ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CONTROLE PID PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE COM ENERGIA FOTOVOLTAICA

ANALYSIS OF PID CONTROL TECHNIQUES FOR GREEN HYDROGEN PRODUCTION WITH PHOTOVOLTAIC ENERGY

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE CONTROL PID PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA

10.56238/IIMultiCientifica-154

Luciano Marcelo Lucena da Silva
Mestre em Energias Renováveis
Instituição: Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
E-mail: lumarcelo@gmail.com

Júlio Inácio Holanda Tavares Neto
Doutor em Engenharia Química
Instituição: Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
E-mail: julio.neto@ceca.ufal.br

Leonardo Faustino Lacerda de Souza
Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares
Instituição: Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
E-mail: leonardo.souza@ceca.ufal.br

Amanda Santana Peiter
Doutora em Engenharia Química
Instituição: Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
E-mail: amanda.peiter@ceca.ufal.br

RESUMO
Este artigo analisa o desempenho de diferentes técnicas de controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) aplicadas a um conversor de corrente contínua do tipo Buck destinado ao fornecimento estável de energia elétrica a uma célula eletrolítica alimentada por módulos fotovoltaicos, visando à produção contínua de hidrogênio verde. A metodologia compreendeu a modelagem matemática do conversor por valor médio, a obtenção de sua função de transferência de segunda ordem e a implementação de dezoito modalidades de controlador PID no ambiente Simulink do MATLAB, versão R2026a. Cada controlador foi sintonizado e avaliado quanto ao desempenho transitório, tempo de subida, tempo de acomodação e sobressinal, e à robustez, mensurada pelo pico de sensibilidade. Os resultados demonstraram que controladores de ação simples, como P e I, são inadequados devido à instabilidade ou à lentidão excessiva, enquanto estruturas compostas de dois graus de liberdade com pesos de ponto de ajuste fixos, sobretudo o controlador I-PDF, eliminam completamente o sobressinal e apresentam robustez ideal. O controlador I-PDF proporcionou o melhor compromisso entre rapidez, estabilidade e rejeição a distúrbios, com tempo de acomodação de aproximadamente 3 ms, mantendo a tensão

constante mesmo diante de perturbações típicas da geração fotovoltaica. Conclui-se que técnicas clássicas de controle, quando adequadamente estruturadas, viabilizam sistemas eficientes e de baixo custo para a produção de hidrogênio verde.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde. Energia Fotovoltaica. Conversor Buck. Controle PID. Eletrólise da Água.

ABSTRACT

This paper analyzes the performance of different Proportional-Integral-Derivative (PID) control techniques applied to a Buck DC-DC converter intended to provide a stable electrical power supply to an electrolytic cell fed by photovoltaic modules, aiming at the continuous production of green hydrogen. The methodology included average-value mathematical modeling of the converter, derivation of its second-order transfer function, and implementation of eighteen PID controller configurations in MATLAB Simulink (R2026a release). Each controller was tuned and evaluated for transient performance, rise time, settling time, and overshoot, and robustness, measured by the sensitivity peak. The results showed that single-action controllers, such as P and I, are inadequate because of instability or excessive sluggishness, whereas two-degree-of-freedom structures with fixed set-point weights, especially the I-PDF controller, eliminate overshoot and exhibit ideal robustness. The I-PDF controller provided the best trade-off among speed, stability, and disturbance rejection, with a settling time of approximately 3 ms, keeping the voltage constant even under disturbances typical of photovoltaic generation. It is concluded that classical control techniques, when properly structured, enable efficient and low-cost systems for green hydrogen production.

Keywords: Green Hydrogen. Photovoltaic Energy. Buck Converter. PID Control. Water Electrolysis.

RESUMEN

Este artículo analiza el desempeño de diferentes técnicas de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) aplicadas a un convertidor de corriente continua del tipo Buck destinado al suministro estable de energía eléctrica a una celda electrolítica alimentada por módulos fotovoltaicos, buscando la producción continua de hidrógeno verde. La metodología comprendió el modelado matemático del convertidor por valor promedio, la obtención de su función de transferencia de segundo orden y la implementación de dieciocho modalidades de controlador PID en el ambiente Simulink de MATLAB, versión R2026a. Cada controlador fue sintonizado y evaluado en cuanto al desempeño transitorio, tiempo de elevación, tiempo de asentamiento y sobreimpulso, y a la robustez, medida por el pico de sensibilidad. Los resultados demostraron que controladores de acción simple, como P e I, son inadecuados debido a la inestabilidad o a la lentitud excesiva, mientras que estructuras compuestas de dos grados de libertad con pesos de punto de ajuste fijos, sobre todo el controlador I-PDF, eliminan completamente el sobreimpulso y presentan robustez ideal. El controlador I-PDF proporcionó el mejor compromiso entre rapidez, estabilidad y rechazo a perturbaciones, con tiempo de asentamiento de aproximadamente 3 ms, manteniendo la tensión constante incluso ante perturbaciones típicas de la generación fotovoltaica. Se concluye que técnicas clásicas de control, cuando están adecuadamente estructuradas, viabilizan sistemas eficientes y de bajo costo para la producción de hidrógeno verde.

Palabras clave: Hidrógeno Verde. Energía Fotovoltaica. Convertidor Buck. Control PID. Electrólisis del Agua.

1 INTRODUÇÃO

No cenário energético contemporâneo, a transição para fontes limpas e renováveis tornou-se imperativa diante dos impactos ambientais associados aos combustíveis fósseis. Nesse contexto, o hidrogênio destaca-se como um vetor energético promissor, capaz de contribuir decisivamente para a descarbonização de setores intensivos em energia, como o transporte pesado, a siderurgia e a indústria química (Agostinho e Ribas, 2023; IEA, 2019). Quando produzido a partir de fontes renováveis, o hidrogênio é denominado hidrogênio verde e representa uma solução com emissões de carbono praticamente nulas.

Entre as rotas tecnológicas disponíveis, a eletrólise da água alimentada por energia solar fotovoltaica sobressai-se pela sustentabilidade e pela abundância do recurso primário. Entretanto, o acoplamento direto entre arranjos fotovoltaicos e eletrolisadores apresenta desafios técnicos relevantes. A natureza intermitente e estocástica da radiação solar, aliada às variações de temperatura, resulta em oscilações severas na potência elétrica gerada. Como os eletrolisadores exigem níveis contínuos e estáveis de tensão e corrente para operar com eficiência e segurança, a conexão direta resulta em baixa eficiência na transferência de energia e em degradação prematura das células eletrolíticas (Ghosh, 2025).

Para contornar essas não linearidades e garantir a máxima eficiência do sistema, torna-se imprescindível o uso de interfaces de eletrônica de potência. Os conversores estáticos de potência contínua (CC-CC) têm a função de adequar os níveis de tensão gerados pelos módulos solares aos exigidos pelo eletrolisador. O conversor do tipo *Buck*, um abaixador de tensão, é frequentemente empregado nessas aplicações, uma vez que a tensão de saída dos arranjos fotovoltaicos costuma ser superior à tensão de operação dos módulos eletrolisadores, o que requer um rebaixamento controlado e eficiente (Erickson; Maksimovic, 2020; Kumaraguruparan; Elango, 2024).

O problema surge quando ocorrem distúrbios na entrada e na saída do sistema, e a robustez dessa interface de potência depende intrinsecamente da estratégia de controle adotada. Para lidar com perturbações externas na entrada, como passagem de nuvens, sombreamento parcial e variações térmicas, e com distúrbios causados no próprio eletrolisador, o uso de malhas de controle em tempo real é obrigatório. O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) atua sobre a Modulação por Largura de Pulso (PWM), ajustando dinamicamente o ciclo de trabalho (*Duty Cycle*) da chave semicondutora do conversor *Buck*. A ação do PID minimiza o erro entre as grandezas elétricas de referência e as medidas no barramento, rejeitando distúrbios e mantendo a produção de hidrogênio

verde constante. Coloca-se, então, a questão central: qual configuração de controlador PID é a mais adequada para atuar no ciclo de trabalho do conversor *Buck*, de modo a manter a produção de hidrogênio verde constante após a ocorrência de um distúrbio?

A relevância do tema é reforçada pela escala projetada para o setor. Estima-se que a demanda global de hidrogênio poderá crescer de forma expressiva até 2050, a depender de avanços tecnológicos, marcos regulatórios e investimentos em infraestrutura, o que evidencia a necessidade de soluções de conversão e controle cada vez mais eficientes e economicamente viáveis (Gomonov; Permana; Handoko, 2025; Ghosh, 2025). Nesse cenário, o aprimoramento das interfaces de eletrônica de potência que conectam a geração fotovoltaica aos eletrolisadores torna-se um fator determinante para a competitividade da rota de produção de hidrogênio verde.

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver, modelar e avaliar comparativamente diferentes técnicas de controle PID aplicadas ao conversor CC-CC do tipo *Buck*, de modo a manter constante a tensão elétrica no eletrolisador e, por consequência, a corrente elétrica, mesmo diante de distúrbios na geração solar fotovoltaica ou no próprio eletrolisador. Para tanto, desenvolveu-se um modelo matemático do conversor por meio de sua função de transferência, seguido da configuração e simulação do sistema no aplicativo *Simulink* do *MATLAB*, versão R2026a, com a modelagem de dezoito modalidades de controladores PID e a análise de sua sintonia em função da dinâmica do processo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para que o dimensionamento e o controle de um sistema de produção de hidrogênio verde sejam bem-sucedidos, é necessário compreender o comportamento dinâmico e as não linearidades dos elementos que o compõem. Esta seção apresenta as bases teóricas do sistema em estudo: a conversão de energia solar em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, a eletroquímica do processo de eletrólise da água do mar, o conversor CC-CC do tipo *Buck* e os fundamentos dos controladores PID e suas variantes.

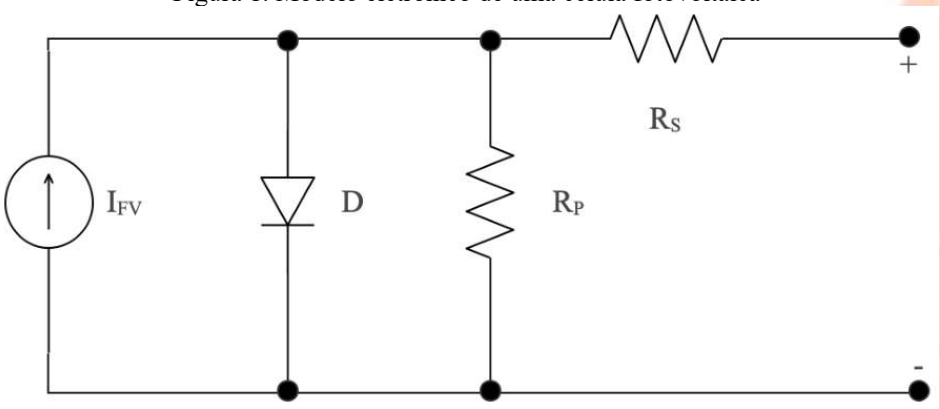
2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica consolidou-se como uma das principais fontes renováveis de geração elétrica, impulsionada pela crescente demanda por soluções sustentáveis e pela redução dos custos tecnológicos. O efeito fotovoltaico corresponde ao processo de conversão direta da radiação

solar em energia elétrica, que ocorre quando fótons incidentes interagem com materiais semicondutores e geram pares elétron-lacuna. Esse fenômeno é explorado em células solares baseadas em junções PN, nas quais se estabelece um campo elétrico interno responsável pela separação e condução das cargas elétricas para um circuito externo (Al-Ezzi; Ansari, 2022).

O modelo eletrônico mais comum de uma célula fotovoltaica, apresentado na Figura 1, é composto por uma fonte de corrente elétrica ligada em paralelo a um diodo intrínseco da célula, que, por sua vez, está ligado em paralelo a um resistor RP. Esse arranjo está em série com um resistor RS, que liga os componentes à saída do modelo. A corrente elétrica de uma célula fotovoltaica única, sob incidência de luz, é da ordem de miliamperes e depende da intensidade luminosa, enquanto a tensão elétrica é de aproximadamente 0,7 V, correspondente à tensão do diodo em células de silício.

Figura 1. Modelo eletrônico de uma célula fotovoltaica



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Os módulos fotovoltaicos podem ser classificados em três grandes grupos tecnológicos: silício cristalino, dominante no mercado e subdividido em monocristalino e policristalino; filmes finos, que incluem materiais como o telureto de cádmio (CdTe) e o seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS); e perovskitas, materiais sintéticos com alta capacidade de absorção de luz solar. Estudos recentes destacam que avanços em materiais e em tecnologias de múltipla junção têm proporcionado ganhos expressivos de eficiência (Machin; Marquez, 2024; Maldonado; Maldonado, 2024). Segundo Chen *et al*. (2025), células de perovskita atingiram eficiência certificada de até 26,4%, e o National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2024) reporta que células de perovskita com silício alcançaram eficiência de até 34%.

Apesar dessa evolução, a inserção segura da energia fotovoltaica passa, obrigatoriamente, pelo controle rigoroso da estabilidade da tensão e da corrente nos módulos. Enquanto, em aplicações de

rede, esse controle é realizado por inversores inteligentes com algoritmos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT), na geração de hidrogênio verde, a utilização e o tipo de controlador PID são determinantes para a manutenção da potência elétrica entregue à célula eletrolítica (Soares *et al*., 2023).

O aproveitamento do potencial solar na região Nordeste do Brasil tem demandado abordagens metodológicas e tecnológicas cada vez mais refinadas para mitigar os efeitos da intermitência climática (Silva Júnior; Ramos, 2026). No estado de Alagoas, e particularmente na cidade de Maceió, o desenvolvimento dessas estratégias de controle depende diretamente da precisão na modelagem da irradiância solar local, fortemente influenciada pelo microclima costeiro e pela nebulosidade híbrida. Pesquisas recentes indicam que a modelagem da irradiância horária tem migrado de abordagens estatísticas clássicas para técnicas avançadas de inteligência artificial, sobretudo arquiteturas de *Machine Learning*, que apresentam erros quadráticos médios significativamente menores na previsão da irradiância disponível (Oliveira; Queiroz; Aquino, 2025). Essa integração entre previsão preditiva e sistemas robustos de controle de potência constitui núcleo fundamental para otimizar a eficiência energética na região.

2.2 ELETRÓLISE DA ÁGUA DO MAR E A CÉLULA ELETROLÍTICA

A eletrólise da água consiste na decomposição da molécula de água em seus elementos constituintes (hidrogênio e oxigênio) por meio da aplicação de corrente elétrica em uma célula eletrolítica. Quando alimentada por energia solar ou eólica, essa tecnologia viabiliza a produção de hidrogênio verde com emissões de carbono praticamente nulas (Wang; Cao; Jiao, 2022). A eletrólise da água do mar, em particular, permite gerar hidrogênio de alta pureza a partir de um recurso abundante, com a produção de hipoclorito de sódio como subproduto (Wu *et al*., 2025). Uma célula eletrolítica é composta por dois eletrodos imersos em um eletrólito aquoso que contém íons móveis: o ânodo, associado ao potencial positivo, e o cátodo, associado ao potencial negativo, além de uma fonte externa de energia que viabiliza reações eletroquímicas não espontâneas.

As células eletrolíticas podem ser classificadas em diferentes tipos, como a eletrólise alcalina (AWE), a eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM) e a eletrólise de óxidos sólidos (SOE), cada qual com características específicas quanto à eficiência, à temperatura de operação, aos materiais empregados e às aplicações potenciais (Dawood; Anda; Shafiullah, 2020). No Brasil, a matriz elétrica majoritariamente renovável oferece condições favoráveis à geração de hidrogênio verde em larga

escala (Silva *et al*., 2025b; Silva Júnior *et al*., 2025), com iniciativas relevantes já consolidadas, como o hub de hidrogênio verde do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no Ceará. Contudo, as mesmas fontes alertam para os limites físicos dessa ambição, uma vez que a concretização de todos os projetos anunciados exigiria uma parcela expressiva da capacidade solar e eólica atualmente instalada no país (Caiafa; Romijn; De Coninck, 2025).

Como a água do mar contém sal dissolvido, com concentração média de NaCl em torno de 30 g/L, ocorrem reações de oxidação e redução nos eletrodos, cujas semirreações combinadas resultam na reação global do processo, expressa pela Equação 1.

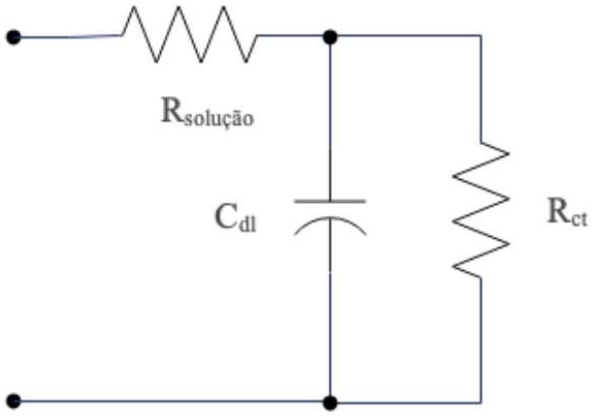
$$NaCl(aq) + H_2O(l) \rightarrow NaClO(aq) + H_2(g) \quad (1)$$

Do ponto de vista termodinâmico, a reação global da eletrólise da água é endotérmica e não espontânea, o que requer energia externa. A tensão teórica mínima necessária para iniciar a eletrólise, denominada tensão reversível (Vrev), relaciona-se à energia livre de Gibbs por meio da equação de *Nernst*, apresentada na Equação 2, em que z é o número de elétrons transferidos por molécula de água (z = 2) e F é a constante de Faraday (96 485 C/mol).

$$Vrev = \Delta G / (z \cdot F) \quad (2)$$

Nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), o valor da tensão reversível é de aproximadamente 1,23 V. Na prática, porém, a tensão real de operação de uma célula eletrolítica é sempre superior, devido a perdas irreversíveis conhecidas como sobretensões. Para representar esse comportamento em simulações de sistemas de potência, adota-se o modelo elétrico equivalente da célula, fundamentado no circuito de *Randles* (Lasia, 2014). Nesse modelo, apresentado na Figura 2, a resistência da solução (Rsolução) representa a contribuição ôhmica do eletrólito, a capacitância de dupla camada (Cdl) modela o acúmulo de cargas na interface eletrodo-solução e a resistência de transferência de carga (Rct) está associada à cinética das reações de oxirredução (Orazem; Tribollet, 2017).

Figura 2. Modelo elétrico equivalente (circuito de Randles) da célula eletrolítica



Fonte: adaptada de Lasia (2014).

A utilização do modelo simplificado justifica-se por equilibrar simplicidade analítica e precisão, permitindo integração direta, computacionalmente leve e em tempo real, com conversores eletrônicos de potência e malhas de controle de corrente ou de tensão (He *et al*., 2024; Ursua; Gandia; Sanchis, 2012). Para os fins deste trabalho, a impedância resultante do modelo eletrônico da célula eletrolítica é tratada como a carga resistiva vista pela saída do conversor.

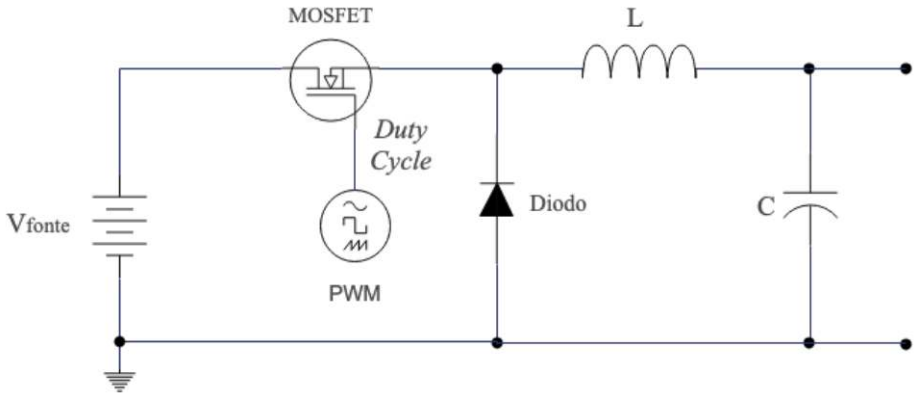
2.3 CONVERSOR CC-CC TIPO BUCK

Conversores CC-CC constituem elementos fundamentais da eletrônica de potência moderna, sendo responsáveis pela conversão e regulação de níveis de tensão contínua em uma ampla variedade de sistemas elétricos e eletrônicos (Timmers *et al*., 2024). Dentre as diversas topologias disponíveis, o conversor *Buck*, também conhecido como conversor abaixador, destaca-se por sua simplicidade estrutural, elevada eficiência e ampla aplicabilidade. Essa topologia é projetada para reduzir o nível de tensão de entrada, fornecendo uma tensão de saída inferior, com baixo nível de perdas (Barbi, 2022; Rashid, 2014).

O conversor do tipo *Buck* é constituído, em sua configuração elementar, por quatro componentes principais: um MOSFET ou IGBT, um diodo, um indutor e um capacitor ligado em paralelo à carga resistiva. O dispositivo opera em regime de chaveamento, alternando entre dois estados: quando o transistor, que funciona como chave, está ligado e quando está desligado. A regulação da transferência de energia é efetuada por meio da Modulação por Largura de Pulso (PWM), sendo a razão entre o tempo de condução do semicondutor e o período total de comutação a definição

do ciclo de trabalho, denotado por D. O circuito esquemático do conversor *Buck* é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Circuito eletrônico do conversor CC-CC tipo Buck



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

O funcionamento do conversor baseia-se, portanto, em dois estados de operação complementares. No estado ligado, com o transistor conduzindo, a tensão de entrada energiza simultaneamente a carga e o indutor, que armazena energia eletromagnética, enquanto o diodo permanece reversamente polarizado e não participa do circuito. No estado desligado, a fonte é desconectada da carga, o diodo entra em condução direta e o par indutor-capacitor descarrega, mantendo o fornecimento de energia à carga. Essa comutação contínua, em alta frequência, estabiliza a tensão de saída, sendo a razão cíclica o principal parâmetro de controle, variando entre 0 e 1. Em relação à estática, a tensão de saída do conversor é dada pela Equação 3, na qual se observa a natureza abaixadora da topologia, uma vez que o ciclo de trabalho é sempre inferior à unidade.

$$Vsaída = D \cdot Vfonte \qquad (3)$$

As principais características do conversor *Buck*, de acordo com Erickson e Maksimovic (2020), são: eficiência que pode superar 95%, uma vez que as perdas ocorrem principalmente nas transições e devido à resistência ôhmica dos componentes; baixo *ripple* de tensão, com bom dimensionamento dos filtros LC; resposta dinâmica rápida quando o conversor é bem projetado; e regulação de saída ajustada à variação do ciclo de trabalho. Para aplicação em eletrólise, o conversor é projetado para operar exclusivamente no modo de condução contínua, no qual a corrente que flui pelo indutor nunca atinge zero, garantindo fluxo contínuo de energia ao eletrolisador.

2.4 CONTROLADORES PID E SUAS VARIANTES

O controle de processos industriais é uma área fundamental da engenharia, cuja evolução tem sido marcada por avanços significativos na teoria e na prática dos sistemas de controle. Dentre os diversos métodos desenvolvidos, o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) destaca-se como uma das técnicas mais utilizadas na indústria, devido à sua simplicidade, robustez e eficácia. A relevância dos controladores PID reside em sua capacidade de ajustar automaticamente a variável de controle com base no erro entre o valor desejado e o valor medido, por meio de três ações fundamentais: proporcional, integral e derivativa (Ogata, 2010; Astrom; Hagglund, 2006).

Historicamente, os fundamentos do controle automático remontam ao trabalho pioneiro de Minorsky (1922) sobre a estabilização direcional de embarcações, no qual as três ações de controle já estavam esboçadas. A sistematização prática do ajuste de controladores, entretanto, consolidou-se com Ziegler e Nichols (1942), que propuseram métodos empíricos de sintonia ainda amplamente utilizados, posteriormente complementados por Cohen e Coon (1953) para processos com tempo morto. Desde então, um vasto conjunto de regras de sintonia foi catalogado na literatura, abrangendo desde formulações clássicas até abordagens analíticas e computacionais (O'Dwyer, 2009; Åström; Hägglund, 2016).

Os métodos de sintonia de controladores PID podem ser agrupados em quatro grandes categorias: métodos clássicos empíricos, como os de Ziegler-Nichols e de Cohen-Coon, baseados na resposta do processo; métodos analíticos, como o de alocação de polos e as regras de Skogestad (2003), que partem de um modelo matemático do sistema; métodos computacionais e inteligentes, que empregam algoritmos de otimização meta-heurística e inteligência artificial (Joseph *et al*., 2022); e a sintonia automática (auto-tuning), disponibilizada por ferramentas como o PID Tuner do *Simulink*. Neste trabalho, adotou-se a sintonia automática, por sua aplicabilidade direta ao modelo do conversor e por permitir a comparação sistemática entre as diferentes estruturas de controlador.

Apesar de sua ampla difusão, o projeto e a sintonia de controladores PID ainda representam desafios, especialmente em sistemas não lineares ou sujeitos a incertezas, o que tem impulsionado uma ampla produção científica sobre métodos de sintonia e de integração com técnicas modernas (Joseph *et al*., 2022; Borase *et al*., 2021). Contudo, para a estabilização imediata das grandezas elétricas em conversores CC-CC, o controlador PID clássico e suas variantes constituem a solução de maior viabilidade prática, fundamentada na simplicidade de construção e no baixo esforço de processamento,

o que viabiliza sua implementação em microcontroladores comerciais de baixo custo (Viola, 2023; He *et al*., 2024).

Além das configurações clássicas de um grau de liberdade (1-DOF), nas quais uma única função atua sobre o sinal de erro, existem estruturas de dois graus de liberdade (2-DOF) que permitem ponderar de forma independente as ações sobre o sinal de referência e o sinal de saída medido. Um caso particular relevante é o das estruturas com pesos de ponto de ajuste fixos, nas quais os pesos das ações proporcional e derivativa sobre a referência são fixados em zero, deslocando integralmente essas ações para a malha de realimentação. Essa arquitetura dá origem a controladores como o I-PD, o ID-P e o I-PDF, que atuam apenas com a ação integral no caminho direto. A Tabela 1 sintetiza as dezoito modalidades de controladores PID avaliadas neste trabalho.

Tabela 1. Modalidades de controlador PID avaliadas neste estudo

Categoria	Modalidades de controlador
Um grau de liberdade (1-DOF)	P; I; PI; PD; PID; PDF; PIDF
Dois graus de liberdade (2-DOF)	PI2; PD2; PID2; PDF2; PIDF2
2-DOF com pesos de ponto de ajuste fixos	I-PD; ID-P; PI-D; I-PDF; IDF-P; PI-DF

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta a modelagem matemática do conversor *Buck* e a obtenção de sua função de transferência, seguida da descrição do ambiente de simulação, da malha de controle implementada e do procedimento de sintonia e avaliação das dezoito modalidades de controlador PID.

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO CONVERSOR BUCK

Para modelar o conversor do tipo *Buck* ideal, utilizou-se a modelagem matemática por valor médio (*Average Modeling*), uma das técnicas mais empregadas para representar o comportamento dinâmico do conversor sem a necessidade de analisar diretamente o chaveamento em alta frequência. Em vez de acompanhar as formas de onda pulsadas, o método suaviza as grandezas elétricas ao longo de um período de comutação, produzindo um modelo contínuo no tempo que preserva a dinâmica essencial do sistema (Erickson; Maksimovic, 2020).

As variáveis de estado mais comuns são a corrente no indutor (i_L) e a tensão no capacitor (v_C). Combinando as equações dos estados ligado e desligado, ponderadas pelo ciclo de trabalho d, obtém-se o modelo médio em espaço de estados do conversor, apresentado na Equação 4.

$$di_L/dt = (dVfonte - v_C) / L \text{ e } dv_C/dt = i_L/C - v_C/(R \cdot C) \quad (4)$$

A partir da linearização das equações médias em torno de um ponto de operação, obtêm-se o modelo de pequeno sinal e a função de transferência que relaciona o ciclo de trabalho à tensão de saída, apresentada na Equação 5, caracterizando um sistema de segunda ordem sem zeros na versão ideal.

$$G_B(s) = Vfonte / (L \cdot C \cdot s^1 + (L/R) \cdot s + 1) \quad (5)$$

Para determinar a função de transferência numérica, é necessário conhecer as especificações de cada componente. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de projeto desejados para o conversor *Buck* (Silva, 2025a).

Tabela 2. Parâmetros de projeto desejados para o conversor Buck

Variável	Símbolo	Valor
Tensão de entrada	Vin	9 a 38 V
Tensão de saída	Vout	0 a 20 V
Corrente de saída	Iout	0 a 10 A
Variação da corrente de saída	ΔIout	≤ 0,01 A
Variação na tensão de saída	ΔVout	≤ 0,01 V
Frequência de chaveamento	f	≥ 20 kHz

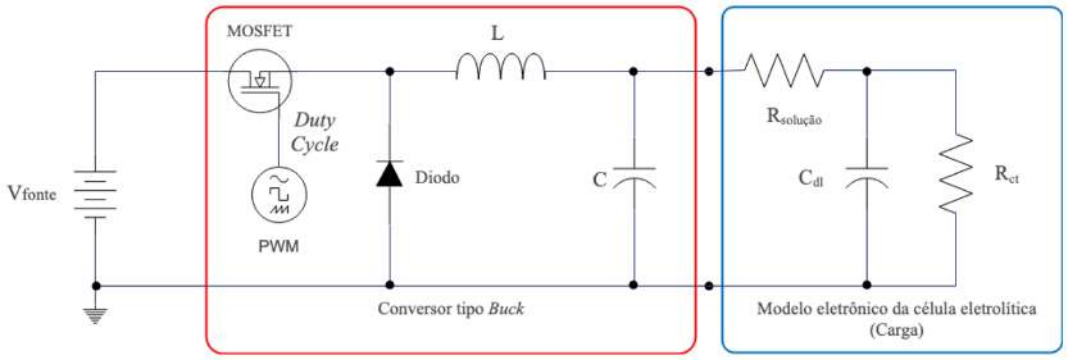
Fonte: adaptada de Silva (2025a).

O circuito foi montado com os componentes efetivamente disponíveis no laboratório de energias do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA) da UFAL, adotando-se os valores Vfonte = 20 V, R = 1 Ω (impedância resultante do modelo da célula eletrolítica), L = 50 µH e C = 2000

[1] Doutor em Engenharia Química, Professor do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). E-mail: julio.neto@ceca.ufal.br.

µF. A Figura 4 apresenta o circuito do conversor *Buck* acoplado ao modelo elétrico da célula eletrolítica, que constitui a carga do sistema.

Figura 4. Circuito do conversor Buck acoplado ao modelo elétrico da célula eletrolítica



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Substituindo os valores dos componentes na Equação 5 e reorganizando a expressão, obtém-se a função de transferência numérica do conversor *Buck*, apresentada na Equação 6.

$$G_B(s) = 200000000 / (s^2 + 500 \cdot s + 10000000) \quad (6)$$

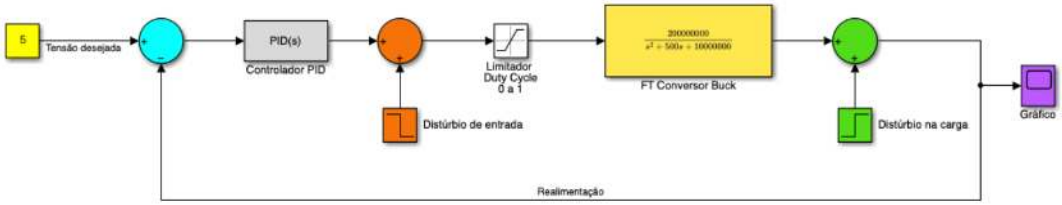
Essa expressão indica que o conversor *Buck* possui dois polos reais ou complexos, dependendo da carga, e não apresenta zeros na versão ideal. Em baixas frequências, o ganho tende a Vfonte, enquanto, em altas frequências, o sistema decai a −40 dB/década, comportamento típico de sistemas de segunda ordem. Essa função de transferência constitui a base para o projeto e a simulação de controladores PID.

3.2 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E MALHA DE CONTROLE

Para realizar as simulações, montou-se no *Simulink* do *MATLAB*, versão R2026a, o diagrama de blocos do sistema de controle de tensão (MathWorks, 2026). Considerando que a célula eletrolítica do laboratório requer uma tensão de 5 V e uma corrente contínua de 4 A para a produção de hidrogênio por eletrólise, a tensão de saída do conversor *Buck* deve ser controlada para esse valor de referência. Assim, o controlador PID atua no ciclo de trabalho do conversor, variando entre 0 e 1, para que a

tensão de saída permaneça constante mesmo diante de distúrbios na fonte de alimentação, como a passagem de uma nuvem sobre as células fotovoltaicas, ou na carga. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos da malha de controle.

Figura 5. Diagrama de blocos da malha de controle de tensão do conversor Buck no Simulink

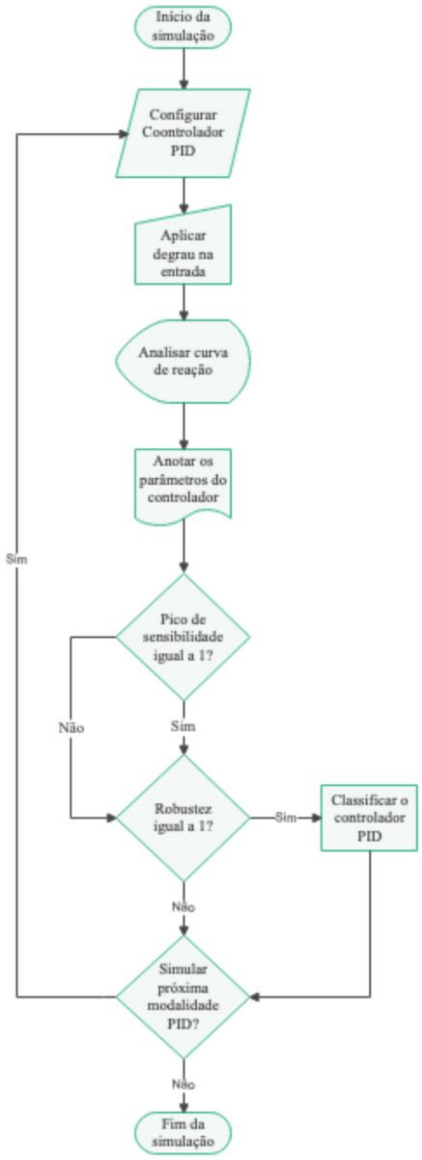


Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

No diagrama de blocos, a tensão desejada de 5 V é comparada ao sinal de realimentação da saída, e o erro resultante alimenta o controlador PID, cuja saída é limitada por um limitador entre 0 e 1, correspondente aos limites físicos do ciclo de trabalho. A esse sinal somam-se os blocos de distúrbio de entrada e de distúrbio na carga, que reproduzem, respectivamente, as variações na alimentação fotovoltaica e as alterações na resistência da célula eletrolítica.

O método utilizado nas simulações consistiu em aplicar um degrau (*step*) na entrada do diagrama de blocos, analisar a curva de reação do sistema e substituir o controlador PID por cada uma de suas variantes, repetindo a sequência. Com a curva de reação traçada e a sintonia obtida pelo aplicativo PID *Tuner* do *Simulink*, com base na função de transferência do conversor, foi possível analisar a estabilidade e a robustez de cada controlador e compará-los entre si. A Figura 6 apresenta o fluxograma que resume a metodologia empregada para simular as dezoito modalidades de controladores PID.

Figura 6. Fluxograma da metodologia de simulação das modalidades de controlador PID



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

3.3 PROCEDIMENTO DE SINTONIA E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Cada controlador foi sintonizado por meio da autossintonia do *Simulink*, que ajusta os ganhos proporcional (Kp), integral (Ki) e derivativo (Kd), bem como o tempo de filtro derivativo (Tf). Após a sintonia, extraíram-se da curva de reação a um degrau os parâmetros de desempenho transitório: o tempo de subida, o tempo de acomodação e o sobressinal (*overshoot*). Além disso, avaliou-se a estabilidade em malha fechada de cada configuração.

A robustez do controlador foi mensurada pelo pico de sensibilidade (Ms). Quanto maior o pico de sensibilidade, menor é a robustez do controlador, sendo possível estabelecer a relação matemática

expressa pela Equação 7, em que Ro representa o valor da robustez. Considera-se ideal o controlador cujo pico de sensibilidade e cuja robustez são iguais a 1 (Skogestad; Postlethwaite, 2005; Skogestad, 2003).

$$Ro = 1 / Ms \qquad (7)$$

Desse modo, o critério de seleção do melhor controlador considerou simultaneamente o desempenho dinâmico, privilegiando baixo sobressinal e tempo de acomodação reduzido, e a robustez, buscando valores de Ms e Ro próximos da unidade. Por fim, o controlador de melhor desempenho foi submetido a ensaios de rejeição a distúrbios aplicados na entrada e na saída do conversor, simulando, respectivamente, obstruções na célula fotovoltaica e variações na resistência da célula eletrolítica.

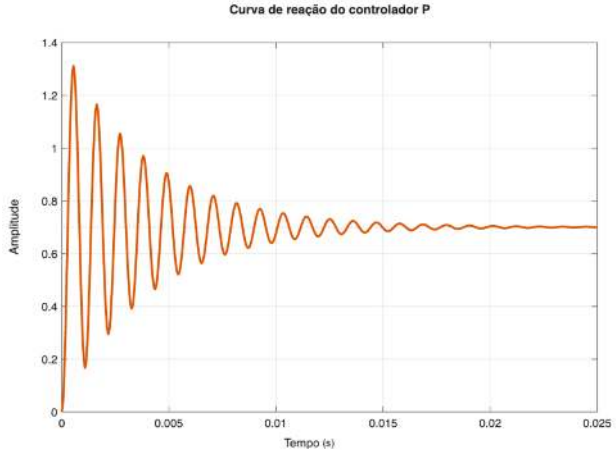
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados das simulações, organizados em três grupos de controladores, de primeira ordem, de segunda ordem e de segunda ordem com pesos de ponto de ajuste fixos, seguidos da comparação geral e da aplicação do controlador de melhor desempenho na malha de controle do conversor *Buck*.

4.1 CONTROLADORES DE PRIMEIRA ORDEM (1-DOF)

Foram avaliados os controladores P, I, PI, PD, PID, PDF e PIDF. O controlador P apresentou resposta rápida, porém com sobressinal extremamente elevado, de aproximadamente 87,3%, o que o torna inadequado para sistemas sensíveis como a alimentação de células eletrolíticas. A curva de reação do controlador P, apresentada no Gráfico 1, exibe uma subida abrupta, seguida de oscilações amortecidas, o que confirma esse comportamento agressivo.

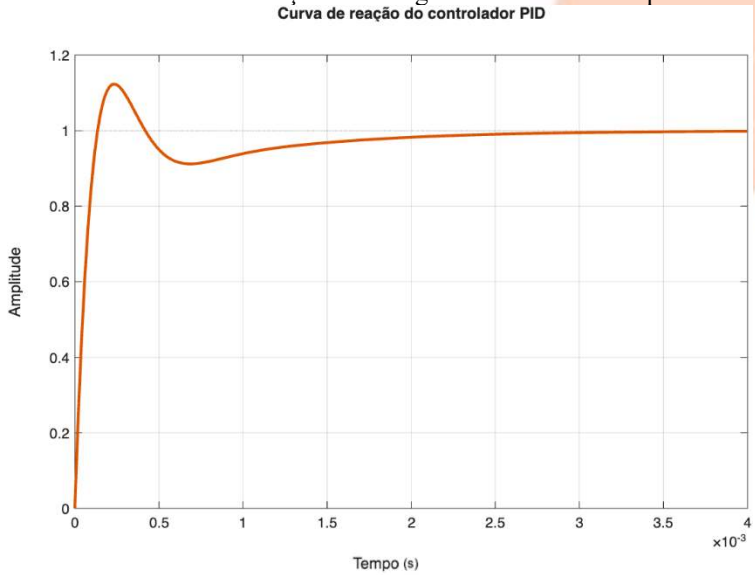
Gráfico 1. Curva de reação a um degrau do controlador tipo P



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

O controlador I mostrou-se totalmente instável, com valores indefinidos em todos os parâmetros de desempenho. O controlador PI apresentou estabilidade, mas com sobressinal de 33,6% e tempo de acomodação relativamente alto. O PD foi rápido, porém com sobressinal de 50,6%, indicando comportamento agressivo. Já o PID clássico apresentou excelente desempenho: tempo de subida de $9{,}99\times10^{-5}$ s, sobressinal de apenas 12,3% e tempo de acomodação de 0,00189 s. O PDF foi ainda mais rápido, mas com sobressinal maior (28,1%), enquanto o PIDF, com filtro derivativo, apresentou desempenho muito próximo ao do PID. O Gráfico 2 apresenta a curva de reação do controlador PID clássico, evidenciando o excelente equilíbrio entre rapidez e estabilidade.

Gráfico 2. Curva de reação a um degrau do controlador tipo PID



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

De modo geral, os controladores de primeira ordem revelam um compromisso persistente entre rapidez e estabilidade. O controlador P, apesar de rápido, é excessivamente oscilatório; o controlador I, isoladamente, conduz o sistema à instabilidade; e o PI, embora corrija o erro estacionário, mantém sobressinal elevado. A introdução da ação derivativa, nas configurações PD, PID e PIDF, melhora sensivelmente o amortecimento, com destaque para o PID e o PIDF, que apresentam baixo sobressinal, rápida acomodação e robustez moderada, figurando entre os melhores da classe clássica. Ainda assim, nenhum controlador de primeira ordem eliminou completamente o sobressinal, o que constitui uma limitação crítica para a alimentação de células eletrolíticas. A Tabela 3 sintetiza os parâmetros de desempenho e de robustez dos controladores de primeira ordem após a simulação.

Tabela 3. Resumo dos parâmetros de desempenho e robustez dos controladores de primeira ordem

Controlador	Tempo de subida (s)	Tempo de acomodação (s)	Sobressinal (%)	Pico (M_s)	Estabilidade
P	$1{,}9\times10^{-4}$	$1{,}5\times10^{-2}$	87,3	1,31	Estável
I	—	—	—	∞	Instável
PI	$2{,}4\times10^{-4}$	$3{,}8\times10^{-2}$	33,6	1,34	Estável
PD	$1{,}5\times10^{-4}$	$2{,}0\times10^{-3}$	50,6	0,88	Estável
PID	$1{,}0\times10^{-4}$	$1{,}9\times10^{-3}$	12,3	1,12	Estável
PDF	$0{,}8\times10^{-4}$	$6{,}7\times10^{-4}$	28,1	1,17	Estável
PIDF	$1{,}0\times10^{-4}$	$1{,}7\times10^{-3}$	13,2	1,13	Estável

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

4.2 CONTROLADORES DE SEGUNDA ORDEM (2-DOF)

Os controladores PI2, PD2, PID2, PDF2 e PIDF2 foram avaliados na sequência. Esses controladores de dois graus de liberdade demonstraram um comportamento mais refinado em relação aos clássicos, sobretudo quanto à capacidade de modular a resposta transitória por meio de pesos adicionais aplicados ao sinal de referência. O controlador PI2, embora estável, manteve características semelhantes às do PI tradicional, com sobressinal elevado, indicando que a adição do segundo grau de liberdade não foi suficiente para melhorar significativamente o desempenho.

O controlador PD2 apresentou redução significativa do sobressinal em relação ao PD clássico, atingindo aproximadamente 27%, o que indica uma resposta mais suave. O PID2 destacou-se como

um dos melhores controladores de segunda ordem, com sobressinal inferior a 10% e boa estabilidade, além de tempo de acomodação moderado. O PDF2 manteve comportamento semelhante ao PD2, e o PIDF2 apresentou desempenho consistente, com sobressinal de 9,61% e resposta suave, sendo menos agressivo do que o PID clássico e mais robusto frente a perturbações. A Tabela 4 resume os parâmetros desses controladores.

Tabela 4. Resumo dos parâmetros de desempenho e robustez dos controladores de segunda ordem

Controlador	Tempo de subida (s)	Tempo de acomodação (s)	Sobressinal (%)	Pico (M_s)	Estabilidade
PI2	$2{,}40\times10^{-4}$	$3{,}80\times10^{-2}$	33,60	1,34	Estável
PD2	$2{,}90\times10^{-4}$	$2{,}10\times10^{-3}$	27,40	0,75	Estável
PID2	$3{,}50\times10^{-4}$	$3{,}60\times10^{-3}$	9,80	1,10	Estável
PDF2	$2{,}90\times10^{-4}$	$2{,}10\times10^{-3}$	27,20	0,74	Estável
PIDF2	$3{,}50\times10^{-4}$	$3{,}80\times10^{-3}$	9,61	1,10	Estável

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

4.3 CONTROLADORES 2-DOF COM PESOS DE PONTO DE AJUSTE FIXOS

Por fim, os controladores I-PD, ID-P, PI-D, I-PDF, IDF-P e PI-DF foram analisados. Essa classe representa a mais avançada e eficiente entre todas as avaliadas, pois permite separar a ação sobre o erro da ação sobre o sinal de referência, resultando em respostas mais suaves e controladas. O controlador I-PD apresentou desempenho excepcional ao eliminar completamente o sobressinal, mantendo a tensão de saída exatamente no valor desejado — característica particularmente importante em sistemas de eletrólise, nos quais sobretensões podem causar degradação acelerada dos eletrodos. O ID-P apresentou comportamento semelhante, com sobressinal nulo e resposta extremamente estável.

O controlador I-PDF destacou-se como o melhor entre os controladores simulados. Além de apresentar sobressinal nulo, apresentou o menor tempo de acomodação entre os controladores estáveis, evidenciando uma combinação rara de rapidez e suavidade. A presença do filtro derivativo reduziu significativamente o ruído e evitou oscilações indesejadas, tornando o sistema altamente robusto a variações no ciclo de trabalho e a perturbações externas, como flutuações na irradiância solar. O IDF-P também apresentou desempenho muito sólido, com resposta estável e sem ultrapassagens, sendo uma alternativa confiável ao I-PDF. A Tabela 5 resume os parâmetros desses controladores.

Tabela 5. Resumo dos parâmetros dos controladores 2-DOF com pesos de ponto de ajuste fixos

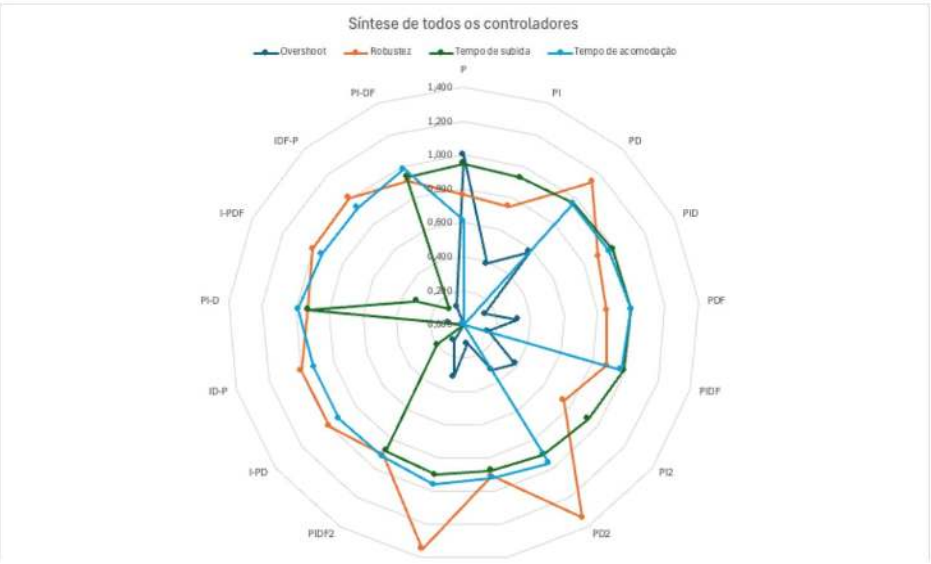
Controlador	Tempo de subida (s)	Tempo de acomodação (s)	Sobressinal (%)	Pico (M_s)	Estabilidade
I-PD	$1{,}80\times10^{-3}$	$3{,}40\times10^{-3}$	0,00	1,00	Estável
ID-P	$2{,}30\times10^{-3}$	$3{,}60\times10^{-3}$	0,00	1,00	Estável
PI-D	$2{,}40\times10^{-4}$	$1{,}20\times10^{-3}$	7,72	1,08	Estável
I-PDF	$1{,}60\times10^{-3}$	$3{,}00\times10^{-3}$	0,00	1,00	Estável
IDF-P	$2{,}00\times10^{-3}$	$3{,}20\times10^{-3}$	0,00	0,99	Estável
PI-DF	$2{,}30\times10^{-3}$	$1{,}30\times10^{-3}$	9,70	1,10	Estável

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

4.4 COMPARAÇÃO GERAL E MELHORES CONTROLADORES

Com base na relação entre o pico de sensibilidade e a robustez, foi possível comparar os resultados de robustez e de estabilidade de todos os controladores simulados. O Gráfico 3 apresenta a síntese dessa comparação, evidenciando o desempenho superior da classe de controladores 2-DOF com pesos fixos, cujos valores de robustez se aproximam da unidade.

Gráfico 3. Síntese da estabilidade e da robustez de todos os controladores simulados



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

A Tabela 6 consolida os valores de pico de sensibilidade (Ms), robustez (Ro), tempo de acomodação, estabilidade e robustez qualitativa das dezoito modalidades simuladas, permitindo uma visão global do comportamento de cada classe de controlador.

Tabela 6. Comparação geral de robustez e estabilidade dos controladores simulados

Controlador	M_s	R_o	Tempo de acomodação (s)	Estabilidade	Robustez
P	1,31	0,763	0,01530	Estável	Baixa
I	∞	0	—	Instável	Nula
PI	1,34	0,746	0,03830	Estável	Baixa
PD	0,881	1,135	0,00208	Estável	Alta
PID	1,12	0,893	0,00189	Estável	Moderada
PDF	1,17	0,855	0,00067	Estável	Moderada
PIDF	1,13	0,885	0,00168	Estável	Moderada
PI2	1,34	0,746	0,03830	Estável	Baixa
PD2	0,746	1,340	0,00212	Estável	Alta
PID2	1,10	0,909	0,00364	Estável	Alta
PDF2	0,741	1,350	0,00209	Estável	Alta
PIDF2	1,10	0,909	0,00379	Estável	Alta
I-PD	1,00	1,000	0,00345	Estável	Alta
ID-P	1,00	1,000	0,00362	Estável	Alta
PI-D	1,08	0,926	0,00120	Estável	Alta
I-PDF	1,00	1,000	0,00300	Estável	Alta (melhor)
IDF-P	0,99	1,010	0,00317	Estável	Alta
PI-DF	1,10	0,909	0,00133	Estável	Alta

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Entre todos os controladores simulados, três se destacaram de forma consistente: I-PDF, ID-P e I-PD. Esses controladores apresentaram sobressinal nulo, excelente estabilidade e tempos de

acomodação reduzidos, além de respostas extremamente suaves e robustas. O controlador I-PDF, em particular, apresentou o melhor desempenho global, devido à sua combinação única de robustez ideal (Ms = 1,0), estabilidade elevada e excelente comportamento dinâmico. O valor de pico da sensibilidade igual a 1,0 indica que o controlador opera exatamente no ponto considerado ideal, garantindo mínima sensibilidade a incertezas e máxima tolerância a perturbações externas. A Tabela 7 apresenta a síntese comparativa dos três melhores controladores.

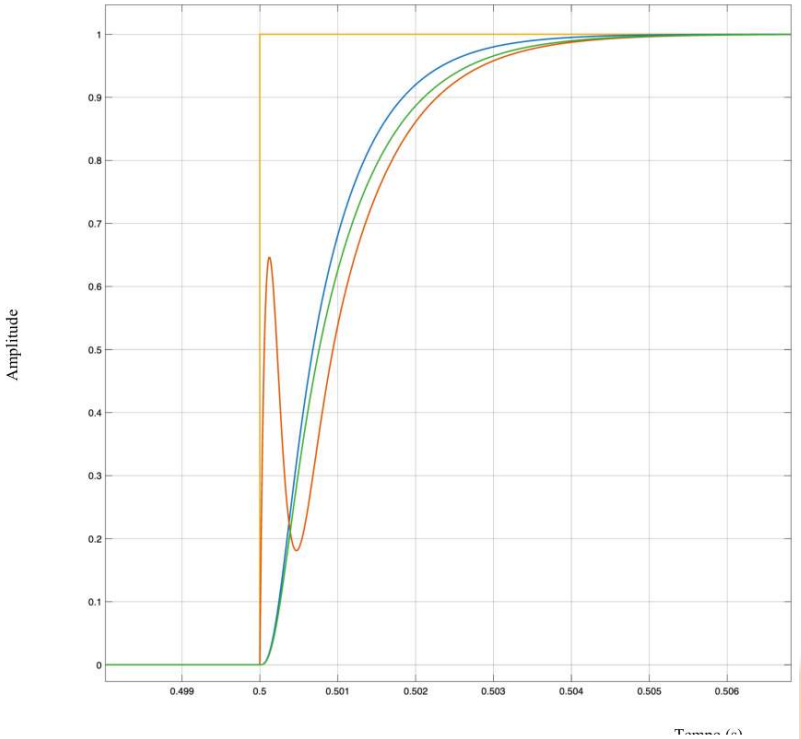
Tabela 7. Síntese comparativa dos três melhores controladores em desempenho e robustez

Controlador	Robustez	Sobressinal	Suavidade da resposta	Rejeição a ruídos	Tempo de acomodação	Melhor uso
I-PDF	Ideal (1,0)	0%	Excelente	Excelente	Rápido (≈3 ms)	Melhor controlador geral
ID-P	Ideal (1,0)	0%	Boa	Moderada	Moderado	Alternativa robusta
I-PD	Ideal (1,0)	0%	Moderada	Baixa	Mais lento	Simplicidade é prioridade

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

O Gráfico 4 compara as curvas de reação dos três melhores controladores em resposta a um distúrbio, evidenciando a superioridade do I-PDF quanto à suavidade e à rapidez de recuperação do valor de referência.

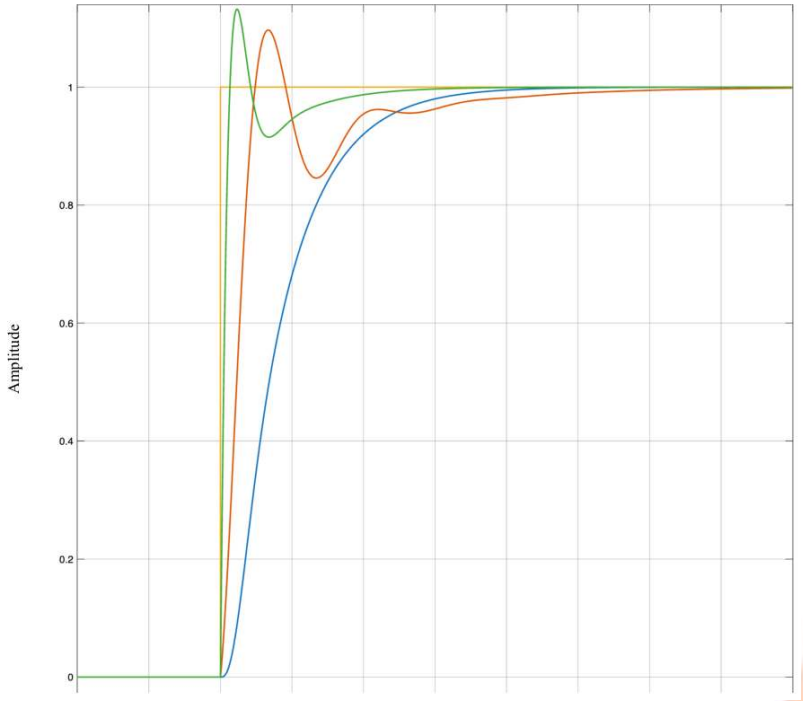
Gráfico 4. Comparação das curvas de reação dos três melhores controladores



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

O Gráfico 5 compara as curvas de reação dos controladores que apresentaram os melhores resultados em cada categoria: o PID clássico (1-DOF), o PIDF2 (2-DOF) e o I-PDF (2-DOF com pesos fixos). A curva do PID clássico exibe uma dinâmica mais agressiva, com o menor tempo de subida, mas também o maior pico de sobressinal e oscilações subsequentes. O PIDF2 reduz significativamente o sobressinal por meio da filtragem da ação derivativa. Já o I-PDF traduz a filosofia de controle na qual apenas a ação integral atua sobre o sinal de erro, enquanto as ações proporcional e derivativa são deslocadas para a malha de realimentação, o que elimina por completo os zeros da função de transferência responsáveis pelo sobressinal, resultando em uma resposta superamortecida e sem oscilações.

Gráfico 5. Comparação das curvas de reação dos melhores controladores por categoria

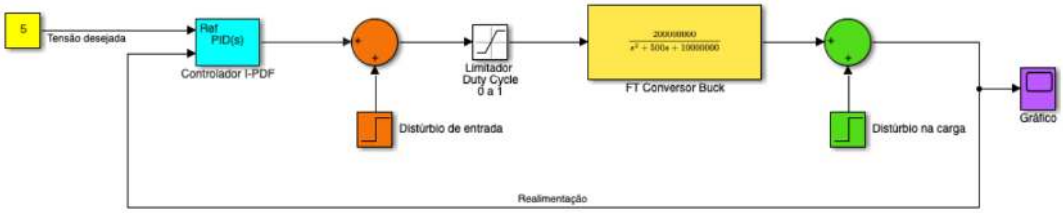


Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

4.5 APLICAÇÃO DO CONTROLADOR I-PDF E REJEIÇÃO A DISTÚRBIOS

Confirmada a superioridade do controlador I-PDF, ele foi inserido na malha de controle do conversor *Buck*, conforme apresentado na Figura 7. Os parâmetros adotados foram Kp = 0,38326, Ki = 482,40530, Kd = $6{,}57710\times10^{-5}$ e Tf = $6{,}04340\times10^{-7}$, com os pesos de ponto de ajuste b e c fixados em zero.

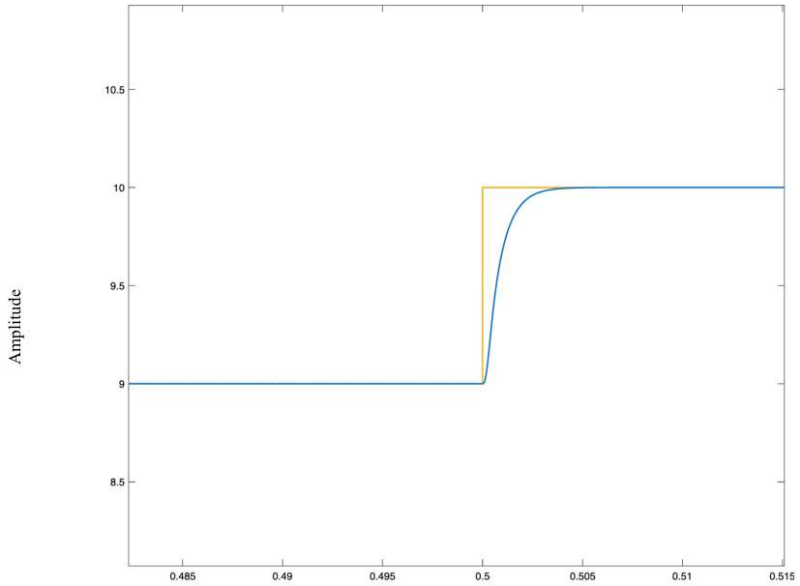
Figura 7. Controlador I-PDF na malha de controle do conversor Buck



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

O Gráfico 6 comprova o excelente desempenho do controlador na malha de controle: identifica-se o degrau (em amarelo) no intervalo de 9 a 10 e a curva de reação (em azul) da saída do controlador I-PDF, com correção rápida para o novo ponto desejado, sem sobressinal e com tempo de acomodação reduzido.

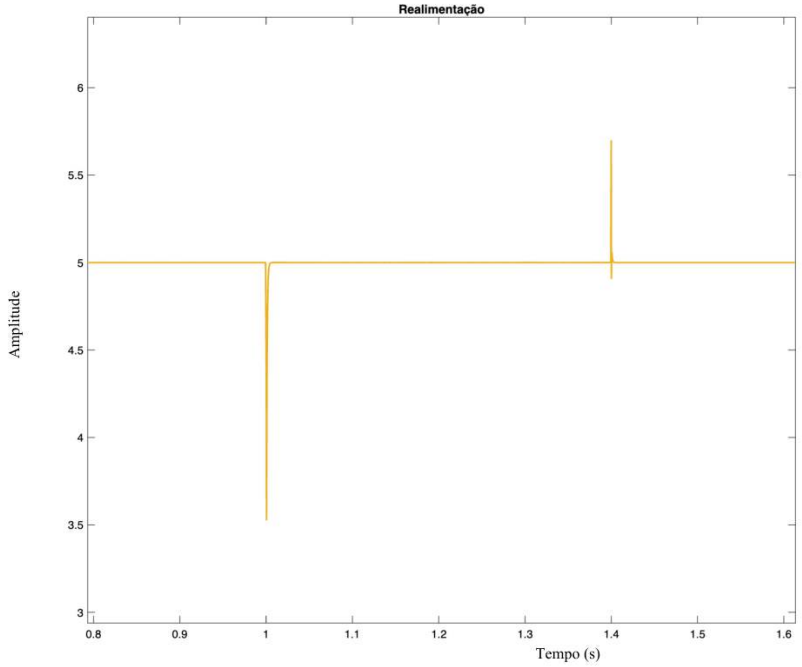
Gráfico 6. Curva de reação da malha de controle com o controlador I-PDF em resposta a um degrau na entrada



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Para validar a robustez do sistema, foram inseridos dois distúrbios: um na entrada do conversor *Buck*, no tempo de 1,0 s, simulando uma obstrução parcial da célula fotovoltaica (como a passagem de uma nuvem); e outro na saída, no tempo de 1,4 s, simulando uma variação na resistência da célula eletrolítica, decorrente, por exemplo, de oxidação dos terminais elétricos. Em ambos os casos, o controlador I-PDF efetuou a correção quase instantânea do valor, mantendo a tensão de 5 V constante na célula eletrolítica, de modo a preservar a produção de hidrogênio verde. O Gráfico 7 apresenta a curva de reação da malha de controle diante dos dois distúrbios.

Gráfico 7. Curva de reação da malha de controle com distúrbio na entrada e na saída



Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

Do ponto de vista eletroquímico, a manutenção precisa da tensão é crítica para a eficiência do processo. Caso a resistência da célula diminua e a corrente ultrapasse um determinado valor, na célula eletrolítica do laboratório, da ordem de 300 mA/cm³, a velocidade de geração de hidrogênio aumenta de forma indesejada, elevando a polarização e a resistência ôhmica devido às bolhas de hidrogênio acumuladas no eletrodo. O impacto direto é a redução da eficiência farádica e o aumento do consumo específico de energia elétrica. Por isso, a capacidade do controlador I-PDF de restabelecer rapidamente a tensão de referência após um distúrbio não se traduz apenas em estabilidade elétrica, mas também na preservação da eficiência e da integridade dos eletrodos.

Os resultados confirmam que a separação estrutural entre os canais de rastreamento e de rejeição a distúrbios, aliada à filtragem do termo derivativo, constitui a combinação ótima para a regulação precisa de tensão em conversores *Buck* aplicados à produção de hidrogênio verde. O controlador I-PDF combinou o menor tempo de acomodação entre todos os controladores estáveis (ts ≈ 3 ms), robustez ideal (Ro = 1,00; Ms = 1,00) e resposta suave sem oscilações, superando os controladores de segunda ordem com pesos variáveis e as demais estruturas com pesos fixos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como propósito desenvolver, modelar e avaliar comparativamente diferentes técnicas de controle PID aplicadas a um conversor CC-CC do tipo *Buck*, destinado ao fornecimento estável de tensão elétrica a uma célula eletrolítica alimentada por módulos fotovoltaicos. A partir da modelagem matemática do conversor, da construção do ambiente de simulação no *Simulink* do *MATLAB* e da análise comparativa de dezoito estruturas de controladores PID, foi possível demonstrar que o uso do controlador I-PDF é plenamente viável e eficaz para garantir a produção contínua e segura de hidrogênio verde, no escopo avaliado.

Os resultados evidenciaram que o conversor *Buck*, quando operado em modo de condução contínua e devidamente compensado, apresenta excelente capacidade de regulação da tensão, mesmo diante de perturbações típicas da geração fotovoltaica, como variações abruptas de irradiância e de carga. A comparação entre os controladores permitiu identificar que os controladores de segunda ordem com pesos fixos, I-PD, ID-P e I-PDF, apresentaram o melhor desempenho para o modelo e os parâmetros adotados. O controlador I-PDF destacou-se em razão de uma característica estrutural que nenhuma das demais configurações reúne simultaneamente: ao fixar os pesos de ponto de ajuste em zero, as ações proporcional e derivativa são deslocadas integralmente para a malha de realimentação, o que suprime completamente o sobressinal e, ao mesmo tempo, preserva a rapidez de rejeição a distúrbios, ponto fraco das estruturas puramente integrais.

Além do mérito técnico, este trabalho contribui para a consolidação de soluções acessíveis e de baixo custo para o controle de sistemas de produção de hidrogênio verde, demonstrando que técnicas clássicas, quando bem aplicadas, continuam extremamente relevantes no contexto da transição energética. A integração entre eletrônica de potência, controle automático e fontes renováveis abre caminho para aplicações descentralizadas, especialmente em regiões com alta disponibilidade de energia solar, como o Nordeste brasileiro.

Cabe ressaltar as limitações do estudo. Os resultados foram obtidos a partir de um modelo linearizado e ideal do conversor *Buck* e de um modelo elétrico simplificado da célula eletrolítica, baseado no circuito de *Randles*, considerando a carga como resistiva. Fenômenos não lineares associados à temperatura, à pressão, à impedância de *Warburg* e à dinâmica das bolhas nos eletrodos não foram incorporados. Assim, embora as simulações demonstrem de forma consistente a

superioridade do controlador I-PDF nas condições avaliadas, a extrapolação para o sistema físico real deve considerar essas simplificações e ser validada experimentalmente.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a implementação experimental dos sistemas, módulo fotovoltaico, conversor *Buck*, controlador PID e célula eletrolítica, com foco na modelagem e na identificação dos sistemas, para posterior investigação de técnicas de controle adaptativo ou inteligente e para a análise do desempenho em condições reais de operação, incorporando as características não lineares da célula eletrolítica decorrentes de temperatura e pressão.



REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, R. U. de A.; RIBAS, L. C. Hidrogênio verde e usos múltiplos dos recursos hídricos: análise crítica de (integração de e entre) políticas públicas e legislação ambiental. Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável, Tupã, v. 2, n. 7, 2023.

AL-EZZI, A. S.; ANSARI, M. N. M. Photovoltaic Solar Cells: A Review. Applied System Innovation, v. 5, n. 4, 2022.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Advanced PID Control. Research Triangle Park: ISA – Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control. Asian Journal of Control, [S. l.], v. 18, n. 4, p. 1162–1172, 2016.

BARBI, I. Teoria de conversores CC-CC chaveados não isolados. 3. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2022.

BORASE, R. P. et al. A review of PID control, tuning methods and applications. International Journal of Dynamic Control, [S. l.], v. 9, p. 818–827, 2021.

CAIAFA, C.; ROMIJN, H.; DE CONINCK, H. C. Identifying opportunities and risks from green hydrogen: a framework and insights from a developing region in Brazil. Climate Policy, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 612–630, 2025.

CHEN, X.; HUI, W.; WANG, Q. et al. Entropy-driven strategy stabilizes photoactive halide perovskites for inverted solar cells. Nature Communications, v. 16, 9717, 2025.

COHEN, G. H.; COON, G. A. Theoretical consideration of retarded control. Transactions of the ASME, v. 75, p. 827–834, 1953.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: an overview. International Journal of Hydrogen Energy, Oxford, v. 45, n. 7, p. 3847–3869, 2020.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. Fundamentals of Power Electronics. 3. ed. Cham: Springer, 2020.

GHOSH, A. Solar-Powered Green Hydrogen from Electrolyzer (PV–H_2): A Review. Solar RRL, [S. l.], v. 9, n. 14, 2025.

GOMONOV, K.; PERMANA, C. T.; HANDOKO, C. T. The growing demand for hydrogen: current trends, sectoral analysis, and future projections. Unconventional Resources, [S. l.], 2025.

HE, M. et al. A generic equivalent circuit model for PEM electrolyzer with multi-timescale and stages under multi-mode control. Applied Energy, [S. l.], v. 359, p. 122728, 2024.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The future of hydrogen: seizing today's opportunities. Paris: IEA, 2019.

JOSEPH, S. B. et al. Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: review, approaches and open problems. Heliyon, [S. l.], v. 8, n. 5, e09335, 2022.

KUMARAGURUPARAN, S.; ELANGO, K. Optimal control strategies for high-efficiency non-isolated DC-DC buck converters in IoT applications: a comparative study. Heliyon, Amsterdam, v. 10, n. 18, 2024.

LASIA, A. Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications. New York: Springer, 2014.

MACHÍN, A.; MÁRQUEZ, F. Advancements in Photovoltaic Cell Materials: Silicon, Organic, and Perovskite Solar Cells. Materials, v. 17, n. 5, 2024.

MALDONADO, L. E.; MALDONADO, J. L. Diseño y simulación de una planta fotovoltaica para el máximo aprovechamiento del recurso solar en Toluviejo, Colombia. Universidad, Ciencia y Tecnología, Quito, v. 28, n. 125, 2024.

MATHWORKS. MATLAB and Simulink: release R2026a. Natick, MA: The MathWorks Inc., 2026.

MINORSKY, N. Directional stability of automatically steered bodies. Journal of the American Society for Naval Engineers, v. 34, n. 2, p. 280–309, 1922.

NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Interactive best research-cell efficiency chart. Golden, CO: NREL, 2024.

O'DWYER, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 3. ed. London: Imperial College Press, 2009.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, T. F.; QUEIROZ, F. S.; AQUINO, A. L. L. Previsão de irradiância solar em Maceió-AL: uma análise comparativa entre modelos de Machine Learning e Deep Learning. In: Anais do Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. IFAL Maceió, 2025.

ORAZEM, M. E.; TRIBOLLET, B. Electrochemical Impedance Spectroscopy. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2017.

RASHID, M. H. Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. 4. ed. Boston: Pearson, 2014.

SILVA, A. F. B. Conversor CC-CC Buck não-isolado para controle de uma célula eletrolítica. 2025. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2025a.

SILVA, G. H. R. da et al. Renewable energy perspectives: Brazilian case study on green hydrogen production. AIMS Energy, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 449–470, 2025b.

SILVA JÚNIOR, L. H. et al. Global assessment of hydrogen production from the electrical grid aiming the Brazilian transportation sector. Energy for Sustainable Development, [S. l.], 2025.

SILVA JÚNIOR, R. S.; RAMOS, D. N. S. Mapeamento solarimétrico do estado de Alagoas em anos de eventos extremos pluviométricos, utilizando o modelo WRF-Solar. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 19, n. 3, p. 1120–1135, 2026.

SKOGESTAD, S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. Journal of Process Control, v. 13, n. 4, p. 291–309, 2003.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. Multivariable feedback control: analysis and design. 2. ed. Chichester: Wiley, 2005.

SOARES, L.; SOUZA, A.; PICCINI, A.; SANTOS, I. Control proposal for photovoltaic inverters with reactive power supply for voltage stability during momentary sags and in steady state. IEEE Latin America Transactions, [S. l.], v. 21, n. 9, p. 1007–1014, 2023.

TIMMERS, V.; EGEA-ÀLVAREZ, A.; GKOUNTARAS, A.; XU, L. Multi-objective optimization and comparison of DC/DC converters for offshore wind turbines. IEEE Access, Piscataway, v. 12, 2024.

URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. Proceedings of the IEEE, New York, v. 100, n. 2, p. 410–426, 2012.

VIOLA, J. Advanced PID control: theory and applications towards a smarter PID controller. Electronics, [S. l.], v. 12, n. 3, 2023.

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

WU, L. et al. Direct seawater electrolysis for green hydrogen production: electrode designs, cell configurations, and system integrations. Energy & Environmental Science, [S. l.], v. 18, n. 10, p. 4596–4624, 2025.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME, v. 64, p. 759–768, 1942.