

AUTOMAÇÃO DE UMA MÁQUINA ELETROLÍTICA PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO E OXIGÊNIO – ESTUDO DE UM PROJETO EM RETROFIT

AUTOMATION OF AN ELECTROLYTIC MACHINE FOR HYDROGEN AND OXYGEN GENERATION – A RETROFIT PROJECT STUDY

AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA ELECTROLÍTICA PARA LA GENERACIÓN DE HIDRÓGENO Y OXÍGENO – ESTUDIO DE UN PROYECTO EN RETROFIT

Luciano Henrique Duquesnois Dubois¹

Alex Franco Ferreira²

RESUMO: Este artigo buscou descrever o desenvolvimento em *retrofit* de uma máquina eletrolítica, originalmente concebida em 1980. Trata-se de um eletrolisador para a produção de hidrogênio e oxigênio para pequenas soldagens, denominado "Micro Maçarico Oxídrico - MMO". O projeto inicial focava nos aspectos construtivos do produto. O *retrofit* atualiza a máquina com tecnologias de hardware e software para automação, visando maior segurança e precisão no manuseio e controle. A metodologia incluiu a remodelagem CAD a partir dos parâmetros originais do equipamento e a determinação do comportamento da corrente em função da resistividade do eletrólito e da temperatura de operação. Devido à ausência de prototipagem física, utilizou-se simulação via Inteligência Artificial (OpenAI ChatGPT) para projetar o comportamento das variáveis: corrente, temperatura e tensão ao longo do tempo. As análises indicaram que a temperatura do eletrólito aumenta significativamente sem refrigeração, o que impacta a segurança e a eficiência. A automação proposta controla a corrente através da tensão da fonte chaveada de potência, via sinal PWM de um CLP baseado em ESP32-S3. Sensores e atuadores, foram utilizados no controle do fluxo dos gases através da monitorização da pressão de saída, garantindo um fluxo seguro da mistura oxídrica, evitando o retrocesso da chama.

980

Palavras-chave: Automação Industrial. Eletrólise. Retrofit. Eletrolisador. ESP32.

ABSTRACT: This article sought to describe the retrofit development of an electrolytic machine, originally designed in 1980. It is an electrolyzer for the production of hydrogen and oxygen for small welding, called "Micro Oxyhydrogen Torch – MOT". The initial project focused on the constructive aspects of the product. The retrofit upgrades the machine with hardware and software technologies for automation, aiming for greater safety and precision in handling and control. The methodology included CAD remodeling based on the original equipment parameters and the determination of current behavior as a function of electrolyte resistivity and operating temperature. Due to the absence of physical prototyping, simulation via Artificial Intelligence (OpenAI ChatGPT) was used to project the behavior of the variables: current, temperature and voltage over time. Analysis indicated that the electrolyte temperature increases significantly without refrigeration, which impacts safety and efficiency. The proposed automation controls the current through the voltage of the switched power supply, via the PWM signal from a PLC based on ESP32-S3. Sensors and actuators were used to control the flow of gases by monitoring the outlet pressure, ensuring a safe flow of the oxyhydrogen mixture and preventing the flame from flashing back.

Keywords: Industrial Automation. Electrolysis. Retrofit. Electrolyser. ESP32.

¹Pós-graduação em Automação Industrial pela Universidade de Vassouras.

²Docente e orientador pela Universidade de Vassouras. Mestrado Profissional em Ciências Ambientais- Universidade Severino Sombra.

RESUMEN: Este artículo buscó describir el desarrollo retrofit de una máquina electrolítica, diseñada originalmente en 1980. Se trata de un electrolizador para la producción de hidrógeno y oxígeno para soldadura pequeña, denominado "Micro Oxidric Torch - MMO". El proyecto inicial se centró en los aspectos constructivos del producto. La modernización actualiza la máquina con tecnologías de hardware y software para la automatización, con el objetivo de mayor seguridad y precisión en el manejo y control. La metodología incluyó la remodelación CAD basada en los parámetros originales del equipo y la determinación del comportamiento de la corriente en función de la resistividad del electrolito y la temperatura de operación. Debido a la ausencia de prototipos físicos, se utilizó simulación vía Inteligencia Artificial (OpenAI ChatGPT) para proyectar el comportamiento de las variables: corriente, temperatura y voltaje en el tiempo. El análisis indicó que la temperatura del electrolito aumenta significativamente sin refrigeración, lo que afecta la seguridad y la eficiencia. La automatización propuesta controla la corriente a través del voltaje de la fuente de alimentación conmutada, mediante la señal PWM de un PLC basado en ESP32-S3. Se utilizaron sensores y actuadores para controlar el flujo de gases monitoreando la presión de salida, asegurando un flujo seguro de la mezcla oxidrica, evitando que la llama regrese.

Palabras clave: Automatización Industrial. Electrólisis. Retrofit. Electrolizador. ESP32.

INTRODUÇÃO

Este artigo se refere ao desenvolvimento em *retrofit* do projeto de uma máquina eletrolítica destinada à geração dos gases Hidrogênio e Oxigênio, em mistura estequiométrica, com a finalidade de realizar pequenas soldagens. Denominada “Micro Maçarico Oxídrico – MMO”, foi idealizada, originalmente, como projeto de graduação do autor, no curso de Desenho Industrial pela Escola de Belas Artes – EBA-UFRJ e apresentado em 1980. Tendo como orientadores: Leonardo Visconti Cavalleiro (EBA-UFRJ) e João Soares Rodrigues Filho (Engenheiro Químico, Instituto de Engenharia Nuclear – IEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN).

O projeto original teve o foco na natureza do Desenho Industrial, propriamente dito, atendendo ao propósito da graduação, com seus aspectos construtivos, como produto. Já o *retrofit*, apresentado neste artigo, foi proposto com o objetivo de atualização tecnológica do equipamento e dos componentes envolvidos no seu funcionamento, através do implemento de tecnologias de hardware e software voltados para automação dos processos. O objetivo deste trabalho foi trazer mais segurança e precisão no manuseio e controle do equipamento, assim como especificações dimensionais mais precisas.

Foi realizada, também, mas não objeto específico deste artigo, uma remodelagem CAD baseada nos parâmetros dimensionais originais, com fins da melhor compreensão tridimensional e funcional da máquina, possibilitando, dentre outros, a confirmação, mais precisa, dos dados propostos originalmente.

Para um melhor entendimento do projeto original, faz-se necessária a exposição de alguns fatores e aspectos técnicos da eletroquímica, assim como uma sucinta transcrição de dados importantes do projeto original, a fim de contextualizar e referenciar a proposta deste projeto atual, enquanto retrofit da máquina e, naturalmente, os valores dimensionais dos elementos do projeto. Longe da pretensão de ser conclusivo. Tem-se então, o resumo do trabalho original.

O MICRO MAÇARICO OXÍDRICO é um produto caracterizado como um equipamento industrial de pequeno porte, utilizado no campo de pequenas soldagens de peças ou reparos em locais de difícil acesso aos maçaricos convencionais. O produto utiliza como combustível uma mistura Oxídrica estequiométrica produzida pela eletrólise da água sob ação da corrente elétrica da rede (110V) retificada. A chama atinge uma temperatura de cerca de 2.600^o C na ponta de agulhas de calibres diversos. Estas agulhas são intercambiáveis, conforme se necessite chamas de comprimentos maiores ou menores, concorrendo para isto apenas regulagens da intensidade de corrente aplicada (AUTOR, 1980).

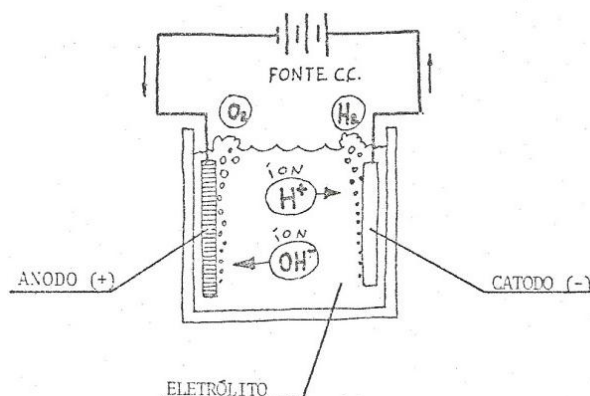
PRINCIPAIS CONCEITOS E ELEMENTOS PERTINENTES AO PROJETO ORIGINAL - FATORES QUE INTERVÊM NO RENDIMENTO DOS SISTEMAS ELETROLÍTICOS

PROCESSO ELETROLÍTICO

O processo de eletrólise da água, em definição muito simplificada, pode ser entendido como a decomposição da água nos gases O₂ e H₂, por meio de uma corrente elétrica C.C. circulando em um meio iônico, denominado eletrólito, através de eletrodos imersos neste meio. O Ânodo, eletrodo positivo, gera o oxigênio e o Cátodo, negativo, produz o Hidrogênio. O processo é, na realidade, bem mais complexo que o descrito, pois parece que os íons presentes no eletrólito, além de favorecerem a condutividade elétrica, também intervêm nas reações eletrolíticas, mas se regeneram mediante outras reações secundárias, porém influenciam a eficiência do processo.

A célula eletrolítica alcalina típica pode ser definida como um dispositivo eletroquímico que utiliza energia elétrica para promover reações químicas em um meio alcalino KOH (Hidróxido de Potássio), por exemplo. As reações ocorrem de forma não espontânea e produzem os gases Hidrogênio e Oxigênio. Uma célula eletrolítica típica pode ser observada na **Figura 1**.

Figura 1 – Célula Eletrolítica Típica



Fonte: AUTOR, 1980.

ELETRODOS

Os eletrodos são os elementos que, imersos na solução eletrolítica, transferem a corrente elétrica direcionando as partículas iônicas H^+ e OH^- para os seus respectivos polos de atração e promovendo, portanto, a decomposição da água em Hidrogênio e Oxigênio. O projeto original MMO adotou a construção de eletrodos em chapa de aço inox lisa, devido à sua ótima resistência química e facilidade de fabricação.

983

ELETRÓLITO – CONCENTRAÇÃO

Eletrólitos são compostos químicos minerais que compõe a solução eletrolítica em determinadas concentrações, a fim de potencializar a condução da corrente elétrica.

De acordo com o projeto MMO,

A concentração do eletrólito é também um importante fator. A condutividade específica que deve ter um eletrólito a certa temperatura, alcança um rendimento máximo em função de sua concentração, exceto quando aumentando-se a concentração, o ponto de saturação é alcançado antes de se conseguir a máxima condutividade. Isto não acontece, quando se usa eletrólitos básicos como KOH ou NaOH entre 0° e $100^\circ C$. Nesta faixa de temperatura, a concentração cáustica para uma máxima condutividade é alcançada também crescendo com a temperatura. Um controlado aumento da temperatura aliado a uma concentração ótima do eletrólito, a resistência tende a diminuir a valores mínimos (AUTOR, 1980).

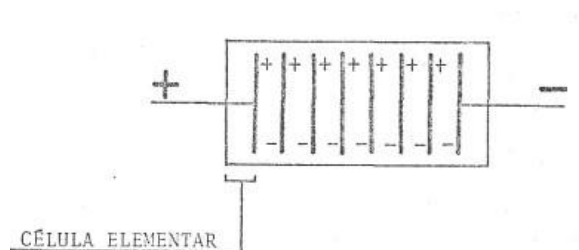
Na concepção original do MMO, o eletrólito utilizado foi o KOH e a concentração estudada foi de 5g/L. Porém, segundo Knob,

O tipo e concentração do eletrólito são também importantes na eletrólise devido à transferência iônica no eletrólito. Boa condutância de um eletrólito ajuda a transferência iônica na solução. A concentração de eletrólito também desempenha um papel importante na determinação da resistência elétrica do eletrólito. Hidróxido de potássio 25-30% é amplamente adotado em eletrolisadores comerciais (KNOB, Daniel, 2013, p.36).

CONFIGURAÇÃO BIPOLAR

O modelo do eletrolisador do MMO foi concebido na *configuração celular bipolar*, ou seja, composto pela montagem, em série, de 20 células eletrolíticas elementares, onde os eletrodos são separados por células isoladas (compartimentos contendo a solução eletrolítica, aonde os gases são gerados) assumindo cada um a polaridade positiva em uma face e negativa na outra face. Desta forma, as células não possuem contato físico direto entre si, mas se comunicam eletricamente através dos eletrodos. Os contatos elétricos de alimentação, positivo e negativo, são feitos apenas nos eletrodos da extremidade da montagem. Desta forma, cada célula reage como um eletrolisador independente, circulando uma corrente de intensidade correspondente a $1/20$ da corrente total aplicada ao eletrolisador, como visto na **Figura 2**.

Figura 2 – Configuração Bipolar



Fonte: AUTOR, 1980

984

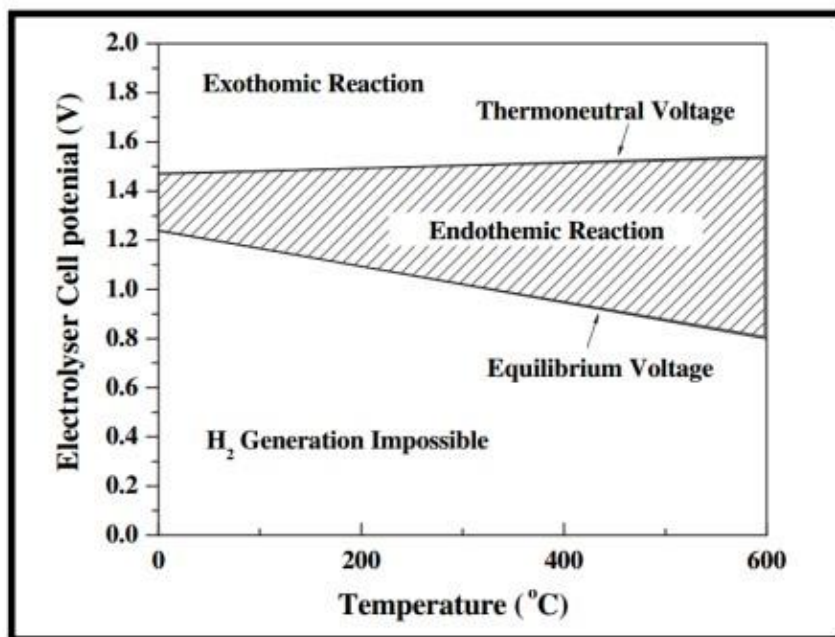
A caracterização da configuração bipolar foi descrita, também, por Natália de O. S. Santiago.

A bipolar é mais usada e consiste de dois eletrodos ligados a cada extremidade, assim a cada dois adjacentes forma uma célula unitária e essas são ligadas através da solução eletrolítica, em série. A tensão total é a soma de todas. Essa configuração reduz as perdas ôhmicas, mas exige uma precisão muito maior em sua fabricação, tendo o cuidado para não haver vazamento de eletrólito (SANTIAGO, Natália de O. S., 2015).

ZONAS DE FUNCIONAMENTO DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA - TENSÃO TERMONEUTRA

A *Tensão Termoneutra* caracteriza-se por uma faixa de valores de potencial aplicado em uma célula eletrolítica, onde a eletrólise ocorre sem gerar ou absorver calor do ambiente. Trata-se, portanto, de uma zona neutra, compreendendo uma faixa, aonde o sistema encontra um equilíbrio térmico. Natália de O. S. Santiago descreve este comportamento, conforme se observa na Figura 3.

Figura 3 - Comportamento do Potencial da Célula Eletrolítica em função da Temperatura



Fonte: SANTIAGO, Natália de O. S., 2015.

É dividido em três zonas de camadas, entre a linha de tensão de equilíbrio e a linha de tensão termo-neutro. A tensão de equilíbrio é o potencial mínimo teórico exigido para dissociar a água por eletrólise, abaixo do qual a eletrólise da água não pode prosseguir. A tensão de equilíbrio decresce com o aumento da temperatura. A tensão termo-neutra é a tensão mínima real que tem de ser aplicada para a célula de eletrólise, abaixo do qual a eletrólise é endotérmica e, acima do qual, exotérmica. A tensão termo-neutra inclui, naturalmente, os sobrepotenciais dos eletrodos, que são apenas fracamente dependentes da temperatura. Assim, a tensão termo-neutra somente apresenta um ligeiro aumento com temperatura. Se a eletrólise da água ocorre na área sombreada na Figura 13, entre a tensão de equilíbrio e a tensão termo-neutra, a reação vai ser endotérmica. (SANTIAGO, Natália de O. S., 2015).

Segundo o estudo apresentado, podemos concluir que o potencial celular ideal, para um sistema equilibrado, estaria, aproximadamente, na faixa dos 1,48V.

MODELO DO CÁLCULO PARA DETERMINAR A INTENSIDADE DA CORRENTE

Dados extraídos do projeto original para o cálculo do valor da intensidade de corrente necessária para alimentar o processo eletrolítico:

- Diâmetro interno da agulha : $\varnothing_i = 0,8\text{mm} = 0,08\text{cm}$
- Área da seção reta : $S = 0,005026\text{cm}^2$
- Velocidade de escoamento : $V = 30\text{ ft/s} = 54,864\text{cm/min}$
- Volume de gás gerado por 1 Faraday : $V \cdot 1F =$
 $1F = 6,02 \times 10^{23}\text{ eletrons} = 1608\text{ A/min}$
 $2H^+ + 2F \rightarrow H_2 \quad \text{---} 1F \quad 0,50\text{ moles } H_2$
 $2OH^- + 1/2 O_2 + H_2O + 2F \rightarrow \text{---} 1F \quad 0,25\text{ moles de } O_2$
 $\text{---} 1F \quad 0,75\text{ moles de gás}$
- $V \cdot 1F = 0,75\text{ moles de } H_2 + 1/2 O_2 = 22.400\text{ cm}^3 \times 0,75\text{ moles} =$
 $= 16.800\text{ cm}^3$
- Vazão gasosa $q = V \times S = 275,77\text{cm}^3/\text{min.}$
- Nº de Faradays $NF/\text{min} = \frac{q}{V} = 0,0164F/\text{min.}$
- Corrente necessária para 1 célula unipolar $I_u =$
 $I_u = nF/\text{min} \times 1F = 26,4A.$
- Intensidade de corrente para 20 células em série
 $I_b = \frac{I_u}{20} = 1,32A$

(Autor, 1980).

986

Com a adoção do circuito bipolar, composto por uma bateria de 20 células elementares ligadas em série, conseguiu-se reduzir a corrente necessária para a produção dos gases em 1/20 do seu valor. Tudo se passando de modo que cada célula elementar produza 1/20 da quantidade de gases necessária. Este fato tem enorme importância quando se verifica que o aquecimento do circuito está em função da intensidade de corrente aplicada (AUTOR, 1980).

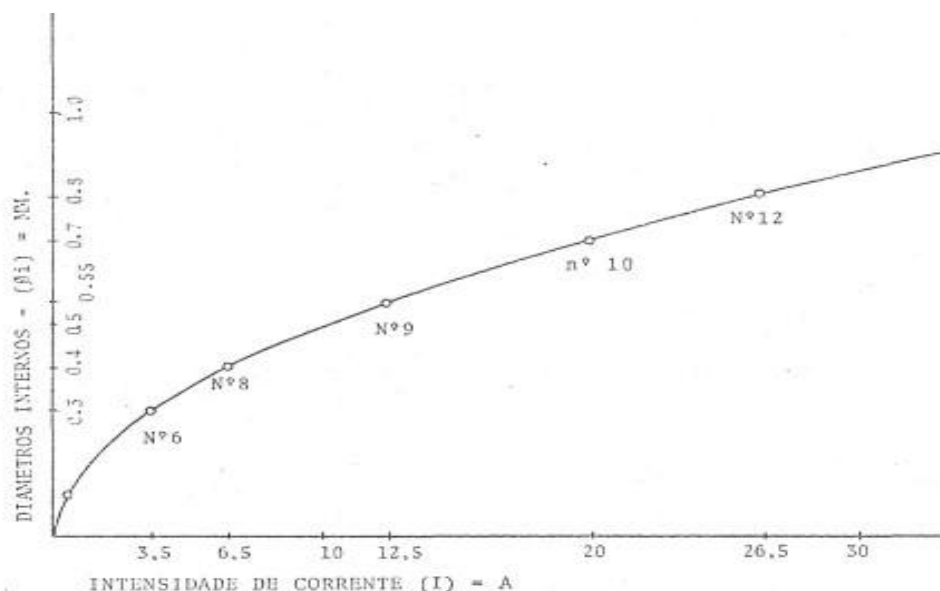
Resultado conclusivo dos cálculos

Para o uso de uma agulha, por exemplo, nº 12 (0,8mm de diâmetro interno), será necessário alimentar o eletrolisador com uma corrente de intensidade $I = 1,32A \times 20$ células para obtermos uma vazão gasosa $q = 275,77\text{ cm}^3/\text{min}$, suficiente para garantir uma velocidade de escoamento $V = 54,864\text{cm/min.}$, necessária para manter, com segurança, uma afluência dos gases sem o perigo do retorno espontâneo da chama (AUTOR, 1980).

Este cálculo apresentado foi também realizado para todas as agulhas a serem usadas, de acordo com a numeração de calibre dada pelo fabricante, resultando no levantamento de uma curva relacionando o diâmetro interno de cada agulha disponível à uma determinada

intensidade de corrente ótima, para satisfazer a velocidade de escoamento estabelecida, como visto no **Gráfico 1**.

Gráfico 1 – Relação dos diâmetros internos das agulhas vs. intensidade de corrente



Fonte: AUTOR, 1980.

MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO, EM PROJEÇÃO, DOS DADOS DAS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO PROCESSO ELETROLÍTICO DO MMO

De posse dos dados levantados do relatório do projeto original, e solidários à remodelagem CAD, buscou-se a determinação do comportamento da corrente em função da resistividade do eletrólito e da temperatura de operação com fins de determinar os parâmetros mais adequados para fornecer dados para o controle do equipamento.

O ideal, devido à natureza complexa do comportamento das variáveis envolvidas no processo eletrolítico, seria a prototipagem real de uma célula eletrolítica piloto, o que nos retornaria um entendimento muito mais completo do comportamento dessas variáveis em função deste modelo construtivo específico de eletrolisador. Mas, na ausência de recursos financeiros para subsidiar esta proposta, apresentou-se a perspectiva de uma simulação via *Inteligência Artificial (IA)*, como uma possibilidade de resolução do problema. Para isto, foi utilizado o *Open AI ChatGPT* através da elaboração de *Comandos de geração do texto* contendo questões e dados fundamentais de uma célula bipolar alcalina, embasados, tanto pelo projeto original, como pelo *retrofit* do remodelamento CAD.

A fim de melhor compreensão, somente os *Comandos de geração e Resposta* mais expressivos foram transcritos, assim como alguns trechos do texto das respostas e alguns textos dos comandos foram reorganizados e/ou ligeiramente ajustados. A IA utilizada em todos os comandos foi *OpenAI – ChatGPT*.

Observado, também, o fato de que o valor da concentração do eletrólito KOH, previsto no projeto original seria de 5 g/L. Porém, verificou-se a sugestão de valores de concentração do eletrólito da ordem de 25-30%, como "amplamente adotados em eletrolisadores comerciais" (KNOB, Daniel, 2013, p. 36). Desta forma, foi assumido como um parâmetro para um estudo inicial o valor de 20 g/L (2% em Massa/volume), o qual, ainda, estaria bem distante da margem de valores sugerida pelo autor mencionado. Mas foi aceito, neste trabalho, considerando-se a relativa baixa demanda da produção Oxídrica do eletrolisador em questão.

O Comando de geração 1:

Em um eletrolisador alcalino bipolar, composto por 20 células em uma montagem, tipo "filtro prensa", separadas por gaxeta em cordão de borracha nitrílica sólida, cada célula é construída em resina ABS, funcionando como um gerador de Hidrogênio e Oxigênio. A mistura Oxídrica se concentra em um "compartimento tubular" longitudinal no topo do eletrolisador, de diâmetro igual a 1cm, recebendo, acumulando e direcionando a mistura dos gases para uma mangueira de saída através de uma agulha de diâmetro interno igual a 0,08 cm. A fim de produzir uma chama intensa usada em pequenas soldagens. Não está previsto sistema de refrigeração, ou recirculação do eletrólito, nem separação interna dos gases hidrogênio e oxigênio.

988

Especificações

Cada célula, operando em CNTP, apresenta as seguintes características construtivas:

- Concentração do eletrólito KOH é de 20g/L
- Volume do eletrólito é de 81,6 cm³
- O gap entre os eletrodos é de 0,9cm
- Os eletrodos são em chapa inox 0.05cm de espessura
- A área dos eletrodos é igual a 90,7cm²
- Densidade da corrente nos eletrodos de 0,015 A/cm²
- A corrente para iniciar o processo eletrolítico é de 1,4 A

- A tensão do circuito irá variar em uma relação com a variação da corrente ao longo do tempo.

Forneça as projeções estimadas e análises dos valores da corrente e da temperatura do eletrólito em função do tempo (escala 0-60m), assim como, um perfil de variação dos valores de tensão relacionados à mesma escala. A análise pode ser representada em tabelas e gráficos, com relatório conclusivo do comportamento das variáveis.

Resposta ao Comando de geração 1:

Análise e Projeções do Eletrolisador Alcalino Bipolar (20 células)

Com base nos parâmetros construtivos fornecidos e nas condições operacionais presumidas, seguem as projeções das principais variáveis do sistema ao longo de 60 minutos de operação contínua:

Parâmetros Considerados:

Número de células: 20

Área do eletrodo por célula: 90,7 cm²

Densidade de corrente nominal: 0,015 A/cm²

Corrente nominal total estimada: 27,2 A

Corrente de partida: 1,4 A

Tensão por célula inicial: 1,8 V (com aumento de polarização 0,005 V/min)

Eletrólito: KOH 20 g/L, sem recirculação nem refrigeração

Temperatura inicial: 25°C

Taxa de aquecimento estimada: 0,6°C/min

989

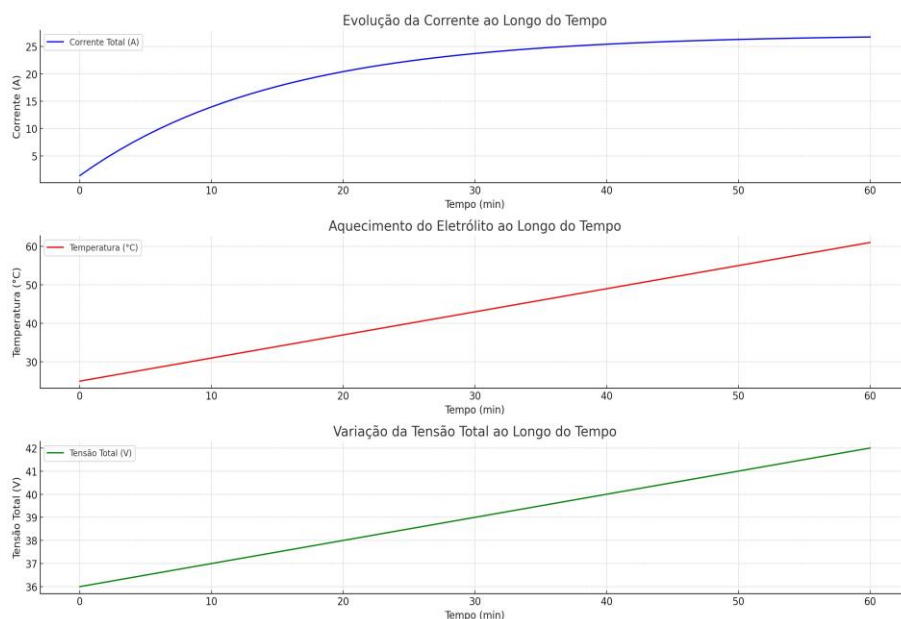
Foi gerada uma análise do comportamento das variáveis: Corrente, Temperatura e Tensão, que pode ser observado na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Relação entre as variáveis: Corrente, Temperatura e Tensão ao longo do Tempo

Tempo (min)	Corrente (A)	Temperatura (°C)	Tensão Total (V)
0	1,4	25,0	36,0
1	3,06	25,6	36,1
2	4,62	26,2	36,2
3	6,08	26,8	36,3
4	7,44	27,4	36,4
...
60	~27,2	61,0	39,0

Fonte: OpenAI-ChatGPT

Gráfico 2 – Curvas geradas para o comportamento das variáveis: *Corrente, Temperatura e Tensão*, respectivamente.



Fonte: Open AI – ChatGPT

Uma descrição dos resultados da análise foi gerada, a seguir,

Corrente (A) vs. Tempo (min):

Crescimento exponencial da corrente, refletindo o aumento de condutividade com a temperatura. Atinge valores próximos da corrente teórica (~27 A) em torno dos 60 minutos.

Temperatura (°C) vs. Tempo (min):

Aumento linear, chegando a ~61°C no final. Este aquecimento é crítico, pois afeta diretamente a eficiência e a segurança da eletrólise.

Tensão Total (V) vs. Tempo (min):

Variação leve, de 36 V para cerca de 39 V ao longo do tempo, observando a elevação por polarização eletroquímica.

(OpenAI – ChatGPT)

Conclusões da análise gerada para o comportamento das variáveis:

- *Corrente:* Aumenta significativamente com o tempo devido ao aquecimento do eletrólito, o que reduz sua resistência. Este comportamento melhora a eficiência, mas exige atenção ao controle de temperatura.
- *Temperatura:* Sem refrigeração, atinge valores potencialmente perigosos (>60°C), o que pode comprometer a integridade das gaxetas de borracha nitrílica, aumentar o risco de evaporação ou fuga de eletrólito, e promover maior degradação dos eletrodos.

- *Tensão*: Varia de forma moderada, sendo influenciada principalmente pela polarização dos eletrodos e não tanto pelo eletrólito. (OpenAI – ChatGPT)

ANÁLISE DOS DADOS E PROPOSTA PARA AUTOMAÇÃO

A partir da projeção do comportamento das variáveis do processo, e o consenso de que a corrente seria a principal variável a ser controlada, com foco na eficiência do mesmo, buscou-se dois critérios para nortear o modelo de automação. Sendo, o primeiro, o controle da corrente realizado em função do ajuste do pulso de disparo em PWM (*Pulse Width Modulation*), através da técnica de controle de ângulo de fase, pela variação do ponto no ciclo da rede AC de alimentação. Este pulso atua no *gate* dos SCRs da fonte de potência de forma precisa. Este controle é realizado pelo ESP32S3. O segundo critério seria pelo controle do fluxo da mistura dos gases produzidos, através do monitoramento do nível da pressão na saída do eletrolisador. Este seria o controle com foco na segurança, visto que a mesma depende de uma certa velocidade de escoamento mínima para evitar o grave retrocesso espontâneo da chama do maçarico.

Características técnicas do ESP32, segundo manual da Espressif Systems:

Processador: dual-core Xtensa® LX7 de 32 bits, operando até 240 MHz;

Atende demandas de cálculos complexos e operações em tempo real;

Possui módulos de PWM que podem ser configurados para gerar pulsos de disparo. O módulo de PWM *LEDC* é o mais simples para configuração dos pulsos de disparo em SCRs, atendendo um controle preciso da condução de corrente em circuitos de potência;

Pode ser programado em C++.

ESPECIFICAÇÃO DO HARDWARE DE AUTOMAÇÃO

Os componentes listados não estão precisamente especificados, pois foram selecionados e dimensionados com base em dados estimados, que somente com prototipagem de modelos reais poderiam se consolidar. Foi prevista uma lista dos componentes envolvidos no sistema de automação, como observam-se no **Quadro 1**.

Quadro 1 Componentes do sistema de Automação e suas funções

COMPONENTES	FUNÇÃO
Fonte chaveada de potência 50 A	Alimentação do Eletrolisador.
Fonte chaveada 220VAC => 12VDC	Alimentação dos conversores.
Conversor LM2596 12VDC => 5VDC	Alimentação do LCD I2C.

Conversor 158412VDC => 3,3VDC	Alimentação da Placa ESP32S3.
Placa ESP32S3	CLP.
Módulo divisor de tensão optoacoplado	Redução da tensão do pulso do Botão de partida e isolamento galvânico do CLP.
Display LCD I2C	Print valores de Corrente , Pressão , e status do Eletrolisador.
Botão de partida	Ativa e desativa o Eletrolisador.
Transdutor de corrente JXK-14 - 12VDC	Leitura e conversão da corrente e envio do sinal analógico para o CLP
Transdutor de pressão T2000 - 12VDC	Leitura e conversão da pressão e envio do sinal analógico para o CLP.
Válvula solenoide NF 12 VDC - 2/2	Retenção e Liberação do fluxo de gases: em NF retém o fluxo, em NA libera, pelo sinal do CLP.

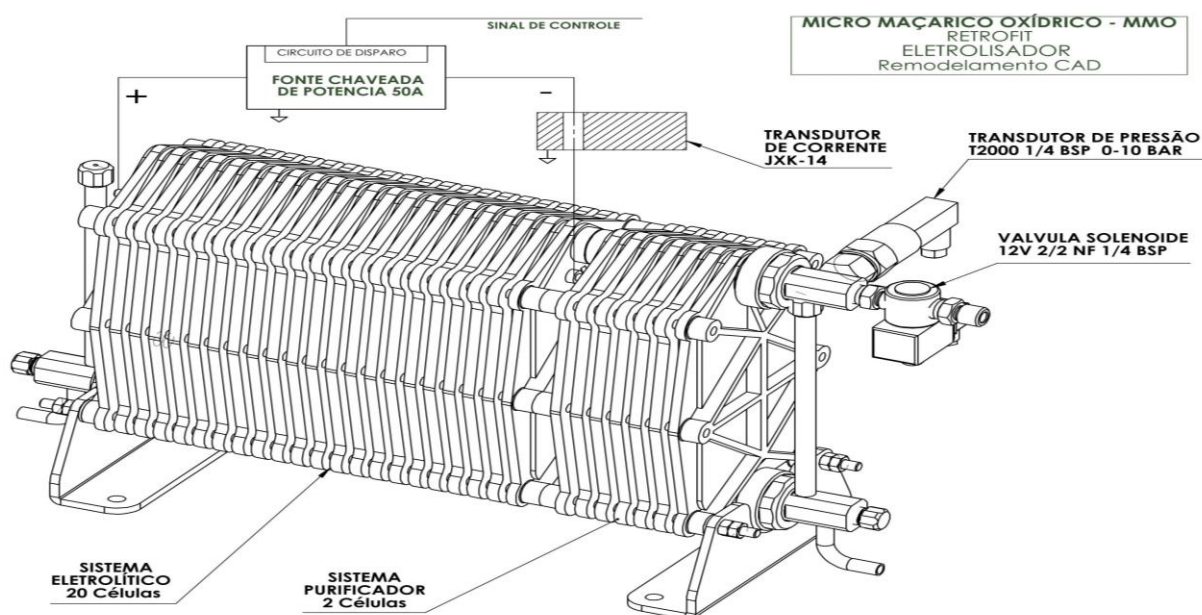
Fonte: AUTOR, 2025.

REMODELAGEM CAD

A remodelagem foi implementada a partir da ferramenta de CAD *SolidWorks*, em uma hierarquia de *Partes* (elementos primários), *Submontagens* e *Montagens*. Toda a parametrização do dimensionamento partiu de dados do projeto original. A modelagem incluiu os *sensores*, *transdutores* e *válvulas*, porque são acoplados diretamente no Eletrolisador.

Desta forma, temos a representação de vistas em 3D da Montagem do *Conjunto Eletrolítico* (Células de produção), o *Conjunto Lavador* (purificador dos gases). Está equipada com o *Transdutor de pressão* e a *Válvula solenoide*, acoplados, conforme **Figura 4**.

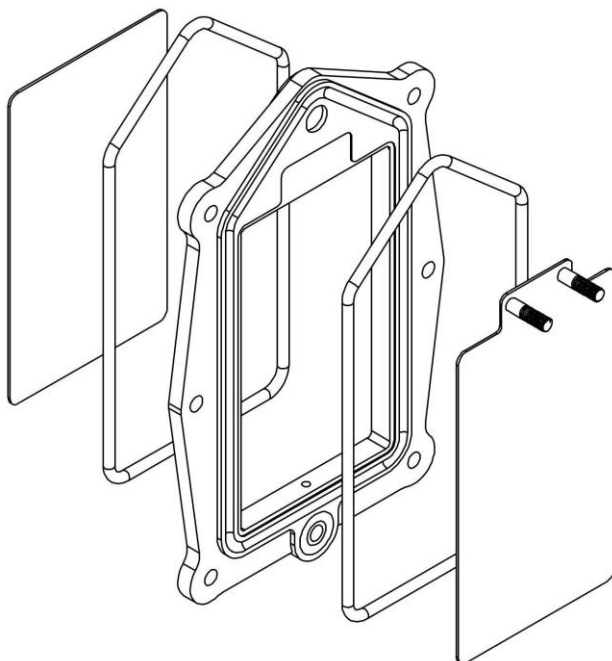
Figura 4 – MMO - Conjunto eletrolítico e Lavador.



Fonte: AUTOR, 2025.

Uma vista explodida da 1ª Célula Eletrolítica (contato elétrico) com seus eletrodos e gaxetas de vedação, como se observa na **Figura 5**.

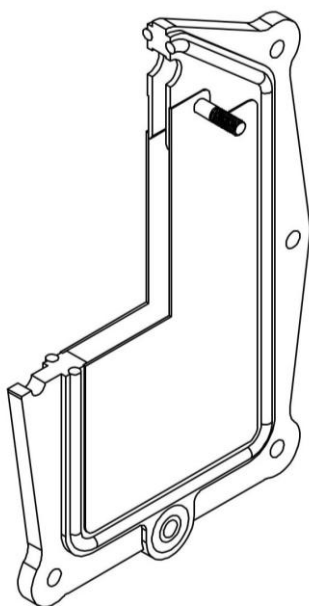
Figura 5 – Vista Explodida da 1ª Célula Eletroquímica



Fonte: AUTOR, 2025.

Uma vista em corte da 1ª Célula montada apresenta-se na **Figura 6**.

Figura 6 – Vista em corte da 1ª Célula Eletrolítica montada

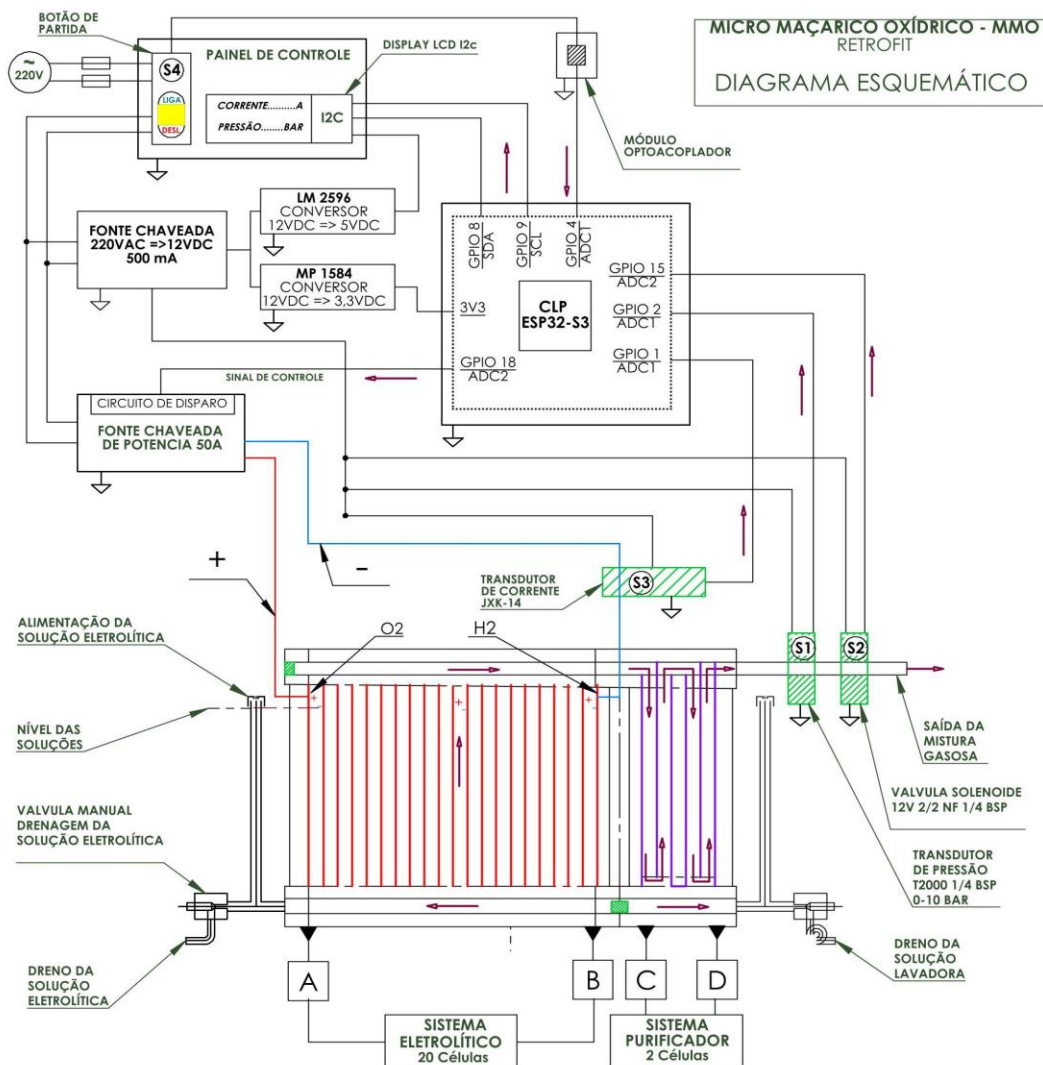


Fonte: AUTOR, 2025.

MODELO ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DO ELETROLISADOR MMO E ESTRUTURAÇÃO DO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO NO CONTEXTO DO MMO

O modelo esquemático do circuito elétrico de *potência e comando* é dado na **Figura 7**.

Figura 7 – Modelo esquemático do eletrolisador - MMO.



Fonte: AUTOR, 2025.

A partir da análise do modelo esquemático, foi elaborada a seguinte sequência estruturada do processo:

O BOTÃO DE PARTIDA (S₄) energiza a fonte de Potência, a fonte de alimentação (12VDC) e os Conversores, responsáveis pela alimentação dos sensores (S₁) e (S₃), do atuador (S₂), o CLP ESP₃₂-S₃ e o DISPLAY LCD I₂C.

OS TRANSDUTORES DE CORRENTE E PRESSÃO (S₃) e (S₁) enviam sinal da corrente

(4–20mA) para o CLP que escreve os valores da corrente e pressão no display LCD, em tempo real.

A VÁLVULA SOLENOIDE (S_2), em nível baixo, se mantém NF retendo, na saída do Eletrolisador a mistura Oxídrica em produção. A pressão na saída do Eletrolisador atinge um certo valor da ordem acima de 1 Bar, ou equivalente ou mesmo superior à uma velocidade de escoamento da ordem de 55000 cm/min. (de forma a garantir um fluxo dos gases seguro contra o retrocesso da chama).

O TRANSDUTOR DE PRESSÃO (S_1), transmite o sinal analógico do valor estipulado (que atenda a velocidade de escoamento esperada) para o CLP, que libera sinal, nível alto, para acionar a bobina da VÁLVULA SOLENOIDE (S_2), liberando a saída da mistura gasosa.

Quando a pressão cair para certo valor que comprometa a velocidade de escoamento segura, determinada, ou o BOTÃO DE PARTIDA (S_4) for desligado, a VÁLVULA SOLENOIDE (S_2) retorna para nível baixo, interrompendo o fluxo de gases e a produção do eletrolisador.

ESTRUTURA DO SOFTWARE

Baseada na sequência estruturada do processo, um Comando de texto foi elaborado e remetido para ferramenta OpenAI – Chat GPT.

995

O Comando de geração 2:

Implemente um controle automático proporcional da tensão, com o objetivo de compensar o aumento da corrente ao longo do tempo, melhorando a eficiência do processo eletrolítico. Aplicada à fonte de alimentação do eletrolisador controlada por tiristores (SCR). Baseada em Esp32-S3 e programada em C++, a fim de compensar o desequilíbrio natural da corrente no decorrer do tempo, minimizar a perda de produtividade do eletrolisador, melhorando a segurança do sistema.

Forneça um programa detalhado com comentários, para este controle proporcional, em malha fechada, com os melhores parâmetros de correção da tensão, para resolver o processo.

Resposta ao Comando de geração 2:

Lógica de Controle:

Malha fechada proporcional (P): ajusta a tensão com base no erro entre corrente medida e corrente-alvo (25 A).

Ganho proporcional $k_p = 10.0$: proporciona resposta rápida sem oscilações, ideal para controle robusto com SCR.

PWM via ESP32: canal PWM configurado para acionar o controle de disparo dos tiristores (SCR).

Controle da válvula solenoide: ativada quando a pressão ultrapassa 1,2 bar e desativada se cair abaixo de 0,9 bar ou se o sistema for desligado.

Feedback e Visualização:

Display LCD mostra corrente e pressão em tempo real.

Botoeira controla o estado geral do sistema.

Fonte SCR com controle via PWM.

Sensor de corrente (como ACS712 ou equivalente).

Sensor de pressão linear (0-2 bar).

Display LCD com interface I2C.

Solenóide 12V/24V normalmente fechada.

ALGORITMO DO PROCESSO

O Algoritmo do Processo foi idealizado e adaptado livremente pelo Autor, a partir de consultas diversas a diferentes ferramentas de IA, com objetivo de aperfeiçoamento e compatibilização com o Modelo Esquemático do MMO e pode ser observado no **Quadro 1**.

Quadro 1 – Algoritmo de automação do controle proporcional da tensão PWM.

PROJETO MICRO MAÇARICO OXÍDRICO-MMO -RETROFIT-
Placa ESP32S3 Dev Module
=====
1. INICIALIZAÇÃO (SETUP)
1.1. Configurar Serial (115200 bps)
1.2. Configurar ADC (12 bits, resolução 4095)
1.3. Inicializar I2C e LCD (GPIO8=SDA, GPIO9=SCL)
1.4. Configurar pinos GPIO:
- GPIO1: Entrada analógica (sensor corrente)
- GPIO2: Entrada analógica (sensor pressão)
- GPIO4: Entrada digital (botão START)
- GPIO15: Saída digital (válvula solenoid)
- GPIO18: Saída PWM (controle SCR)
1.5. Configurar PWM (Canal 0, 5kHz, 8 bits)
1.6. Exibir mensagem de boas-vindas no LCD
2. LOOP PRINCIPAL
2.1. Executar debounce do botão START
- Filtrar ruído (50ms)
- Implementar toggle (liga/desliga)
2.2. Controle de tempo não-bloqueante
- Verificar se passaram 500ms
- Se NÃO: aguardar 10ms e continuar
- Se SIM: executar leitura e controle
2.3. Leitura dos sensores
- Ler corrente: GPIO1 convertido para 0-50A
- Ler pressão: GPIO2 convertido para 0-2 bar

2.4. Decisão do estado do sistema
SE sistema ATIVO:
2.4.1. Executar controle PID simplificado
- Calcular erro: $\text{setpoint} - \text{corrente_atual}$
- Calcular correção: $k_p \times \text{erro}$
- Aplicar PWM: $\text{base} + \text{correção}$ (limitado 0-255)
2.4.2. Controle da válvula com histerese
SE pressão ≥ 1.2 bar E válvula fechada:
- Abrir válvula (GPIO15 = HIGH)
SE pressão ≤ 0.9 bar E válvula aberta:
- Fechar válvula (GPIO15 = LOW)
2.4.3. Exibir no LCD: "I:XX.XA P:X.XB" / "Sistema ATIVO"
SE sistema INATIVO:
2.4.4. Desativar PWM (valor = 0)
2.4.5. Fechar válvula (GPIO15 = LOW)
2.4.6. Exibir no LCD: "Sistema PARADO" / "Pressione START"
2.5. Debug via Serial
- Enviar valores de corrente e pressão
- Reportar estado da válvula
2.6. Atualizar display LCD
2.7. Retornar ao início do loop
3. FUNÇÕES AUXILIARES
3.1. lerCorrente(): Converte ADC para amperes
3.2. lerPressao(): Converte ADC para bar
3.3. controlarTensao(): Implementa controle proporcional
3.4. lerBotaoComDebounce(): Filtro antirruído do botão
3.5. atualizarDisplay(): Gerencia informações do LCD
4. PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO
- Setpoint de corrente: 25.0A
- Pressão mínima: 0.9 bar
- Pressão máxima: 1.2 bar
- Ganho proporcional (kp): 10.0
- PWM base: 100.0
- Frequência PWM: 5000 Hz
- Tempo de debounce: 50ms
- Intervalo de atualização: 500ms

Fonte: AUTOR, 2025.

CÓDIGO DO CONTROLE PROPORCIONAL DE TENSÃO PWM EM C++

Comentário sobre o código

Este código foi gerado, inicialmente, pelo *OpenAI – ChatGPT*, revisto no *Copilot* e finalizado no *ClaudeAI* e revisado e compilado pelo autor.

Link para o código da automação

https://github.com/lucianodubois/Micro_Macarico_Oxidrico/

CONCLUSÃO

A ausência de estudos baseados em prototipagens reais do processo eletrolítico do MMO, os quais teriam trazido uma visão mais robusta dos impactos implementados neste projeto: *Retrofit do MICRO MAÇARICO OXÍDRICO – MMO* foi atenuada pela proposta metodológica, apresentada neste artigo, na forma a seguir:

O modelo de controle automatizado da corrente do eletrolisador MMO é feito através do ajuste da potência entregue ao circuito eletrolítico via sinal PWM gerado pelo ESP32-S3. A variação da largura dos pulsos aplicados no circuito de disparo dos SCRs da fonte de potência mostrou-se, tecnicamente, bastante eficiente. Aliado a um modelo de hardware de relativo baixo custo. Com a utilização de apenas 2 sensores, sendo um controlando a *Corrente* e outro a *Pressão*, mantendo as variáveis, em valores operacionais adequados. Verificando-se, como principais características deste modelo, a escalabilidade, a simplicidade e confiabilidade.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho de trazer mais segurança e precisão no manuseio e controle do equipamento, assim como especificações dimensionais mais precisas, foi plenamente alcançado

REFERÊNCIAS

BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. 2001. (mencionado por OpenAI – ChatGPT)

CARMO, M., et al. A comprehensive review on PEM water electrolysis. In: *Journal of Hydrogen Energy*. 2013. (mencionado por OpenAI – ChatGPT)

DADOS empíricos de projetos semelhantes com células bipolares de KOH. (mencionado por OpenAI – ChatGPT)

KNOB, Daniel. *Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica*. Dissertação de Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais). 2013. 125 p.

Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-11062014-143621/publico/2013KnobGeracao.pdf>> Acesso em 26 jun 2025.

SANTIAGO, Natália de O. S.. *Eletrolisador Alcalino Bipolar: Avaliação de Eletrodos a Base de Espuma de Níquel Usando Energia Fotovoltaica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. 2015. 106 p. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/286/3/NAT%20OLIVEIRA%20SANTIAGO%20-%20DISSERTA%2087%20PPGEQ%20CCT%202015.pdf>> Acesso em 26 jun 2025.

UPAC Recommendations on Electrolysis & Electrode Kinetics. (mencionado por OpenAI-ChatGPT)