

AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA DE MASSA E ENERGIA DE UMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE POR ELETRÓLISE ALCALINA DA ÁGUA

SILVA, Marcelo Álvaro de Castro da.
madcd.silva.2016@aluno.unila.edu.br;

GARCIA-ACEVEDO, Luis Evelio
luis.acevedo@unila.edu.br

Universidade Federal da Integração Latino-americana.

Resumo.

A molécula de hidrogênio (H₂) é um vetor energético que pode ser utilizado para armazenar energia química de fonte renovável conhecido como hidrogênio verde, ou mesmo como fonte de energia fóssil quando encontrado em jazida natural. Em qualquer um dos casos pode ser transformado através de processos termoquímico como combustão ou em processos eletroquímicos como os presentes nas células a combustível. Apesar do seu potencial na cadeia produtiva das fontes renováveis, desafios persistem na produção, armazenamento, distribuição em larga escala e uso. Investir na eficiência da produção de hidrogênio verde é crucial, pois contribui com a redução das emissões de carbono, diversificação da matriz energética, impulsionar a inovação tecnológica e trazer consequências favoráveis na meta do aquecimento global. O desenvolvimento deste trabalho tem como objetivo calcular fatores que influenciam a eficiência de produtividade de hidrogênio por eletrólise alcalina da água em uma na Planta de Produção de Hidrogênio Verde, localizada no Parque Tecnológico de Itaipu, e fazer uma análise paramétrica entre dois modelos de determinação da eficiência termodinâmica de produção do hidrogênio. Dados elétricos são medidos para determinar as potências, o consumo de energia e a eficiência. A tomada dos dados elétricos e de fluxo de hidrogênio são feitas de forma quase contínua, com intervalos entre 10 e 20 segundos, o que facilita a abordagem cálculo matemático e traz uma maior exatidão dos parâmetros de energia e volume. Os dados medidos são usados para validar e corrigir os valores calculados termodinamicamente e, em conjunto, utilizados para avaliar a nova eficiência do processo. Os resultados obtidos desse trabalho foram de uma eficiência termodinâmica mais alta do que vinha sendo calculada (mais de 7,78 %) e uma produtividade de 82,09% comparada ao nível nominal. Este resultado confirma que novos estudos são possíveis para averiguar um rendimento mais preciso do processo como um todo, e que a instalação de novos dispositivos de leitura de dados se mostra de extrema importância, criando cenários futuros de análises e ciências para a Planta de Produção de Hidrogênio Verde.

Palavras-Chave: Análise energética; análise mássica; eficiência energética.

Abstract.

The hydrogen molecule (H₂) is an energy vector that can be used to store chemical energy from renewable sources, known as green hydrogen, or even as a fossil energy source when found in natural deposits. In either case, it can be converted through thermochemical processes like combustion or electrochemical processes such as those present in fuel cells. Despite its potential in the renewable energy production chain, challenges persist in large-scale production, storage, distribution, and usage. Investing in the efficiency of green hydrogen production is crucial, as it contributes to reducing carbon emissions, diversifying the energy matrix, driving technological innovation, and positively impacting global warming goals. The aim of this study is to calculate factors that influence the efficiency of hydrogen production by alkaline water electrolysis at the Green Hydrogen Production Plant, located in the Itaipu Technological Park, and to conduct a parametric analysis between two models for determining the thermodynamic efficiency of hydrogen production. Electrical data is measured to determine power, energy consumption, and efficiency. The collection of electrical and hydrogen flow data is done almost continuously, at intervals between 10 and 20 seconds, which facilitates the mathematical calculation approach and provides greater accuracy in energy and volume parameters. The measured data is used to validate and correct thermodynamically calculated values and, together, to evaluate the new process efficiency. The results obtained from this work showed a higher thermodynamic efficiency than previously calculated (more than 7.78%) and a productivity of 82.09% compared to the nominal level. This result confirms that further studies are possible to ascertain a more precise yield of the overall process and that the installation of new data reading devices is of utmost importance, creating future scenarios for analysis and science for the Green Hydrogen Production Plant.

Keywords. Energy analysis; mass energy; energy efficiency.

1 INTRODUÇÃO

O consumo global de energia cresce de forma exponencial em nível global como consequência do crescimento populacional e o acesso a bens e serviços de setores antes preteridos, especialmente em países emergentes. Embora as energias renováveis venham crescendo em um ritmo acelerado, a energia utilizada hoje provém em grande parte de combustíveis fósseis que, junto com outras variáveis, como o desmatamento, fazem parte das principais causas das mudanças climáticas (UN, 2024). Outro fator relevante nesta questão é a proximidade de atingir o pico de produção dos combustíveis fósseis e, portanto, o uso de combustíveis fósseis mais contaminantes (IEA, 2023).

Para lidar com essa situação crítica, estratégias de diversificação das matrizes energéticas vêm sendo propostas, nas quais as energias renováveis, como solar, eólica, geotérmica e oceânica passam a ter um papel fundamental (EPE, 2024). No entanto, essas fontes de energia enfrentam desafios técnicos, como flutuações na produção de energia, armazenamento e transporte para seu uso final, o que limita sua eficácia em larga escala. Uma solução crucial é desenvolver métodos eficientes para armazenar o excesso de energia produzida por essas fontes para seu uso no futuro, quando a demanda exceder a produção (Ana L. Santos, 2021).

Diante desse cenário, um número crescente de pesquisas, como as feitas por Salari e Salim, vem focando no estudo da substituição de fontes não renováveis por renováveis, visando a transição para um mix energético, com diferentes fontes de energia, descentralizando e diminuindo a dependências das fontes fósseis ou poluentes.

Com o foco na transição energética para um cenário menos poluidor, esforços globais vêm surgindo para combater as mudanças climáticas. As estratégias abrangem diversas áreas, desde procedimentos menos predatórios no uso do solo e outros recursos, passando pela otimização de processos para uso cada vez mais eficiente da energia, até mudanças do modo de vida da sociedade contemporânea. O Acordo de Paris, resultado da 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima (UNFCCC), teve como principal objetivo buscar a redução das emissões de gases de efeito estufa a fim de atingir a meta de "manter o aumento da temperatura média global bem abaixo dos 2 °C acima dos níveis pré-industriais e prosseguir esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais" (UNFCCC., 2024). Apesar das dificuldades enfrentadas nesses objetivos a agência internacional de energia IEA entende que o setor energético tem condições para melhorar a segurança energética, abordar as emissões e considera realizável atingir a meta de limitar o aumento de temperatura global em 1,5°C (IEA, 2024).

O Brasil tem uma composição invejável no que diz respeito a participação renovável na matriz energética, com 47,4%, e ainda melhor da matriz elétrica onde a participação sobe para 87,9% segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) 2023 (EPE, 2023). Apesar desta condição, o Brasil pretendeu comprometer-se a reduzir as emissões de gás efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, através da sua pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (MMA, 2024).

A economia do hidrogênio, como vetor energético no suporte das fontes renováveis vem sendo reconhecida como uma solução para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Embora a produção atual de hidrogênio seja dominada por métodos baseados em combustíveis fósseis, a produção por meio da eletrólise da água, que utiliza a energia elétrica de fonte renovável, está sendo fortemente promovida. Isso enfrenta desafios de custo e tecnologia, mas é visto como essencial para alcançar a sustentabilidade energética. Iniciativas políticas, como a Clean Hydrogen Alliance da União Europeia (BELOV, 2020), e legislações em diversos países, incluindo o Brasil, buscam impulsionar a produção em larga escala de hidrogênio limpo (J.O. Abe, 2019).

Essa transformação de energia em hidrogênio (PtH, do inglês, "Power-to-Hydrogen") se vislumbra como um processo basilar nos sistemas futuros de energia renovável para equilibrar a rede e ligar diferentes setores (Manuel Gotz, 2016; Sebastia Schiebahn, 2015), a qual pode funcionar como uma forma de armazenamento de energia, que ajuda a utilizar melhor as energias renováveis e que evita problemas quando há excesso ou falta de energia em diferentes momentos. Além disso, o PtH tem potencial para unir sistemas de eletricidade e gás em futuras redes de energia (Kewei Hu, 2022).

A produção de hidrogênio (H₂) pode ocorrer através de vários processos, cada uma com seus próprios métodos, como reforma a vapor de hidrocarbonetos, que envolve a reação de um hidrocarboneto com vapor de água em altas temperaturas (aproximadamente 900°C) e pressão de 1 a 20 atm (SCHULTZ; SOARES, 2014); gaseificação de biomassa, que envolve a conversão de materiais orgânicos em um gás de síntese rico em hidrogênio; eletrólise da água, onde a água é decomposta em seus componentes, hidrogênio e oxigênio, por meio da passagem de uma corrente elétrica através do sistema; fotólise da água, que é um processo semelhante à eletrólise, mas utiliza-se da energia solar de maneira direta, sem a conversão prévia de energia solar em energia elétrica; fermentação biológica, onde microrganismos podem produzir hidrogênio como subproduto do seu metabolismo anaeróbico (SANTOS, 2023).

Existem diversas formas de armazenar hidrogênio, dentre as quais se destacam: compressão, liquefação, hidretos metálicos, hidretos complexos/químicos e adsorção física, todos têm seus prós e contras, associados principalmente ao fato do pequeno tamanho da molécula e a baixa densidade do hidrogênio (ANDERSSON; GRÖNKVIST, 2019). O armazenamento em compressão exige um alto capital investido na obtenção de cilindros, tanques ou depósitos subterrâneos de forma segura, assim como perdas de energia para o próprio processo de compressão. Para a liquefação, embora a densidade energética do hidrogênio seja mais alta nesse estado, o processo precisa levar e manter o hidrogênio em temperaturas criogênicas, (abaixo de -253°C). Os hidretos metálicos auxiliam no armazenamento do hidrogênio devido a que suas ligações químicas são mais fortes e eliminam a necessidade sistemas pressurizado ou criogênicos, mas

apresentam séria dificuldade para aplicações móveis devido ao seu peso. Já para os hidretos complexos/químicos, sua diferença está no fato que esses materiais, em estado normal, se encontram em estado líquido, mesmo associados ao hidrogênio, que facilita o transporte e o armazenamento. Por fim, o armazenamento em adsorção envolve a ligação entre o hidrogênio na forma molecular e outro material (geralmente nitrogênio líquido), e esta forma ainda não possui versão comercial (LACERDA, 2021). No momento, armazenar o hidrogênio em forma gasosa ou líquida é o mais utilizado em grande escala. A melhor opção técnica para transportar hidrogênio em dutos é construir uma infraestrutura nova e dedicada exclusivamente ao hidrogênio puro (TAVARES, 2021).

No que diz respeito a produção de hidrogênio por eletrólise, o eletrolisador, equipamento chave do funcionamento do processo de produção de hidrogênio, é muito importante no estudo da otimização da produção dessa energia. Atualmente, existem quatro tipos de tecnologias de eletrólises: alcalina (AEL - Alkaline Electrolysis), de membrana de troca de prótons (PEM - Proton Exchange Membrane Electrolysis), de óxido sólido (SOE - Solid Oxide Electrolysis), e Membrana de Troca Aniônica (AEM - Anion Exchange Membrane Electrolysis), cada uma com suas especificações e nicho de aplicação que dependem de parâmetros como eficiência, custo, tamanho, e capacidade de resposta a mudanças na quantidade de energia. Dois estudos, um feito por Alexander Buttler (Alexander Buttler, 2017) e outro por Alfredo Ursúa (Ursúa, 2012), examinam eletrolisadores e como eles são usados com fontes de energia renovável, além de identificar a eletrólise alcalina como uma tecnologia estabelecida e madura, enquanto a de membrana de troca de prótons está em ascensão, especialmente para armazenamento flexível de energia, oferecendo também uma vantagem no setor de design compacto e maior flexibilidade operacional. Ambas as tecnologias têm rápida resposta na estabilização da rede elétrica. No entanto, a integração desses sistemas em diversos processos industriais está sendo explorada, com uma expectativa de redução de custos no futuro devido ao aumento da produção e avanços tecnológicos.

Os eletrolisadores alcalinos estão se tornando cada vez mais importantes para a transição energética e continuam a ser uma opção viável e promissora para a produção de hidrogênio verde em larga escala. A eletrólise alcalina da água desempenha um papel fundamental na produção de hidrogênio verde. Sua maturidade tecnológica, com uma eficiência entre 50 e 70%, a tornam uma escolha confiável e eficiente para a geração de hidrogênio. (ZENG; ZHANG, 2010).

Eficiências de dispositivos eletroquímicos, em especial dos eletrolisadores, pode ser medida através de alguns cálculos de eficiência. A eficiência faradaica (η_F) refere-se à fração da corrente elétrica operacional (I_{oper}) pela corrente teórica esperada com base na quantidade de reagentes consumidos ($I_{teórica}$), apresentada pela Equação 1 (LINARDI, 2010).

$$\eta_F = \frac{I_{oper}}{I_{teórica}}$$

Equação 1

Já a eficiência eletroquímica (η_{eq}) é uma medida de eficiência real do processo de eletrólise, levando em consideração as perdas eletroquímicas que ocorrem durante a reação, como perdas de polarização ôhmica (perda de energia devido à resistência elétrica do eletrólito e dos eletrodos) e polarização de concentração. A eficiência eletroquímica é expressa como a relação entre a energia química do hidrogênio produzido e a energia elétrica fornecida, levando em conta essas perdas. Essa eficiência pode ser contemplada pela Equação 2 (ZENG; ZHANG, 2010).

$$\eta_{eq} = \frac{\Delta G}{\Delta G + Perdas} = \frac{\Delta G}{-nFE_{op}} = \frac{E_{\Delta G}}{E_{cell}}$$

Equação 2

Para a eficiência termodinâmica (η_t), ela é determinada pela relação da energia química do hidrogênio produzido (E_{H_2}) e a energia elétrica total fornecida ($E_{el,total}$), encontrada na Equação 3 (SANTOS; CEBOLA; SANTOS, 2021).

$$\eta_t = \frac{E_{H_2}}{E_{el,total}} = \frac{E_{H_2}}{E_T}$$

Equação 3

Por fim, a eficiência do sistema (η_s) inclui perdas e ganhos com a necessidade de energia para todos os dispositivos e equipamentos do processo, como bombas, trocadores de calor, dispositivos elétricos, rede elétrica, pressurizador, resfriador etc., levando-se em conta o sistema como um todo. Essa eficiência depende dos sistemas específicos e só pode ser obtida experimentalmente (LINARDI, 2010). Para a abordagem deste trabalho se calculará a eficiência termodinâmica, encontrada na Equação 3. Para demonstração da viabilidade da análise paramétrica, são necessários métodos estatísticos que validem, ou não, a comparação de grupos de dados, e para isso, são feitos os testes de hipóteses. O Teste de Hipótese (TH) é uma ferramenta essencial na estatística, utilizada para tomar decisões com base em informações amostrais ou diferença entre duas populações. Ele ajuda a determinar se um valor hipotético representa adequadamente uma situação específica, permitindo ao indivíduo escolher entre diferentes opções de maneira informada.

Também conhecido como teste estatístico ou teste de significância, sua finalidade é avaliar se um valor teórico é apropriado para uma determinada circunstância (Rodrigues, 2020), permitindo verificar se os dados amostrais fornecem evidências que apoiem ou refutem uma hipótese estatística formulada.

Depois de estabelecermos as hipóteses, o objetivo é testá-las para decidir entre a hipótese nula ou alternativa. Para isso, precisa-se de evidências, ou seja, de informações. Essas evidências são obtidas por meio de uma amostra. Quanto mais informações houver (ou seja, quanto maior a amostra), mais fácil será tomar uma decisão (UFSC, 2024).

Ao realizar um teste de hipótese envolvendo duas populações distintas, é crucial considerar a natureza das amostras que estão sendo comparadas. Existem duas situações principais a serem analisadas: amostras independentes e amostras dependentes, também conhecidas como emparelhadas. No caso de amostras independentes, os valores amostrados de uma população não têm qualquer relação ou emparelhamento com os valores da outra população. Por outro lado, amostras dependentes ou emparelhadas ocorrem quando cada elemento de uma amostra corresponde diretamente ao mesmo elemento na outra amostra. Pode-se ampliar o teste de hipóteses quando deseja-se comparar o mesmo parâmetro em duas populações distintas. Normalmente, realizamos testes para determinar se a diferença entre esses dois parâmetros é igual a zero (RIBEIRO JUNIOR, 2024). Em outras palavras, o teste investigará se não há diferença significativa entre os parâmetros das duas populações. Os tipos de hipóteses são:

Hipótese Bilateral: $H_0: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ ou $H_0: \mu_1 \neq \mu_2$

Hipótese Unilateral à Direita: $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$ ou $H_1: \mu_1 > \mu_2$

Hipótese Unilateral à Esquerda: $H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$ ou $H_1: \mu_1 < \mu_2$

Dentro dos tipos de TH, os testes t são usados para comparar médias, seja entre uma amostra e um valor hipotético, entre duas amostras diferentes ou em casos de grupos emparelhados. Eles são chamados de "t" devido aos valores-t, que são estatísticas de teste calculadas a partir dos dados amostrais durante um teste de hipótese. Esses valores-t comparam as médias amostrais com a hipótese nula, considerando o tamanho da amostra e a variabilidade nos dados. No teste t, busca-se evidências de uma diferença significativa entre as médias populacionais (teste t para 2 amostras) ou entre a média populacional e um valor hipotético (teste t para 1 amostra). O valor-t mede essa diferença em relação à variação nos dados amostrais, representando a diferença calculada em unidades de erro padrão. Quanto maior a magnitude de T, maior a evidência contra a hipótese nula, indicando uma diferença significativa. Por outro lado, quanto mais próximo T estiver de 0, maior a probabilidade de que não haja uma diferença significativa (BLOG MINITAB, 2019). O valor-t é determinado através da Equação 4.

$$\text{valor - t} = \frac{\mu_A - \mu_B}{\sqrt{\frac{(DP_A)^2}{n_A} + \frac{(DP_B)^2}{n_B}}}$$

Equação 4

Onde μ_A é média da população A e μ_B é a média da população B.

As distribuições t são representações baseadas nos graus de liberdade, relacionados ao tamanho da amostra. Quanto mais graus de liberdade, mais concentrada é a distribuição em torno do valor central. Elas assumem que as amostras são retiradas aleatoriamente de uma população onde a hipótese nula é verdadeira. A probabilidade associada ao valor-t nos permite avaliar se o efeito observado na amostra é consistente com a hipótese nula. Se essa probabilidade for baixa o suficiente, podemos rejeitar a hipótese nula para toda a população. Distribuições t com menos graus de liberdade têm caudas mais grossas para refletir a incerteza adicional associada à análise de amostras pequenas. Isso significa que, em amostras pequenas, é mais provável que a estatística da amostra se afaste da hipótese nula, mesmo que ela seja verdadeira (BLOG MINITAB, 2019). O grau de liberdade (GL) é determinado pela Equação 5.

$$GL = N^{\circ}_{amostra,1} - N^{\circ}_{amostra,2}$$

Equação 5

Onde $N^{\circ}_{amostra,1}$ é a quantidade de dados da população A, e $N^{\circ}_{amostra,2}$ é a quantidade da população B.

Complementando, o valor de p, ou valor-p, é uma medida estatística que indica a probabilidade de que a diferença observada entre os grupos seja devida ao acaso. Um valor de p pequeno ($p \leq 0,05$) sugere uma baixa probabilidade de que essa diferença seja meramente aleatória, o que leva à conclusão de uma diferença significativa entre os grupos. Por outro lado, um valor de p grande ($p > 0,05$) indica uma alta probabilidade de que a diferença entre os grupos seja devido ao acaso, levando à conclusão de que não há diferença significativa entre eles. Em resumo, o valor de p é uma ferramenta importante na interpretação dos resultados de um teste estatístico, ajudando a determinar se uma diferença observada é estatisticamente significativa ou não. O valor-p é determinado pela integral da curva de distribuição tomadas pelos dados, determinado pela Equação 6.

$$\text{valor} - p = \int \text{Curva de Distribuição}$$

Equação 6

A planta de produção de hidrogênio verde do parque tecnológico Itaipu (PTI) possui uma Planta de Produção de Hidrogênio Verde (PPHV) instalada desde 2014, cuja construção tem por objetivo estudos, validações de tecnologias e equipamentos, inovações e desenvolvimento (BINACIONAL & S.A.), voltado para a área de hidrogênio verde, e fontes de energias sustentável, como da usina hidrelétrica de Itaipu ou sistema fotovoltaico. Essa planta piloto possui uma capacidade de fluxo volumétrico teórica de produção de 10 Nm³/h, com um armazenamento máximo de 800 Nm³, que consome também um valor próximo de 10 L/h de água destilada durante a operação e um consumo de energia de 4,7 kWh/m³, e que utiliza uma concentração de eletrólito entre 25 e 30% em massa de base forte (FPTI, 2014).

A planta tem 4 unidades de operação, sendo elas: produção, purificação, compressão e armazenamento. A unidade de produção é onde acontece a produção de hidrogênio através dos eletrolisadores e equipamentos complementares a este. Já a purificação é o setor onde o hidrogênio passa pela limpeza, retirando suas impurezas, como eletrólito, água e oxigênio. A etapa de compressão ocorre quando o hidrogênio já seco é pressurizado para os buffers, sendo um interno e um externo, onde acontece a leitura do fluxômetro entre eles. Esta etapa de transferir o hidrogênio do buffer interno para o externo se inicia quando a pressão do sistema chega a 17 bar (por ser uma válvula unidirecional, quando chega a esta pressão, por efeito de diferença de pressão, o hidrogênio começa a fluir para o buffer externo). Por fim, a etapa de armazenamento é onde o hidrogênio é armazenado em cilindros até chegar a 200 bar em cestas de 12 cilindros. Há também a unidade de refrigeração, porém, essa etapa engloba quase todas as outras devido ao fato que há equipamentos a serem refrigerados em cada uma delas.

Para este trabalho se destaca o subsistema de produção. Na Figura 1, é apresentada esquematicamente as linhas que alimentam os eletrolisadores A e B com a solução de eletrólito de hidróxido de potássio (KOH), e nas saídas desses equipamentos há as saídas de oxigênio e hidrogênio separadamente para os separadores horizontais de hidrogênio (HV) e de oxigênio (OV).

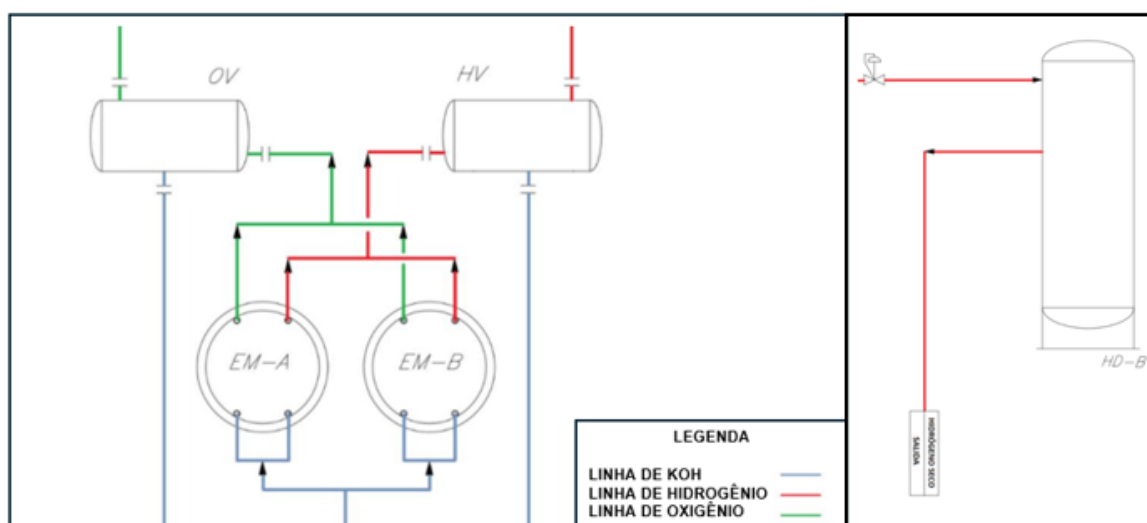


Figura 1: Diagrama esquemático de entrada e saída dos fluidos no eletrolisador
Fonte: QUISPE, 2016. Adaptado.

A planta opera por batelada fazendo operação em determinada potência que repete ciclos de enchimento e esvaziamento do buffer à medida que o gás é produzido pelo eletrolisador e comprimido, e conduzido para os tanques. A operação da planta pode ser setada conforme necessidade ou objetivo de operação existindo para isto a determinação do set point. O set point é por tanto um parâmetro de entrada que define a porcentagem de operação a qual a planta realizará a produção de hidrogênio quando comparada com sua operação em máxima capacidade. O eletrolisador utilizado pela PPHV é do tipo bipolar alcalino, que fornece uma pureza de hidrogênio de aproximadamente 99,95 % (QUISPE, 2016). Através da Tabela 1, é observado informações da ficha técnica do eletrolisador com água desmineralizada (FPTI, 2014).

Tabela 1: Ficha técnica do eletrolisador com água desmineralizada

Condições de operação da bancada de teste	Valores	Unidades
Consumo de água desmineralizada 10 Nm ³ /h	10	l/h
Consumo de água desmineralizada para cada Nm ³ /h	≈ 1	l/h cada Nm ³ /h
Tipo de carregamento	Injeção direta unidade de água pura deionizada	
Capacidade de armazenamento dentro do tanque de água	20	l
Pressão de operação do tanque	1	bar
Temperatura de entrada	35	°C
Temperatura de Saída	80	°C
Pressão de Entrada	21,1	bar
Pressão de saída	20,0	bar

Fonte: FPTI, 2024; QUISPE, 2016.

Sendo assim, este trabalho está limitado ao subsistema de produção e destaca-se no tratamento de dados de medidas recentes e análise de históricos da planta para determinar fatores de correção e adequação. A partir dos dados aferidos, se avalia a eficiência do processo, buscando potenciais melhorias da eficiência, gerando parâmetros de comparação e correção de séries históricas, e analisando o comportamento energético e de massa durante o processo.

O objetivo deste trabalho é analisar parametricamente os efeitos dos parâmetros de energia e massa durante o processo de produção de hidrogênio, por meio da eletrólise alcalina da água. O objetivo é mostrar as diferenças nas eficiências dos métodos de cálculo utilizado, o primeiro realizado pela Equação de Estado de Van der Waals, considerando a diferença de pressão e temperatura no armazenamento de hidrogênio, e o segundo pela coleta contínua de dados de fluxo de massa medidos pelo sensor fluxômetro.

2 METODOLOGIA

Os parâmetros de operação de produção de hidrogênio pertinentes ao estudo e os parâmetros a serem calculados, são apresentados na Tabela 2 .

Tabela 2: Parâmetros operacionais da PPHV e parâmetros calculados

Parâmetros operados	Unidade	Parâmetros calculados	Unidade
Correntes A e B	A	Fator de proporcionalidade / ajuste	-
Tensões A e B	V	Potências A e B	W
PowerSetde operação	-	Energia A, B e Total	J
Pressão	Pa	Produtividade	-
Temperaturas A e B	°C	Massa e volume de hidrogênio	Nm ³
Fluxo volumétrico	Nm ³ /hora	Quantidade de água mínima necessária	M3
		Eficiências	-

Fonte: Autoria própria, 2024.

A metodologia utilizada neste trabalho toma como base os dados de medição de parâmetros de controle da planta, em especial o fluxo de massa e consumo de energia, e a partir desses dados realiza o cálculo de parâmetros convencionais de operação, faz-se um comparativo que permite validar ou corrigir os procedimentos de cálculos. O tratamento de dados permite avaliar estatisticamente os parâmetros e obter fatores de correção reais para o procedimento convencional o qual é aplicável em forma retroativa para a série histórica.

Para a análise, foram tomados períodos de operação em batelada, com duração de aproximadamente 1 hora, e com PowerSet de operação de 70%. A tomada dos dados de energia é feita através do *ScadaBR*, um software de desenvolvimento de aplicações nas áreas de automação, aquisição de dados e controle supervisão, que monitora dispositivos, realiza o controle de parâmetros desses equipamentos e permite visualizar em forma organizada onde os sensores fazem a leitura dos dados (ScadaBR, 2024), e os dados são armazenados no banco de dados MySQL Workbench. A leitura dos dados de vazão volumétrica de hidrogênio se faz por meio de fluxômetro, instalado na entrada do buffer, e esses dados são tomados pelo software ScadaBR, que tratam os dados e os armazenam no banco de dados MySQL Workbench.

2.1 ARQUITETURA DOS DADOS

Para fazer a leitura dos dados nesse banco, filtra-se os parâmetros desejados através da programação em SQL (do inglês “Structured Query Language”, que significa linguagem de consulta estruturada), e os arquivos são exportados em formato CSV, depois convertidos em tabelas de cálculo. O Ambiente de Desenvolvimento Integrado de programação escolhido foi o Jupyter, que é um ambiente de desenvolvimento que proporciona uma interface gráfica para escrever, testar e codificar a linguagem de programação *Python*, no local *Colaboratory* (comumente conhecido como COLAB), que proporciona uma interface gráfica para ler e entender o código-fonte da linguagem. Trabalha-se neste local de codificação porque está em ambiente de nuvens online. Também, para fazer análises e cálculos de forma tabelada e visual, utiliza-se a ferramenta da Microsoft Excel. Para finalizar, outra ferramenta para auxiliar na visualização dos dados e informações é a Microsoft PowerBI, que permite a tomada de alguns dados de forma rápida, fácil e visual, além de acompanhar o comportamento dos dados em função do tempo, permitindo breves análises sobre os dados da planta.

2.2 MASSA CALCULADA PELA EQUAÇÃO DE ESTADO DE VAN DER WAALS

O procedimento padrão utilizado na planta para o cálculo da produção de hidrogênio utiliza a equação de estado de Van der Waals. Para iniciar as análises, começou-se validando os dados da quantidade de hidrogênio produzido, calculado a partir da pressão e temperatura do hidrogênio no buffer de armazenamento. Esses valores foram comparados com a leitura do fluxômetro a partir da integração dos dados. A série temporal de leitura simultânea dos dados de fluxo de hidrogênio e da pressão e temperatura do buffer durou 9 dias.

Através de ensaios e testes experimentais, Van der Waals determinou uma relação para os gases baseada em parâmetros que aproximam os gases reais dos ideais, a partir do comportamento da substância em seu ponto crítico termodinâmico. O aperfeiçoamento em seu estudo foi considerar as forças de atração intermoleculares e o volume ocupado pelas moléculas, acrescentando as variáveis *a* e *b*. Apresentada pela Equação 7, a equação de Estado de Van der Waals (Mahan, 2019) torna-se:

$$\left(P + \frac{n^2a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT$$

Equação 7

Onde *a* e *b* são constantes positivas empíricas que variam conforme as características do gás em seu ponto crítico, *V* é o volume em [m³], *n* é a quantidade de gás em [mol], *R_u* a constante do gás igual a 8,31438 $\left[\frac{J}{mol \cdot K}\right]$, *P* é a pressão, conforme segue:

$$a = \frac{27 \times R_u^2 \times T_{cri}^2}{64 \times P_{cri}} \quad e \quad b = \frac{R_u \times T_{cri}}{8 \times P_{cri}}$$

A partir das propriedades no hidrogênio no ponto crítico, como observadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades do ponto crítico da molécula de hidrogênio

Substância	Fórmula	Massa Molar (M) [kg/kmol]	Constante do Gás (R) kJ/kg.K	Temperatura [K]	Pressão [bar]	Volume [m ³ /kmol]
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1240	33,3	13	0,0649

Fonte: Çengel & Boles, 2013.

Se tem, pela Equação 8, que:

$$R_u = R_{H_2} \times M = 4,1240 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \times 2,016 \left[\frac{kg}{kmol} \right] = 8,3144 \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right]$$

Equação 8

Então,

$$a = \frac{27 \times 8,31438^2 \times 33,3^2}{64 \times 13} = 0,024876 \left[\frac{Jm^3}{mol} \right]$$

$$b = \frac{8,31438 \times 33,3}{8 \times 13} = 2,662 \times 10^{-5} \left[\frac{m^3}{mol} \right]$$

A pressão e a temperatura são medidas pelos sensores do buffer, equipamento de armazenamento intermediário. Conhecendo os valores de a e b, determina-se a quantidade molar de hidrogênio armazenada no buffer no intervalo de tempo entre a pressão inicial e a pressão final. Assim, a quantidade de hidrogênio produzida e armazenada no buffer externo é determinada através da Equação de Estado de Van der Waals e posteriormente expressa em quilogramas ($m_{H_2,vdw}$).

2.3 MASSA DETERMINADA PELO FLUXÔMETRO

O fluxômetro, instalado na entrada do buffer na sessão final da etapa de produção, é da marca ALICAT SCIENTIFIC, modelo MS-Series: medidores de vazão mássicos anticorrosivos, e suas informações técnicas padrão são apresentadas na Tabela 4.

A ficha técnica do fluxômetro permite determinar o intervalo de operação de alguns parâmetros. O termo "RH" (do inglês "relative humidity") significa umidade relativa, uma medida da quantidade de vapor de água presente no ar em relação à quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter a uma determinada temperatura, e "0-100%" é a faixa que o dispositivo é capaz de medir, podendo medir desde o ar seco até o ar completamente saturado com vapor de água. O termo "sem condensação" indica que o dispositivo é projetado para operar em condições sem condensação de umidade (quando o vapor de água no ar se transforma em líquido ao entrar em contato com superfícies frias). Dispositivos de medição de umidade projetados para operar sem condensação são mais adequados para ambientes com variação de umidade, onde a condensação pode afetar a precisão das medições ou danificar o dispositivo. O termo "SCCM" significa centímetros cúbicos por minuto padrão e "SLPM" significa litros por minuto padrão, indicando que essas faixas de vazão cobrem desde fluxos extremamente baixos até fluxos muito altos de gás. O termo "barA" é a unidade de pressão absoluta, medida em bar. O "Tempo de Resposta" refere-se ao intervalo de tempo que o sensor leva para detectar uma mudança em sua entrada e produzir uma resposta correspondente. As "Faixas de Medição e Controle" indicam os limites dentro dos quais o dispositivo pode medir e controlar uma variável, de 0,01% a 100% da escala completa. Essas especificações indicam que o dispositivo pode medir e controlar uma ampla faixa de valores, desde uma fração muito pequena até o valor máximo da escala completa, com grande capacidade de ajuste.

A exatidão descreve a precisão de um dispositivo de medição. O termo " $\pm 0,6\%$ de leitura" significa que o erro máximo permitido é 0,6% do valor lido pelo dispositivo; " $\pm 0,1\%$ de escala completa" refere-se ao valor máximo que o dispositivo pode medir; e "o que for maior" significa que, entre esses valores, o maior será considerado para definir a exatidão do dispositivo em qualquer ponto de operação.

Com a instalação desse equipamento, foi possível determinar o volume de hidrogênio produzido no buffer externo em Nm³/h em um determinado período, como um ciclo de operação. A partir desses dados em um intervalo de tempo, é possível obter o volume gerado em cada operação e, conseqüentemente, pela densidade, determinar a quantidade de massa, pela Equação 9.

$$m = \rho V$$

Equação 9

Em que m é a massa e, $[kg]$, ρ é a densidade do elemento em $[kg/m^3]$ e V é o volume em $[m^3]$.

Tabela 4: Ficha técnica do fluxômetro com água desmineralizada

Especificações	Descrição
Fluido	H ₂ gás
Faixas de vazão em escala real	0,5 SCCM – 10.000 SLPM
Pressão de operação em grande escala	11 barA ou 22 barA
Humidade	0-100% RH, sem condensação

Temperatura de operação	-10°C a +60°C
Tempo de aquecimento	<1 s
Exatidão	±0,6% de leitura ou ±0,1% de escala completa, o que for maior
Tempo de resposta do sensor	<10 ms
Controle o tempo de resposta	Em apenas 30 ms
Faixas de medição e controle	0,01% – 100% da escala completa (10.000:1 de turn-down)
Totalizador & média de fluxo	A cada 1 ms

Fonte: ALICAT SCIENTIFIC, 2024.

Para determinar a massa através de um fluxômetro que lê dados em Nm³/h, utilizou-se um método matemático de integração. Conhecendo o comportamento do gráfico desse fluxo volumétrico em função do tempo, a somatória de cada diferencial de tempo desse fluxo fornece a quantidade em volume de hidrogênio. O Teorema Fundamental do Cálculo é um conceito da matemática que relaciona a diferenciação e a integração. Ele afirma que se $f(x)$ é uma função contínua em um intervalo fechado $[a, b]$, e $F(x)$ é a integral definida de $f(x)$ nesse intervalo, então a derivada de $F(x)$ em qualquer ponto x dentro do intervalo é igual a $f(x)$ (VALLE, 2013). O teorema fundamental do cálculo permite calcular a área sob uma curva ao encontrar a antiderivada da função que define a curva (Stewart, 2014). Analogamente, sendo $V_{H_2}(t)$ o volume de hidrogênio em função do tempo e este a integral definida da função de fluxo volumétrico de hidrogênio ($\Phi(t)$) na diferencial de tempo dt , tem-se a Equação 10.

$$V_{H_2}(t) = \int_0^{\Delta t} \Phi(t) * dt$$

Equação 10

Onde V_{H_2} o volume de hidrogênio em $[m^3]$, o Φ o fluxo volumétrico em $[\frac{Nm^3}{h}]$ e dt a diferencial de tempo em $[h]$ (Çengel & Boles, 2013). a Figura 2, representa um caso específico de produção de hidrogênio em um ciclo de 0,6 horas para o dia 26/12/2023 no qual a curva mostra a leitura do fluxômetro. O volume total de hidrogênio produzido no intervalo de tempo se obtém pela integração da curva e corresponde a área embaixo da própria curva, que para o caso em específico é de 3,632 m³.

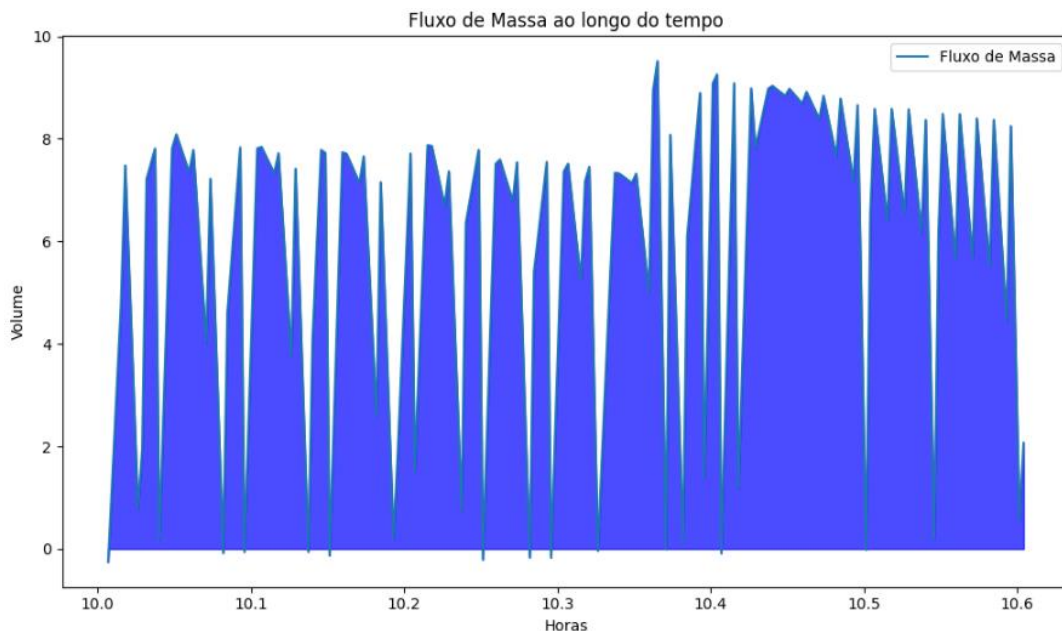


Figura 2: Figura representando o volume sob a linha do gráfico do fluxo volumétrico de hidrogênio em função do tempo referente ao dia 26/12/2023.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para o cálculo do fluxo volumétrico, foi necessário o tratamento dos dados do fluxômetro, conhecido como o método dos trapézios, que calcula, com boa aproximação, a área correspondente.

O método do trapézio é uma técnica de integração numérica que aproxima a área sob uma curva utilizando trapézios (Stewart, 2009). Tendo uma função $f(x)$ definida no intervalo $[a, b]$, que pode dividir esse intervalo em n subintervalos de largura $\Delta x = \frac{b-a}{n}$. A área sob a curva pode ser aproximada pela soma das áreas dos trapézios formados por esses subintervalos. Para cada um desses subintervalos, sua área é tomada pela média das alturas dos dois extremos (valores em y), multiplicada pela largura Δx . Quanto maior a quantidade de n , mais precisa será a aproximação da integral. Na Equação 11, é apresentada a fórmula geral para o método do trapézio (Stewart, 2009).

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{\Delta x}{2} [f(a) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + 2(b)]$$

Equação 11

Onde Δx é a largura de cada subintervalo, $f(x_i)$ é o valor da função em cada ponto intermediário do intervalo, n é o número de subintervalos em que o intervalo $[a, b]$ é dividido. Tem-se também que $x_i = a + i\Delta x$ para $i = 1, 2, \dots, n - 1$. A Equação 11 pode ser simplificada para a Equação 12 (Stewart, 2009).

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{\Delta x}{2} [f(a) + 2\sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(b)]$$

Equação 12

Conhecendo o método do trapézio utilizado pelo código-fonte da linguagem python, a quantidade de hidrogênio calculado por esse método matemático de somatória ($m_{H_2,fluxo}$), a relação entre esta massa calculada e a massa do hidrogênio calculado pela Equação de Van der Waals ($m_{H_2,vdw}$), além das suas relações em percentual, são determinadas por linhas de código, apresentadas no APÊNDICE A.

Para cada operação feita a partir do momento que houve a instalação do fluxômetro na PPHV, calculam-se os dados de massa de hidrogênio produzido através das etapas anteriores, e compara-os com aqueles calculados pela Equação de Van der Waals, e um fator de proporcionalidade entre eles é encontrado através da razão z_i , apresentado na Equação 13.

$$z_i = \frac{H_2 \text{ por Van der Waals}}{H_2 \text{ por Integral}} = \frac{m_{H_2,vdw}}{m_{H_2,fluxo}}$$

Equação 13

Neste trabalho, esses fatores de proporção z_i foram determinados para 4 meses de operação, os quais já havia os dados de fluxo volumétrico. Assim, o fator de proporcionalidade p , que transcreve os dados de $m_{H_2,vdw}$ desde o começo de 2023, foi determinado tomando as médias dos fatores de proporção, encontrado na Equação 14 abaixo.

$$p = \left(\frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \right)^{-1}$$

Equação 14

Desta forma, toma-se todos os dados de hidrogênio calculado pela Equação 7, $m_{H_2,vdw}$, e multiplicado pelo fator p da Equação 14, obtendo-se agora valores de hidrogênio transpostos $m_{H_2,transp}$, utilizando a Equação 15, que se aproximam da realidade em comparação aos dados medidos pelo fluxômetro.

$$m_{H_2,transp} = p \times m_{H_2,vdw}$$

Equação 15

A média aritmética amostral, o desvio-padrão e o coeficiente de variação são medidas estatísticas que auxiliam e representam o comportamento de um conjunto de dados. A média representa o valor médio dos dados de um grupo, resumindo o centro ou tendência central desse conjunto e fornecendo um valor típico dos dados (Moreira, 2021), apresentado pela Equação 16.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Equação 16

Já o desvio-padrão é uma medida de dispersão ou variabilidade dos dados em um conjunto, que representa o quanto os valores individuais tendem a se desviar da média Azevedo, 2016), apresentado pela Equação 17.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Equação 17

Por fim, o coeficiente de variação expressa a variabilidade de um conjunto de dados em relação à sua média (Silva, 2015), apresentado pela Equação 18.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Equação 18

Quanto menor o desvio-padrão, menor a dispersão dos dados daquele conjunto em torno da média. E quanto menor o coeficiente de variação, mais os dados estão relativamente mais próximos da média.

O gráfico do fluxo volumétrico da Figura 2, não é totalmente uniforme, mas apresenta ligeiras mudanças em seu comportamento, tanto ao longo de toda a produção com consecutivos picos e vales, quanto na segunda metade do intervalo do tempo. A primeira variação acontece devido a uma válvula que controla a passagem do gás oxigênio. Quando este gás é pressurizado e necessita ser expelido para a atmosfera, a válvula de hidrogênio acaba fechando rapidamente, impedindo sua passagem nos pequenos espaços de tempo, onde há a queda do fluxo volumétrico, apresentado na Figura 2. Já a segunda variação, o incremento em vazão, pode acontecer devido a mudança de pressão no buffer. Na primeira metade do intervalo de tempo, a buffer se pressuriza de 14 para 17 bar gerando uma resistência ao fornecimento de hidrogênio, já na segunda metade há uma despressurização do buffer devido ao deslocamento do hidrogênio para a etapa de compressão final. Esses comportamentos podem ser apresentados na Figura 3.

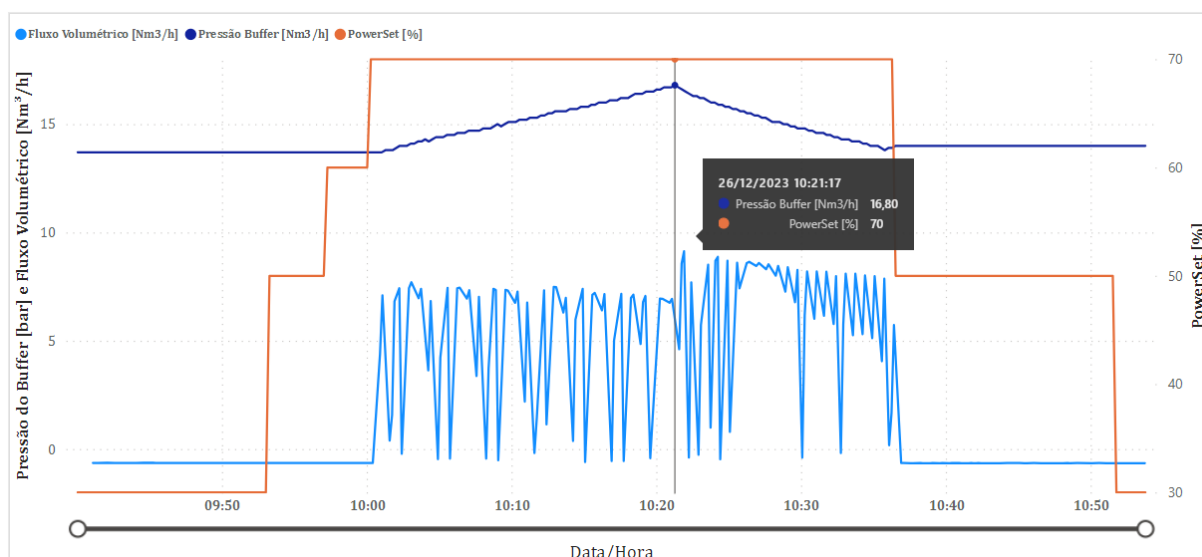


Figura 3: Comportamento do fluxômetro em relação ao comportamento de pressão e powerset referente ao dia 26/12/2023

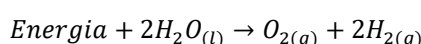
Fonte: Autoria própria, 2024.

Na Figura 3, a linha azul escuro mostra o comportamento da pressão do buffer, a linha laranja o powerset e a linha azul claro a leitura do fluxômetro. O ciclo de operação inicia com pressão do buffer em 14 bar, manutenção do powerset constante e produção constante de hidrogênio. O valor selecionado para visualização da etiqueta de dados é o ponto de máxima pressão do buffer (16,8 bar) que acontece no minuto 10:20. Nesse mesmo momento, pode-se perceber que o

comportamento do fluxo volumétrico é alterado, representado pela linha de cor azul clara, que indica que a pressurização e a despressurização do buffer interferem no fluxo de hidrogênio devido a facilidade ou dificuldade de armazenamento. O ciclo de operação termina quando o buffer retorna novamente a pressão inicial, o powerset é reduzido a 50, e cessa a produção de hidrogênio lida no fluxômetro. Esse processo determinar um ciclo de operação, que podem se repetir ao longo de um dia. No APÊNDICE C é encontrado figuras que mostram o comportamento de operações com quantidade de ciclos diferentes.

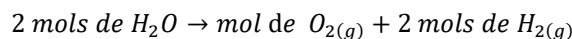
2.4 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE ÁGUA MÍNIMA NECESSÁRIA PARA A ELETRÓLISE

Apesar de contar com um sólido sistema de aquisição de dados, a planta não mede a quantidade de água consumida em cada ciclo de processo, assim se faz necessário um cálculo do consumo de água do processo que posteriormente, com a inserção de um instrumento de medida de vazão, possa também ser verificada. Conhecendo a quantidade de hidrogênio produzido em massa, $m_{H_2,fluxo}$, a quantidade mínima de entrada de água no eletrolisador é determinada através do cálculo estequiométrico da água para produção de hidrogênio através da eletrólise (EL-SHAFIE, 2023), apresentado na Equação 19.



Equação 19

Podemos observar, de forma molar, na Equação 20, que:



$$[mol]_{H_2O} = [mol]_{O_2}, [2 mol]_{H_2O} = [2 mol]_{H_2}$$

Equação 20

Para converter a quantidade de hidrogênio produzido em quilogramas, necessita-se fazer um rearranjo das unidades e cálculos estequiométricos para determinar a quantidade de água necessária mínima para a produção daquela mesma quantidade de hidrogênio. Assim, segue abaixo a determinação das massas com o trabalho das unidades de medidas.

De início, sabendo que as massas estão em quilogramas e que, de acordo com a tabela periódica (Fogaça, 2024), tem-se os pesos molares dos reagentes e produtos na Equação 21.

$$1 H: [1 mol]_H = 1 [g]_H \quad ; \quad 1 O: [1 mol]_O = 16 [g]_O \quad ; \quad 1 H_2: [1 mol]_{H_2} = 2 [g]_{H_2} \quad ;$$

$$1 H_2O: [1 mol]_{H_2O} = 18 [g]_{H_2O} \quad ; \quad 1 O_2: [1 mol]_{O_2} = 32 [g]_{O_2}.$$

Equação 21

Com isso, a massa de hidrogênio produzido pode ser utilizada para se obter a massa de água consumida por meio da Equação 22.

$$m[kg]_{H_2} \approx [kg]_{H_2} \times \frac{1 [kmol]_{H_2}}{2 [kg]_{H_2}} \times \frac{2 [kmol]_{H_2O}}{2 [kmol]_{H_2}} \times \frac{18 [kg]_{H_2O}}{1 [kmol]_{H_2O}} \approx 9 [kg]_{H_2O}$$

Equação 22

Ou seja, são necessários minimamente 9 quilogramas de água para a produção de 1 quilograma de hidrogênio.

Como trabalha-se com quantidade de água em litros, tem-se, através da densidade da água ser de aproximadamente $\rho_{H_2O} = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (Çengel & Boles, 2013), pela Equação 23:

$$m[kg]_{H_2O} \approx [kg]_{H_2O} \times \frac{1 [m^3]_{H_2O}}{1000 [kg]_{H_2O}} \times \frac{1000 [l]_{H_2O}}{1 [m^3]_{H_2O}} \approx 1 [l]_{H_2O}$$

Equação 23

Se 9 quilogramas de água são necessários para a produção de 1 quilograma de hidrogênio, e 1 quilograma de água equivale a 1 litro de água, por uma regra de três composta, encontra-se, na Equação 24:

$$\begin{array}{ccccc}
 1 \text{ [kg]}_{H_2} & \leftrightarrow & 9 \text{ [kg]}_{H_2O} & \leftrightarrow & x \\
 y & \leftrightarrow & 1 \text{ [kg]}_{H_2O} & \leftrightarrow & 1 \text{ [l]}_{H_2O}
 \end{array}$$

Equação 24

Assim,

$$x = 9 \text{ [l]}_{H_2O} \quad \text{e} \quad y = \frac{1}{9} \text{ [kg]}_{H_2}$$

Ou, também, pela Equação 25:

$$9 \text{ [kg]}_{H_2O} \approx 1 \text{ [kg]}_{H_2}$$

$$1 \text{ [l]}_{H_2O} \approx 1 \text{ [kg]}_{H_2O}$$

$$9 \text{ [l]}_{H_2O} \approx 1 \text{ [kg]}_{H_2}$$

Equação 25

Ou seja, são minimamente necessários 9 litros de água para a produção de cada quilograma de hidrogênio. Conhecendo agora a relação das massas pelo balanço estequiométrico da Equação 25, pode-se agora calcular a quantidade de água mínima que foi necessária para que cada operação ocorresse (é o mínimo, pois há quantidade de massa de água que é produzida e fica ou volta ao sistema).

O cálculo estequiométrico da massa de água consumida incorre em erro porque desconsidera condições termodinâmica reais de operação no interior do eletrolisador, sabidamente pressão e temperatura. A análise de equilíbrio da reação interna e o cálculo do refluxo e perdas, são procedimentos recomendados para diminuir a incerteza deste valor. De qualquer forma, o erro neste cálculo não deve afetar significativamente a valor da eficiência, assim, se entendem como válidos os resultados obtidos.

2.5 CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA PELO ELETROLISADOR

Para a análise de energia dos eletrolisadores, a potência (P_{ot}) nos terminais é uma medida da taxa com que o fluxo de energia flui para dentro do circuito, e ela é determinada pela lei de ohm, o produto da tensão (V_{el}) pela corrente (I), e sua unidade é watts [W] (Umans, 2014), apresentado na Equação 26.

$$P_{ot} = V_{el}I \text{ [W]}$$

Equação 26

O desenvolvimento para a determinação do gasto de energia é apresentado para um dia de operação, mas o método foi utilizado para todos os dias de operação, desde o início de 2023. Toma-se como exemplo o dia 26/12/2023, o último dia de operação daquele ano. Na Figura 4 abaixo é apresentado o comportamento das correntes, das tensões e do PowerSet dos eletrolisadores A e B. Observa-se uma variação de picos e vales nas correntes devido a qualidade da energia do retificador, que é influenciada pela carga que está conectada a ele. Há também uma maior tensão sendo aplicada pelo eletrolisador A devido a condições de operação do circuito, o qual não entra na análise desse trabalho. Como a carga é do tipo resistiva-capacitiva (RC) e o retificador é controlado por tensão, implica que a corrente na carga se ajusta proporcionalmente à tensão configurada. Isso faz com que a qualidade da energia fornecida pelo retificador seja afetada pela resposta dinâmica da carga. O eletrolisador consome corrente contínua (DC), mas o fornecedor da rede entrega corrente alternada (AC). Os retificadores são os responsáveis pela transformação de corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC). Para realizar essa conversão, é necessário usar um componente denominado diodo retificador, que facilita o fluxo da corrente elétrica em uma direção específica (corrente direta) enquanto bloqueia o fluxo na direção oposta (corrente reversa). Diversas abordagens podem ser adotadas para incorporar o diodo na elaboração de circuitos retificadores. É viável realizar a retificação de meia onda, de onda completa e até mesmo realizar retificações que resultem na duplicação ou multiplicação da tensão de pico proveniente da fonte geradora (TOGINHO FILHO, 2010). Na figura 4 se observam as correntes e tensões do eletrolisador assim como o powerset. As tensões e o powerset apresenta comportamento uniforme e constante, já a na corrente se observam as variações anteriormente explicadas. Os dados pseudocontínuos permitem a aplicação da abordagem matemática para o tratamento dos dados na busca dos novos parâmetros.

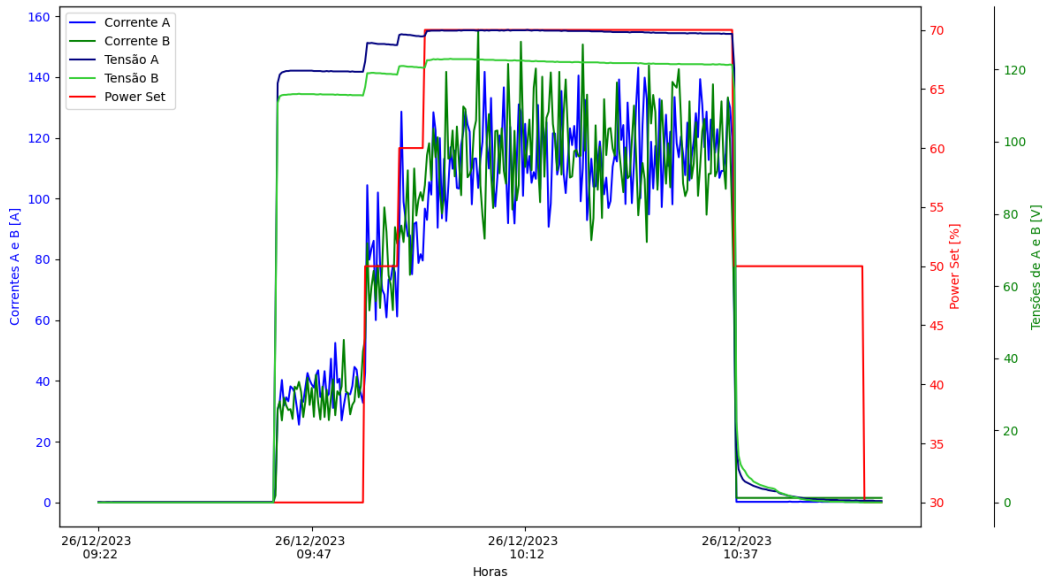


Figura 4: Comportamento das correntes e tensões A e B com PowerSet ao longo do tempo de operação referente ao dia 26/12/2023
 Fonte: Autoria própria, 2024.

Como deseja-se estudar o momento em que o hidrogênio é produzido e armazenado, foi observado, na Figura 5, que valores iguais ou maiores de PowerSet de 70% é o momento quando ocorre a passagem de hidrogênio pelo sensor fluxômetro, os quais serão armazenados e calculados para análise desse trabalho. Na figura 5 se apresenta com a linha azul clara, o comportamento do fluxo volumétrico, e com a linha azul escura os PowerSets de operação para o período de operação, neste caso, de 70%. Devido a isso, o estudo é filtrado para este intervalo. O hidrogênio é produzido antes e depois do powerset chegar a 70%, mas devido a fatores operacionais como controle de pureza, limpeza do sistema, quantidade de hidrogênio que volta para o sistema ao passar pelos secadores, a massa produzida e calculada de hidrogênio é considerada aqui apenas a de armazenamento do buffer externo.

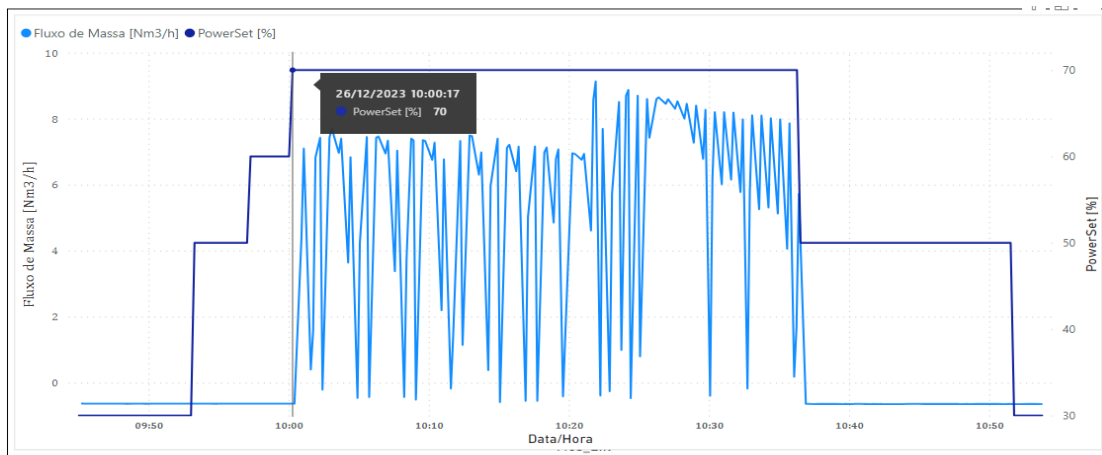


Figura 5: Comportamento da produção de hidrogênio pelo fluxômetro em relação ao PowerSet no dia 26/12/2023
 Fonte: Autoria própria, 2024.

Como há dados de correntes e tensões de interesse, pode-se calcular a potência nesse intervalo de tempo através da Equação 26, multiplicando as correntes pelas tensões respectivas aos valores de seus eletrolisadores, referente à Figura 4, encontrando as potências de A e de B, dentro do PowerSet estudado. O comportamento dessas potências e suas médias são observadas na Figura 6 abaixo.

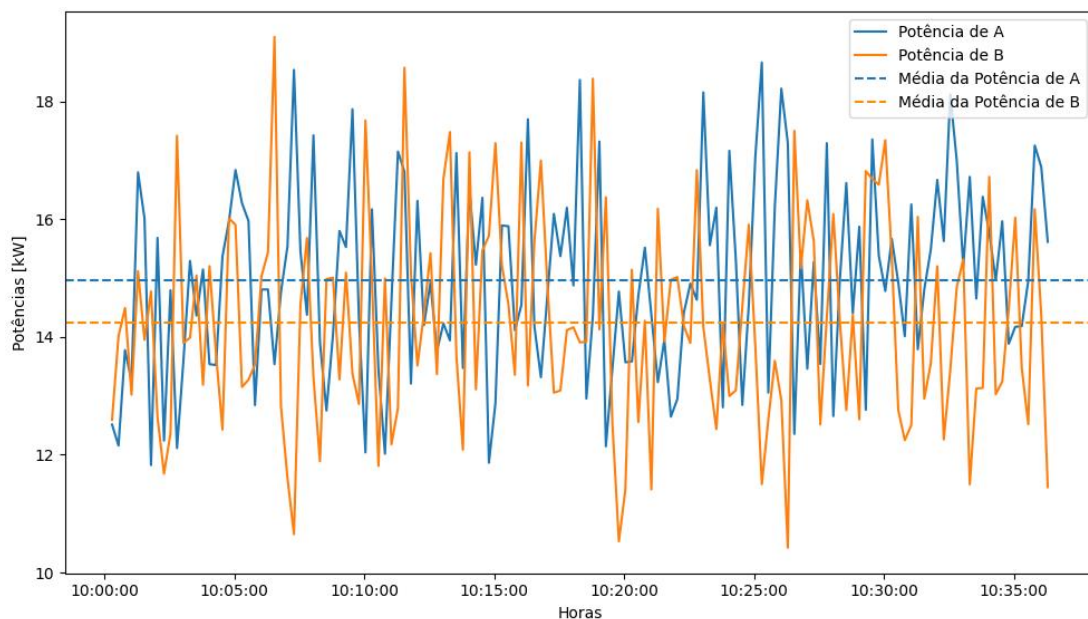


Figura 6: Comportamento das potências de A e de B ao longo do tempo
 Fonte: Autoria própria, 2024.

A potência é quantidade de energia por unidade de tempo instantânea, sendo assim pode-se determinar a energia de um gráfico de potência por tempo através da Equação 27 (C. Rus-Casas, 2014)

$$E = \int P_{ot} dt [J]$$

Equação 27

Como a integral é a somatória da potência na diferencial de tempo em um dado instante, a área sob o gráfico é a própria energia, sendo calculada através do método de trapézio através do código em *python* da Equação 11 (Sobbouhi, 2020). Assim, pode-se calcular a integral do gráfico utilizando a IDE Jupyter, que é apresentada no APÊNDICE B. A Figura 7 e Figura 8 são apresentadas as áreas dos gráficos representando a energia consumida pelo eletrolisador A naquele intervalo de produção, e na Figura 8, é apresentada a energia do eletrolisador B.

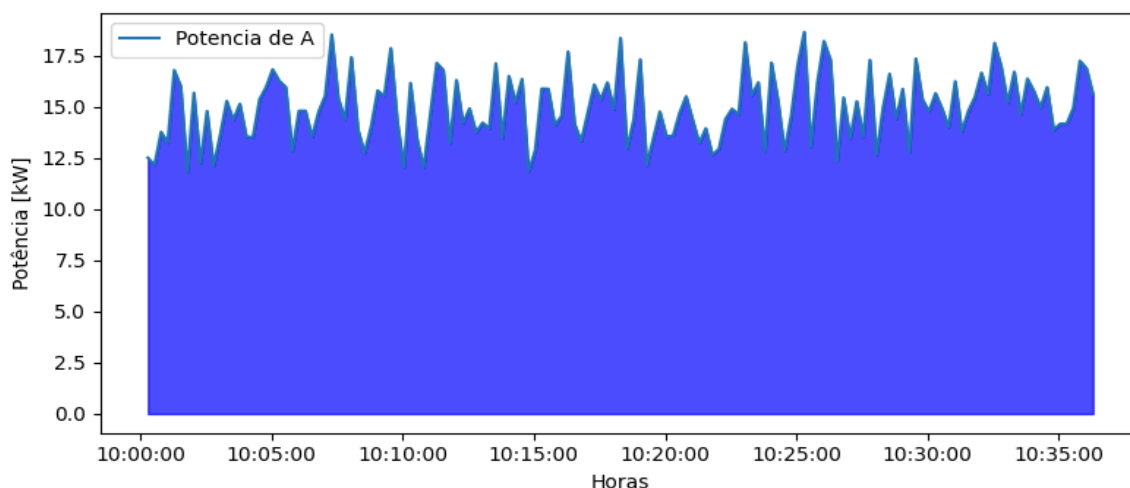


Figura 7: Energia de 8,976 kWh representada pela área do gráfico de potência de A em função do tempo referente ao dia 26/12/2023
 Fonte: Autoria própria, 2024.

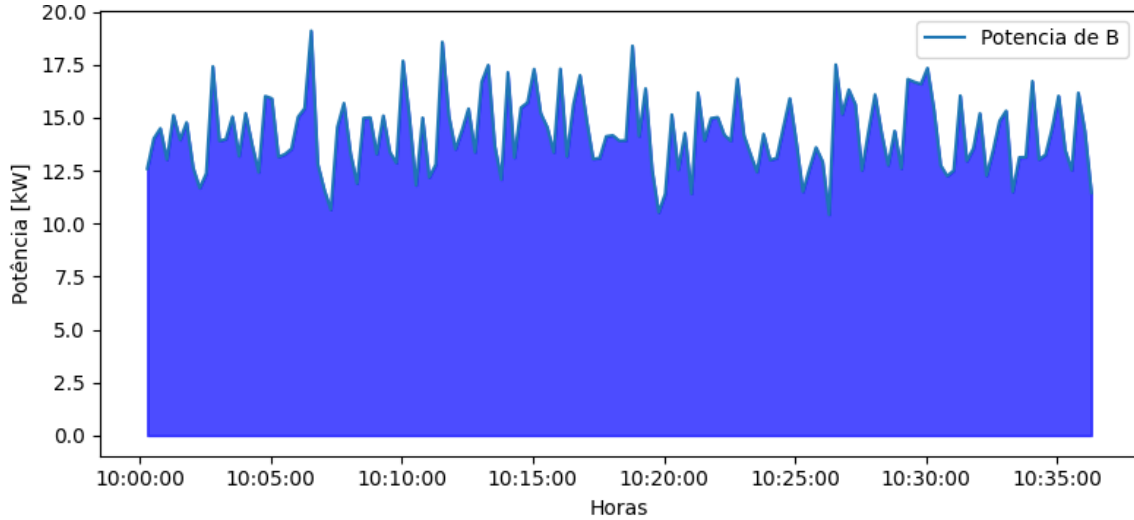


Figura 8: Energia de 8,553 kWh representada pela área do gráfico de Potência de B em função do tempo referente ao dia 26/12/2023

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para todos os dias de operação, foram calculadas a quantidade de energia consumida pelos stacks A (E_A), B (E_B) e a energia total E_T , pois a quantidade de hidrogênio produzido foi calculada levando-se em conta os dois eletrolisadores juntos. Assim, a energia total E_T consumida será a soma das energias consumidas pelos equipamentos A e B, como mostrado pela Equação 28 (Zahariev & Levy, 2017).

$$E_T = \sum_{i=1}^n E_i = E_A + E_B$$

Equação 28

2.6 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DE H₂

Com os valores transpostos da massa de hidrogênio produzida na série histórica a partir dos dados do fluxômetro, $m_{H_2,transp}$ (Equação 15), e possível igualmente fazer um cálculo do histórico de eficiência transposta da planta. O poder calorífico inferior (PCI) da molécula de gás hidrogênio (H_2) é igual a 33,33 kWh/kg (IDEALHY, 2020) assim é possível determinar a quantidade de energia química contida na massa de hidrogênio produzida como uma função temporal como mostrado na Equação 29.

$$E_{H_2} = PCI \times \int_0^{\Delta t} f(t)_{H_2} dt$$

Equação 29

Em que $f(t)_{H_2}$ é a função do fluxo mássico de hidrogênio, ou seja, o volume de hidrogênio em um dado instante de tempo, que passa pelo fluxômetro e PCI é o poder calorífico inferior da molécula de hidrogênio (Çengel & Boles, 2013).

Como se tem a quantidade de energia consumida pelo equipamento (E_T), e a energia interna da massa de hidrogênio produzida (E_{H_2}) simultaneamente, é possível determinar a função eficiência termodinâmica da operação dos eletrolisadores dentro do intervalo de produção de hidrogênio que é armazenado no buffer externo.

Analogamente, o consumo específico de energia (CE), em [kWh/Nm³], relaciona a energia consumida durante a eletrólise com a produção de hidrogênio, que geralmente aumenta com a taxa de produção. Esse consumo se refere apenas ao processo de eletrólise, e não aos demais equipamentos auxiliares, outros consumos de energia, perdas de fornecimentos de energia elétrica e hidrogênios existentes como impurezas dentro do sistema. Já a eficiência termodinâmica (η_T) representa a proporção entre a energia contida no hidrogênio produzido, em [kWh/Nm³], e a energia fornecida para a eletrólise dentro do mesmo intervalo de tempo dos dois processos (CE) (URSUA, 2012), como mostrado pela Equação 30.

$$\eta_T = \frac{PCI \times \int_0^{\Delta t} f(t)_{H_2} dt}{\int_0^{\Delta t} N_{cell,H_2} \times I_{cell} \times V_{cell} dt} = \frac{E_{H_2}}{E_{el,total}} = \frac{E_{H_2}}{E_T}$$

Equação 30

Como os dados de energia produzida e a quantidade de energia consumida possuem a mesma unidade de medida, a eficiência termodinâmica pode ser determinada através da Equação 31 (EL-SHAFIE, 2023).

$$\eta_T = \frac{E_{H_2}}{E_T} \times 100\%$$

Equação 31

Por meio da Equação 31, é possível determinar a eficiência de cada operação realizada na planta. Essa eficiência foi calculada através do mesmo método calculado para determinar a eficiência de produção que utiliza os dados através da Equação de Estado de Van der Waals.

2.7 TESTE DE HIPÓTESE

Dentre os vários tipos de testes de hipóteses que existem, os principais são o Teste-t, utilizado para comparar as médias de duas amostras ou populações independentes ou dependentes; o Teste Z, usado quando a variância populacional é conhecida e/ou o tamanho da amostra é grande; o Teste Qui-quadrado, usado para testar a independência entre duas variáveis categóricas em uma tabela de contingência ou para testar a adequação de um modelo de ajuste; e o Teste F, usado para comparar variâncias entre duas ou mais amostras. A análise de variância (ANOVA) também é usada para testar se há diferenças significativas entre as médias de três ou mais grupos, entre outros (ASSIS; SOUSA; LINHARES, 2020).

Como toda a população em estudo é conhecida, o Teste-t é o mais adequado para ser utilizado. O Teste-t de amostras independentes é utilizado quando queremos comparar as médias de duas amostras independentes, ou seja, quando não há relação entre os indivíduos em cada amostra. A estatística t, também conhecida como valor-t, ajuda a determinar a magnitude da diferença entre as médias de duas amostras, levando em conta a variabilidade dos dados. O Teste-t de Student pode ser aplicado em várias situações, incluindo distribuições monocaudais, distribuições que não se assemelham à normal, duas ou mais amostras, amostras de tamanhos diferentes, amostras com desvios padrão diferentes e quando é necessário testar a normalidade das distribuições. Para o teste, é necessário definir o nível de significância, que geralmente é 0,05, indicando um risco de 5% de concluir erroneamente que existe uma diferença. Existem três tipos comuns de Teste-t: o Teste-t para duas amostras independentes (ou não pareadas), o Teste-t para duas amostras dependentes (ou pareadas) e o Teste-t para uma amostra (para comparar com a média da população) (NAGAO, 2022).

O Teorema Central do Limite afirma que, independentemente da distribuição subjacente, se coletarmos várias amostras de um mesmo tamanho de uma população e calcularmos a média de cada amostra, a distribuição dessas médias se aproximará de uma distribuição normal à medida que o tamanho da amostra aumenta. Isso significa que podemos usar a distribuição normal para fazer inferências sobre a média da população, mesmo que a distribuição original dos dados não seja normal. O Teorema Central do Limite é fundamental na estatística porque nos permite aplicar técnicas baseadas na distribuição normal em uma ampla variedade de situações (NAGAO, 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 5 apresenta valores de xxx, pressão e temperatura, inicial e final, do buffer por ciclo de operação na data, e o correspondente cálculo de massa de hidrogênio produzida conforme a Equação 7 de Van Der Waals ($m_{H_2,vdw}$).

Tabela 5: Dados de pressões e temperaturas iniciais e finais do buffer externo da PPHV e sua produção de hidrogênio por Van der Waals

Data	Registro de operação	Pressão inicial	Pressão final	Temperatura inicial [°C]	Temperatura final [°C]	Produção de H2_vdw [kg]
07/12/2023	389	196,83	203,97	24,7	24,4	0,25
14/12/2023	390	198,18	207,23	30,0	31,6	0,26
26/12/2023	391	200,65	209,28	25,7	27,00	0,26
02/01/2024	392	203,89	212,92	27,9	30,1	0,25

11/01/2024	393	204,78	212,81	26,6	26,9	0,26
18/01/2024	394	209,10	218,68	29,7	32,1	0,25
23/01/2024	395	154,18	162,06	24,1	25,3	0,26
29/02/2024	396	162,31	169,91	27,0	27,2	0,29
07/03/2024	398	177,25	186,56	28,8	29,6	0,30

Fonte: Autoria própria, 2024.

A tabela 6 apresenta a comparação entre os valores calculados da massa do hidrogênio, em datas específicas de operação, por ciclo usando a equação de VdW e utilizando a leitura do fluxômetro. Na primeira coluna apresenta a massa de hidrogênio a partir do cálculo de VdW, na segunda coluna a massa de hidrogênio calculado a partir da leitura do fluxômetro, na terceira coluna aparece a razão entre a massa de hidrogênio calculada por VdW e a massa de hidrogênio calculada a partir do fluxômetro, e finalmente, na última coluna apresenta o valor transposto pelo parâmetro p da primeira coluna, como explicado a continuação. A média desses novos valores da última coluna é de 0,309, ou seja, a equação de Van der Waals para esse sistema erra com média de 14,30 % para baixo.

Utilizando a Equação 13 gerou-se a coluna “Razão H2_vdw / H2_fluxo [%]”. Ao calcular a média desses valores de razão e aplicando na Equação 14, obteve um valor igual a 1,17, com desvio padrão de 0,09 e coeficiente de variação de 7,98%, ou seja, com esses dados estatísticos indicam que os dados são relativamente homogêneos e tem uma dispersão relativamente baixa em relação à média. Assim, tomando-se esse valor de proporção, multiplicou-o por todos os valores calculados por Van Der Waals do ano de 2023, como na Equação 15, é gerada a coluna “Produção de H2_transp [kg]”, ou seja, valores de produção de hidrogênio que são transpostos de um método para o outro através de um fator de proporção. Todos os valores que foram utilizados para a transposição dos dados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Diferentes dados de produção de hidrogênio e sua comparação

Data	Produção de H2_vdw [kg]	Produção de H2_fluxo [kg]	Razão H2_vdw / H2_fluxo [%]	Produção de H2_transp [kg]
	$(m_{H_2,vdw})$	$(m_{H_2,fluxo})$		$(m_{H_2,transp})$
07/12/2023	0,25	0,327	76,57%	0,293
14/12/2023	0,26	0,293	88,83%	0,305
26/12/2023	0,26	0,329	78,93%	0,305
02/01/2024	0,25	0,293	85,21%	0,293
11/01/2024	0,26	0,313	83,09%	0,305
18/01/2024	0,25	0,279	89,64%	0,293
23/01/2024	0,26	0,325	80,01%	0,305
29/02/2024	0,29	0,292	99,38%	0,340
07/03/2024	0,30	0,334	89,77%	0,352

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para demonstrar o comportamento dos dados de produção de hidrogênio, tanto os dados calculados por Van der Waals, quanto os dados tomados pelo fluxômetro e os dados que foram submetidos a transposição, são apresentados na Figura 9 abaixo.

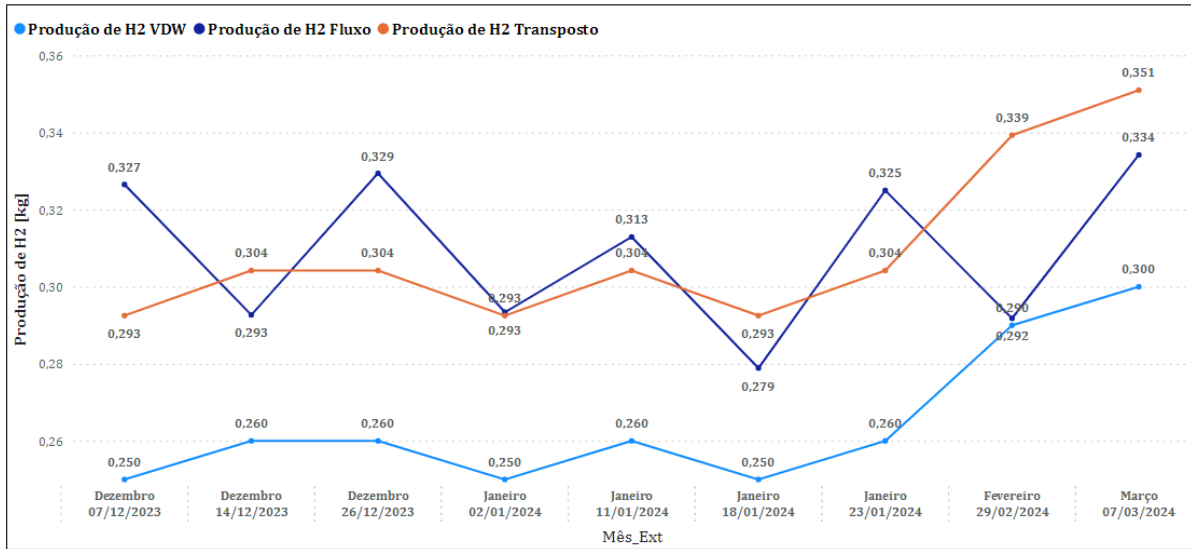


Figura 9: Produção de hidrogênio a partir da instalação do fluxômetro
 Fonte: Autoria própria, 2024.

Teoricamente, a planta operando a 100% produziria um fluxo de 10 Nm³/h (0,899 kg/h). Uma relação direta pode ser usada como estimativa de comparação para a produção da planta operada em PowerSet igual a 70, ou seja 70% da sua capacidade, sendo este valor de 7 Nm³/h (0,629 kg/h). Na Figura 10, o limite estimado de operação ideal aparece como uma linha tracejada roxa, o fluxo mássico máximo teórico é apresentado pela linha azul escura. O fluxo médio real por operação tomado pelo fluxômetro é apresentado pela linha verde. A linha laranja na figura apresenta o percentual local entre o fluxo mássico real e o fluxo mássico ideal para a condição de operação de 70%. Se comparados os valores médios de operação entre a estimativa nominal (0,629 kg/h), com a leitura real (0,524 kg/h), pode se inferir que a planta, na condição de 70%, opera, em média, 17,91% abaixo do nível nominal esperado. A subida no final do gráfico é justificada pelo aumento no powerset de operação para 80%.

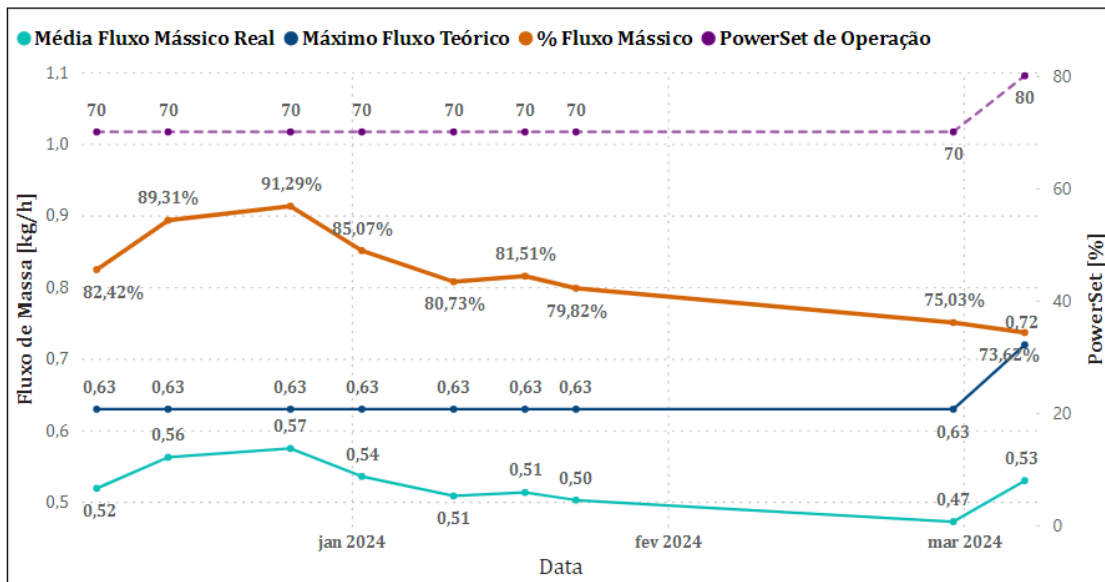


Figura 10: Fluxos mássicos de hidrogênio real e teóricos em relação aos PowerSets de operação a partir da instalação do fluxômetro
 Fonte: Autoria própria, 2024.

Considerando que os dados de fluxo estejam corretos, houve uma aparente piora no desempenho da planta durante os primeiros meses de 2024. Isso justifica o desvio do fator de proporcionalidade das duas últimas operações (Figura 9).

Fazendo uma análise estatística da confiabilidade dessa transposição dos dados através das equações: Equação 16, Equação 17 e Equação 18, é possível determinar pela média entre os dados, seus desvios-padrões e coeficiente de variação,

todos apresentados na Tabela 7, que a média dos dados tomados pelo fluxômetro é igual a média dos dados que foram transpostos daqueles calculados por Van Der Waals e multiplicados pelo fator de proporção p , e também, os dois grupos de dados possuem valores de desvios-padrão equivalentemente baixos. Ou seja, existe uma aproximação muito forte dos dois conjuntos de dados. Para conferir suas dispersões, observa-se que os desvios-padrões e os coeficientes de variação são valores muito pequenos, ou seja, o conjunto dos dois grupos de dados apresentam dispersões baixas e seus valores estão relativamente próximos em torno da média, provando assim que eles estão relativamente próximos uns dos outros, mostrando consistência e homogeneidade.

Tabela 7: Análise estatística dos dados de massa de hidrogênio e sua transposição

Estatística	Produção de H2_vdw [kg]	Produção de H2_fluxo [kg]	Produção de H2_transp [kg]
	$(m_{H_2,vdw})$	$(m_{H_2,fluxo})$	$(m_{H_2,transp})$
Média	0,264	0,309	0,309
Desvio-padrão	0,017	0,020	0,021
Coefficiente de Variação (CV)	0,065	0,066	0,068

Fonte: Autoria própria, 2024.

A partir da transposição dos dados das operações ocorridas do ano de 2023, agora se tem uma nova quantidade de hidrogênio produzido e armazenado mais próximo dos valores lidos pelo fluxômetro, o qual traz valores mais precisos. Sabendo-se a quantidade de hidrogênio em massa produzido, pode-se calcular por estequiometria a quantidade mínima de água em litros através da Sessão 3.4, utilizando a equação de estequiometria da eletrólise alcalina da água (Equação 19). De forma direta, utilizando as relações da Equação 25, as quais relacionam as massas produzidas de hidrogênio com a quantidade volumétrica da água líquida. Esses dados podem ser apresentados de forma resumida na Tabela 8.

Tabela 8: Quantidades de água mínima necessária para a produção de hidrogênio de todo o período de operação em estudo

Data	Produção de H2_transp [kg]	Número de ciclos	Quantidade de H2O mínima (Fluxo) [Litros]	Quantidade de H2O mínima (VDW) [Litros]
17/01/2023	0,31590	1	2,84	2,43
18/01/2023	0,28080	1	2,53	2,16
24/01/2023	0,30420	1	2,74	2,34
26/01/2023	0,29250	1	2,63	2,25
31/01/2023	0,30420	1	2,74	2,34
...
14/11/2023	0,59670	2	5,37	4,59
21/11/2023	0,59670	2	5,37	4,59
07/12/2023	0,29250	1	2,63	2,25
14/12/2023	0,30420	1	2,74	2,34
26/12/2023	0,30420	1	2,74	2,34

Fonte: Autoria própria, 2024.

A coluna “Número de Ciclos” traz a explicação do aumento na quantidade de massa produzida de hidrogênio, pois a cada ciclo operado, maior a quantidade de massa de hidrogênio produzido, como observado na coluna “Produção de H2_transp [kg]”, da Tabela 8 e, conseqüentemente, o aumento na quantidade de água necessária, observado na coluna “Quantidade de H2O Mínima Necessária [Litros]”. A quantidade de água mínima total necessária para a produção de hidrogênio através do método que utiliza o fluxômetro e está armazenado no buffer externo é de 468,06 litros, diferentemente do total de 400,05 litros se fosse considerar a quantidade de hidrogênio calculado através da Equação de Estado de Van Der Waals. Como a capacidade do buffer externo é de 700 L, a uma pressão de 20 bar e temperatura de

30 °C, pode ser armazenado uma quantidade de até 1,1 kg de hidrogênio e, para essa quantidade produzida e armazenada é necessária uma quantidade de água igual a 9 litros.

Os dados da energia consumida pelos eletrolisadores A e B, referentes a Sessão 3.5, encontrados através da integração que utiliza o método do trapézio da Equação 12 (porém, a integral representando da energia é a Equação 27), pode ser observada na Tabela 9. Como o consumo de energia varia com o tempo de operação, assim, quanto maior a quantidade de ciclo realizado em uma operação, conseqüentemente, maior será a energia consumida, podendo ser observado no aumento de consumo de energia da coluna “Consumo de Energia [kWh]” em relação a coluna “Número de Ciclos”. Na Figura 11 se observa graficamente as mesmas informações da tabela 9, com ênfase no número de ciclos.

Tabela 9: Consumos de energia pelos eletrolisadores A e B

Data	Produção de H2_transp [kg]	Número de Ciclos	Consumo de Energia [kWh]
17/01/2023	0,316	1	17,583
18/01/2023	0,281	1	20,381
24/01/2023	0,304	1	13,705
26/01/2023	0,293	1	15,578
31/01/2023	0,304	1	17,116
...
14/11/2023	0,597	2	37,379
21/11/2023	0,597	2	31,286
07/12/2023	0,293	1	17,893
14/12/2023	0,304	1	15,731
26/12/2023	0,304	1	17,529

Fonte: Autoria própria, 2024.

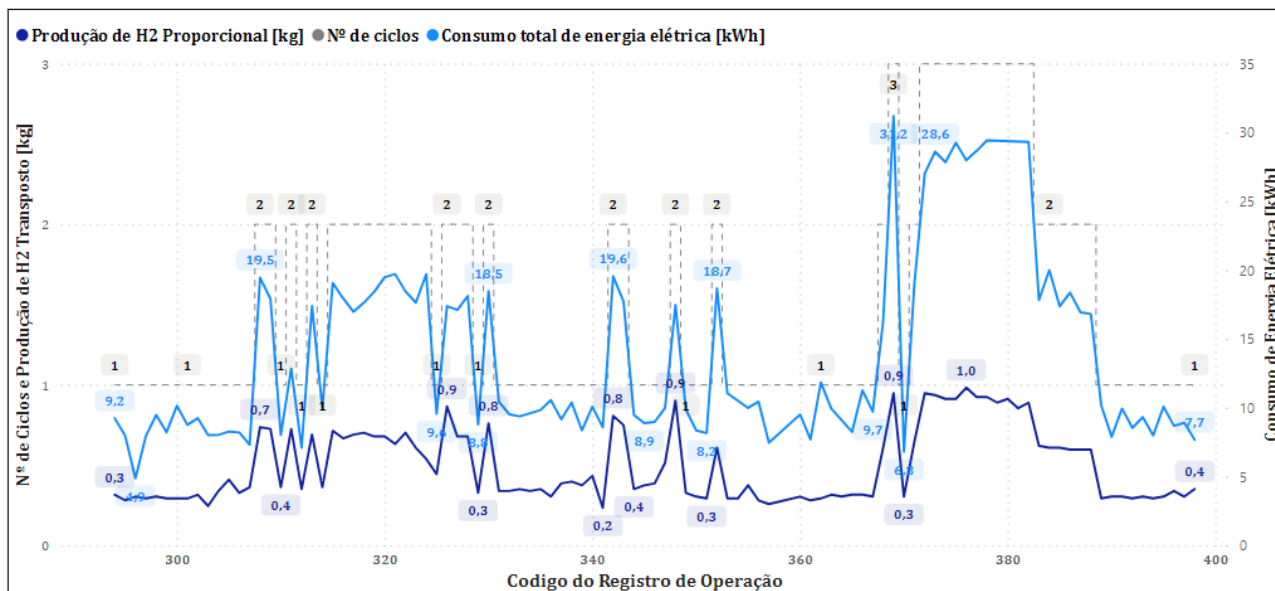


Figura 11: Comportamento da produção de hidrogênio e o consumo de energia em relação ao número de ciclos realizados em cada operação.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Na Figura 11 acima, observa-se uma equivalência e proporção entre a quantidade de energia consumida com a quantidade de hidrogênio produzido, o que era de se esperar. Na Tabela 10, se observa a quantidade de massa de hidrogênio produzida, a energia consumida para esta produção por ciclo, tanto em forma específica, quanto em forma total e finalmente a eficiência na produção por cada ciclo.

Tabela 10: Dados de produção de hidrogênio e quantidade de energia consumida pelo eletrolisador por quantidade de ciclos operados

Parâmetros	1 Ciclo	2 Ciclos	3 Ciclos
Hidrogênio produzido por ciclo [kg]	0,326	0,340	0,306
Hidrogênio produzido [kg]	0,326	0,681	0,919
Energia consumida por ciclo [kWh]	17,036	17,220	16,515
Energia consumida [kWh]	17,036	34,776	49,544
Eficiência	63,83%	65,86%	61,85%

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os dados apresentados na Tabela 10, mostram que quando é aplicado 2 ciclos de operação, a quantidade de hidrogênio produzido é a mais alta entre os ciclos 1, 2 e 3, porém, há um consumo maior de energia para essa mesma produção. Para ter um valor válido de comparação entre os ciclos, foi calculado a eficiência de produção para cada tipo de ciclo. Diante dos dados apresentados, mesmo a operação com 2 ciclos tendo uma quantidade de energia consumida maior, esse tipo de operação se mostrou mais eficiente, com uma eficiência de 65,86%, em comparação com as de 63,83% com 1 ciclo e 61,85% com 3 ciclos, podendo ser resposta desse acontecimento a influência das limitações operacionais, principalmente a temperatura.

A Tabela 11. Apresenta o comparativo da produção de hidrogênio por VdW e transposto, o consumo de energia para esta produção (neste caso é o mesmo valor para as duas produções), a energia calculada de cada uma das produções e finalmente as correspondentes eficiências de primeira lei.

Tabela 11: Quantidade energética de hidrogênio produzido transposto, energia consumida pelos eletrolisadores e a eficiência de produção de hidrogênio

Data	Produção de H2_VDW[kg]	Produção de H2_transp[kg]	Consumo de energia_trans [kWh]	Consumo de energia_VDW [kWh]	Eficiência de produção de H2 (Transp) [%]	Eficiência de produção de H2 (VDW) [%]
17/01/2023	0,27	0,31590	17,583	9,24	59,881	55,45
18/01/2023	0,24	0,28080	20,381	7,99	45,921	54,83
24/01/2023	0,26	0,30420	13,705	4,88	73,980	55,1
26/01/2023	0,25	0,29250	15,578	7,94	62,582	55,73
31/01/2023	0,26	0,30420	17,116	9,48	59,237	61,42
...
14/11/2023	0,51	0,59670	37,379	16,94	53,206	61,23
21/11/2023	0,51	0,59670	31,286	16,81	63,568	55,57
07/12/2023	0,25	0,29250	17,893	10,17	54,485	55,88
14/12/2023	0,26	0,30420	15,731	7,89	64,452	65,59
26/12/2023	0,26	0,30420	17,529	9,95	57,841	54,53

Fonte: Autoria própria, 2024.

Com os valores de eficiências apresentados na Tabela 11, pode-se compará-los visualmente através de um gráfico, apresentado pela Figura 12. A coluna “Eficiência de Produção de H2 (Fluxo) [%]” representa o grupo de dados tomados pelo fluxômetro, e é observado como sendo a linha azul clara, e a linha azul escura tracejada é a média dessa eficiência. Já a coluna “Eficiência de Produção de H2 (VDW) [%]” representa os dados calculados através da Equação de Estado de Van der Waals, e é observado como sendo a linha alaranjada na mesma figura, e a linha laranja escura tracejada representa a média dessa eficiência.

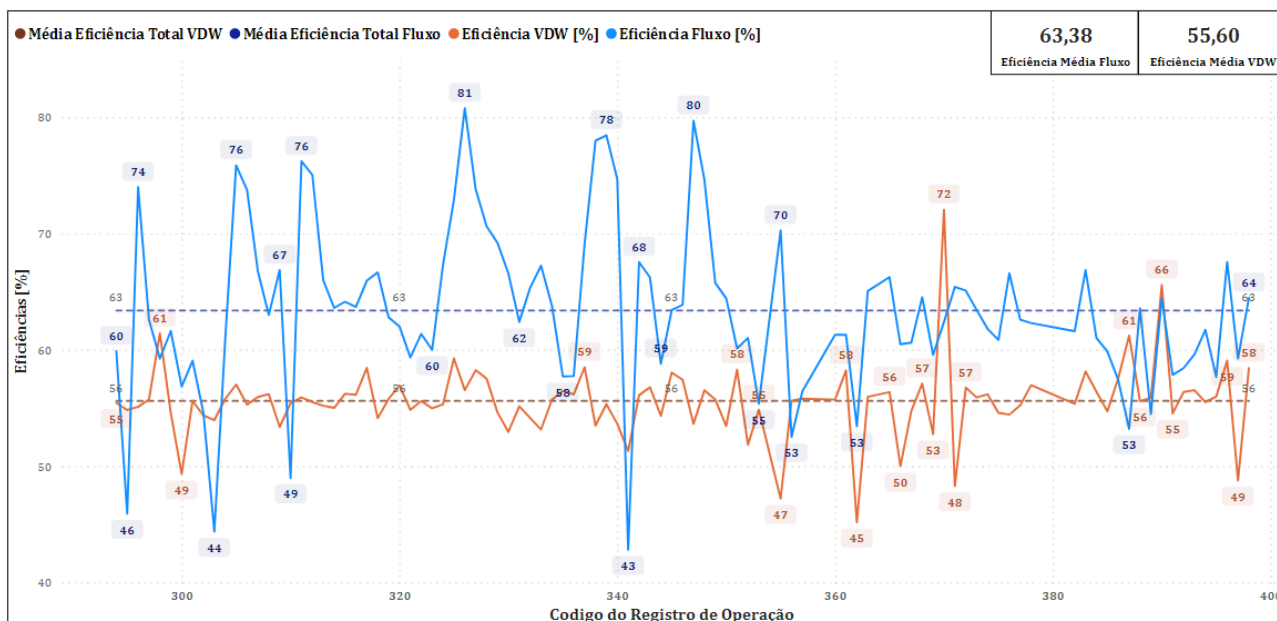


Figura 12: Análise de comparação das eficiências de produção de hidrogênio
 Fonte: Autoria própria, 2024.

Tomando os dados estatísticos, como apresentado na Tabela 12, obtém-se os valores das médias, dos desvios-padrões e dos coeficientes de variações dos dois grupos de dados de eficiências mostrados na Figura 12.

Tabela 12: Comparação estatística entre as eficiências

Grupo de Dados	Média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação
Fluxômetro	63,638	7,066	0,111
Van Der Waals	55,605	3,203	0,058

Fonte: Autoria própria, 2024.

A partir da eficiência termodinâmica calculada para o subsistema de produção, e apresentados na Tabela 12, pode-se concluir que os dados tomados pelo fluxômetro têm uma média de 63,638% e uma variabilidade moderada em torno dessa média, com um desvio padrão de 7,066 e um coeficiente de variação de aproximadamente 11,1%, que indica que esses valores dos dados estão relativamente próximos da média, com uma maior dispersão em torno dela. Já os mesmos dados de eficiência termodinâmica calculados pela Equação de Estado de Van Der Waals podem-se concluir que os dados têm uma média de 55,605% e uma variabilidade relativamente menor em torno da média, com um desvio padrão de 3,203 e um coeficiente de variação de aproximadamente 5,8%. Isso indica que os valores desses dados estão bastante próximos da média, com menor dispersão em torno dela.

Diante dos dados estatísticos que caracterizam os grupos de dados de eficiência, um teste de hipótese se faz necessário para a comparação estatística no âmbito de confiabilidade das informações perante testes não paramétricos. Utilizando o MINITAB, um software de ferramenta estatística para análise de dados como teste de hipóteses, regressão, ANOVA e controle estatístico de processo, além de visualização de gráficos estatísticos e suporte para metodologia Six Sigma da melhoria contínua. Abaixo é apresentado na Figura 13 os dados estatísticos do Teste T da sessão 2.7.

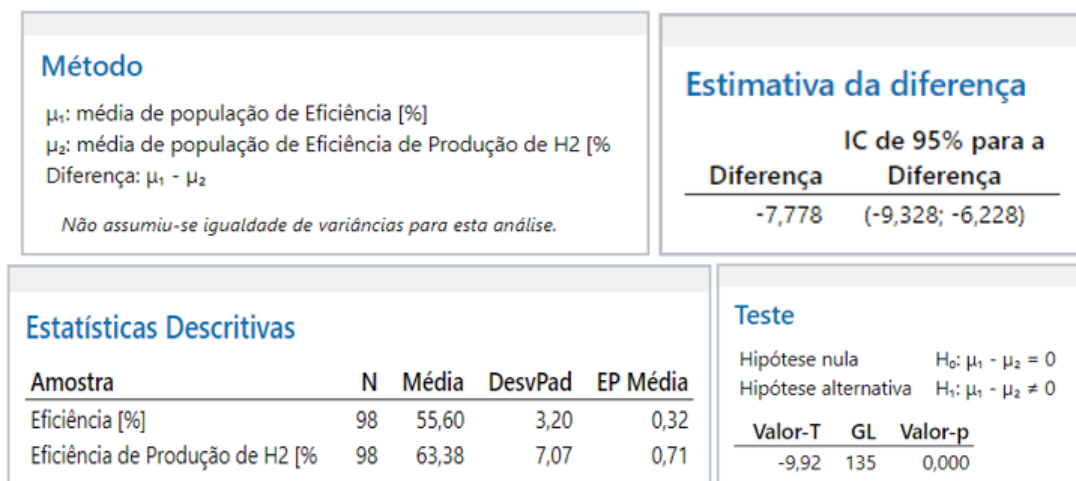


Figura 13: Dados do Teste T para dois grupos de dados de eficiências.
 Fonte: Autoria própria, 2024.

As hipóteses utilizadas pelo teste t são a hipótese nula: $H_0: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$, ou também, $H_0: \mu_1 = \mu_2$, e a hipótese alternativa: $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$, ou também, $H_0: \mu_1 \neq \mu_2$.

Observando os valores estatísticos da Figura 13, um valor t de -9,92 indica que a média da eficiência calculada pela Equação de Van Der Waals está significativamente abaixo da média da eficiência calculada pelos dados de fluxômetro, e a diferença é grande o suficiente para ser considerada estatisticamente significativa. Isso sugere que há uma diferença real entre a média da eficiência calculada por van der Waals e a média da eficiência com dados do fluxômetro, e essa diferença não é devido ao acaso. Um valor t muito negativo levaria à rejeição da hipótese nula em favor da hipótese alternativa. Isso significa que há evidências estatísticas para sugerir que as médias das eficiências são diferentes. Já para o grau de liberdade (GL), com um valor de 135, pode-se dizer que há uma quantidade significativa de informações (dados) para estimar os parâmetros da eficiência e realizar inferências sobre as médias das amostras, aumentando a confiabilidade e a precisão dos resultados do teste, tornando as conclusões mais robustas. Em última análise, um valor-p de 0,000 sugere que há uma forte evidência estatística para rejeitar a hipótese nula em favor da hipótese alternativa. Em outras palavras, há uma diferença estatisticamente significativa entre as médias das populações.

Todo o trabalho foi guiado pelos parâmetros operacionais da PPHV, levanto em consideração os comportamentos das variáveis de correntes, tensões, potências, temperaturas, pressões, powersets e fluxo volumétrico, sendo observados e apresentados no APÊNDICE C.

4 CONCLUSÕES

Foi possível comparar a produtividade de hidrogênio da planta utilizando dois métodos de medida, um pelo cálculo termodinâmico utilizando a equação de vdw e outro pela medida do fluxômetro.

A comparação entre as duas produtividades permitiu a identificação de um fator de transposição estatisticamente consistente que permite uma revisão dos valores históricos de produtividade e eficiência da planta.

Apesar da pouca quantidade de dados em comparação com a série histórica de funcionamento da planta, as informações disponíveis em simultâneo de variáveis elétricas, pressão, temperatura e fluxômetro, são estatisticamente consistentes para afirmar que a série histórica da eficiência de produção de hidrogênio pode estar prejudicada utilizando métodos de cálculo que traz valores menores de eficiência, já que os cálculos por Van Der Waals possuem um percentual de erro maior do que a do fluxômetro.

O comparativo de eficiências e produtividade a partir dos dois métodos permite concluir que a eficiência e produtividade da planta sempre foi maior do que o calculado até o momento.

Foi possível calcular o consumo de água na produção de hidrogênio da planta a partir da análise estequiométrica o qual identificou um consumo de 9 litros de água por cada quilograma de hidrogênio produzido.

A planta apresenta diferentes eficiências quando operada a um, dois ou três ciclos. Se identificou que a planta opera em forma mais eficiente quando operada em dois ciclos. Esta operação com 2 ciclos apresenta maior eficiência, de 65,86%, em comparação as de 1 e 3 ciclos, de 63,83% e 61,85%, respectivamente.

O uso de dados pseudocontínuos e a abordagem do método matemático e estatístico adequado dão garantia da avaliação eficaz da planta.

A comparação do valor médio de produtividade real de 0,52 kg/h, frente ao valor de produtividade nominal a 70%, de 7 Nm³/h (ou 0,63 kg/h), infere-se que a produtividade está 17,91% abaixo do nível teórico de operação esperado.

A eficiência de operação pelo fluxômetro foi de 36,62% abaixo do esperado de produção de hidrogênio, e de 44,4% abaixo realizados pela equação de van der waals;

O valor-t negativo de -9,92 nos mostra uma média de eficiência por van der waals significativamente menor, o valor gl de 135 averigua que a quantidade dos dados é suficiente para confiar no teste de hipótese, e o valor p de 0,000 nos mostra que temos evidências estatísticas significativas para rejeitar a hipótese nula e não rejeitar a hipótese alternativa. Portanto, sendo a hipótese nula sendo representada pelas igualdades das médias entre dois grupos e dados de eficiência, e que a hipótese alternativa é representada pela diferença, rejeitamos a hipótese de que as médias são significativamente iguais, e escolhemos não rejeitar a hipótese de que são diferentes. Derradeiramente, com 95 % de confiança, pode-se dizer que as médias entre os dois grupos de dados de eficiência são estatisticamente diferentes de forma significativa, e através do valor-t, pode-se também dizer que a média pelo método matemático utilizando o fluxômetro possui média de eficiência significativamente maior.

5 AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão às seguintes pessoas e instituições que foram fundamentais para a realização deste trabalho:

À professora Alessandra Sibim, que não só me introduziu à fascinante área de estatística e análise de dados, mas também me inspirou com sua dedicação e paixão pelo ensino.

Ao Centro de Tecnologia em Hidrogênio do Parque Tecnológico de Itaipu, pelo apoio inestimável, orientação e encorajamento fornecidos em todas as etapas deste projeto. Suas contribuições foram essenciais para o sucesso desse trabalho.

Ao meu orientador, Luis Evelio, pela orientação excepcional, apoio constante, generosidade de tempo e compartilhamento de valiosas ideias e técnicas. Seu compromisso com meu crescimento acadêmico foi verdadeiramente inspirador, além de me apresentar o gosto pela área da termodinâmica.

Por fim, à Universidade Federal da Integração Latino-Americana, pela oportunidade de estudar e crescer como discente. Agradeço o suporte financeiro, recursos, atenção e incentivo ao longo de minha jornada acadêmica, que me permitiu desenvolver projetos e colaborar com colegas de maneira significativa.

A todos, meu profundo agradecimento por fazerem parte desta jornada e por contribuírem para o meu crescimento pessoal e profissional.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABE, J.O.; Popoola, A.P.I.; Ajenifuja, E.; Popoola, O.M. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *Int. J. Hydrogen Energy* 2019, 44, 15072–15086.
- ALICAT Scientific: Medidores de Vazão Mássica de Hidrogênio e Controladores. Medidores de Vazão Mássica de Hidrogênio e Controladores. 2024. Disponível em: <https://www.alicat.com/industries/hydrogen/hydrogen-flow-meters-and-controllers/>. Acesso em: 03 abr. 2024.
- ANDERSSON, Joakim; GRÖNKVIST, Stefan. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal Of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 44, n. 23, p. 11901-11919, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>.
- ARSIOLI, Bruno Sversut. TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DO HIDROGÊNIO. Campinas - Sp: Unicamp, 2015.
- ASSIS, Janilson Pinheiro de; SOUSA, Roberto Pequeno de; LINHARES, Paulo César Ferreira. Testes de Hipóteses Estatísticas. Mossoró-Rn: Edufersa, 2020. 184 p.
- AZEVEDO, Paulo Roberto Medeiros de. Introdução à Estatística. 3. ed. Natal, Rn: Edufrn, 2016. 235 p. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/>. Acesso em: 04 abr. 2024.
- BINACIONAL, I., & S.A., C. E. (s.d.). PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NA USINA HIDRELÉTRICA DE ITAIPU EM ESCALA PILOTO E UTILIZAÇÃO EM CÉLULA A COMBUSTÍVEL. Nº ECV-DTC-002/2011.
- BRASIL. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Fontes de Energia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- Bruce H. Mahan. Química: Um curso universitário. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda.
- BUTTLER, Alexander; SPLIETHOFF, Hartmut. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 82, p. 2440-2454, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>.
- UNIDAS, Nações. Paz, dignidade e igualdade em um planeta saudável: causas e efeitos das mudanças climáticas. Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas. 2024. Disponível em: <https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A., 2013, “Termodinâmica”, 7a Edição, McGraw Hill, São Paulo.
- EL-SHAFIE, Mostafa. Hydrogen production by water electrolysis technologies: a review. *Results In Engineering*, [S.L.], v. 20, p. 101426, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426>.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2023. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- ESPINOLA, Diego Osmar Galeano. Análisis energético y exergético de una planta de producción de hidrógeno electrolítico. 2016. 18 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território., Universidad Federal de Integración Latinoamericana - Unila, Foz do Iguaçu, 2016.
- FPTI. PRESSURIZED Water Electrolyser. Foz do Iguaçu: Itaipu, 2014. 10 p.
- F. Zahariev and M. Levy, *Phys. Chem. A* 121, 342 (2017). <https://doi.org.ez350.periodicos.capes.gov.br/10.1021/acs.jpca.6b10952> Crossref
- FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. "Nomenclatura IUPAC"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/nomenclatura-iupac.htm>. Acesso em 20 de março de 2024.
- GANDÍA, Luis M.; OROZ, Raquel; URSÖA, Alfredo; DIÉGUEZ, Pablo Sanchispedro M. Renewable Hydrogen Production: Performance of an Alkaline Water Electrolyzer Working under Emulated Wind Conditions. *Energy & Fuels*, Pamplona, Espanha., v. 21, n. 03, p. 1699-1706, 06 fev. 2007. Disponível em: <https://pubs-acsc-org.ez350.periodicos.capes.gov.br/doi/epdf/10.1021/ef060491u>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- GÖTZ, Manuel; LEFEBVRE, Jonathan; MÖRS, Friedemann; KOCH, Amy McDaniel; GRAF, Frank; BAJOHR, Siegfried; REIMERT, Rainer; KOLB, Thomas. Renewable Power-to-Gas: a technological and economic review. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 85, p. 1371-1390, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>.
- HELERBROCK, Rafael. "Leis de Kirchhoff"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/leis-de-kirchhoff.htm>. Acesso em 12 de abril de 2024.

- HU, Kewei; FANG, Jiakun; AI, Xiaomeng; HUANG, Danji; ZHONG, Zhiyao; YANG, Xiaobo; WANG, Lei. Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling. *Applied Energy*, [S.L.], v. 312, p. 118788, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118788>.
- IDEALHY – INTEGRATED DESIGN FOR EFFICIENT ADVANCED LIQUEFACTION OF HYDROGEN. *Liquid Hydrogen Outline*. Idealhy, [s. l.], [200]. Disponível em: https://www.idealhy.eu/index.php?page=lh2_outline. Acesso em: 25 out. 2022.
- IEA. Avanços na transição para energia limpa: causas e efeitos das mudanças climáticas. *Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas*. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach/progress-in-the-clean-energy-transition>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- International Energy Agency. *World Energy Outlook 2023: Executive Summary*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/executive-summary?language=es>. Acesso em: 08 maio 2024.
- LACERDA, Naylil Liria Baldin de. Os desafios da armazenagem e transporte de hidrogênio em larga escala. 2021. Disponível em: <https://gasenergy.com.br/os-desafios-da-armazenagem-e-transporte-de-hidrogenio-em-larga-escala/>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- LINARDI, Marcelo. *Introdução à Ciência e Tecnologia de Células a Combustível*. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2010. 152 p.
- Lima, Elon Lages. *Temas e problemas*. 1.ed. SBM, 2001. 193 p. Capítulo 1. ISBN 8585818166
- BLOG, Minitab. Como entender os testes t: valores-t e distribuições-t. 2019. Disponível em: <https://blog.minitab.com/pt/como-entender-os-testes-t-valores-t-e-distribuicoes-t>. Acesso em: 16 abr. 2024.
- BLOG, Minitab. O que são os valores-t e valores-p na estatística? 2019. Disponível em: <https://blog.minitab.com/pt/o-que-sao-os-valores-t-e-valores-p-na-estatistica>. Acesso em: 16 abr. 2024.
- MOREIRA, Terezinha de Jesus Rocha Vilanova; SANTOS, Marlei Rosa dos; MOREIRA, Antonia Leidiana. *ESTATÍSTICA BÁSICA para cursos de graduação*. Teresina, Pi: Eduespi, 2021. 175 p.
- Ministério do Meio Ambiente. *Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)*. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas>. Acesso em: 01 abril 2024.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente -. INDC (Contribuição Nacionalmente Determinada): convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima. **CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL%20iNDC%20portugues%20FINAL.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- NAGAO, Rafael Kenji. *Teste T de Student: tome decisões com base em apenas uma amostra*. 2022. Disponível em: <https://www.zup.com.br/blog/teste-t-de-student>. Acesso em: 11 abr. 2024.
- O QUE é o ScadaBR? 2017. Disponível em: <https://www.scadabr.com.br/>. Acesso em: 27 mar. 2024.
- QUISPE, Angel Ambrocio. *PROYECTO DE INGENIERÍA: ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO*. 2016. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Ingeniería de Energías, Instituto Latino-Americano de Tecnología, Infraestructura e Territorio (Ilatit), Universidade Federal da Integração Latino-Americana - Unila, Foz do Iguaçu, 2016.
- RIBEIRO JUNIOR, Prof. Paulo Justiniano. *Testes de hipótese para médias, proporções e variâncias: testes para comparar médias de duas populações*. Paraná, 2024. Color. Departamento de Estatística Universidade Federal do Paraná. Disponível em: http://www.leg.ufpr.br/~paulojus/estbas/slides/604_teste_de_hipotese_duas_populacoes.pdf. Acesso em: 16 abr. 2024.
- RODRIGUES, Leonardo. Entenda o que é e veja o passo a passo para realizar um Teste de Hipótese: o teste de hipótese é uma das regras mais importantes da estatística. entenda tudo sobre esse tema e veja como decidir entre as melhores opções.. O Teste de Hipótese é uma das regras mais importantes da estatística. Entenda tudo sobre esse tema e veja como decidir entre as melhores opções.. 2020. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/teste-de-hipotese>. Acesso em: 16 abr. 2024.
- ROMEU C. ROCHA FILHO (Brasil). *Tabela Periódica dos Elementos, versão 2022, já disponível para download*. 2022. Disponível em: <https://boletim.s bq.org.br/noticias/2022/n3678.php>. Acesso em: 20 mar. 2024.

- RUS-CASAS, C.; AGUILAR, J.D.; RODRIGO, P.; ALMONACID, F.; PÉREZ-HIGUERAS, P.J. Classification of methods for annual energy harvesting calculations of photovoltaic generators. *Energy Conversion and Management*, [S.L.], v. 78, p. 527-536, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.006>.
- SALARI, Mahmoud; KELLY, Inas; DOYTCH, Nadia; JAVID, Roxana J. Economic growth and renewable and non-renewable energy consumption: evidence from the u.s. states. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 178, p. 50-65, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.016>.
- SALIM, Ruhul A.; HASSAN, Kamrul; SHAFIEI, Sahar. Renewable and non-renewable energy consumption and economic activities: further evidence from oecd countries. *Energy Economics*, [S.L.], v. 44, p. 350-360, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2014.05.001>.
- SANTOS, ANA B. P. As Formas de Producao de Hidrogenio. 2023. Disponível em: <https://mitsidi.com/as-formas-de-producao-de-hidrogenio/>. Acesso em: 10 abr. 2024.
- SANTOS, Ana L.; CEBOLA, Maria-João; SANTOS, Diogo M. F. Towards the Hydrogen Economy—A Review of the Parameters That Influence the Efficiency of Alkaline Water Electrolyzers. *Energies*, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 3193, 29 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en14113193>.
- SCHULTZ, Emerson Léo; SOARES, Itânia Pinheiro. Reforma do biogás – revisão. *Circular Técnica*. Brasília, Df, p. 1-9. out. 2014.
- SCHIEBAHN, Sebastian; GRUBE, Thomas; ROBINIUS, Martin; TIETZE, Vanessa; KUMAR, Bhunesh; STOLTEN, Detlef. Power to gas: technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in germany. *International Journal Of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 40, n. 12, p. 4285-4294, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.123>.
- SHRESTHA, Anil; MUSTAFA, Andy Ali; HTIKE, Myo Myo; YOU, Vithyea; KAKINAKA, Makoto. Evolution of energy mix in emerging countries: modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 199, p. 419-432, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.018>.
- SILVA, Jorge Luiz de Castro e; FERNANDES, Maria Wilda; ALMEIDA, Rosa Livia Freitas de. *Matemática: estatística e probabilidade*. 3. ed. Fortaleza, Ce: Eduece, 2015. 128 p.
- SOUZA, Líria Alves de. Poder Calorífico de combustíveis. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/poder-calorifico-combustiveis.htm>. Acesso em: 09 abr. 2024.
- STEWART, James. *Cálculo*. Volume 1, 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2009
- STEWART, James. *Cálculo: volume 2*. 7ª 2 v. SÃO PAULO: Cengage Learning, 2014, 1044 p.
- TAVARES, Amanda. Ensaio Energético: O papel do transporte de gás natural na transição energética. 2021. Disponível em: https://ensaioenergetico.com.br/o-papel-do-transporte-de-gas-natural-na-transicao-energetica/?utm_source=mailpoet&utm_medium=email&utm_campaign=newsletter-post-title_1. Acesso em: 08 abril ago. 2024.
- TOGINHO FILHO, D. O., Laureto, E., *Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral*, Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, 2010.
- UFSC, Inf. Teste de Hipóteses: introdução. Introdução. Disponível em: https://www.inf.ufsc.br/~andre.zibetti/probabilidade/teste-de-hipoteses.html#_Teste_de_hip%C3%B3tese_. Acesso em: 16 abr. 2024.
- UMANS, Stephen D. *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed. Porto Alegre: Amgh, 2014.
- URSUA, Alfredo; GANDIA, Luis M.; SANCHIS, Pablo. Hydrogen Production From Water Electrolysis: current status and future trends. *Proceedings Of The Ieee*, [S.L.], v. 100, n. 2, p. 410-426, fev. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2011.2156750>.
- VALLE, Marcos Eduardo. MA111 - Cálculo I: aula 19 - teorema fundamental do cálculo e integrais indefinidas. Campinas: Unicamp, 2013. 37 slides, color.
- WAPPLER, Mona; UNGUDER, Dilek; LU, Xing; OHLMEYER, Hendrik; TESCHKE, Hannah; LUEKE, Wiebke. Building the green hydrogen market – Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing. *International Journal Of Hydrogen Energy*, [S.L.], v. 47, n. 79, p. 33551-33570, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.253>.
- ZENG, Kai; ZHANG, Dongke. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress In Energy And Combustion Science*, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 307-326, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>.

7 NOMENCLATURA

HV	-	Separadores horizontais de hidrogênio	$m_{H_2,fluxo}$	-	Quantidade de hidrogênio produzido pelo fluxômetro
OV	-	Separadores verticais de hidrogênio	$m_{H_2,transp}$	-	Quantidade de hidrogênio produzido transpostos
$PPHV$	-	Planta de Produção de Hidrogênio Verde	Φ	-	Fluxo volumétrico de hidrogênio
PTI	-	Parque Tecnológico de Itaipu	dt	-	Diferencial de tempo
η_F	-	Eficiência faradaica	V_{H_2}	-	Volume de hidrogênio
I_{oper}	-	Corrente elétrica operacional	z_i	-	Razão das quantidades de hidrogênio produzidos da Equação de Van der Waals pelo fluxômetro
$I_{teórica}$	-	Corrente teórica	p	-	Fator de proporção
η_{eq}	-	Eficiência eletroquímica	\bar{x}	-	Média
$\Delta G = E_{\Delta G}$	-	Energia livre de Gibbs	σ	-	Desvio padrão
F	-	Constante de Faraday	CV	-	Coefficiente de variação
E_{cell}	-	Energia na célula do eletrolisador	ρ_{H_2O}	-	Densidade da água
E_{op}	-	Energia de operação	m	-	Massa
n	-	Número de elétrons	P_{ot}	-	Potência
E_{H_2}	-	Energia hidrogênio produzido	I	-	Corrente elétrica
$E_{eletrica}$	-	Energia elétrica fornecida	V_{el}	-	Tensão elétrica
η_t	-	Eficiência termodinâmica	RC	-	Resistor-capacitor
η_s	-	Eficiência do Sistema	E	-	Energia
HV	-	Separador horizontais de hidrogênio	E_T	-	Energia total
OV	-	Separador vertical de oxigênio	E_A	-	Energia do eletrolisador A
SQL	-	Linguagem de consulta estruturada	E_B	-	Energia do eletrolisador B
IDE	-	Ambiente de desenvolvimento integrado	E_i	-	Energia individual
CSV	-	Formato de arquivo “valores separados ‘por vírgula’”	PCI	-	Poder calorífico inferior
P	-	Pressão	PCS	-	Poder calorífico superior
V	-	Volume	CE	-	Consumo específico de energia
R	-	Constante do gás ideias referente ao hidrogênio	N_{cell,H_2}	-	Número de células do eletrolisador
T	-	Temperatura Absoluta	I_{cell}	-	Corrente da célula
T_{cri}	-	Temperatura absoluta no ponto crítico	V_{cell}	-	Tensão da célula
P_{cri}	-	Pressão no ponto crítico	η_E	-	Eficiência da eletrólise
R_u	-	Constante do gás ideias	GL	-	Grau de liberdade
$m_{H_2,vdw}$	-	Quantidade de hidrogênio produzido pela Equação de Van der Waals			

8 APÊNDICES

APÊNDICE A: CÓDIGO EM PYTHON PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS MÁSSICOS DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO

```
1 # CALCULANDO A INTEGRAL DOS DADOS DE FLUXO DE MASSA EM RELAÇÃO ÀS HORAS DECIMAIS PELO MÉTODO DO TRAPÉZIO.
2 integral_numerica = np.trapz(db_hr['M_Fluxo_[Nm3/h]'], \
3                               x=db_hr['Hora_decimal'])
4
5 print("Quantidade de Fluxo de Massa em m³: ", integral_numerica)
6
7 # MULTIPLICANDO O VALOR DA INTEGRAL POR 0,0899 PARA TRAZER A QUANTIDADE DE H2 EM KG.
8 qdd_H2 = integral_numerica * 0.0899
9
10 qdd_H2_VDW = input("Digite a quantidade de H2 por VDW do mesmo dia de estudo: ")
11
12 print("Quantidade de H2 produzido em kg: ", qdd_H2)
13
14 # COMPARANDO A RPRODUÇÃO DE H2 CALCULADO E ENCONTRADO.
15 comparacao = qdd_H2_VDW / qdd_H2
16
17 print("Relação de antes e depois H2/H2: ", comparacao)
18
19 # TRAZENDO O PERCENTUAL DE APROXIMAÇÃO ENTRE A RPRODUÇÃO DE H2 CALCULADO E ENCONTRADO.
20 comparacao = comparacao * 100
21
22 # FORMATANDO O DADO DE COMPARAÇÃO
23 comparacao_format = "{:.3F}%".format(comparacao)
24
25 print("Relação Percentual de antes e depois H2/H2: ", comparacao_format)
```

APÊNDICE B: CÓDIGO EM PYTHON PARA DETERMINAR A ENERGIA CONSUMIDA PELO ELETROLISADOR NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

```
1 # CALCULANDO A INTEGRAL PELO MÉTODO DO TRAPÉZIO.
2 integral_PotenciaA = np.trapz(db_dia['Potencia_A_[kW]'], \
3                               db_dia['Hora_decimal'])
4
5 # FORMATANDO O DADO DA INTEGRAL PARA 3 DÍGITOS.
6 integral_PotenciaA = round(integral_PotenciaA , 3)
7
8 # IMPRIMINDO O RESULTADO.
9 print("Energia de A:", integral_PotenciaA, "[kJ]")
```

APÊNDICE C: PARÂMETROS OPERACIONAIS DE ESTUDO DA PPHV DO PTI

Figura a: Uma operação ocorrida a um ciclo.

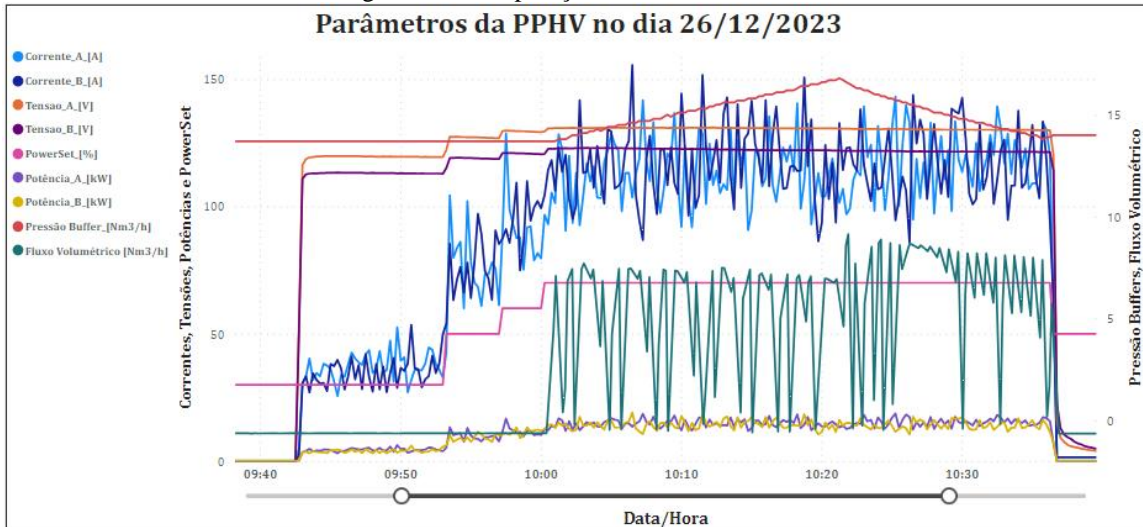


Figura b: Uma operação ocorrida a dois ciclos.

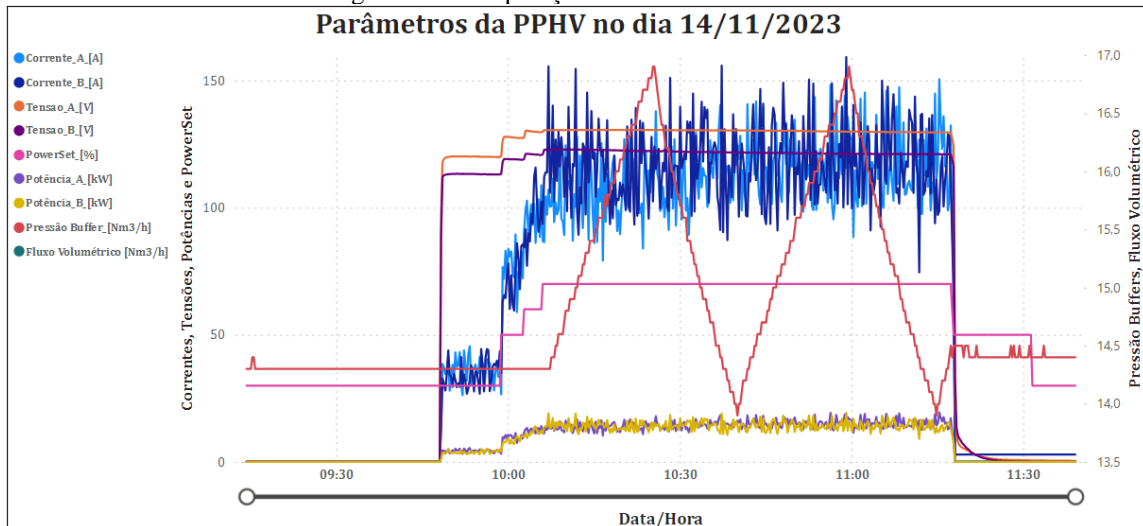


Figura c: Uma operação ocorrida a três ciclos.

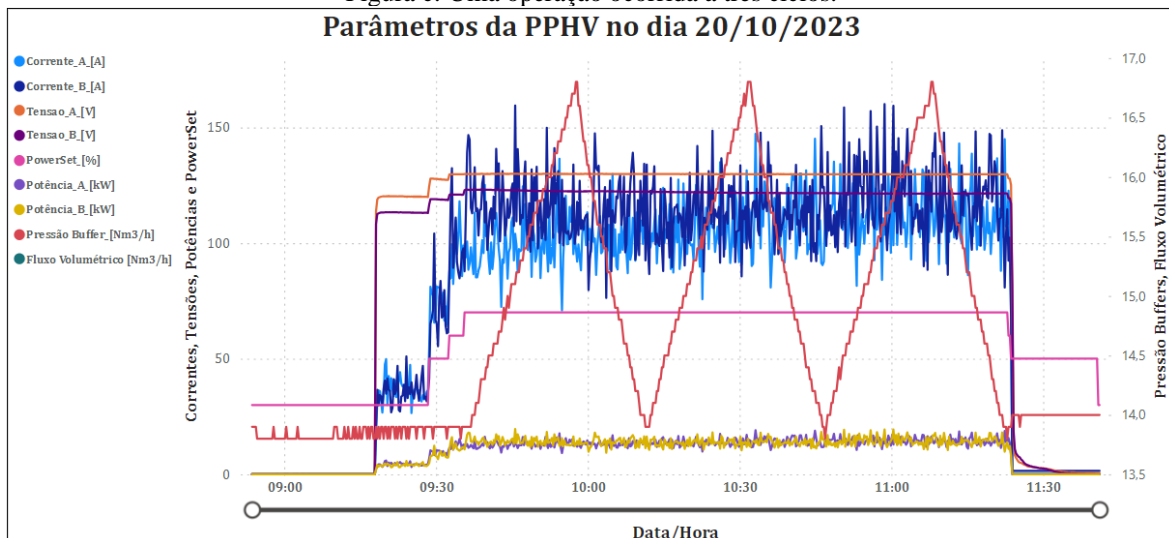


Figura d: Duas operações ocorridas a um ciclo cada.

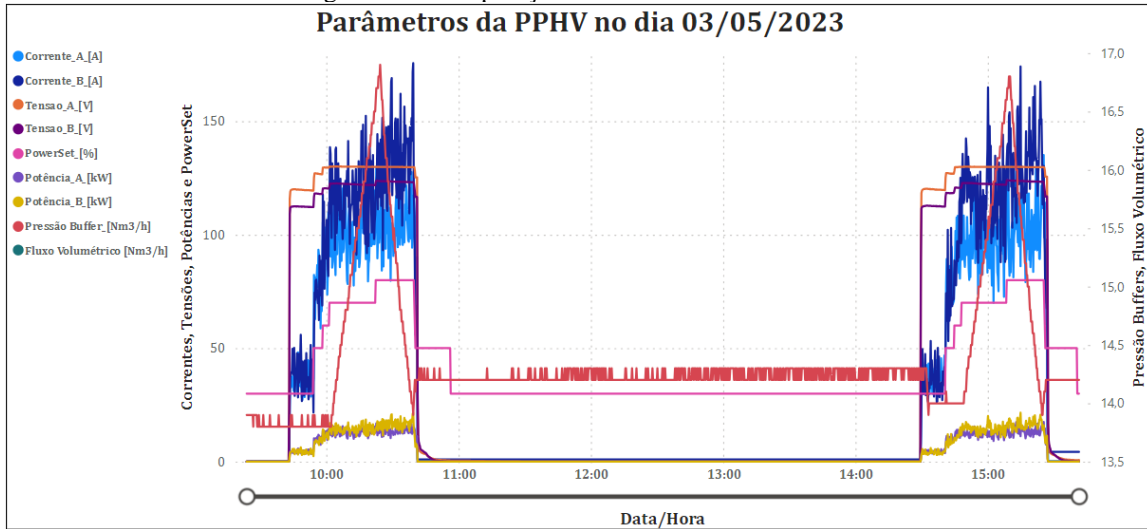


Figura e: Duas operações ocorridas a dois ciclos cada.

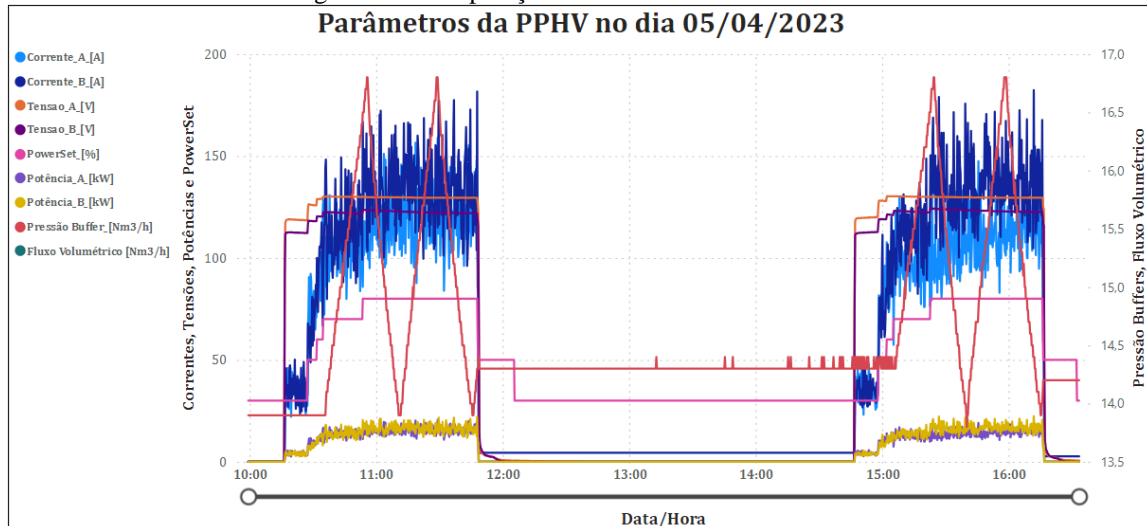


Figura f: Duas operações ocorridas a três ciclos cada.

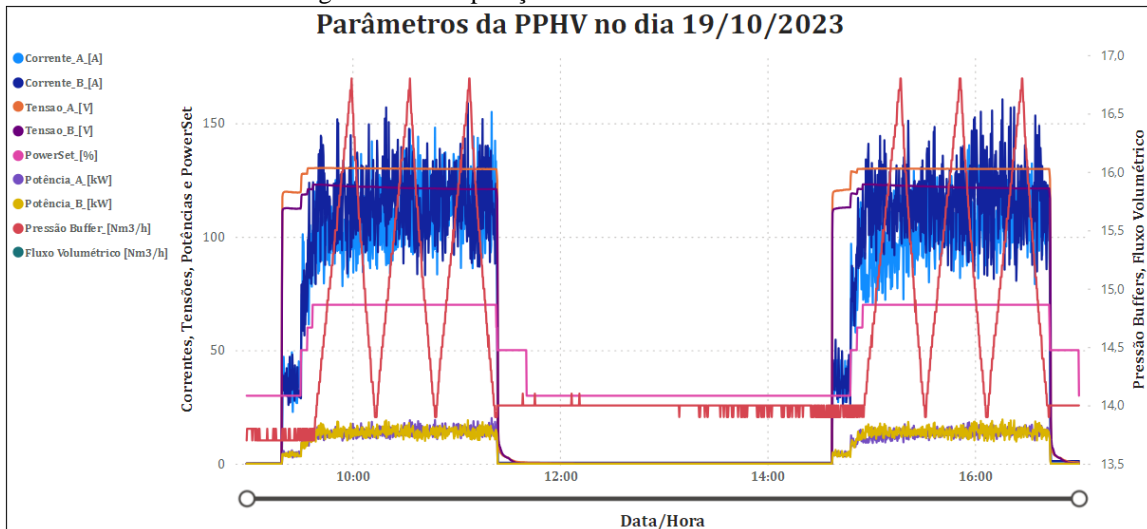


Figura g: Duas operações ocorridas a dois e um ciclo, respectivamente.

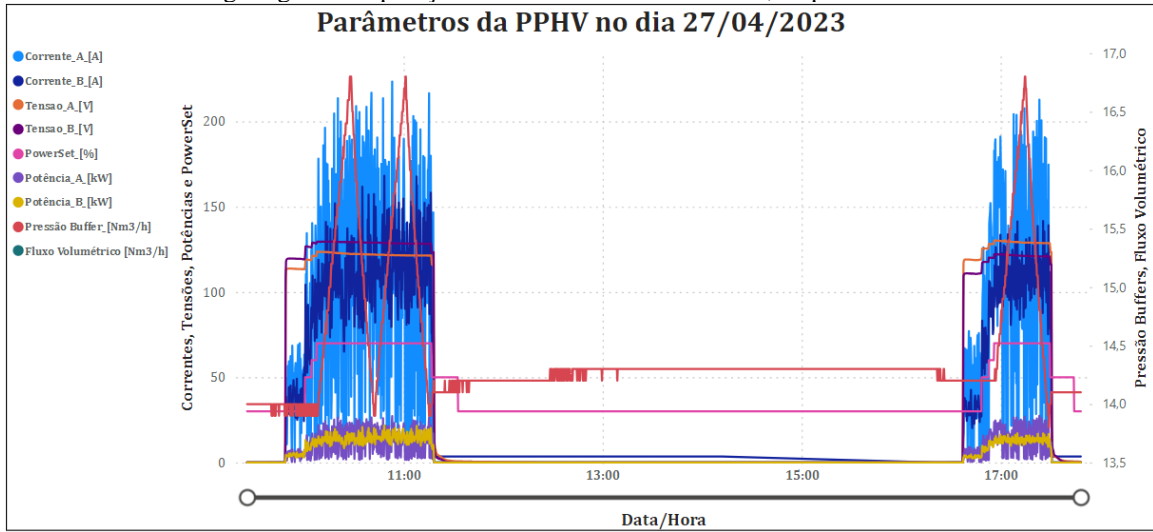


Figura h: Duas operações ocorridas a três e dois ciclos, respectivamente.

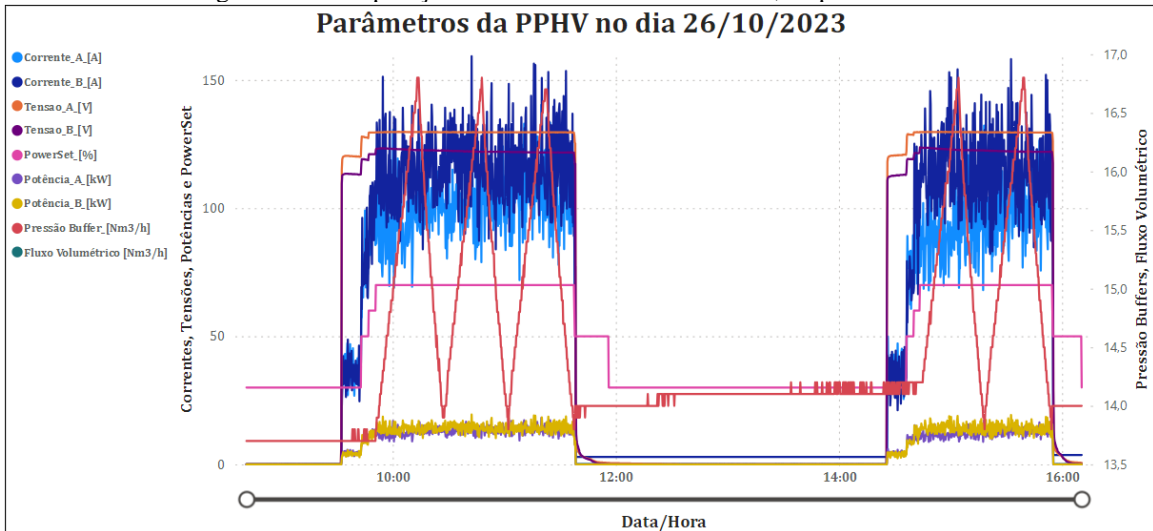


Figura i: Duas operações ocorridas a três e um ciclo, respectivamente.

