiro de 2023, ocasião em que foi produzida a "primeira" molécula de H_2V , conforme descrito na Figura 44.

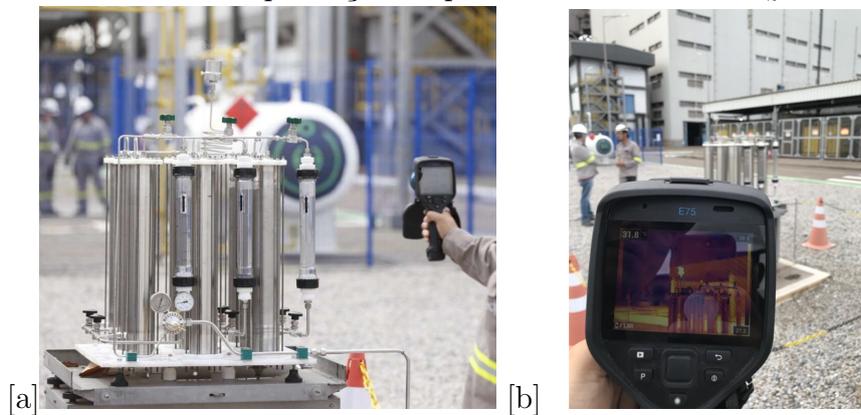
A decisão de implantar um eletrolisador do tipo *PEM* em vez de um eletrolisador alcalino foi baseada em três fatores principais. O primeiro fator é que o eletrolisador *PEM*

representa uma tecnologia emergente e mais inovadora em comparação ao eletrolisador alcalino, já consolidado em aspectos como desempenho, metalurgia e operação. As vantagens tecnológicas do eletrolisador *PEM* foram determinantes para sua escolha.

O segundo fator considerado foi a densidade elétrica; a tecnologia *PEM* requer um volume de eletrólise aproximadamente 2,5 vezes menor do que a tecnologia alcalina para produzir a mesma quantidade de hidrogênio. Essa característica é vantajosa, pois reflete diretamente na área disponível dentro da empresa para a instalação do equipamento.

Além disso, o terceiro fator que influenciou a escolha do eletrolisador *PEM* está relacionado à complexidade do controle de agentes químicos e ao armazenamento necessários para a operação da tecnologia alcalina. Esta última exige uma solução eletrolítica líquida, geralmente composta de hidróxido de potássio ou hidróxido de sódio misturados com água, o que não apenas demanda um controle rigoroso das condições químicas, mas também gera custos adicionais com o armazenamento e manejo desses compostos. Em contraste, a tecnologia *PEM* não requer uma solução eletrolítica líquida, limitando-se apenas ao controle da água utilizada no processo, o que simplifica sua operação e reduz os custos associados.

Figura 44 – Registro de um termovisor medindo a temperatura de combustão da chama no dia da produção da primeira molécula de H_2V do estado



Fonte: adaptado de [Secretaria da Infraestrutura do Ceará \(2023\)](#)

Neste dia havia diversos convidados especiais estiveram presentes, como empresários, políticos e jornalistas e pesquisadores. Para que a experiência dos expectadores presente fosse melhor tangibilizada, foi desenvolvido um queimador para H_2 produzido, em que através de uma câmera termográfica pôde ser visualizado a chama que a olho nu é incolor.

O projeto teve intensa cobertura midiática devido a característica de ser o primeiro eletrolisador de hidrogênio verde operacional na escala de 1 MW da América Latina, deixando um marco na história da transição energética do estado do Ceará, Brasil e do mundo. Portanto, dados comparativos com este trabalho são limitados ou inexistentes até este momento. Todavia, a medida que a pesquisa evoluía pelo autor, resultados

parciais e finais foram sendo apresentados ao fabricante do eletrolisador com a finalidade de endossar os resultados obtidos, conforme dimensionado.

Figura 45 – Reportagem do jornal Diário do Nordeste anunciando o lançamento da 1ª planta de hidrogênio verde do estado

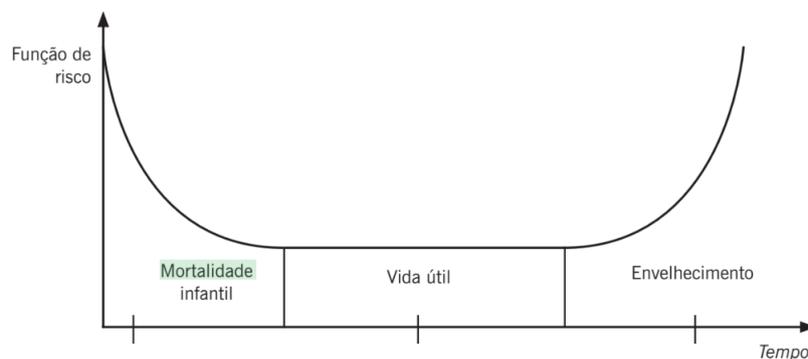


Fonte: [Quintela \(2023\)](#)

É importante salientar que, embora o eletrolisador tenha iniciado suas operações em janeiro de 2023 como indicado na Figura 45, os dados utilizados neste trabalho foram coletados apenas em junho de 2023, logo após a estabilização operacional dos parâmetros do equipamento.

Nesse período, conforme descrito por [Fogliatto e Duarte \(2011\)](#) e representado na Figura 46, a confiabilidade do sistema estava na fase crítica da curva da banheira, com uma alta taxa de falhas, exigindo intervenções e ajustes por parte do fabricante do eletrolisador além dos ajustes normais de comissionamento.

Figura 46 – Curva da Banheira



Fonte: [Fogliatto e Duarte \(2011\)](#)

Após a extração dos dados, foi implementada a estratégia de Análise de Dados baseada no processo *KDD* descrito a seguir. O objetivo principal é minerar e descobrir conhecimento a partir das variáveis operacionais. Para facilitar a manipulação e análise dos dados, foi utilizada a linguagem de programação *Python*, reconhecida por sua eficiência e versatilidade em tarefas de análise estatística.

A sigla *KDD* significa "descoberta de conhecimento a partir de dados" ou *Knowledge Discovery in Databases* (Descoberta de Conhecimento em Bancos de Dados). Muitas vezes, o *KDD* é tratado como sinônimo de mineração de dados, mas a mineração de dados é apenas uma parte do processo maior de descoberta de padrões interessantes. O principal objetivo do *KDD* é extrair ou descobrir padrões ocultos e relevantes a partir de grandes bases de dados, *data warehouse* e outros repositórios de informações, incluindo a *web*.

O processo de *KDD* é composto por sete fases principais:

1. **Limpeza de Dados (*Data Cleaning*)**: Nesta primeira fase, os dados são pré-processados. O ruído é removido, valores ausentes são tratados e outliers são identificados.
2. **Integração de Dados (*Data Integration*)**: Nesta fase, os dados provenientes de diferentes fontes são combinados e integrados, utilizando ferramentas de migração de dados e processos de *Extract, Transform, Load (ETL)* (Extração, Transformação e Carga).
3. **Seleção de Dados (*Data Selection*)**: Os dados relevantes para a tarefa de análise são selecionados nesta etapa.
4. **Transformação de Dados (*Data Transformation*)**: Aqui, os dados são preparados e transformados no formato adequado para análise.
5. **Mineração de Dados (*Data Mining*)**: Nesta fase, são aplicadas técnicas de mineração de dados para descobrir padrões úteis e desconhecidos.
6. **Avaliação de Padrões (*Pattern Evaluation*)**: Os padrões extraídos são avaliados para determinar sua relevância e interesse.
7. **Apresentação do Conhecimento (*Knowledge Presentation*)**: Após a avaliação dos padrões, o conhecimento extraído precisa ser visualizado e apresentado para profissionais de negócios, a fim de apoiar a tomada de decisões.

O processo completo de *KDD* é frequentemente representado em um diagrama que ilustra suas etapas, como pode ser visto na Figura 47. O *KDD* é um processo iterativo que visa melhorar a qualidade dos dados, sua integração e transformação, com o objetivo de alcançar um sistema mais eficiente.

Figura 47 – Processo de *KDD*

Fonte: Navlani *et al.* (2021)

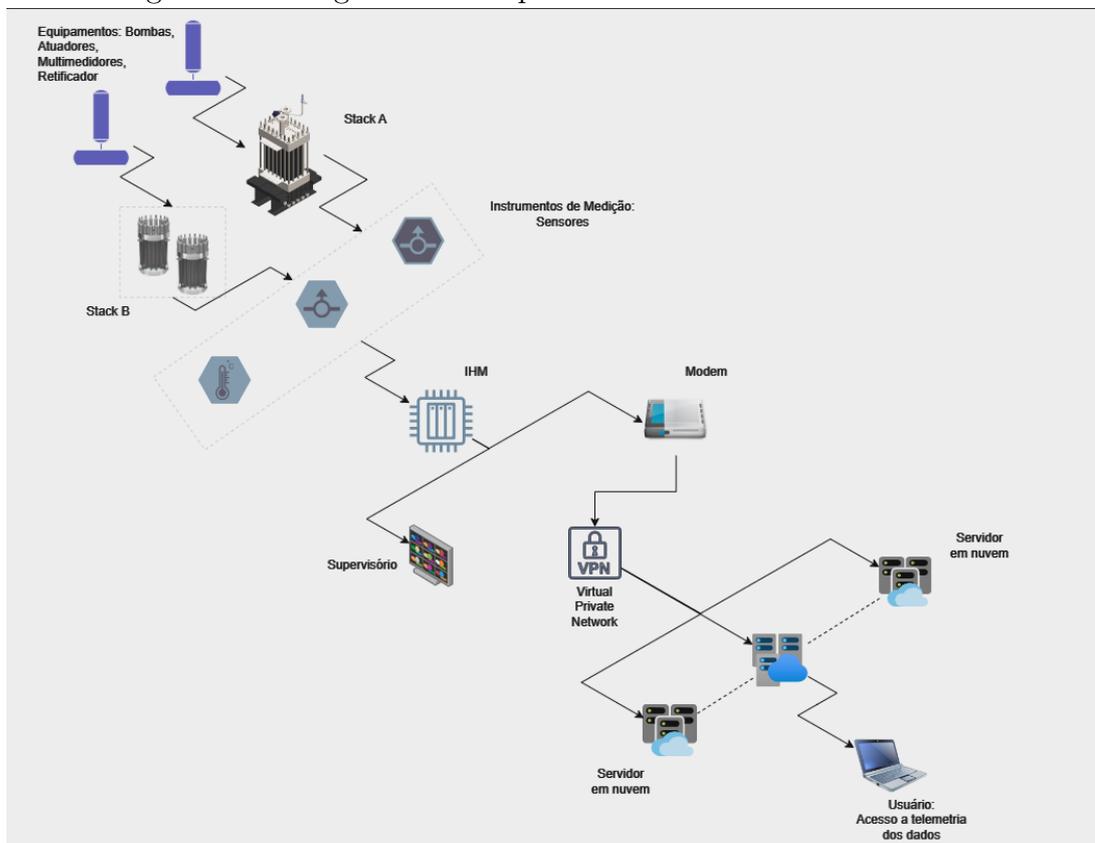
3.2.2 Fases da Análise de Dados tipo *KDD*

Para desenvolver esta pesquisa, foi necessário adquirir dados de telemetria dos diversos equipamentos (atuadores, multimedidores, sensores, motores, bombas, *chillers*, tanques, detectores de gases, osmose reversa e *stacks*), que somam 225 sinais diferentes.

Conforme demonstrando na Figura 48, os sinais dos equipamentos foram acessados pelo fabricante através de servidores em nuvem que armazenam os dados, que por sua vez, estão conectados a *IHM* através de um modem com acesso a internet usando uma rede *Virtual Private Network (VPN)*.

3.2.2.1 Coleta dos Dados

Figura 48 – Diagrama da Arquitetura do Sistema de Telemetria



Fonte: O Autor

Os dados extraídos do eletrolisador através dos servidores, possuem extensão de tabela .xlsx e são brutos, sem qualquer nível de tratamento.

Os dados utilizado possuem as seguintes características:

- O *dataframe* foi disponibilizado pelo fabricante em quatro arquivos distintos, sendo um para cada dia de operação, como pode ser visto na Figura 49.
- O período compreendido de operação do *dataframe* foram os dias 13, 14, 21 e 26 de Junho/2023.
- O *dataframe* possui 82.390 observações contendo medições distintas.
- O intervalo de medição contido nas observações do *dataframe* dispostas no *dataframe* é de 2 segundos.
- O arquivo possui 225 atributos representando os diversos parâmetros medidos no eletrolisador e seus sistemas auxiliares. Os principais parâmetros são: pressão, temperatura, corrente, tensão, pureza, condutividade, nível, resistência, sinais analógicos e digitais.
- Os quatro dias de operação resultaram em um arquivo com 82.390 observações que são medições distintas.

Figura 49 – Dataframe contendo dados brutos

TIME STA	TT100 (°C)	TT326 (°C)	TT300 (°C)	TT302 (°C)	TT303 (°C)	TT307 (°C)	TT309 (°C)	TT310 (°C)	TT311 (°C)	TT312 (°C)	TT313 (°C)	TT316 (°C)	TT317 (°C)	TT319 (°C)	TT321 (°C)	TT322 (°C)	TT323 (°C)	TT324 (°C)	TT325
09 00 44	31,01328	37,67513	30,87861	30,72657	30,67009	29,96416	29,97502	30,22119	28,80571	30,01846	28,37129	29,42476	28,29164	28,33146	27,3685	27,28161	29,27633	28,71882	28,77
09 00 46	31,02197	37,6534	30,88296	30,71788	30,66141	29,97502	29,97502	30,22119	28,79847	30,02932	28,36767	29,42113	28,29526	28,34956	27,3685	27,28161	29,29443	28,72968	28,77
09 00 48	31,02415	37,61213	30,86775	30,72005	30,66141	29,96416	29,97502	30,21757	28,80209	30,01846	28,36405	29,42476	28,3025	28,34956	27,37212	27,29609	29,28719	28,72606	28,75
09 00 54	31,01111	37,47529	30,87861	30,72005	30,66358	29,96778	29,99674	30,23205	28,80933	30,01484	28,38215	29,42113	28,29888	28,3387	27,36126	27,28523	29,29443	28,72968	28,77
09 00 56	31,01763	37,40578	30,88296	30,72874	30,67227	29,97864	29,97864	30,22119	28,80209	30,02932	28,37491	29,42113	28,3025	28,33146	27,37212	27,28885	29,29081	28,72606	28,78
09 01 04	31,01763	37,19292	30,8873	30,73526	30,67444	29,96778	29,96778	30,21757	28,79123	30,01484	28,37491	29,42476	28,29888	28,33508	27,37936	27,28885	29,29443	28,7333	28,77
09 01 06	31,01763	37,13427	30,87861	30,73091	30,67444	30,00398	29,96778	30,21757	28,80209	30,00398	28,38215	29,41389	28,30974	28,34594	27,37936	27,30334	29,29805	28,74416	28,78
09 01 08	31,0198	37,10169	30,86775	30,73743	30,68095	29,97502	29,96778	30,22119	28,81657	30,00398	28,38215	29,41751	28,30974	28,35318	27,37574	27,30334	29,30529	28,72968	28,77
09 01 11	31,01328	37,03653	30,8721	30,73526	30,67661	29,97864	29,96416	30,22843	28,78761	30,00398	28,39301	29,42476	28,30974	28,34594	27,36126	27,30696	29,30891	28,74778	28,78
09 01 13	31,01328	36,98005	30,87644	30,7244	30,67009	29,98226	29,97502	30,22119	28,82019	29,99312	28,38215	29,432	28,3025	28,36767	27,37574	27,29609	29,30529	28,72968	28,78
09 01 15	31,01328	36,96919	30,8873	30,72657	30,67009	29,97502	29,96416	30,21757	28,80571	30,01122	28,38939	29,42113	28,30974	28,35318	27,37574	27,28161	29,29081	28,72968	28,80
09 01 17	31,01328	36,93661	30,87861	30,73091	30,67227	29,98588	29,96778	30,23567	28,80933	30,00398	28,38215	29,42476	28,30974	28,3387	27,37212	27,29972	29,31253	28,73692	28,79
09 01 19	31,01328	36,90403	30,8721	30,72657	30,66358	29,96416	29,96778	30,21395	28,80933	30,01846	28,37491	29,41751	28,3025	28,3568	27,3685	27,28161	29,29081	28,74416	28,78
09 01 25	31,01111	36,78022	30,8873	30,72005	30,67009	29,97502	29,96054	30,23205	28,81657	30,00398	28,37491	29,42476	28,30974	28,34594	27,37936	27,29972	29,30891	28,7333	28,78
09 01 27	31,01111	36,74764	30,87644	30,73526	30,67444	29,98588	29,96416	30,22843	28,80933	30,00398	28,37129	29,42476	28,3025	28,34594	27,37574	27,30696	29,30529	28,74778	28,81
09 01 34	31,00677	36,64989	30,88947	30,7244	30,67444	29,98588	29,95692	30,21395	28,81657	30,00398	28,38939	29,41389	28,30974	28,34956	27,37574	27,30696	29,31615	28,73692	28,79
09 01 37	31,00894	36,62165	30,87644	30,72657	30,66141	29,96416	29,96054	30,21757	28,81657	30,00398	28,37129	29,42476	28,33146	28,3568	27,37574	27,28885	29,30891	28,74416	28,79
09 01 39	31,00025	36,59342	30,86993	30,73526	30,66575	29,96778	29,94244	30,21757	28,80933	29,99674	28,37491	29,42476	28,3206	28,35318	27,37936	27,3142	29,30891	28,73692	28,80
09 01 45	31,00894	36,48481	30,86993	30,72874	30,66575	29,97864	29,94606	30,21757	28,80571	30,00398	28,39301	29,40665	28,3387	28,35318	27,3685	27,29972	29,30891	28,75502	28,82
09 01 47	31,00894	36,4392	30,8873	30,73091	30,67227	29,98226	29,94244	30,21757	28,82019	29,99312	28,38577	29,42476	28,3025	28,36767	27,37574	27,31782	29,30529	28,75502	28,80
09 01 50	31,00894	36,38924	30,87861	30,72657	30,67444	29,99312	29,93158	30,21395	28,82019	29,99674	28,38577	29,42476	28,33146	28,36405	27,37936	27,29609	29,30529	28,7514	28,80

Fonte: O Autor

3.2.2.2 Pré-Processamento: Limpeza dos Dados

A etapa de limpeza, bem como a manipulação dos dados foram realizadas usando o *framework Jupyter Notebook* com a linguagem de programação *Python* versão 3.12.0. As técnicas aplicadas foram as comumente utilizadas dentro do campo da Ciência de Dados ou *Data Science*, usando a biblioteca *pandas*.

As etapas de limpeza efetuada no *dataframe* foram:

1. Verificado os tipos de variáveis. Neste caso todas, exceto o *timestamp* devem estar

como *float*.

2. Verificado existência de valores *missing* ou *Not a Number*.
3. Removido 291 duplicidades.
4. Verificado quantidade de valores distintos medidos por cada sensor.
5. Eliminado atributos sem relevância para a pesquisa: valores *missing* sinal digital, *set*, Sinal de ligado/desligado.
6. Verificado quantidade de valores distintos medidos por cada sensor.
7. Realizado análise estatística descritiva dos dados com a finalidade de encontrar valores discrepantes ou *outliers*.
8. Eliminado valores negativos em variáveis que não operam abaixo de zero.

Inicialmente o *dataframe* possuía 225 atributos e 82390 observações. Ao término da etapa de limpeza, restaram 91 atributos e 82099 observações.

3.2.2.3 Pré-Processamento: Integração dos Dados

A equipe de automação industrial do fabricante do eletrolisador enviou ao todo quatro arquivos distintos, sendo um para cada dia de operação. Cada arquivo continha 5 guias cada.

Com a finalidade de reunir toda informação em um único arquivo, adotou-se a função *merge* e em seguida *concat*, dentro do *Jupyter Notebook*. Dessa forma concluiu-se a etapa de *ETL*.

3.2.2.4 Pré-Processamento: Seleção dos Dados

Nesta fase, foi iniciada a Análise Exploratória dos Dados, na qual cada variável foi avaliada individualmente por meio de análise estatística descritiva, e os dados relevantes para esta pesquisa foram selecionados. À medida que os dados eram analisados, obtinha-se um entendimento mais profundo sobre eles, e percebeu-se a necessidade de calcular a eficiência do eletrolisador. A etapa citada é demonstrada na Figura 50:

Figura 50 – Etapa de Análise Estatística Descritiva

```
In [17]: 1 df0.describe()
```

	IT300 (A)	AS100 (%)	AS300 (%)	AT301 (%)	AT302 (%)	AT303 (%)	CT100 (uS)	CT101 (uS)	CT301 (uS)	CT302 (uS)	...	T
count	82099.000000	82099.000000	82099.000000	82099.000000	82099.000000	82099.000000	82099.000000	82099.000000	82099.000000	82099.000000	...	82099
mean	2.908029	0.362064	2.354980	4190.984749	2.537367	2.371432	6.474080	0.184334	0.147635	33.871892	...	...
std	0.911520	0.095796	2.062780	2917.988168	3.501178	0.048975	4.932430	0.116816	0.080747	10.335214	...	...
min	-0.003982	0.000000	-0.061543	-90.504295	0.000000	0.000000	-0.506824	-0.130326	0.000000	-0.027151	...	...
25%	3.088187	0.271513	-0.018101	3330.558105	0.517685	2.372443	1.954893	0.130326	0.121276	31.506353	...	...
50%	3.120950	0.387358	1.954893	4715.273926	0.937624	2.372443	5.937081	0.159288	0.126706	35.651451	...	...
75%	3.297252	0.445281	3.945987	5086.341309	1.799768	2.372443	9.195236	0.188249	0.135756	39.536800	...	...
max	5.931108	0.532165	50.874271	181053.843750	10.026427	2.372443	32.943562	0.803678	0.590088	49.987331	...	...

8 rows x 220 columns

Fonte: O Autor

A figura apresenta uma tabela gerada por meio da função `df.describe()` no Python, que fornece uma análise estatística descritiva dos dados. Nessa tabela, temos várias colunas de variáveis medidas (como IT300, AS100, AS300, AT301, entre outras) que foram analisadas individualmente, cada uma representando diferentes parâmetros monitorados na pesquisa. Para cada variável, são exibidos os seguintes valores estatísticos:

- **Count:** Número total de observações (82099) em cada variável, indicando que todas as variáveis contêm o mesmo número de dados.
- **Mean (Média):** Valor médio das observações em cada coluna, indicando o valor médio esperado para cada variável.
- **Std (Desvio Padrão):** Mede a dispersão dos dados em torno da média. Valores mais altos indicam maior variabilidade dos dados.
- **Min (Valor Mínimo):** O menor valor registrado para cada variável, útil para identificar valores extremos.
- **Percentis (25%, 50% e 75%):** Indicam a posição dos dados no primeiro quartil (25%), mediana (50%) e terceiro quartil (75%), respectivamente.
- **Max (Valor Máximo):** O maior valor registrado para cada variável.

Essas estatísticas ajudam a entender a distribuição e variabilidade dos dados para cada variável monitorada, o que é fundamental para identificar padrões, possíveis *outliers* e tendências iniciais. Além disso, esse resumo estatístico serviu como base para a seleção dos dados mais relevantes para a pesquisa e permitiu um entendimento mais profundo das características de cada variável.

3.2.2.5 Transformação dos Dados

Nesta etapa, concentrou-se uma grande parte do tempo despendido na pesquisa. Pois, com a finalidade de extrair mais *insights* e calcular a eficiência do eletrolisador, se fez necessário a criação de aproximadamente 53 novas variáveis, sendo estas não medidas sensorialmente, mas calculadas. Inicialmente foi necessário estabelecer os dados dispostos na Tabela 3 afim de serem considerados nos cálculos.

Tabela 3 – Considerações para uso nos Cálculos de Eficiência

Descrição	Valor
Poder Calorífico Superior do H2 (kWh/kg)	39,42
Tensão Faraday por Célula (V)	1,48
Produção Nominal Stack-A (Nm ³ /h)	200
Produção Nominal Stack- BC(Nm ³ /h)	50
Nº Células no Stack-A	120
Nº Células no Stack-BC	142
Corrente Máxima-A (A)	3750
Corrente Máxima-BC (A)	900

Fonte: Adaptado do datasheet do fabricante

De acordo com [Zhang et al. \(2012\)](#), a eficiência de um eletrolisador deve ser calculada através da Equação 3.2. No entanto, como o eletrolisador em estudo não possui medidor de vazão de produção de hidrogênio devido não abrangência do escopo de entregáveis, adotar-se-á um outro fator que de acordo com o fabricante possui relação direta. O fator adotado foi a corrente que vem do retificador DC e alimenta os *stacks* A e BC. O *stack* A recebe uma corrente de 3750 A que resulta numa produção de 200 Nm³/h, já o *stack* BC recebe uma corrente de 900 A que resulta numa produção de 50 Nm³/h, somando 250 Nm³/h que é a capacidade projetada.

3.2.2.5.1 Cálculo da Eficiência do Eletrolisador

Efetuada as considerações anteriores, para calcular a eficiência energética do eletrolisador, é necessário conhecer a energia de entrada e saída dos *stacks*. Dessa forma, para equalização das energias, a unidade de medida que será usada é [kWh/kg], conforme equação 3.2.

$$\eta(\%) = \frac{\text{Saída de Energia H}_2 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]}{\text{Entrada de Energia Elétrica} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right]} \cdot 1000 \quad (3.2)$$

Como recomendado por [Ursua et al. \(2012\)](#), adota-se para saída de energia H_2 no *Stack* o *HHV* do H_2 ou *PCS* devido o calor rejeitado ser integral. Além disso, para entrada de energia Elétrica no *stack* adotou-se *Consumo Específico de Energia (C.E)*.

Dessa forma, ao substituir na Equação 3.2, tem-se:

$$\eta(\%) = \frac{HHV}{C.E} \cdot 1000 \quad (3.3)$$

$$\eta(\%) = \frac{HHV}{\left(\frac{V \times I_{DC}}{\dot{m}} \right)} \cdot 1000 \quad (3.4)$$

$$\eta(\%) = \frac{HHV \times \dot{m}}{V \times I_{DC}} \cdot 1000 \quad (3.5)$$

Como o eletrolisador em estudo não possui medidor de vazão para quantificar a produção de hidrogênio, adotar-se-á um outro fator que de acordo com o fabricante possui relação direta com a produção sem gerar entropia. O fator adotado foi a corrente que vem do retificador DC e alimenta os *stack* A e BC. Portanto, a vazão mássica é dada em

função da corrente variando fixamente de acordo com o *Capacidade de Produção (CP)* que é a capacidade de produção de hidrogênio na *Stack* em kg.

$$m_{H_2} = \left[\left(\frac{I_{DC}}{I_{max}} \right) \times CP \right]_{Stack-ABC} \quad (3.6)$$

Considerando que o eletrolisador em estudo possui fisicamente três elementos *stacks*, sendo que eletricamente os sinais são divididos apenas em dois, *Stack A* e *Stack BC*, para calcular a eficiência geral será considerado a soma das duas vazões mássicas como apresentado:

$$m_{H_2} = \left[\left(\frac{I_{DC}}{I_{max}} \right) \times CP \right]_{Stack-A} + \left[\left(\frac{I_{DC}}{I_{max}} \right) \times CP \right]_{Stack-BC} \quad (3.7)$$

É importante salientar ainda que, cada elemento *stack* recebe duas entradas de corrente elétrica oriunda do retificador e duas tensão, dessa forma a Equação 3.7 teve que ser desmembrada em duas correntes para cada parcela da equação:

$$m_{H_2} = \left[\left(\frac{I_{1A} + I_{2A}}{I_{maxA}} \right) \times CP \right]_{Stack-A} + \left[\left(\frac{I_{1BC} + I_{2BC}}{I_{maxBC}} \right) \times CP \right]_{Stack-BC} \quad (3.8)$$

Assim sendo, será substituído a Equação 3.8 na Equação 3.6 resultando na equação geral para cálculo da eficiência energética do eletrolisador tipo *PEM* citado nesta pesquisa, que contém em sua configuração dois elementos *stack* que produzem hidrogênio, sendo denominado, *stack A* e *stack BC*:

$$\eta(\%) = \left(\left[\frac{HHV \times \left[\left(\frac{I_{1A} + I_{2A}}{I_{maxA}} \right) \times CP_A \right]}{(V_{1A} \times I_{1A}) + (V_{2A} \times I_{2A})} \right]_A + \left[\frac{HHV \times \left[\left(\frac{I_{1BC} + I_{2BC}}{I_{maxBC}} \right) \times CP_{BC} \right]}{(V_{1BC} \times I_{1BC}) + (V_{2BC} \times I_{2BC})} \right]_{BC} \right) \cdot 1000 \quad (3.9)$$

A partir deste ponto, abordar-se-á somente o *stack A*, com a finalidade de facilitar o entendimento e tornar prático a aplicação da pesquisa, já que não há histórico de dados operacional suficiente da *stack BC*.

Diante dessa definição a equação para cálculo da eficiência da *stack* A, é dado pela Equação 3.10:

$$\eta(\%) = \left[\frac{HHV \times \left(\frac{I_{1A} + I_{2A}}{I_{\max A}} \times CP_A \right)}{(V_{1A} \times I_{1A}) + (V_{2A} \times I_{2A})} \right]_A \cdot 1000 \quad (3.10)$$

Dessa forma, essa equação foi incorporada como uma nova variável no *dataframe*, com o objetivo de calcular a eficiência instantânea em cada registro de *log*, considerando intervalos de dois segundos.

É importante destacar que as variáveis mencionadas variam, conforme especificado na Tabela 4

Tabela 4 – Variáveis e Constantes da Equação de Eficiência

Denominação	Valor	Tipo
HHV (kWh/kg)	39.42	Constante
Corrente 1A (A)	0 a 1875	Variável
Corrente 2A (A)	0 a 1875	Variável
Corrente Máxima-A (A)	3750	Constante
CP-Capac. Produção (Nm ³ /h)	17.97	Constante
Tensão 1A (V)	0 à 220	Variável
Tensão 2A (V)	0 à 220	Variável

Fonte: O Autor

3.2.2.6 Limpeza dos Dados dentro da fase de Transformação dos Dados

Durante a etapa de transformação dos dados, logo após a criação da variável para cálculo da eficiência, foi realizado novamente uma análise exploratória dos dados para garantir a confiabilidade dos dados. Assim sendo, uma nova limpeza nos dados foi executada para remoção de qualquer nível de ruído. Dessa forma, as seguintes limpezas foram executadas:

1. Eliminação de eficiência acima de 100% ou infinita.
2. Eliminação de eficiência abaixo de 0%.
3. Eliminação de *CP* igual ou menor que zero

Por fim, os dados que realmente foram analisados possuem 47732 observações e 143 atributos. No que tange a eficiência, a *stack* A (Allagash) a ser abordada neste trabalho, apresentou uma eficiência média de **72,6%**, como pode ser visto na análise estatística descritiva na Figura 51.

Figura 51 – Análise Estatística Descritiva da Eficiência

Out[81]:

	n Efic-A(%)	n Efic-BC(%)	n Efic-A+BC(%)
count	47732.000000	28380.000000	47734.000000
mean	0.726720	0.703699	0.719699
std	0.020901	0.014505	0.021882
min	0.663010	0.671716	0.663010
25%	0.713051	0.697761	0.707958
50%	0.723979	0.698953	0.711465
75%	0.729569	0.704893	0.719649
max	0.964074	0.999362	0.999362

Fonte: O Autor

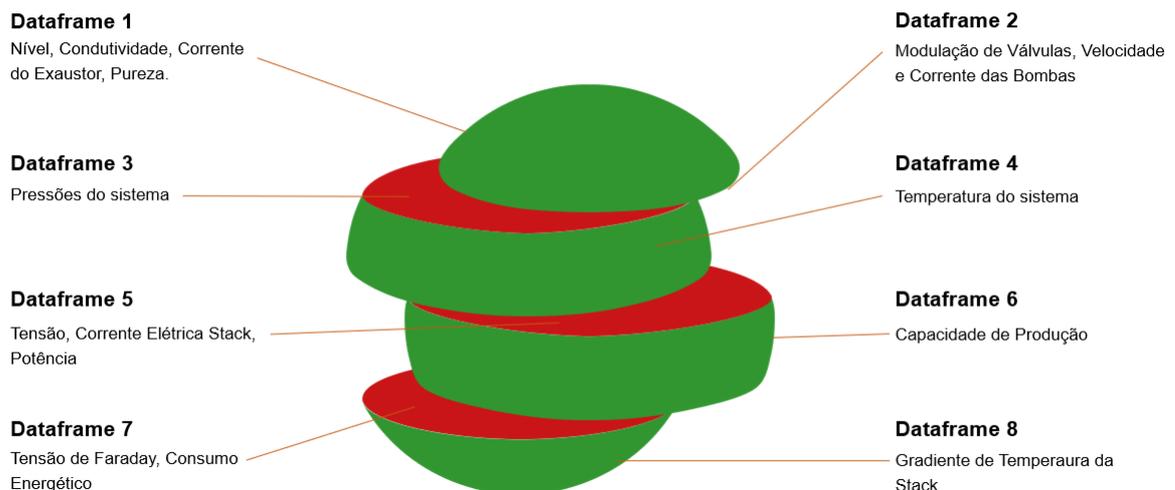
3.2.2.7 Mineração de Dados, Modelagem e Desenvolvimento

Nesta etapa, ocorreu o desenvolvimento, modelagem e segmentação do conjunto de dados. O *dataframe* foi dividido em oito partes menores com o intuito de otimizar tanto o processo de mineração dos dados quanto a sua visualização.

O conjunto de dados compreende aproximadamente 140 atributos distintos, e a divisão foi realizada levando em consideração a natureza física das variáveis, visando facilitar a investigação dos padrões, conforme divisão apresentada na Figura 52.

A medida que o trabalho foi avançando, variáveis relacionadas ao *stack* BC precisaram ser desprezadas para manter um volume de dados adequados e concisos.

Figura 52 – Modelo da Divisão do Dataframe em Subgrupos



Fonte: O Autor

Após a divisão do *dataframe* em subgrupos, foram criadas matrizes de correlação de *Pearson* para cada um deles. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada do impacto das diversas variáveis na Eficiência da *stack* A, revelando relações significativas entre os diferentes parâmetros.

Para realizar a análise, foi desenvolvido um programa utilizando a linguagem de programação *Python*. As bibliotecas empregadas estão representadas na Figura 53, sendo elas: *Pandas*, *Numpy*, *Scipy*, *Matplotlib*, *Seaborn*, *Plotly*, *Pandas Profiling* e *Sweetviz*. Essas ferramentas oferecem um conjunto robusto de funcionalidades para manipulação de dados, visualização e geração de *insights*

Figura 53 – Bibliotecas Python utilizadas na pesquisa



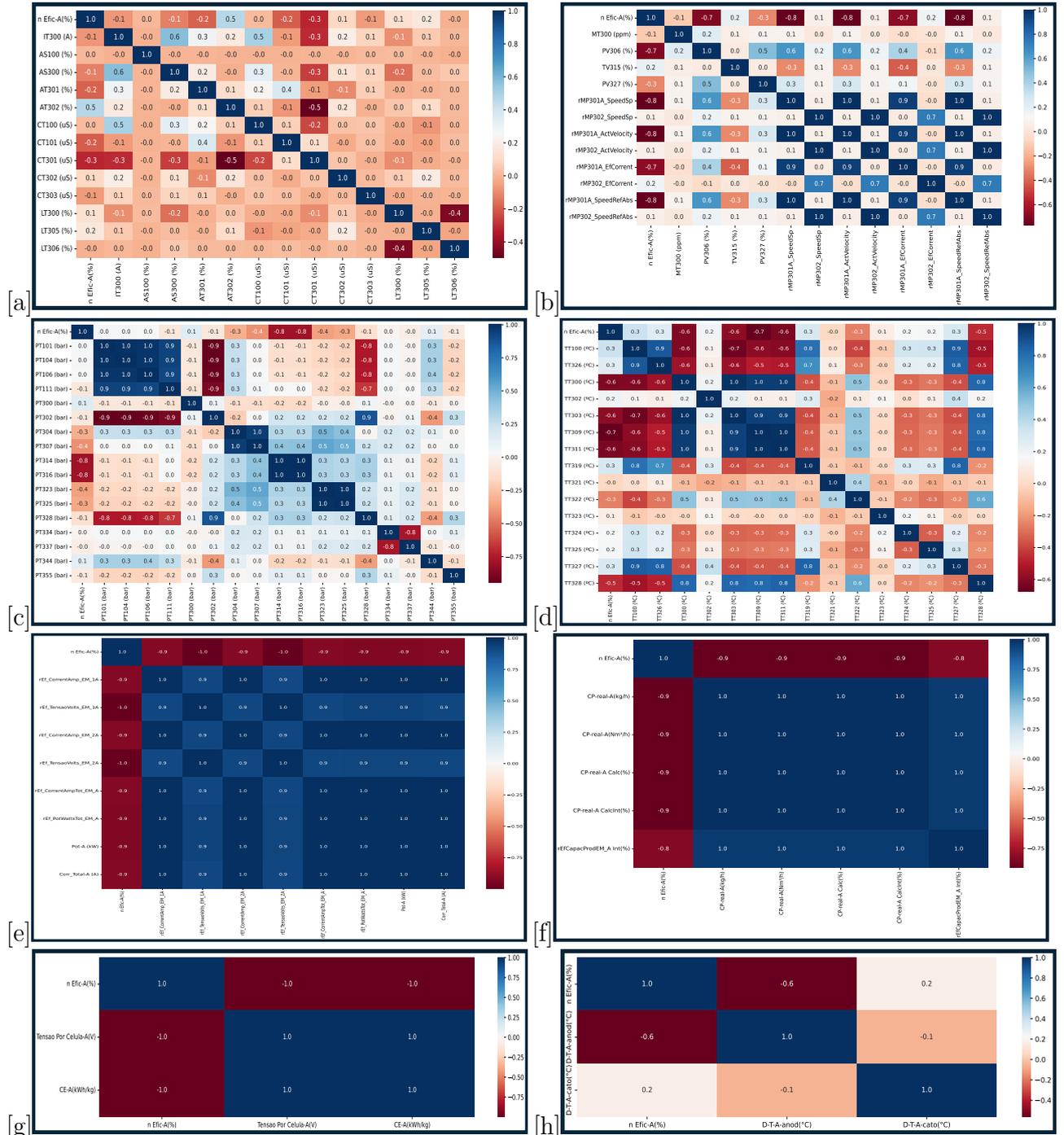
Fonte: O Autor

Após a segmentação dos subgrupos mencionados na Figura 52, cada um foi submetido a uma análise detalhada da matriz de correlação. Em seguida, foram avaliados os impactos individuais de cada variável na eficiência do eletrolisador, como apresentado na Figura 54.

Ao concluir a análise das matrizes de correlação, foi gerado um novo subgrupo somente com as variáveis que possui alta correlação linear com a eficiência energética do eletrolisador. Essa seleção refinada das variáveis relevantes foi crucial para focalizar os esforços analíticos e conduzir a investigação de maneira mais eficiente.

Oito matrizes de correlação linear, oriundas dos subgrupos do *dataframe* descrito na Figura 52, são apresentadas na Figura 54.

Figura 54 – Matriz de Correlação Linear de Person



Fonte: O Autor

Uma matriz de correlação linear de *Pearson*, gerada com a biblioteca *Matplotlib*, é uma tabela que mostra como diferentes variáveis em um conjunto de dados estão relacionadas umas com as outras. Essa relação é medida através de um número chamado coeficiente de correlação, que varia de -1 a +1.

Se o coeficiente for próximo de +1, significa que as variáveis têm uma forte correlação positiva, o que significa que quando uma aumenta, a outra também tende a aumentar. Se o coeficiente for próximo de -1, indica uma forte correlação negativa, o que significa que quando uma variável aumenta, a outra tende a diminuir. Se os valores estiverem próximos de 0, não há uma relação linear forte entre as variáveis. Isso significa que as variáveis provavelmente não têm influência direta uma sobre a outra.

Observe que quanto mais próximo de +1 ou -1 maior a correlação entre as variáveis. Além disso, quanto mais azul escuro, mais próxima a correlação fica de 1, que significa que além de forte a correlação é positiva. Equivalentemente quanto mais próximo de vermelho escuro, mais próxima a correlação fica de -1, que significa que além de forte a correlação é negativa.

Com a finalidade de auxiliar a leitura e interpretação das dependências entre as variáveis, foi criado a Tabela 5 e 6 contendo o *tag* do sensor e descrição:

Tabela 5 – Variáveis e Constantes da Equação de Eficiência - Parte 1

Tag (Variável do Processo)	Descrição da Tag
n Efic-A (%)	Eficiência do Stack-A
IT-300 (A)	Corrente do Motor do Ventilador de Ar E-300
AS-100 (%)	Detector de Hidrogênio no Ambiente (área 1)
AS-300 (%)	Detector de Hidrogênio no Ambiente (área 3)
AT-301 (%)	Oxigênio na Saída de Hidrogênio (Antes da Purificação)
AT-302 (%)	Oxigênio na Saída de Hidrogênio (Após a Purificação)
CT-100 (μS)	Condutividade do Processo de Filtragem FT1-1
CT-101 (μS)	Condutividade do Processo de Filtragem FT1-3
CT-301 (μS)	Condutividade do Reservatório VS-301
CT-302 (μS)	Condutividade da Saída do Gerenciamento de Calor de Polimento
CT-303 (μS)	Condutividade do Sistema de Eletrolise PEM B/C
LT-300 (%)	Nível do Reservatório VS-301
LT-305 (%)	Nível do Separador O2-GLS (Reservatório de Água)
LT-306 (%)	Nível do Separador H2-GLS-HP (Reservatório de H2)
MT-300 (ppm)	Ponto de Orvalho da Saída de Hidrogênio
PV-306 (%)	Válvula do Separador Coalescente SGLF-104
TV-315 (%)	Válvula do Módulo de Eletrolise EM-C
PV-327 (%)	Válvula de Saída de Hidrogênio
rMP301A-SpeedSp (Hz)	Frequência da Bomba de Alimentação do Stack-A
rMP302-SpeedSp (Hz)	Frequência da Bomba de Gerenciamento Térmico do Separador O2-GLS (Reservatório de Água)
rMP301A-ActVelocity	Velocidade da Bomba de Alimentação do Stack-A
rMP302-ActVelocity	Velocidade da Bomba de Gerenciamento Térmico do Separador O2-GLS (Reservatório de Água)
rMP301A-EfCorrent	Corrente da Bomba de Alimentação do Stack-A
rMP302-EfCorrent	Corrente da Bomba de Gerenciamento Térmico do Separador O2-GLS (Reservatório de Água)
rMP301A-SpeedRefAbs	Frequência Absoluta da Bomba de Alimentação do Stack-A
rMP302-SpeedRefAbs	Frequência Absoluta da Bomba de Gerenciamento Térmico do Separador O2-GLS (Reservatório de Água)
PT-101 (bar)	Pressão FT10-1
PT-104 (bar)	Pressão FT1-1
PT-106 (bar)	Pressão MP-103
PT-111 (bar)	Pressão RO-R2
PT-300 (bar)	Pressão do Gerenciamento de Calor Polish TW-01
PT-302 (bar)	Pressão do Suprimento de Água CW-01
PT-304 (bar)	Pressão da Bomba MP-302
PT-307 (bar)	Pressão do Separador O2-GLS
PT-314 (bar)	Pressão do Filtro F-309A
PT-316 (bar)	Pressão do Sistema de Eletrolise PEM A
PT-323 (bar)	Pressão do Separador H2-GLS-HP
PT-325 (bar)	Pressão do Sistema de Eletrolise HA-10
PT-328 (bar)	Pressão de Saída de Hidrogênio (para o cliente)
PT-334 (bar)	Pressão do Reator de Purificação ADS-1
PT-337 (bar)	Pressão do Reator de Purificação ADS-2
PT-344 (bar)	Pressão do Ar de Instrumentação
PT-355 (bar)	Pressão de Entrada de Nitrogênio N01

Fonte: O Autor

Tabela 6 – Variáveis e Constantes da Equação de Eficiência - Parte 2

Tag (Variável)	Descrição
TT-100 (°C)	Temperatura do Filtro FT1-3
TT-326 (°C)	Temperatura Ambiente (área 1)
TT-300 (°C)	Temperatura de Saída do Gerenciamento de Calor do Polimento
TT-302 (°C)	Temperatura de Alimentação de Água Fria CW-01
TT-303 (°C)	Temperatura de Alimentação de Água Fria CW-02
TT-309 (°C)	Temperatura do Sistema de Eletrolise PEM A
TT-311 (°C)	Temperatura do Sistema de Eletrolise PEM A
TT-319 (°C)	Temperatura de Saída do Aquecedor AE-302
TT-321 (°C)	Temperatura de Saída do Aquecedor AE-301
TT-322 (°C)	Temperatura do Reator Deoxo
TT-323 (°C)	Temperatura do Separador Coalescente SGLF-317A
TT-324 (°C)	Temperatura do Reator de Purificação ADS-1
TT-325 (°C)	Temperatura do Reator de Purificação ADS-2
TT-327 (°C)	Temperatura Ambiente (área 3)
TT-328 (°C)	Temperatura de Saída da Bomba MP-304
rEf-CorrentAmp-EM-1A (°C)	Temperatura do Filtro FT1-3
rEf-TensaoVolts-EM-1A	Temperatura Ambiente (área 1)
rEf-CorrentAmp-EM-2A	Temperatura de Saída do Gerenciamento de Calor do Polimento
rEf-TensaoVolts-EM-2A	Temperatura de Alimentação de Água Fria CW-01
rEf-CorrentAmpTot-EM-A	Temperatura de Alimentação de Água Fria CW-02
rEf-PotWattsTot-EM-A	Temperatura do Sistema de Eletrolise PEM A
Pot-A (kW)	Temperatura do Sistema de Eletrolise PEM A
Corr-Total-A (A)	Temperatura de Saída do Aquecedor AE-302
CP-real-A(kg/h)	Temperatura de Saída do Aquecedor AE-301
CP-real-A(Nm ³ /h)	Temperatura do Reator Deoxo
CP-real-A Calc(%)	Temperatura do Separador Coalescente SGLF-317A
CP-real-A CalcInt(%)	Temperatura do Reator de Purificação ADS-1
rEfCapacProdEM-A Int(%)	Temperatura do Reator de Purificação ADS-2
Tensao Por Celula-A(V)	Temperatura Ambiente (área 3)
CE-A(kWh/kg)	Temperatura de Saída da Bomba MP-304
D-T-A-anod(°C)	Temperatura do Reator de Purificação ADS-2
D-T-A-cato(°C)	Temperatura Ambiente (área 3)

Fonte: O Autor

3.2.2.8 Avaliação do Padrão, Avaliação do Conhecimento, Interpretação e Comunicação dos Resultados

Após investigar as variáveis que impactam a eficiência da *stack* do eletrolisador e criar uma nova matriz com as de forte correlação, a análise prosseguiu. O passo seguinte foi entender o comportamento operacional das variáveis quando o eletrolisador operava a 100% de *CP* e máxima eficiência. Identificar os intervalos ideais dos componentes e sensores é crucial para garantir uma operação contínua, minimizando perdas e maximizando a eficiência energética. Nesta fase, os padrões extraídos são avaliados e os resultados apresentados. No entanto, os resultados serão apresentados somente no Capítulo 4.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, apresenta-se os resultados obtidos após realização da análise descritiva e exploratória dos dados operacionais do eletrolisador. Os resultados contemplam gráficos de dispersão entre variáveis, determinação da eficiência, matriz de correlação das variáveis com maior impacto na eficiência e por fim, a demonstração dos parâmetros mínimos e máximos das variáveis de forma que o eletrolisador opere em plena carga imprimindo a maior eficiência.

4.1 Eficiência do Eletrolisador

A eficiência da *stack A* foi avaliada utilizando a equação 3.10, aplicada em cada uma das 47.730 medições sensoriais registradas ao longo do funcionamento do eletrolisador. Pode-se afirmar que a operação do eletrolisador foi bastante estável, baseado no baixo desvio padrão encontrado de 2,08%. Por fim, a média aritmética do cálculo da eficiência resultou em um valor de **72,7%**, conforme apresentado na análise descritiva da Tabela 7.

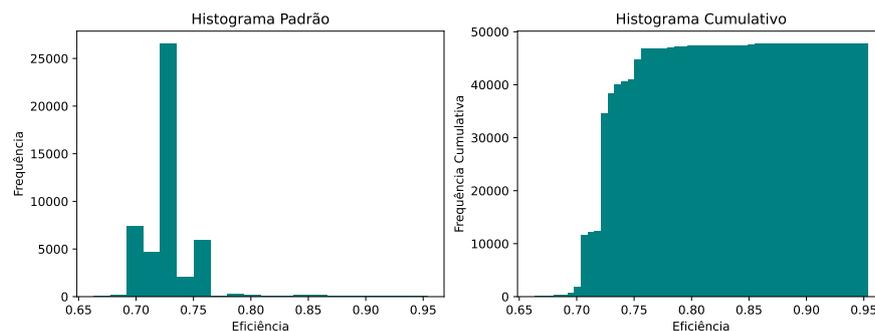
Tabela 7 – Estatística Descritiva da Eficiência

Denominação	Valor
Contagem	47.730
Média (%)	0.726710
Desvio Padrão (%)	0.020847
Mínimo (%)	0.663010
1º Quartil (%)	0.713051
2º Quartil (%)	0.723979
3º Quartil (%)	0.729569
Máximo (%)	0.953638

Fonte: O Autor

A Figura 55 demonstra o histograma padrão e cumulativo da eficiência do eletrolisador.

Figura 55 – Histograma Padrão e Acumulado da Eficiência



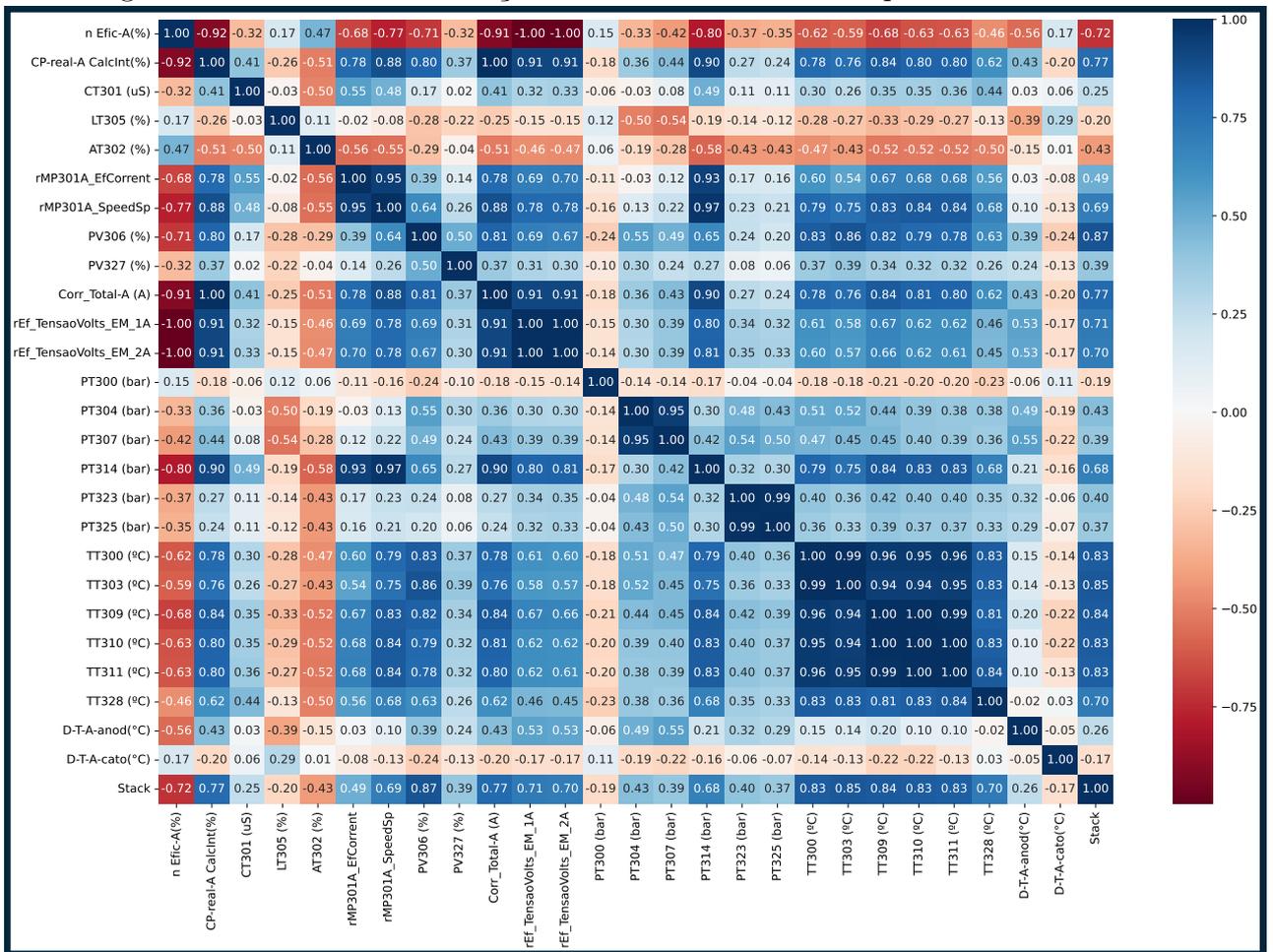
Fonte: O Autor

4.2 O impacto das variáveis na eficiência

4.2.1 Uma análise da Matriz de Correlação de Person

No que tange a correlação entre variáveis operacionais, após a análise das 8 (oito) matrizes de correlação de *Pearson* realizada detalhadamente em cada subgrupo citado na Figura 54, destacaram-se 26 variáveis cujos valores são superiores a 17% para correlações positivas e inferiores a -17% para correlações negativas. Essa seleção resultou em uma matriz que reúne as principais variáveis com dependência em relação à eficiência a matriz de correlação apresenta na Figura 56:

Figura 56 – Matriz de Correlação: Variáveis com maior impacto à eficiência



Fonte: O Autor

A partir da matriz de correlação de *Pearson* apresentada na Figura 56, foi realizada uma análise criteriosa que combinou a avaliação detalhada dos valores de correlação com a construção de diagramas de dispersão para explorar as relações entre as variáveis. Essa abordagem possibilitou a identificação visual de padrões e tendências, permitindo uma compreensão mais aprofundada das interações existentes entre as variáveis.

Somente após essa análise detalhada foi possível determinar se cada variável poderia ser considerada como dependente da eficiência. Essa avaliação considerou não apenas a força e o sentido da correlação (positiva ou negativa), mas também a distribuição dos dados nos diagramas de dispersão, garantindo maior precisão e confiabilidade na seleção das variáveis dependentes.

Para consolidar os resultados obtidos, foi desenvolvida a Tabela 8 que reúne e organiza todas as informações analisadas. Além disso, os diagramas de dispersão de cada variável podem ser consultados detalhadamente nos itens [4.2.1.2](#) até [4.2.1.23](#).

Durante o estudo, foi possível extrair diversos *insights* após o cruzamento de dados, gerando valor ao processo produtivo que outrora não era perceptível.

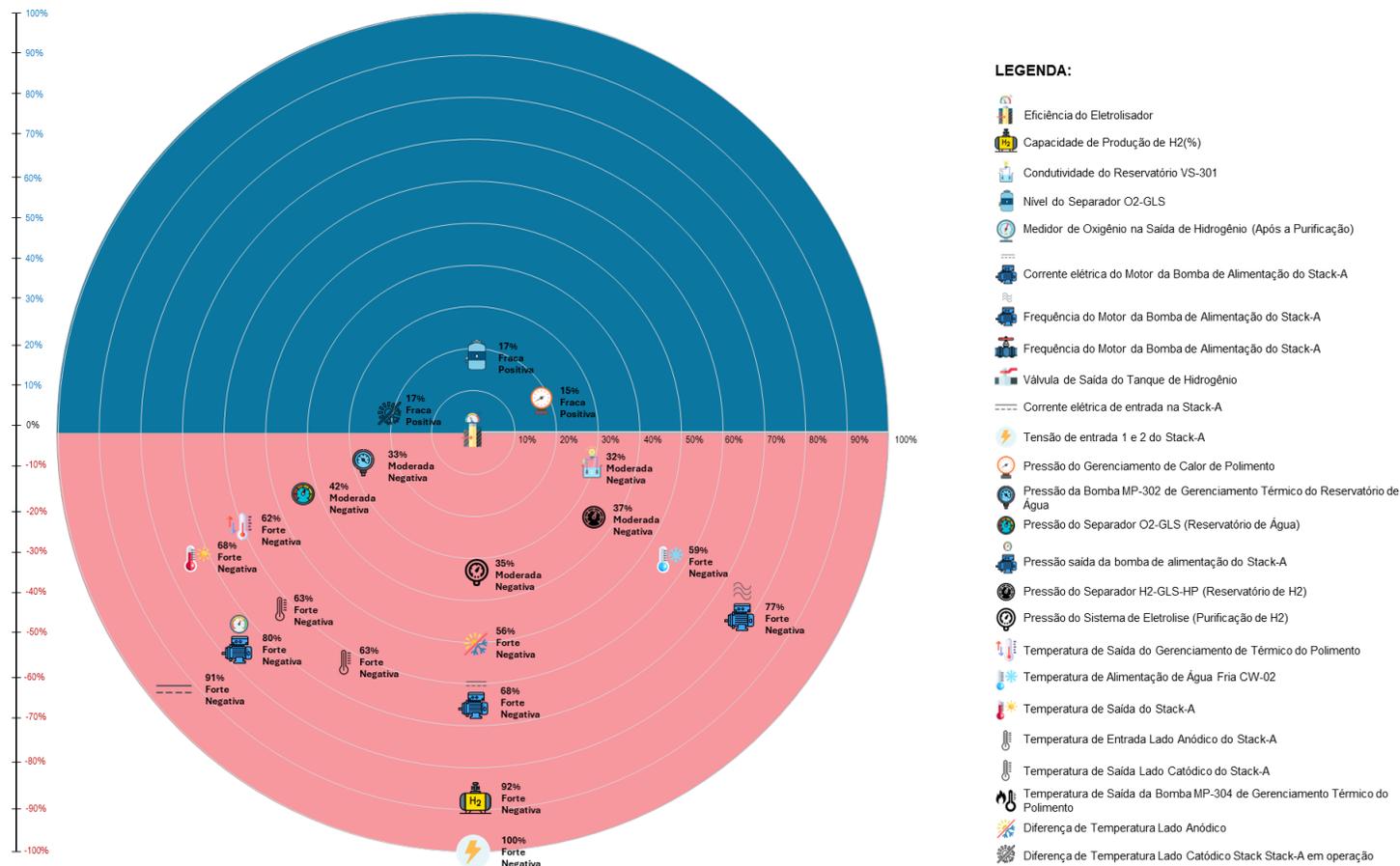
Tabela 8 – Correlação entre variáveis e eficiência

Índice	Tag (Variável)	Descrição da Tag	Correlação Linear de Pearson	Sentido da Correlação no Diagrama de Dispersão	Intensidade	Dependência com a Eficiência
1	n Efic-A (%)	Eficiência do Stack-A	100%	Positiva	Forte	Sim
2	CP-real-A Cal- cInt(%)	Capacidade de Produção de H ₂ (%)	-92%	Negativa	Forte	Sim
3	CT-301 (S)	Condutividade do Reservatório VS-301	-32%	Negativa	Moderada	Sim
4	LT-305 (%)	Nível do Separador O ₂ -GLS	17%	Positiva	Fraca	Sim
5	AT-302 (%)	Medidor de Oxigênio na Saída de Hidrogênio	47%	Positiva	Moderada	Não
6	rMP301A-EfCorrent	Corrente elétrica do Motor da Bomba de Alimentação	-68%	Negativa	Forte	Sim
7	rMP301A-SpeedSp (Hz)	Frequência do Motor da Bomba de Alimentação	-77%	Negativa	Forte	Sim
8	PV-306 (%)	Válvula de Saída do Separador O ₂ -GLS	-71%	Negativa	Forte	Não
9	PV-327 (%)	Válvula de Saída do Tanque de Hidrogênio	-32%	Negativa	Moderada	Não
10	Corr-Total-A (A)	Corrente elétrica de entrada na Stack-A	-91%	Negativa	Forte	Sim
11	rEf-TensaoVolts-EM-1A	Tensão de entrada 1 do Stack-A	-100%	Negativa	Forte	Sim
12	rEf-TensaoVolts-EM-2A	Tensão de entrada 2 do Stack-A	-100%	Negativa	Forte	Sim
13	PT-300 (bar)	Pressão do Gerenciamento de Calor de Polimento	15%	Positiva	Fraca	Não
14	PT-304 (bar)	Pressão da Bomba MP-302 de Gerenciamento Térmico	-33%	Negativa	Moderada	Sim
15	PT-307 (bar)	Pressão do Separador O ₂ -GLS	-42%	Negativa	Moderada	Sim
16	PT-314 (bar)	Pressão saída da bomba de alimentação do Stack-A	-80%	Negativa	Forte	Sim
17	PT-323 (bar)	Pressão do Separador H ₂ -GLS-HP	-37%	Negativa	Moderada	Sim
18	PT-325 (bar)	Pressão do Sistema de Eletrolise	-35%	Negativa	Moderada	Sim
19	TT-300 (°C)	Temperatura de Saída do Gerenciamento Térmico	-62%	Negativa	Forte	Sim
20	TT-303 (°C)	Temperatura de Alimentação de Água Fria CW-02	-59%	Negativa	Forte	Sim
21	TT-309 (°C)	Temperatura de Saída do Stack-A	-68%	Negativa	Forte	Sim
22	TT-310 (°C)	Temperatura de Entrada Lado Anódico do Stack-A	-63%	Negativa	Forte	Sim
23	TT-311 (°C)	Temperatura de Saída Lado Catódico do Stack-A	-63%	Negativa	Forte	Sim
24	TT-328 (°C)	Temperatura de Saída da Bomba MP-304	-46%	Negativa	Moderada	Não
25	D-T-A-anod (°C)	Diferença de Temperatura Lado Anódico	-56%	Negativa	Forte	Sim
26	D-T-A-cato (°C)	Diferença de Temperatura Lado Catódico	17%	Positiva	Fraca	Não

Fonte: O autor

A partir da Tabela 8, foi desenvolvido um infográfico para representar a correlação linear entre variáveis e a eficiência. O gráfico utiliza uma estrutura radial com anéis concêntricos (onde variáveis com correlações mais fortes estão posicionadas nos anéis externos e as mais fracas, próximas ao centro). A codificação por cores distingue correlações positivas (azul) e negativas (vermelho), facilitando a interpretação. Cada variável é identificada por um ícone único, com rótulos indicando o valor percentual da correlação e sua intensidade (classificada como fraca, moderada ou forte). A legenda complementa a visualização, associando ícones às respectivas variáveis, tornando a análise mais clara e intuitiva.

Figura 57 – Infográfico da matriz de correlação linear utilizando uma disposição radial.



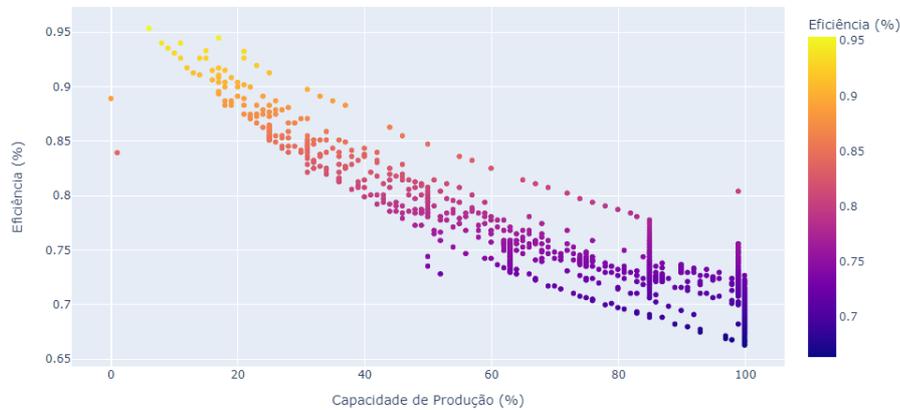
Fonte: O Autor

Os gráficos apresentados abaixo são diagramas de dispersão usados para análise e desenvolvimento da Tabela 8 e do Infográfico 57.

4.2.1.1 Eficiência x Capacidade de Produção (Correlação Forte e Negativa de 92%)

É um fato que a Eficiência é diretamente afetada pela CP. Esta relação é evidenciada não apenas pela **forte** correlação linear **negativa** de **92%** apresentada na Matriz da Figura 56, mas também pela clara dependência apresentada no gráfico de dispersão da Figura 58, onde o perfil de propagação de pontos revela que à medida que CP aumenta, a eficiência diminui, e vice-versa.

Figura 58 – Eficiência x Capacidade de Produção)

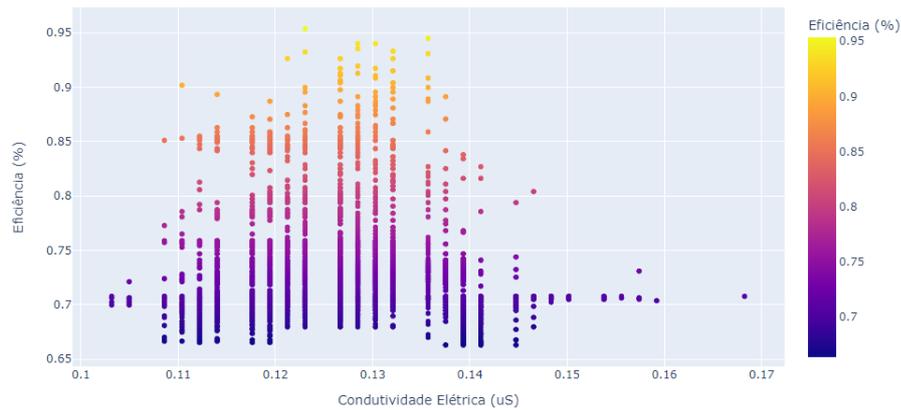


Fonte: O Autor

4.2.1.2 Eficiência x Condutividade Elétrica (Correlação Moderada e Negativa de 32%)

A análise do sensor CT301 (μS), que trata-se de um Condutivímetro, revela uma correlação linear **negativa moderada** de **32%** com relação a eficiência, conforme ilustrado na Figura 56. Embora, inicialmente, o gráfico de dispersão apresentado na Figura 59 não sugira uma relação clara entre as variáveis, uma análise mais detalhada revela um padrão de propagação dos dados, inicialmente progressivo e, posteriormente, regressivo. Esses indícios sugerem um certo nível de dependência entre as variáveis. Assim, pode-se considerar que a condutividade exerce influência sobre a eficiência. É importante ressaltar que, embora a correlação seja moderada, em estudos com grande volume de dados, até mesmo uma correlação pequena pode ser estatisticamente significativa (COHEN, 1988).

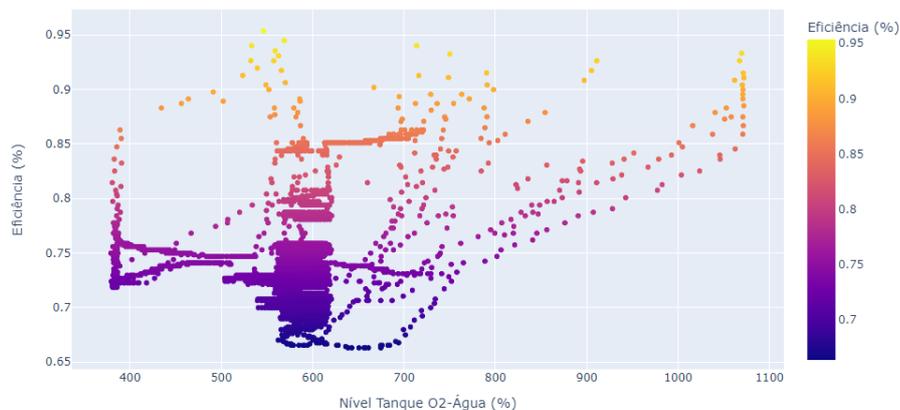
Figura 59 – Eficiência x Condutividade Elétrica



Fonte: O Autor

4.2.1.3 Eficiência x Nível do Tanque de O_2 +Água (Correlação Fraca e Positiva de 17%)

O sensor LT305 (%) responsável pela medição do Nível do Tanque de O_2 +Água apresentou **fraca** correlação linear **positiva** de **17%** com a eficiência. Todavia, na Figura 60 é possível encontrar uma nuvem de pontos em que consiste uma relação de dependência entre as variáveis na Portanto, a variável não será desprezada, mas sim, considerada.

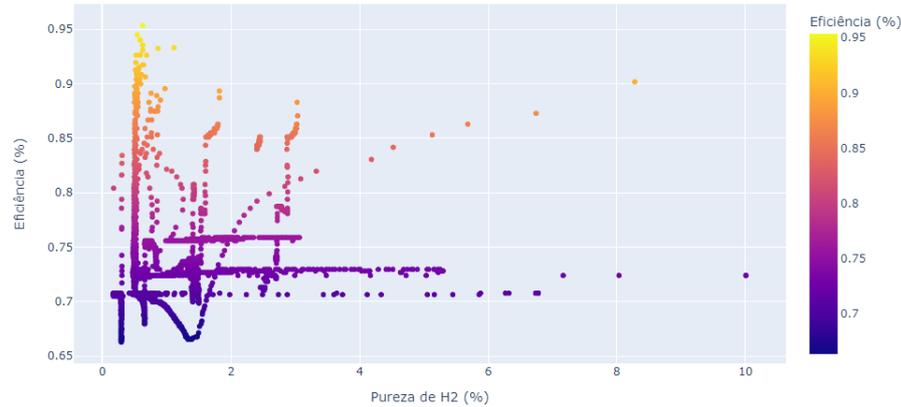
Figura 60 – Eficiência x Nível do Tanque de O_2 +Água

Fonte: O Autor

4.2.1.4 Eficiência x Medidor de Pureza de H_2 (Correlação Moderada e Positiva de 47%)

A tag AT302 (%), que refere-se ao Medidor de Pureza de H_2 , demonstrou correlação linear **moderada positiva** de **47%**, sugerindo dependência com a eficiência, como pode ser visto na Figura 56. No entanto, ao avaliar o padrão de dispersão na Figura 61 percebe-se que não existe praticamente nenhuma dependência entre variáveis. Nesse sentido, esta variável será desprezada a partir deste momento.

Figura 61 – Eficiência X Medidor de Pureza de Hidrogênio

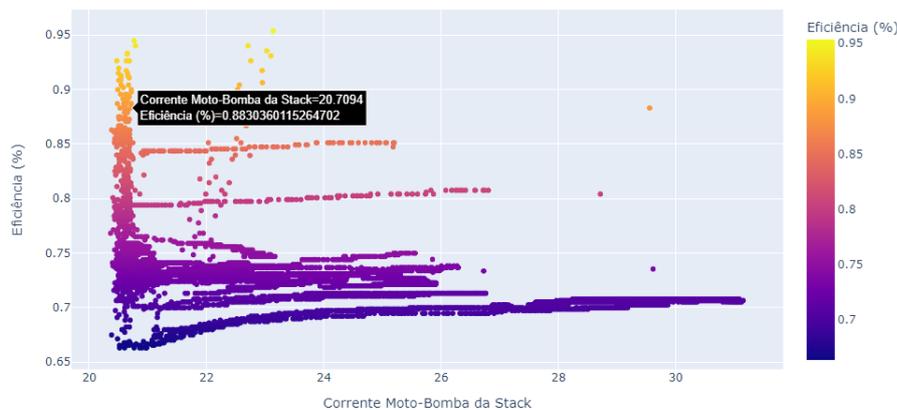


Fonte: O Autor

4.2.1.5 Eficiência x Corrente do Motor (Correlação Forte e Negativa de 68%)

A Corrente Elétrica do moto-bomba (rMP301A_EfCorrent) que fornece água para reação de eletrólise que acontece internamente no *stack*, apresentou **forte** correlação linear **negativa** de **68%** com a Eficiência. Tal relacionamento de dependência, pode ser constatado ao avaliar o padrão no diagrama de dispersão apresentado na Figura 62.

Figura 62 – Eficiência x Corrente do Motor da Stack



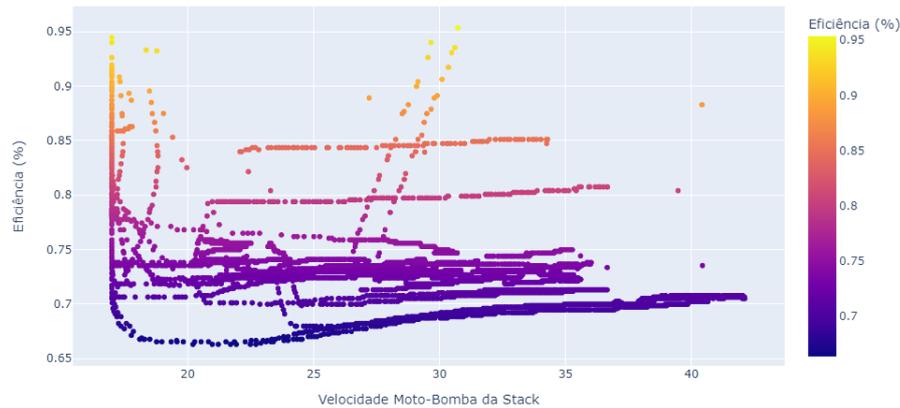
Fonte: O Autor

4.2.1.6 Eficiência X Frequência do Motor (Correlação Forte e Negativa de 77%)

A frequência do moto-bomba (rMP301A-SpeedSp), responsável por fornecer água para a reação de eletrólise, revelou uma correlação linear **negativa forte** de **68%** com a eficiência. Semelhante ao indicado no item anterior, o relacionamento de dependência pode ser constatado ao avaliar o padrão de dispersão apresentado na Figura 63. É relevante destacar ainda que, conforme discutido na seção 4.2.1.5, a corrente do motor aumenta, especialmente quando o sistema demanda uma maior vazão da bomba de deslocamento

positivo. Como resultado, a velocidade do motor também aumenta para fornecer uma maior quantidade de líquido por unidade de tempo, aumentando inclusive a carga ou pressão do sistema. ¹.

Figura 63 – Eficiência x Velocidade do Motor da *Stack*



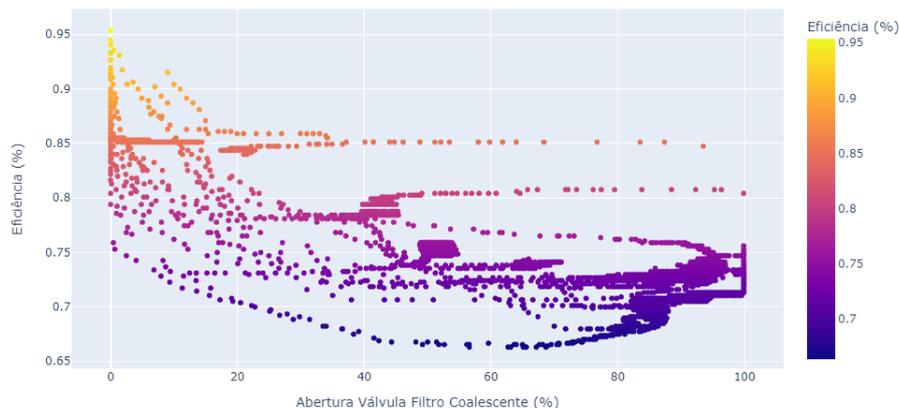
Fonte: O Autor

4.2.1.7 Eficiência x Percentual de Abertura Válvula [PV306 (%)] (Correlação Forte e Negativa de 71%)

O tag PV306 (%), refere-se ao Percentual de Abertura Válvula localizada a jusante do filtro coalescente existente na saída do tanque de O₂+Água e a montante do vent de O₂ para atmosfera. A correlação linear entre a abertura da válvula e a eficiência demonstra-se **fortemente negativa**, alcançando **71%**, conforme ilustrado na Figura 56. No entanto, a interpretação do diagrama de dispersão entre essas variáveis, como mostrado na Figura 64, é de complexa elucidação, devido à presença de uma nuvem de pontos que sugere tanto um relacionamento proporcional quanto inversamente proporcional. Sendo assim, como não foi possível tomar uma decisão entre matriz e diagrama, será considerado o conhecimento do autor, onde se estabelece-se que a variável será excluída da análise desse estudo por não possuir nexos causal com a eficiência.

¹ Corrente Elétrica e Velocidade são duas variáveis que apresentam uma correlação linear **fortemente positiva** de **95%**. Por serem de ordem secundária, não serão apresentadas graficamente.

Figura 64 – Eficiência x Abertura Válvula Filtro Coalescente

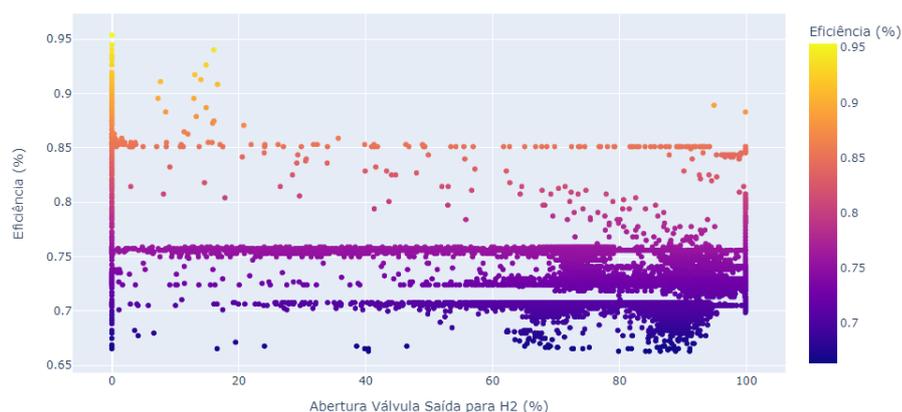


Fonte: O Autor

4.2.1.8 Eficiência x Percentual de Abertura Válvula [PV327 (%)] (Correlação Moderada e Negativa de 32%)

O tag PV327 (%), refere-se ao Percentual de Abertura Válvula localizada a jusante do filtro coalescente existente na saída do tanque de H₂+GLS e a montante do tanque de armazenamento H₂. A correlação linear entre a abertura da válvula e a eficiência é **moderada negativa**, atingindo **32%**, conforme ilustrado na Figura 56. Ao avaliar o diagrama de dispersão da Figura 65 nota-se facilmente que a maior volumetria dos dados possuem comportamento que se propagam no eixo horizontal, detonando a não dependência entre as variáveis.

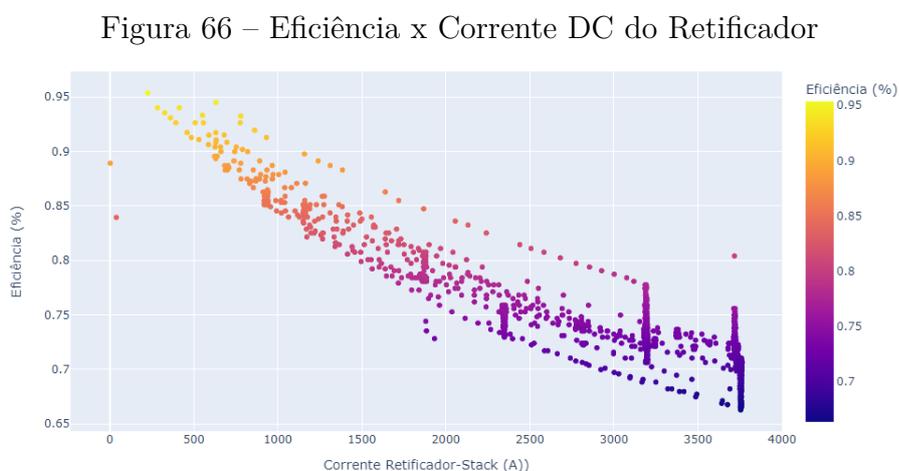
Figura 65 – Eficiência x Percentual de Abertura Válvula [PV327 (%)]



Fonte: O Autor

4.2.1.9 Eficiência x Corrente DC do Retificador (Correlação Forte e Negativa de 91%)

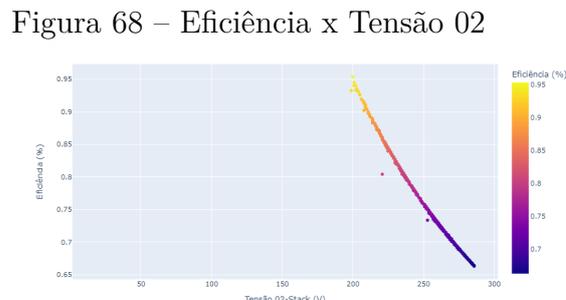
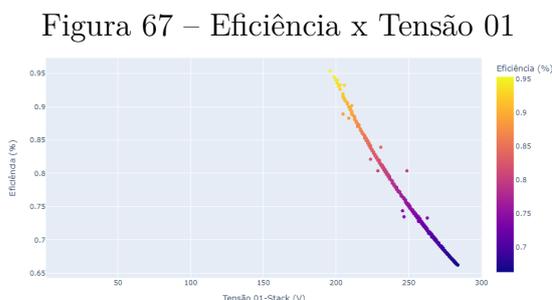
A Corrente DC oriunda do Retificador é responsável por fornecer alimentação elétrica para que ocorra o processo de eletrólise na *stack*. Avaliando a matriz da Figura 56, é possível notar que a correlação linear entre a Corrente DC e a Eficiência se apresentou **fortemente negativa**, atingindo **91%** de dependência. Ao avaliar o diagrama de dispersão da Figura 66, conclui-se que realmente as variáveis possuem forte dependência entre si. Ou seja, quanto maior for a corrente DC menor será a eficiência, o inverso também é verdadeiro.



Fonte: O Autor

4.2.1.10 Eficiência x Tensão 01 e Tensão 02 (Correlação Perfeita e Negativa de 100%)

As Tensões Elétricas 01 e 02 que alimentam o *stack*, possuem uma correlação **perfeita e negativa** de **100%**, sendo a maior correlação entre as variáveis nesse estudo. Ao avaliar os diagramas de dispersão das Figuras 67 e 68, constata-se a dependência direta entre variáveis, como citado por [Nur Ozdemir et al. \(2023\)](#).

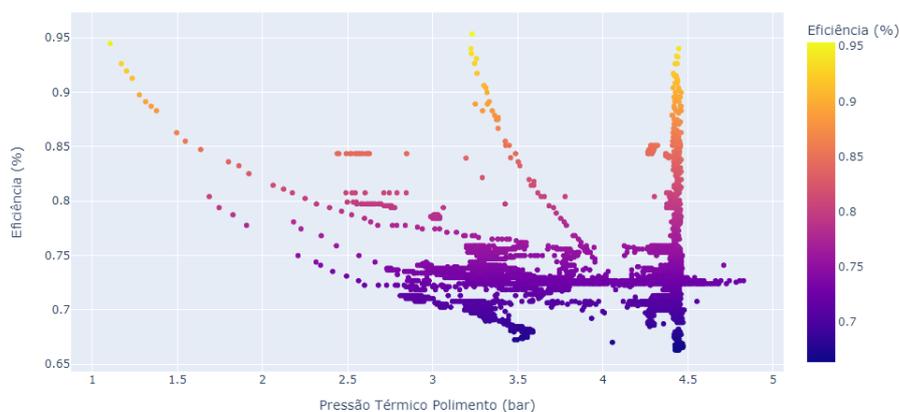


Fonte: O Autor

4.2.1.11 Eficiência x Pressão Gerenciamento Térmico Polimento [PT300 (bar)] (Correlação Fraca e Positiva de 15%)

A pressão do sistema de gerenciamento térmico de polimento da água, tag PT300 (bar), possui **fraca** correlação linear de **15% positiva**. Para conhecer se realmente há um certo nível de dependências entre as variáveis, foi avaliado o diagrama de dispersão da Figura 69. Há portanto, um antagonismo entre a possível dependência mostrada no resultado da matriz de correlação que é **positiva** e o diagrama de dispersão, que por sua vez, indica uma leve inclinação **negativa**. Sendo assim, a variável será desprezada desse estudo.

Figura 69 – Eficiência x Pressão Gerenciamento Térmico Polimento [PT300 (bar)]



Fonte: O Autor

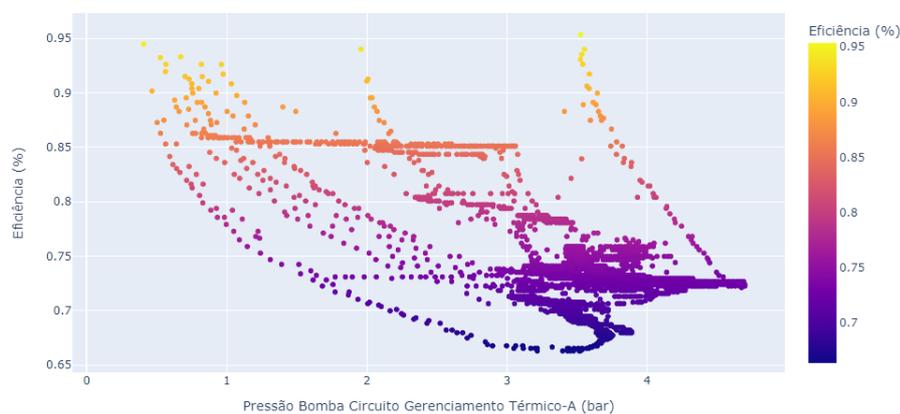
4.2.1.12 Eficiência x Pressão Bomba Circuito Gerenciamento Térmico [PT304 (bar)] (Correlação Moderada e Negativa de 33%)

O sensor PT304 (bar), responsável pela medição da Pressão da bomba circuito gerenciamento térmico apresentou **33%** de correlação com a Eficiência, sendo sua relação **moderada negativa**. Ao avaliar a dispersão na Figura 70, foi constatado a dependência através do gráfico inversamente proporcional.

4.2.1.13 Eficiência x Pressão Tanque O₂-Água [PT307 (bar)] (Correlação Moderada e Negativa de 42%)

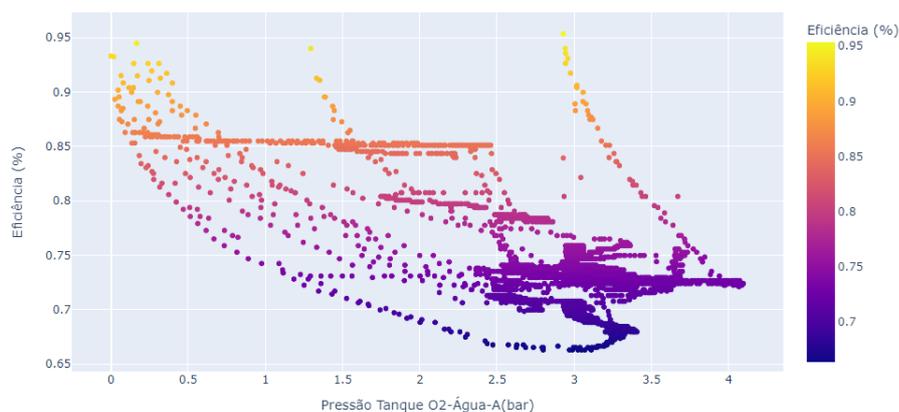
O sensor PT307 (bar), responsável pela medição da Pressão do tanque de O₂+Água apresentou **moderada** correlação linear **negativa** de **42%** com a eficiência. Ao avaliar os diagramas de dispersão das Figuras 71, constata-se a dependência direta entre variáveis.

Figura 70 – Eficiência x Pressão Bomba Circuito Gerenciamento Térmico [PT304 (bar)]



Fonte: O Autor

Figura 71 – Eficiência x Pressão Tanque O2-Água [PT307 (bar)]

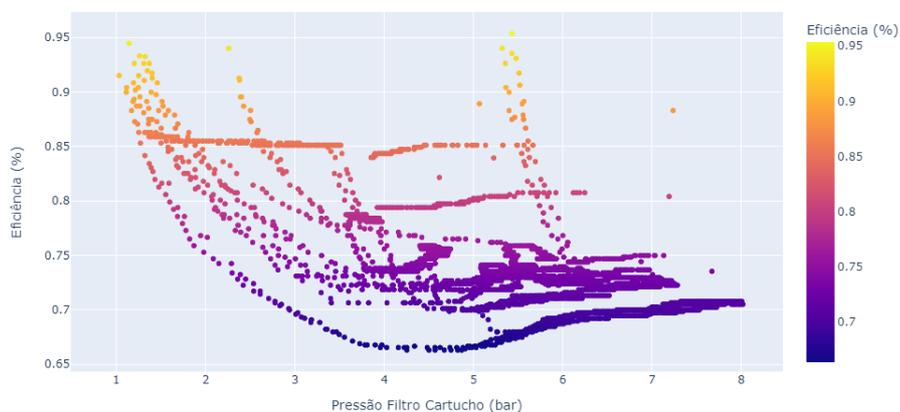


Fonte: O Autor

4.2.1.14 Eficiência x Pressão Bomba Alimentação do Stack [PT314 (bar)] (Correlação Forte e Negativa de 80%)

O sensor PT314 (bar), responsável pela medição da Pressão na Saída da bomba que alimenta a *stack* apresentou **forte** correlação linear **negativa** de **80%** com a eficiência. A análise dos diagramas de dispersão apresentados na Figura 72, revela uma dependência direta entre as variáveis. Em outras palavras, à medida que a pressão do fluxo que atravessa o *stack* aumenta, a eficiência diminui. Esse fenômeno pode ser atribuído ao tempo de reação química necessário no eletrolisador.

Figura 72 – Eficiência x Pressão Bomba Alimentação do *Stack* [PT314 (bar)]

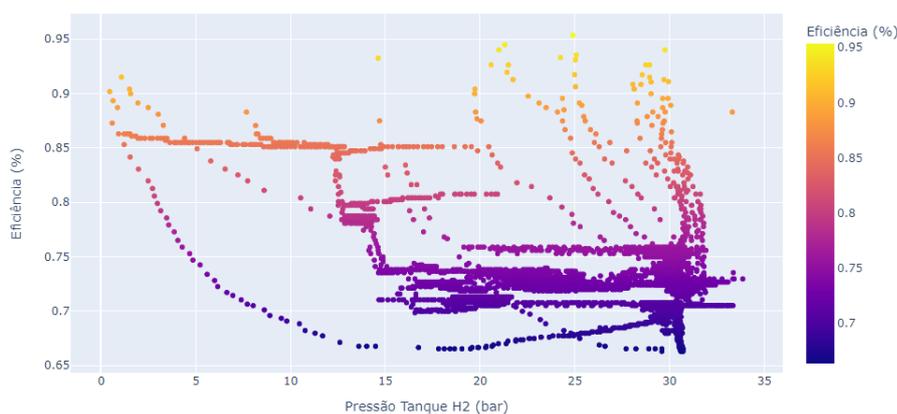


Fonte: O Autor

4.2.1.15 Eficiência x Pressão Tanque H₂ [PT323 (bar)] (Correlação Moderada e Negativa de 37%)

O sensor PT323 (bar), responsável pela medição da Pressão do tanque de H₂ apresentou **moderada** correlação linear **negativa** de **37%** com a eficiência. Ao avaliar o diagrama de dispersão da Figura 73, constata-se a dependência direta entre variáveis. No entanto, essa variável será descartada devido o tanque ficar a jusante da *stack*, não afetando de fato a eficiência.

Figura 73 – Eficiência x Pressão Tanque H₂ [PT323 (bar)]



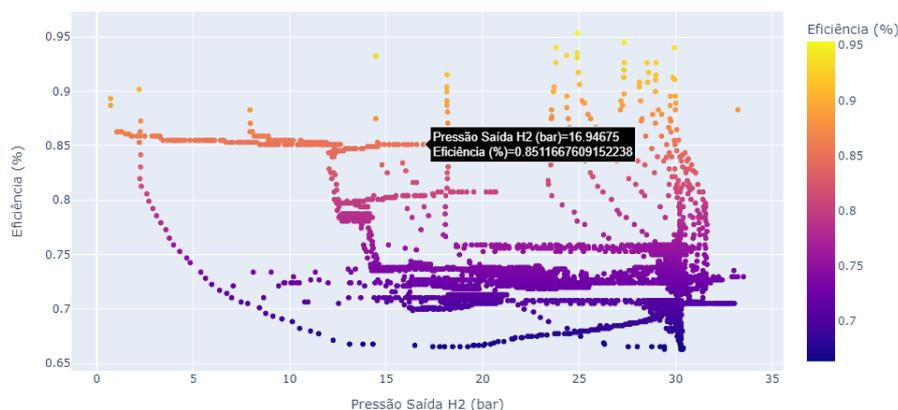
Fonte: O Autor

4.2.1.16 Eficiência x Pressão Saída H₂ [PT325 (bar)] (Correlação Moderada e Negativa de 35%)

O sensor PT325 (bar), responsável pela medição da Pressão de H₂ após sua purificação, apresentou **moderada** correlação linear **negativa** de **35%** com a eficiência.

Ao avaliar os diagramas de dispersão das Figuras 61, constata-se a dependência direta entre variáveis. No entanto, essa variável será descartada pelo mesmo motivo da variável da seção 4.2.1.15.

Figura 74 – Eficiência x Pressão Saída H2 [PT325 (bar)]

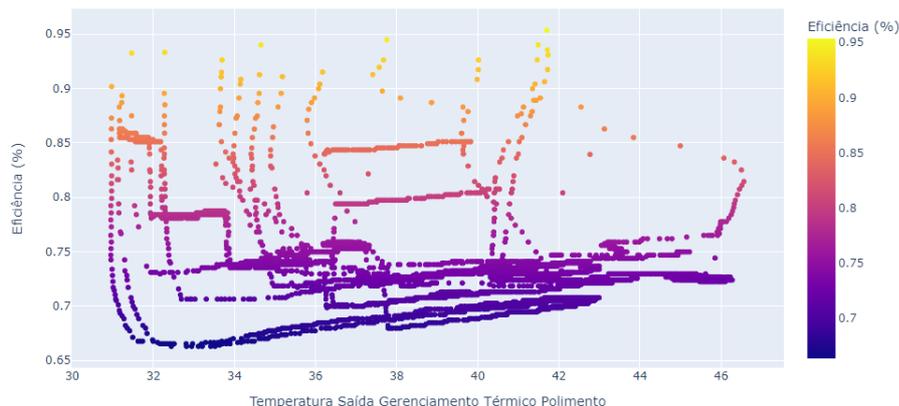


Fonte: O Autor

4.2.1.17 Eficiência x Temp. Saída Gerenciamento Térmico Polimento [TT300 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 62%)

O sensor TT300 (°C), responsável pela medição da temperatura de saída do sistema de gerenciamento térmico de polimento da água apresentou **forte** correlação linear **negativa** de **62%** com a eficiência. No entanto, ao analisar o diagrama de dispersão da Figura 75, percebe-se que a dependência é **positiva**. É possível haver uma correlação negativa na matriz de Pearson e, ao mesmo tempo, apresentar uma correlação positiva em um diagrama de dispersão. Isso pode ocorrer quando há uma relação não linear entre as variáveis. A correlação de Pearson mede apenas a relação linear entre duas variáveis. Se a relação entre as variáveis for não linear, a correlação de Pearson pode não capturar essa relação adequadamente. Por outro lado, ao plotar um diagrama de dispersão das variáveis, você pode observar uma tendência clara que indica uma relação positiva.

Figura 75 – Eficiência x Temp. Saída Gerenciamento Térmico Polimento [TT300 (°C)]

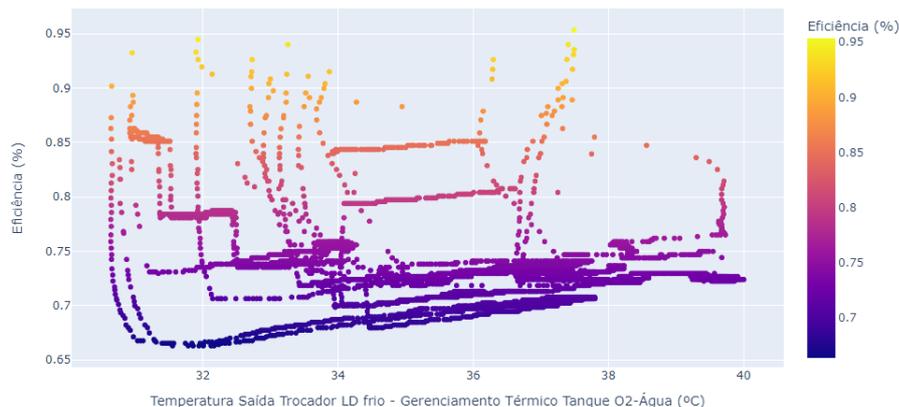


Fonte: O Autor

4.2.1.18 *Eficiência x Temp. Saída Trocador LD frio - Gerenciamento Térmico Tanque O₂-Água (°C) [TT303 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 59%)*

O sensor TT303 (°C), responsável pela medição da temperatura de saída do trocador de calor lado frio apresentou **forte** correlação linear **negativa** de **59%** com a eficiência. No entanto, ao analisar o diagrama de dispersão da Figura 76, percebe-se que a dependência é **positiva** pelo mesmo motivo citado na seção 4.2.1.17.

Figura 76 – Eficiência x Temp. Saída Trocador LD frio - Gerenciamento Térmico Tanque O₂-Água (°C) [TT303 (°C)]



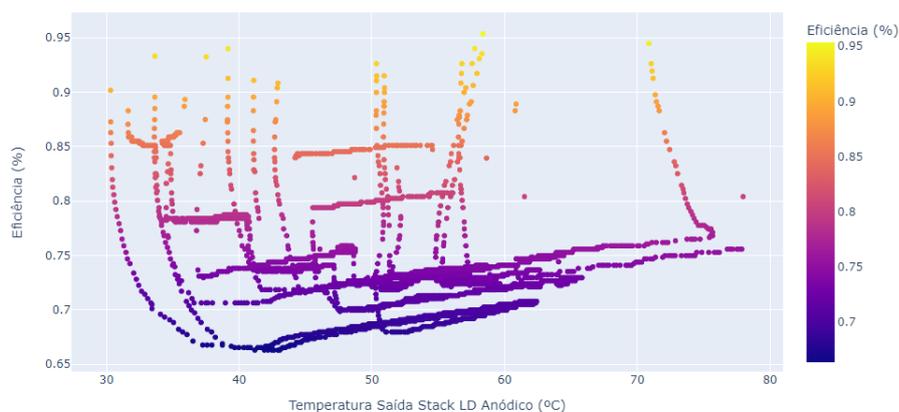
Fonte: O Autor

4.2.1.19 *Eficiência x Temperatura Saída Stack Lado Anódico (°C) [TT309 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 68%)*

O sensor TT309 (°C), responsável pela medição da temperatura de saída lado anódico da *stack* apresentou **forte** correlação linear **negativa** de **68%** com a eficiência. No entanto, ao analisar o diagrama de dispersão da Figura 77, percebe-se que a dependência

é **positiva** pelo mesmo motivo citado na seção 4.2.1.17.

Figura 77 – Eficiência x Temperatura Saída *Stack* Lado Anódico (°C) [TT309 (°C)]

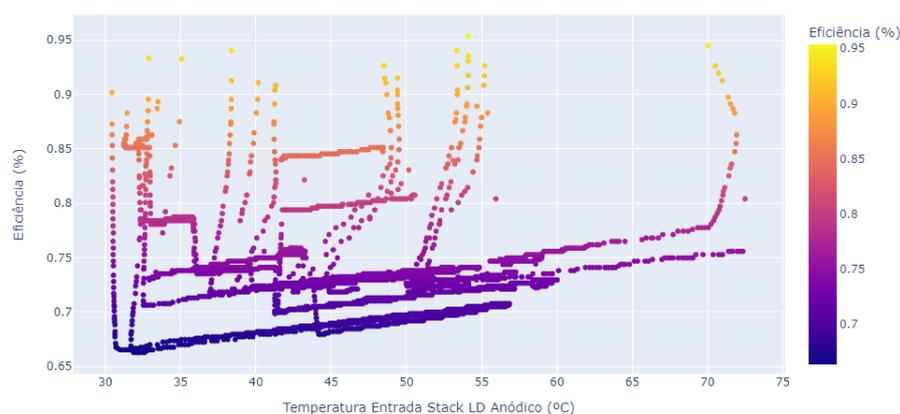


Fonte: O Autor

4.2.1.20 Eficiência x Temperatura Entrada *Stack* Lado Anódico (°C) [TT310 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 63%)

O sensor TT310 (°C), responsável pela medição da temperatura de entrada lado anódico da *stack* apresentou **forte** correlação linear **negativa** de **63%** com a eficiência. No entanto, ao analisar o diagrama de dispersão da Figura 78 percebe-se que a dependência é **positiva** pelo mesmo motivo citado na seção 4.2.1.17.

Figura 78 – Eficiência x Temperatura Entrada *Stack* Lado Anódico (°C) [TT310 (°C)]

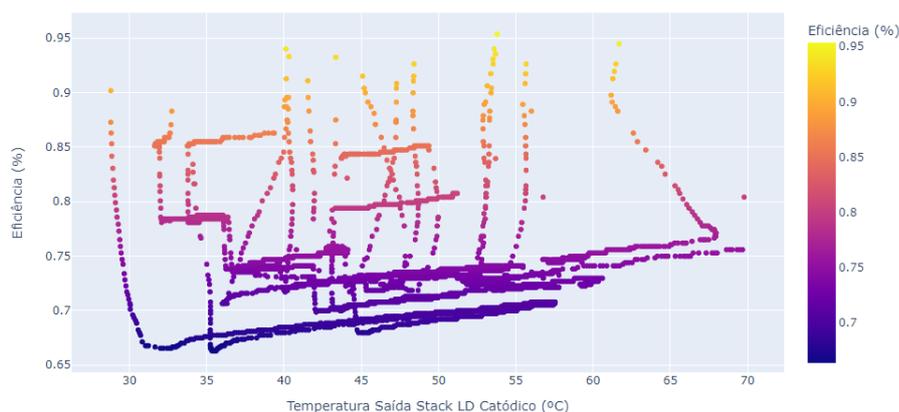


Fonte: O Autor

4.2.1.21 Eficiência x Temperatura Saída Stack Lado Catódico (°C) [TT311 (°C)] (Correlação Forte e Negativa de 63%)

O sensor TT310 (°C), responsável pela medição da temperatura de saída lado catódico da *stack* apresentou **forte** correlação linear **negativa** de **63%** com a eficiência. No entanto, ao analisar o diagrama de dispersão da Figura 79 percebe-se que a dependência é **positiva** pelo mesmo motivo citado na seção 4.2.1.17.

Figura 79 – Eficiência x Temperatura Saída Stack Lado Catódico (°C) [TT311 (°C)]

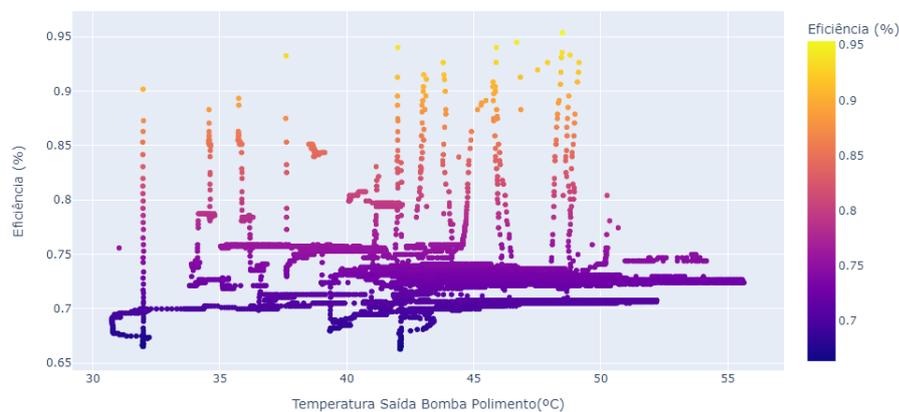


Fonte: O Autor

4.2.1.22 Eficiência x Temperatura Saída Bomba Polimento (°C) [TT328 (°C)] (Correlação Moderada e Negativa de 46%)

O sensor TT328 (°C), responsável pela medição da temperatura de saída da bomba de polimento apresentou **moderada** correlação linear **negativa** de **46%** com a eficiência. No entanto, ao avaliar o padrão de dispersão na Figura 80 percebe-se que não existe nenhuma dependência entre variáveis. Dessa forma, esta variável será desprezada a partir deste momento.

Figura 80 – Eficiência x Temperatura Saída Bomba Polimento ($^{\circ}\text{C}$) [TT328 ($^{\circ}\text{C}$)]

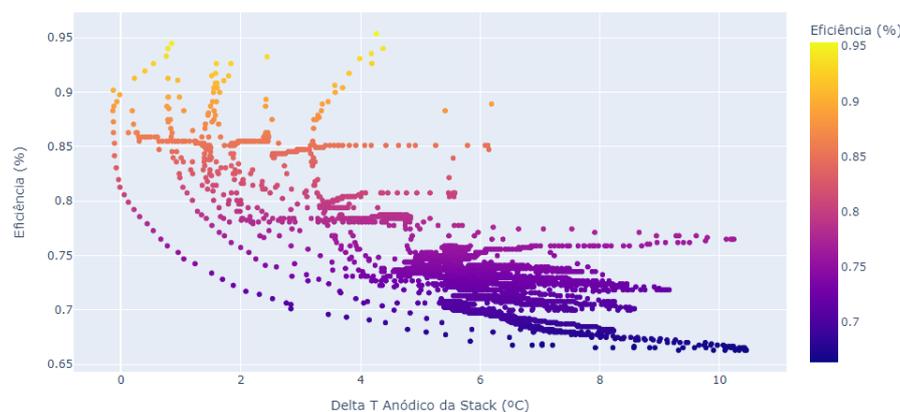


Fonte: O Autor

4.2.1.23 Eficiência x Delta T Anódico da Stack ($^{\circ}\text{C}$) (Correlação Forte e Negativa de 56%)

O diferencial de temperatura lado anódico da *stack*, apresentou **forte** correlação linear **negativa** de **56%** com a eficiência. Ao avaliar os diagramas de dispersão da Figura 81, constata-se a dependência direta entre variáveis.

Figura 81 – Eficiência x Delta T Anódico da Stack ($^{\circ}\text{C}$)



Fonte: O Autor

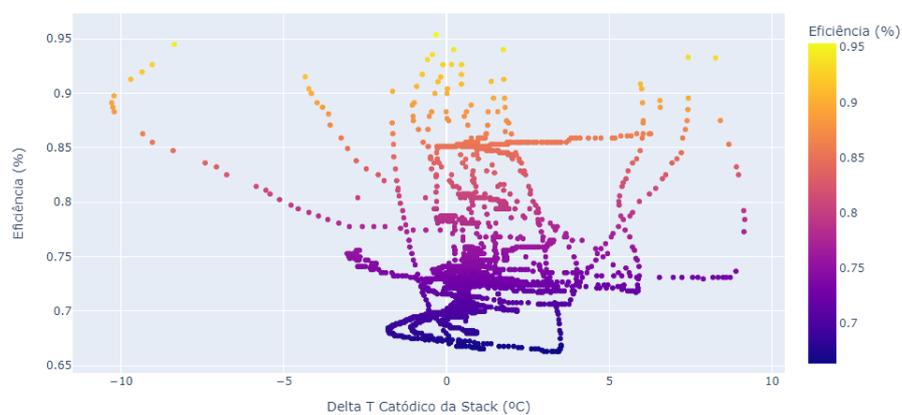
4.2.1.24 Eficiência x Delta T Catódico da Stack ($^{\circ}\text{C}$) (Correlação Fraca e Positiva de 17%)

O Delta T Catódico da *Stack* possui baixa correlação positiva com a eficiência, sendo da ordem de 17%.

O diferencial de temperatura do lado catódico da *stack* apresentou uma correlação linear **fraca** e **positiva** de **17%** com a eficiência. Ao avaliar os diagramas de

dispersão da Figura 82, percebe-se que não existe uma dependência significativa entre as variáveis. Dessa forma, esta variável será desprezada a partir deste momento.

Figura 82 – Eficiência x Delta T Catódico da *Stack* (°C)



Fonte: O Autor

4.3 Limites operacionais para se obter a máxima eficiência

Por último, foi desenvolvido um algoritmo que calcula os parâmetros mínimos, médios e máximos das variáveis operacionais. O código implementado inclui duas restrições principais: a primeira é que os dados gerados correspondam a uma capacidade de produção de 100

Assim, os parâmetros apresentados na Figura 83 ilustram as faixas operacionais ideais necessárias para que o eletrolisador funcione a plena carga, mantendo uma eficiência da *stack* constante de 72%.

Figura 83 – Parâmetros ideais de operação do eletrolisador

	max	min	mean
n Efic-A(%)	0.73	0.72	0.72
CP-real-A CalcInt(%)	100.0	100.0	100.0
CT301 (uS)	0.14	0.12	0.13
LT305 (%)	577.37	546.8	568.07
AT302 (%)	1.42	0.48	1.4
rMP301A_EfCorrent	25.92	24.85	25.4
rMP301A_SpeedSp	35.51	34.09	34.9
PV306 (%)	100.0	100.0	100.0
PV327 (%)	100.0	0.0	99.45
Corr_Total-A (A)	3746.6	3731.3	3739.39
rEf_TensaoVolts_EM_1A	261.0	259.0	260.99
rEf_TensaoVolts_EM_2A	263.0	261.0	262.65
PT300 (bar)	3.71	3.52	3.56
PT304 (bar)	4.23	3.67	3.92
PT307 (bar)	3.57	3.36	3.38
PT314 (bar)	7.16	6.79	6.96
PT323 (bar)	32.02	18.73	24.75
PT325 (bar)	31.45	7.09	23.67
TT300 (°C)	45.06	42.53	42.85
TT303 (°C)	39.48	37.92	38.16
TT309 (°C)	64.52	60.56	61.9
TT310 (°C)	59.02	54.89	56.34
TT311 (°C)	59.66	55.4	56.93
TT328 (°C)	51.24	45.07	48.07
D-T-A-anod(°C)	5.7	5.48	5.57
D-T-A-cato(°C)	0.72	0.51	0.59
Stack	2.0	2.0	2.0

Fonte: O Autor

5 CONCLUSÃO

Este estudo foi conduzido com o objetivo de determinar os parâmetros operacionais ideais para um eletrolisador de hidrogênio verde do tipo *PEM*, utilizando técnicas de *Data Science* e análise de dados de telemetria. A pesquisa alcançou com sucesso todos os objetivos propostos, sendo possível identificar as variáveis-chave que impactam diretamente a eficiência do equipamento. Além disso, foi desenvolvido um algoritmo capaz de retornar os parâmetros operacionais que maximizam a eficiência do eletrolisador, atingindo um valor médio de **72,7%**. O uso da metodologia *KDD* se mostrou eficaz para a descoberta de padrões e relações importantes nos dados, enquanto a aplicação de bibliotecas da linguagem Python forneceu uma base sólida para a análise estatística.

Portanto, os resultados obtidos são promissores e representam uma contribuição relevante para o campo da engenharia de confiabilidade, ciência de dados e energias renováveis, especialmente no que diz respeito à operação de eletrolisadores de hidrogênio verde. A pesquisa demonstrou a viabilidade de se aplicar *Data Science* na melhoria da eficiência desses equipamentos, destacando seu papel na descarbonização e sustentabilidade global.

5.1 Limitações

Apesar dos resultados positivos, a pesquisa enfrentou algumas limitações. O período de aquisição dos dados de telemetria foi restrito a apenas quatro dias, devido a atrasos e dificuldades no envio de informações pelo fabricante. Essa limitação afetou a quantidade de dados disponíveis para análise, o que poderia ter sido melhorado com um período de monitoramento mais longo.

Além disso, o eletrolisador utilizado no estudo não possuía medidor de vazão. Isso exigiu que toda a pesquisa fosse baseada em cálculos de aproximação matemática para a eficiência do equipamento, em vez de utilizar dados reais de vazão, o que poderia trazer maior precisão para os resultados obtidos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para futuras pesquisas, recomenda-se a repetição deste estudo utilizando dados de telemetria de um medidor de vazão, eliminando assim a necessidade de aproximações matemáticas e aumentando a precisão dos resultados. A inclusão de um medidor de vazão permitirá uma avaliação direta da eficiência do eletrolisador com base em dados reais, fortalecendo a validade das conclusões.

Além disso, sugere-se a aplicação de técnicas de *machine learning* para prever o comportamento das variáveis operacionais ao longo do tempo, contribuindo para

o desenvolvimento de modelos preditivos que possam otimizar ainda mais a operação de eletrolisadores de hidrogênio verde. A introdução dessas técnicas pode melhorar a previsibilidade e o controle dos processos, levando a novos avanços na eficiência desses sistemas.

REFERÊNCIAS

- AYERS, K. E.; CAPUANO, C.; ANDERSON, E. B. Recent advances in cell cost and efficiency for pem-based water electrolysis. **ECS Transactions**, The Electrochemical Society, Inc., v. 41, n. 10, p. 15, may 2012. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1149/1.3684798>>.
- AYERS, K. E.; MOULTHROP, L.; ANDERSON, E. B. Hydrogen infrastructure challenges and solutions. **ECS Transactions**, IOP Publishing, v. 41, n. 46, p. 75, 2012.
- BABIC, U.; SUERMANN, M.; BÜCHI, F.; GUBLER, L.; SCHMIDT, T. Critical review—identifying critical gaps for polymer electrolyte water electrolysis development. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 164, p. F387–F399, 02 2017.
- BADE, S. O.; TOMOMEWO, O. S.; MEENAKSHISUNDARAM, A.; FERRON, P.; ONI, B. A. Economic, social, and regulatory challenges of green hydrogen production and utilization in the us: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, 2024. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923041587>>.
- BALAT, M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 33, n. 15, p. 4013–4029, 2008.
- BARBIR, F. Pem electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. **Solar energy**, Elsevier, v. 78, n. 5, p. 661–669, 2005.
- BAREISS, K.; RÚA, C. De la; MÖCKEL, M.; HAMACHER, T. Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. **Applied Energy**, v. 237, p. 862–872, 03 2019.
- BERNT, M.; GASTEIGER, H. Influence of ionomer content in iro 2 /tio 2 electrodes on pem water electrolyzer performance. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 163, p. F3179–F3189, 08 2016.
- BESSARABOV, D.; WANG, H.; LI, H.; ZHAO, N. **PEM electrolysis for hydrogen production: principles and applications**. [S.l.]: CRC press, 2016.
- BURTON, N.; PADILLA, R.; ROSE, A.; HABIBULLAH, H. Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110255, 2021. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212030544X>>.
- CARMO, M.; FRITZ, D. L.; MERGEL, J.; STOLTEN, D. A comprehensive review on pem water electrolysis. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 38, n. 12, p. 4901–4934, 2013.
- 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>>.

CHI, J.; YU, H. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. **Chinese Journal of Catalysis**, v. 39, n. 3, p. 390–394, 2018. ISSN 1872-2067. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1872206717629498>>.

CHISHOLM, G.; ZHAO, T.; CRONIN, L. 24 - hydrogen from water electrolysis. In: LETCHER, T. M. (Ed.). **Storing Energy (Second Edition)**. Second edition. Elsevier, 2022. p. 559–591. ISBN 978-0-12-824510-1. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128245101000155>>.

CLIMATE. 2024. Acessado em 01 de Março, 2024. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>>.

CNOSSEN, I. Drivers of upper atmosphere climate change. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 2020. Acesso em: 10 jun. 2024.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2^a. ed. NJ: Erlbaum: Hillsdale, 1988. 472 p.

CONWAY, D. **The Data Science Venn Diagram**. 2013. Accessed: 2024-10-03. Disponível em: <<https://drewconway.com/zia/2013/3/26/the-data-science-venn-diagram>>.

COP21. **Acordo de Paris**. 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/paris_agreement_e.pdf>.

COP3. **Protocolo de Kyoto**. 1997. 3^a Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada em Kyoto, Japão, em 1997. Paris, França. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol>>.

DANTAS, G. **Tentando uma Definição Abrangente para Data Science**. 2023. Accessed: 2024-10-03. Disponível em: <<https://awaridados.substack.com/p/tentando-definicao-abrangente-data-science>>.

DODDS, P. E.; STAFFELL, I.; HAWKES, A. D.; LI, F.; GRÜNEWALD, P.; MCDOWALL, W.; EKINS, P. Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 40, n. 5, p. 2065–2083, 2015.

DOE. **Hydrogen Program Plan**. 2020. USA. Disponível em: <<https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>>.

DU, N.; ROY, C.; PEACH, R.; TURNBULL, M.; THIELE, S.; BOCK, C. Anion-exchange membrane water electrolyzers. **Chemical Reviews**, v. 122, n. 13, p. 11830–11895, 2022. PMID: 35442645. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00854>>.

DURBIN, D. J.; MALARDIER-JUGROOT, C. Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 38, n. 34, p. 14595–14617, 2013.

EL-SHAFIE, M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. **Results in Engineering**, v. 20, p. 101426, 2023. ISSN 2590-1230. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123023005534>>.

ENEL. **Green Hydrogen Factbook**. 2023. Cores do hidrogênio - pg.5. Disponível em: <<<https://www.enelgreenpower.com/content/dam/enel-egp/documenti/energie-rinnovabili/green-hydrogen-factbook.pdf>>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

EPO; IRENA. **Patent Insight Report: Innovation Trends in Electrolysers for Hydrogen Production**. Vienna, 2022.

ESTEVIÃO, T. E. R. Mestrado em Engenharia Mecânica, **O Hidrogênio como combustível**. Porto: [s.n.], 2008.

FAVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. Inclui bibliografia e índice. ISBN 978-85-352-7087-7.

FENG, Q.; YUAN, X.-Z.; LIU, G.; WEI, B.; ZHANG, Z.; LI, H.; WANG, H. A review of proton exchange membrane water electrolysis on degradation mechanisms and mitigation strategies. **Journal of Power Sources**, v. 366, p. 33–55, 10 2017.

FERNANDES, R. F. Eletrólise. **Revista de Ciência Elementar**, v. 3, n. 1, 2015. Disponível em: <<https://rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2015/019/>>.

FERRERO, D.; LANZINI, A.; SANTARELLI, M.; LEONE, P. A comparative assessment on hydrogen production from low- and high-temperature electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 9, p. 3523–3536, 2013. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913001511>>.

FOGLIATTO, F. S.; DUARTE, J. L. R. **Confiabilidade e manutenção industrial [recurso eletrônico]**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.

G1 Ceará. **Primeira molécula de hidrogênio verde do país é apresentada durante evento no Complexo do Pecém, no Ceará**. 2023. Acesso em: 04 out. 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2023/01/19/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-do-pais-e-apresentada-durante-evento-no-complexo-do-pecem-gh.html>>.

GAGO, A.; BURGGRAF, F.; WANG, L.; BIERMANN, K.; HOSSEINI, S.; GAZDZICKI, P.; FRIEDRICH, K. Zukunftspotentiale der elektrolyse. In: . [S.l.: s.n.], 2015.

GANLEY, J. High temperature and pressure alkaline electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 3604–3611, 05 2009.

GODULA-JOPEK, A. **Hydrogen production: by electrolysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.

GOLDENERGY. **Metro cúbico normal (Nm³)**. 2024. Accessed: 2024-08-26. Disponível em: <<https://goldenergy.pt/glossario/metro-cubico-normal-nm3/>>.

GOMES, J. Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio. **Revista de Ciência Elementar**, v. 10, n. 2, 2022. Disponível em: <<https://rce.casadasciencias.org/rceapp/pdf/2022/025/>>.

GRUS, J. **Data Science from Scratch: First Principles with Python**. O'Reilly Media, 2019. ISBN 9781492041108. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=YBKSDwAAQBAJ>>.

GUTIÉRREZ-MARTÍN, F.; OCHOA-MENDOZA, A.; RODRÍGUEZ-ANTÓN, L. M. Pre-investigation of water electrolysis for flexible energy storage at large scales: The case of the spanish power system. **international journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 40, n. 15, p. 5544–5551, 2015.

HAAS, C.; MACHERHAMMER, M.-G.; KLOPCIC, N.; TRATTNER, A. Capabilities and limitations of 3d-cfd simulation of anode flow fields of high-pressure pem water electrolysis. **Processes**, v. 9, n. 6, 2021. ISSN 2227-9717. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/9/6/968>>.

HACKELING, G. **Mastering Machine Learning with scikit-learn**. Packt Publishing, 2017. ISBN 9781788298490. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=9-ZDDwAAQBAJ>>.

HALEEM, A. A.; NAGASAWA, K.; KURODA, Y.; NISHIKI, Y.; ZAENAL, A.; MITSUSHIMA, S. A new accelerated durability test protocol for water oxidation electrocatalysts of renewable energy powered alkaline water electrolyzers. **Electrochemistry**, The Electrochemical Society of Japan, v. 89, n. 2, p. 186–191, 2021.

HAYNES, W. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. CRC Press, 2014. (CRC Handbook of Chemistry and Physics). ISBN 9781482208689. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bNDMBQAAQBAJ>>.

HINO, R.; HAGA, K.; AITA, H.; SEKITA, K. 38. rd on hydrogen production by high-temperature electrolysis of steam. **Nuclear Engineering and Design**, v. 233, n. 1, p. 363–375, 2004. ISSN 0029-5493. Japan's HTTR. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549304002651>>.

IAEA. **Hydrogen Production Using Nuclear Energy**. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2013. (Nuclear Energy Series, NP-T-4.2). ISBN 978-92-0-135110-4. Disponível em: <<https://www.iaea.org/publications/8855/hydrogen-production-using-nuclear-energy>>.

IBERDROLA. Aplicações do hidrogênio verde. p. 1, 2022.

IEA. **The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities**. 2019. Cores do hidrogênio - pg.8. Acesso em: 20 mar. 2024.

IEA. **Global Hydrogen Review 2021**. 2021. Disponível em: <<<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

IEA. **Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach**. 2023. Paris. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a698da4-4002-4e53-8ef3-631d8971bf84/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf>.

IEA. **World Energy Outlook**. [S.l.], 2023.

IPCC. **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]**. [S.l.], 2023.

IRENA. **Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition**. 2018. Abu Dhabi. Disponível em: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf>.

IRENA. **Green Hydrogen: A Guide to Policy Making**. 2020. Cores do hidrogênio - pg.8. Disponível em: <<>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

IRENA. **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal**. Abu Dhabi: [s.n.], 2020.

IRENA. **MAKING THE BREAKTHROUGH—Green Hydrogen Policies and Technology Costs**. [S.l.]: International Renewable Energy Agency Abu Dhabi, 2021.

IRENA. **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, Volume 1**. 2023. Abu Dhabi. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>>.

ITO, H.; MAEDA, T.; NAKANO, A.; HASEGAWA, Y.; YOKOI, N.; HWANG, C.; ISHIDA, M.; KATO, A.; YOSHIDA, T. Effect of flow regime of circulating water on a proton exchange membrane electrolyzer. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 9550–9560, 09 2010.

JAOKAR, A.; HOWARTH, D.; MUTLU, A. **Classification and Regression: In a Weekend**. [S.l.]: Data Science Central, 2016. Happy Weekend Series.

JENNING-ANODES-COMPANY. **Processo de produção de hidrogênio em larga escala**). 2024. Figura publicada em site Jennings Anodes, fabricante de ânodos de alta qualidade e produtos de controle de corrosão nos Estados Unidos. Disponível em: <<https://jenningsanodes.com/applications/hydrogen-production-by-water-electrolysis>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

JENNINGS-ANODES. **Hydrogen Production by Water Electrolysis**. 2024. <<https://jenningsanodes.com/applications/hydrogen-production-by-water-electrolysis>>. Accessed: March 20, 2024.

KACPRZYK, A.; KUCHTA, Z. Shining a new light on the environmental kuznets curve for co2 emissions. **Energy Economics**, v. 87, p. 104704, 2020. ISSN 0140-9883. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988320300438>>.

KARAYEL, G.; JAVANI, N.; DINCER, I. Green hydrogen production potential in turkey with wind power. **International Journal of Green Energy**, v. 20, p. 1–10, 02 2022.

KAUARK, G.; MANHAES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa : guia prático**. Itabuna-Bahia: Via Litterarum, 2010.

KEONG, C. Y. Chapter 2 - the united nations' journey to global environmental sustainability since stockholm: An assessment. In: KEONG, C. Y. (Ed.). **Global Environmental Sustainability**. Elsevier, 2021. p. 7–61. ISBN 978-0-12-822419-9. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128224199000023>>.

KHAN, Z.; ALI, S.; DONG, K.; LI, R. Y. M. How does fiscal decentralization affect co2 emissions? the roles of institutions and human capital. **Energy Economics**, v. 94, p. 105060, 2021. ISSN 0140-9883. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014098832030400X>>.

KIRK, A. **Data Visualisation: A Handbook for Data Driven Design**. [S.l.]: Sage Publications Ltd., 2016. ISBN 1473912148.

KJARTANSDÓTTIR, C. K.; NIELSEN, L. P.; MØLLER, P. Development of durable and efficient electrodes for large-scale alkaline water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 20, p. 8221–8231, 2013. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319913010252>>.

KONOPKA, A. J.; GREGORY, D. P. Hydrogen production by electrolysis-present and future. In: **Energy 10; Annual Intersociety Energy Conversion and Engineering Conference**. [S.l.: s.n.], 1975. p. 1184–1193.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em excel**. Elsevier, 2007. ISBN 9788535220872. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-rPgNAAACAAJ>>.

LANGEMANN, M.; FRITZ, D. L.; MÜLLER, M.; STOLTEN, D. Validation and characterization of suitable materials for bipolar plates in pem water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 35, p. 11385–11391, 2015. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915010939>>.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015. Título original: Elementary statistics: picturing the world. ISBN 978-85-4301-811-9.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. 6. ed. São Paulo, SP: Pearson Education do Brasil, 2016. xv, 656 p. ISBN 9788543004778.

LENG, Y.; CHEN, G.; MENDOZA, A.; TIGHE, T.; HICKNER, M.; WANG, C.-Y. Solid-state water electrolysis with an alkaline membrane. **Journal of the American Chemical Society**, v. 134, p. 9054–7, 05 2012.

LUJANO-ROJAS, J.; DUFO-LÓPEZ, R.; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A. 6 - optimization of renewable energy systems by genetic algorithms. In: LUJANO-ROJAS, J.; DUFO-LÓPEZ, R.; DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A. (Ed.). **Genetic Optimization Techniques for Sizing and Management of Modern Power Systems**. Elsevier, 2023. p. 247–281. ISBN 978-0-12-823889-9. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128238899000072>>.

MARIOLAKOS, I.; KRANIOTI, A.; MARKATSELIS, E.; PAPAGEORGIOU, M. Water, mythology and environmental education. **Desalination**, Elsevier, v. 213, n. 1-3, p. 141–146, 2007.

MCKINNEY, W. **Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter**. O'Reilly Media, 2022. ISBN 9781098103989. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=EAKBEAAAQBAJ>>.

MCNICHOLAS, P.; TAIT, P. **Data Science with Julia**. CRC Press, 2019. ISBN 9781351013666. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-UOCDwAAQBAJ>>.

MILLER, H. A.; BOUZEK, K.; HNAT, J.; LOOS, S.; BERNÄCKER, C. I.; WEIßGÄRBER, T.; RÖNTZSCH, L.; MEIER-HAACK, J. Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis: a review of recent developments in critical materials and operating conditions. **Sustainable Energy Fuels**, The Royal Society of Chemistry, v. 4, p. 2114–2133, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/C9SE01240K>>.

MILLET, P.; NGAMENI, R.; GRIGORIEV, S.; MBEMBA, N.; BRISSET, F.; RANJBARI, A.; ETIÉVANT, C. Pem water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 10, p. 5043–5052, 2010. ISSN 0360-3199. Novel Hydrogen Production Technologies and Applications. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990901386X>>.

MOLIN, S.; JEE, K. **Hands-On Data Analysis with Pandas: A Python Data Science Handbook for Data Collection, Wrangling, Analysis, and Visualization**. Sciendo, 2021. 1–788 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.0000/9781800565913-001>>.

MÜLLER, A.; GUIDO, S. **Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists**. O'Reilly Media, 2016. ISBN 9781449369897. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=vbQIDQAAQBAJ>>.

NAFION Membranes and Dispersions: XI-100 membrane. Wilmington, DE: DuPont Fuel Cells, 2010. P.O. Box 80701, Wilmington, DE 19880-0701. Copyright © 2010 DuPont or its affiliates. The DuPont Oval Logo, DuPont™, The miracles of science™, and Nafion® are trademarks or registered trademarks of E. I. du Pont de Nemours and Company or its affiliates.

NASA. **Earth's Magnetosphere: Protecting Our Planet from Harmful Space Energy**. 2023. Acesso em: 10 jun. 2024. Disponível em: <<https://science.nasa.gov/earths-magnetosphere>>.

NASA:Goddard Institute for Space Studies . **Global average temperature**. 2022. Disponível em: <<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>>.

NAVLANI, A.; FANDANGO, A.; IDRIS, I. **Python Data Analysis: Perform data collection, data processing, wrangling, visualization, and model building using Python**. Packt Publishing, 2021. ISBN 9781789953459. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DN4SEAAAQBAJ>>.

NAVLANI, A.; IDRIS, I. **Python Data Analysis: Perform Data Collection, Data Processing, Wrangling, Visualization, and Model Building Using Python**. Sciendo, 2021. 1–463 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.0000/9781789953459-001>>.

NELSON, L.; LIN, J.; DAVIDSON, M.; CHILDS, E.; BARTEL, J.; GORMAN, J.; BALL, D.; ANIMALS, E.; RUBY, E. **Green Hydrogen: Guidebook**. 2020. Cores do hidrogênio - pg.8. Disponível em: <<<https://www.ghcoalition.org/education>>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

NELSON, L.; LIN, J.; DAVIDSON, M.; CHILDS, E.; BRTELL, J.; GORMAN, J.; BALL, D.; ANIMAS, E.; RUBY, E. **Guidebook, Green Hydrogen Coalition**. 2020.

NEWBOROUGH, M.; COOLEY, G. Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. **Fuel Cells Bulletin**, MA Business London, v. 2020, n. 11, p. 16–22, 2020. Cores do hidrogênio.

NOUSSAN, M.; RAIMONDI, P. P.; SCITA, R.; HAFNER, M. The role of green and blue hydrogen in the energy transition—a technological and geopolitical perspective. **Sustainability**, v. 13, n. 1, 2021. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/1/298>>.

Nur Ozdemir, S.; TAYMAZ, I.; OKUMUŞ, E.; Gül Boyacı San, F.; AKGÜN, F. Experimental investigation on performance evaluation of pem electrolysis cell by using a taguchi method. **Fuel**, v. 344, p. 128021, 2023. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123006348>>.

O Povo. **Usina de Hidrogênio Verde no Pecém Abre Caminho para Fornecedores**. 2023. Accessed: 2024-08-28. Disponível em: <<https://mais.opovo.com.br/jornal/economia/2023/01/24/usina-de-hidrogenio-verde-no-pecem-abre-caminho-para-fornecedores.html>>.

PAVEL, C.; CECCONI, F.; EMILIANI, C.; SANTICCIOLI, S.; SCAFFIDI, A.; CATANORCHI, S.; COMOTTI, M. Highly efficient platinum group metal free based membrane-electrode assembly for anion exchange membrane water electrolysis. **Angewandte Chemie (International ed. in English)**, v. 126, 01 2014.

PI, Y.; ZHANG, N.; GUO, S.; GUO, J.; HUANG, X. Ultrathin laminar ir superstructure as highly efficient oxygen evolution electrocatalyst in broad ph range. **Nano Letters**, v. 16, 06 2016.

PIANA, M.; BOCCIA, M.; FILPI, A.; FLAMMIA, E.; MILLER, H. A.; ORSINI, M.; SALUSTI, F.; SANTICCIOLI, S.; CIARDELLI, F.; PUCCI, A. H₂/air alkaline membrane fuel cell performance and durability, using novel ionomer and non-platinum group metal cathode catalyst. **Journal of Power Sources**, v. 195, n. 18, p. 5875–5881, 2010. ISSN 0378-7753. Selected Papers Presented at 4th International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309023477>>.

PNUMA. **Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente**. 1972. Estocolmo, Suécia.

POURBAIX, M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. National Association of Corrosion Engineers, 1974. ISBN 9780915567980. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=QjxRAAAAMAAJ>>.

QUINTELA, S. **Setor de hidrogênio verde no Ceará tem apoio garantido de Elmano: “Conte com o que precisar”**. 2023. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/opiniao/colunistas/samuel-quintela/setor-de-hidrogenio-verde-no-ceara-tem-apoio-garantido-de-elmano-conte-com-o-que-prec>>.

RAMACHANDRAN, R.; MENON, R. K. An overview of industrial uses of hydrogen. **International journal of hydrogen energy**, Elsevier, v. 23, n. 7, p. 593–598, 1998.

RASHID, M.; MESFER, M. K. A.; NASEEM, H.; DANISH, M. Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, pem water electrolysis and high temperature water electrolysis. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, 2015.

RMI. **Harnessing Green Hydrogen - Opportunities for deep descarbonisatoin in India**. 2022. Cores do hidrogênio - pg.18. Disponível em: <<>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

ROSSMEISL, J.; QU, Z.-W.; ZHU, H.; KROES, G.-J.; NØRSKOV, J. Electrolysis of water on oxide surfaces. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 607, n. 1, p. 83–89, 2007. ISSN 1572-6657. Theoretical and Computational Electrochemistry. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022072806006371>>.

SALEHMIN, M. N. I.; HUSAINI, T.; GOH, J.; SULONG, A. B. High-pressure pem water electrolyser: A review on challenges and mitigation strategies towards green and low-cost hydrogen production. **Energy Conversion and Management**, v. 268, p. 115985, 2022. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422007786>>.

SANTOS, D.; SEQUEIRA, C.; FIGUEIREDO, J. Hydrogen production by alkaline water electrolysis. **Química Nova**, v. 36, p. 1176–1193, 12 2012.

SARROUKH, M.; LAHLOU, K.; FARAH, M.; KEBIR, M. Effect of global warming and new equivalent temperature zoning maps for asphalt pavement design in morocco. **Energy and Buildings**, v. 303, p. 113820, 2024. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778823010502>>.

SCHEFER, R.; KULATILAKA, W.; PATTERSON, B.; SETTERSTEN, T. Visible emission of hydrogen flames. **Combustion and Flame**, v. 156, n. 6, p. 1234–1241, 2009. ISSN 0010-2180. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218009000170>>.

SCHENUIT, F. Staging science: Dramaturgical politics of the ipcc's special report on 1.5 °c. **Environmental Science Policy**, v. 139, p. 166–176, 2023. ISSN 1462-9011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901122003252>>.

SCHMIDT, O.; GAMBHIR, A.; STAFFELL, I.; HAWKES, A.; NELSON, J.; FEW, S. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, p. 30470–30492, 12 2017.

ScienceDaily. **Activity deep in Earth affects the global magnetic field**. 2023. Acesso em: 10 jun. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedaily.com/releases/2023/03/230316124442.htm>>.

Secretaria da Infraestrutura do Ceará. **Primeira molécula de hidrogênio verde produzida no Brasil é lançada no Ceará**. 2023. Acesso em: [data de acesso]. Disponível em: <<https://www.seinfra.ce.gov.br/2023/01/19/primeira-molecula-de-hidrogenio-verde-produzida-no-brasil-e-lancada-no-ceara>>.

SELAMET, ; BECERIKLI, F.; MAT, M.; KAPLAN, Y. Development and testing of a highly efficient proton exchange membrane (pem) electrolyzer stack. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, p. 11480–11487, 08 2011.

Shiva Kumar, S.; HIMABINDU, V. Hydrogen production by pem water electrolysis – a review. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 3, p. 442–454, 2019. ISSN 2589-2991. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>>.

SIEMENS. **Aplicações do Hidrogênio Verde**. 2021. Citado por Outro Autor no artigo (??).

SQUADRITO, G.; MAGGIO, G.; NICITA, A. The green hydrogen revolution. **Renewable Energy**, v. 216, p. 119041, 2023. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148123009552>>.

SUTHERLAND, R. D. **Performance of different proton exchange membrane water electrolyser components**. Tese (Doutorado) — North-West University, 2012.

TABANJAT, A.; BECHERIF, M.; EMZIANE, M.; HISSEL, D.; RAMADAN, H.; MAHMAH, B. Fuzzy logic-based water heating control methodology for the efficiency enhancement of hybrid pv–pem electrolyser systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 5, p. 2149–2161, 2015. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914032698>>.

THYMOS. **Hidrogênio Verde - A nova fronteira dos mercados de energia**. 2023. Cores do hidrogênio - pg.5. Disponível em: <<>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

TOBIN, P.; SCHMIDT, N. M.; TOSUN, J.; BURNS, C. Mapping states' paris climate pledges: Analysing targets and groups at cop 21. **Global Environmental Change**, v. 48, p. 1–2, 2018. ISSN 0959-3780. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378017304259>>.

URSUA, A.; GANDIA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410–426, 2012.

URSUA, A.; MARROYO, L.; GUBÍA, E.; GANDÍA, L. M.; DIÉGUEZ, P. M.; SANCHIS, P. Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 8, p. 3221–3233, 2009. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990900216X>>.

UTGIKAR, V.; THIESEN, T. Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 7, p. 939–944, 2006. ISSN 0360-3199. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905002570>>.

VARCOE, J. R.; ATANASSOV, P.; DEKEL, D. R.; HERRING, A. M.; HICKNER, M. A.; KOHL, P. A.; KUCERNAK, A. R.; MUSTAIN, W. E.; NIJMEIJER, K.; SCOTT, K. *et al.* Anion-exchange membranes in electrochemical energy systems. **Energy & environmental science**, Royal Society of Chemistry, v. 7, n. 10, p. 3135–3191, 2014.

VINCENT, I.; BESSARABOV, D. Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1690–1704, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117309127>>.

WENDT, H.; HOFMANN, H. Ceramic diaphragms for advanced alkaline water electrolysis. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 19, n. 4, p. 605 – 610, 1989. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0024701947&doi=10.1007%2fBF01022121&partnerID=40&md5=1e9a5ccd2f672ce29f1aab022bef0dc>>.

WITTEN, I.; FRANK, E.; HALL, M. **Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques**. Morgan Kaufmann, 2011. (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems). ISBN 9780080890364. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=bDtLM8CODsQC>>.

XIAO, H.; DUAN, Q.; SUN, J. Premixed flame propagation in hydrogen explosions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1988–2001, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117309449>>.

XU, Q.; ZHANG, L.; ZHANG, J.; WANG, J.; HU, Y.; JIANG, H.; LI, C. Anion exchange membrane water electrolyzer: Electrode design, lab-scaled testing system and performance evaluation. **EnergyChem**, v. 4, p. 100087, 08 2022.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307–326, 2010. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000598>>.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307–326, 2010. ISSN 0360-1285. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000598>>.

ZHANG, H.; SU, S.; LIN, G.; CHEN, J. Efficiency calculation and configuration design of a pem electrolyzer system for hydrogen production. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 7, n. 5, p. 4143–4157, 2012. ISSN 1452-3981. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123195277>>.

ZHANG, Y.-h.; JIA, Z.-c.; YUAN, Z.-m.; YANG, T.; QI, Y.; ZHAO, D.-l. Development and application of hydrogen storage. **Journal of Iron and Steel Research International**, Springer, v. 22, n. 9, p. 757–770, 2015.