



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO - CECAU**



SAULO NEVES MATOS

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E DE
CONTROLE PI, DO TIPO CASCATA, DE UMA CÉLULA
ELETROLÍTICA A SECO**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2020

SAULO NEVES MATOS

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E DE
CONTROLE PI, DO TIPO CASCATA, DE UMA CÉLULA
ELETROLÍTICA A SECO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Alan Kardek Rêgo Segundo, D.Sc.

Coorientador: Gemírson de Paula Reis, M.Sc.

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2020**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M433d Matos, Saulo Neves .
Desenvolvimento de sistema de instrumentação e de controle PI, do tipo cascata, de uma célula eletrolítica a seco. [manuscrito] / Saulo Neves Matos. - 2020.
53 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rego Segundo.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Energia. 2. Hidrogênio. 3. Eletrólise. 4. Controlador PI. I. Rego Segundo, Alan Kardek. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB:1716

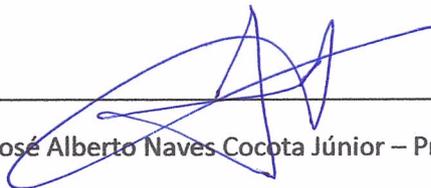
Monografia intitulada DESENVOLVIMENTO DA INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE PI, DO TIPO CASCATA, DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA A SECO, defendida e aprovada em 17 de janeiro de 2020 pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo – Orientador



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado



Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior – Professor Convidado

RESUMO

Tendo em vista o consumo energético crescente no mundo, o uso do hidrogênio como fonte de energia intermediária vem se tornando uma alternativa na busca de novos métodos de produção energética, já que o uso de combustíveis fósseis não serão capazes de suprir a alta demanda mundial a longo prazo. Além disso, os combustíveis fósseis podem acarretar consequências nocivas com a emissão de gases de efeito estufa, os quais causam danos a saúde humana e são os causadores do aumento da temperatura global. Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um sistema de controle de vazão do gás proveniente da eletrólise da água, a qual é feita por uma célula eletrolítica a seco. O hidrogênio gerado tem como finalidade ser utilizado como aditivo em motores de combustão interna, com o objetivo de reduzir a emissão de gases poluentes, melhorar o desempenho de motores a combustão e reduzir o consumo do combustível primário. O estudo é de caráter experimental e consiste no desenvolvimento de um sistema de medição para monitorar as variáveis presentes no processo de eletrólise e de um controlador PI, do tipo cascata em série, cujo objetivo é controlar a vazão do gás produto da eletrólise da água, de forma que a corrente elétrica é controlada para que o controle de vazão seja efetuado. Para o controle de vazão foi usado um sensor de vazão como elemento sensor da realimentação, o qual foi calibrado de forma indireta utilizando um rotâmetro como dispositivo auxiliar do processo, obtendo-se um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9957. Para validar o controle de vazão desenvolvido, foi realizado um experimento em que o valor desejado de vazão foi alterado com cinco valores de diferentes e a saída do controlador convergiu, obtendo-se um erro menor que 0,5 g/h para todos os casos. Estudos de um sistema de controle e de monitoramento para o uso de hidrogênio a partir da eletrólise da água como auxiliar no processo de combustão pode ser considerado como passo importante no processo de obtenção de energia mais limpa e econômica.

Palavras-chaves: Energia. Hidrogênio. Eletrólise. Controlador PI. Controle em cascata. Instrumentação.

ABSTRACT

Given the increasing energy consumption in the world, the use of hydrogen as an intermediate energy source has become an alternative in the search for new methods of energy production, since the use of fossil fuels will not be able to supply, in the long term, the high demand of the world. In addition, fossil fuels can have harmful consequences with the emission of greenhouse gases, which cause damage to human health and cause global warming. This work presents the development of a gas flow control system from water electrolysis, which is made by a dry electrolytic cell. The hydrogen generated is intended to be used as an additive in internal combustion engines, with the aim of reducing the emission of polluting gases, improving combustion engine performance and reducing primary fuel consumption. The study is experimental and consists of the development of a measurement system to monitor the variables present in the electrolysis process and a series cascade PI controller, which aims to control the gas flow from the water electrolysis, so that the current is controlled for flow control to be performed. For flow control a flow sensor was used as the feedback sensor element, which was indirectly calibrated using a rotameter as an auxiliary device of the process, obtaining a coefficient of determination (R^2) equals 0,9957. To validate the developed flow control, an experiment was performed in which the setpoint flow value was changed with five different values and in all cases the controller output converged, resulting in an error of less than 0,5 g/h. Studies of a control and monitoring system for the use of hydrogen from water electrolysis as an aid in the combustion process can be considered as an important step in the process of obtaining cleaner and more economical energy.

Key-words: Energy. Hydrogen. Electrolysis. PI controller. Cascade control. Instrumentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenho de uma célula eletroquímica.	16
Figura 2 – Eletrolisador a seco.	19
Figura 3 – Exemplo de sinal PWM.	21
Figura 4 – Impulso PWM.	22
Figura 5 – Representação de uma ponte H.	23
Figura 6 – Ponte H BTS7960.	24
Figura 7 – Componentes de um sistema de medição.	25
Figura 8 – Desenho esquemático de um sensor efeito Hall.	27
Figura 9 – Módulo sensor de corrente.	27
Figura 10 – Esquemático de um divisor de tensão.	28
Figura 11 – Sensor de temperatura DS18B20.	28
Figura 12 – Sensor de vazão F1012 e rotâmetro.	29
Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.	30
Figura 14 – Malha de controle cascata.	31
Figura 15 – Diagrama de blocos básico da identificação de sistemas.	32
Figura 16 – Curva de reação de um sistema de 1ª ordem.	33
Figura 17 – Diagrama esquemático do circuito.	37
Figura 18 – Bancada de testes para a célula eletrolítica.	37
Figura 19 – Diagrama de blocos do sistema de instrumentação.	38
Figura 20 – Conexão do sensor de vazão no rotâmetro.	38
Figura 21 – Ponte H e instrumentação.	39
Figura 22 – (a) Entrada e saída do sistema em malha aberta.(b) Entrada e saída para obtenção do modelo.	40
Figura 23 – Entrada e saída em malha aberta.	41
Figura 24 – Determinação de parâmetros pelo método da curva de reação.	41
Figura 25 – Calibração do sensor F1012.	42
Figura 26 – Tensão, vazão, corrente e temperatura em função do tempo.	43
Figura 27 – Modelo de saída encontrado pela <i>toolbox system identification</i>	44
Figura 28 – Controle de corrente, em que o valor de referência é mostrado em vermelho e a medida do sensor de corrente em verde.	45
Figura 29 – Diagrama de blocos do controle em cascata.	46
Figura 30 – Controle de vazão, em que o valor de referência é mostrado em vermelho e a medida do sensor de vazão em verde.	46
Figura 31 – Controle de corrente, em que o valor de referência é mostrado em vermelho e a medida do sensor de corrente em verde.	47
Figura 32 – Erro do controle de vazão.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Arduino UNO.	20
Tabela 2 – Sintonia de controladores usando o método IMC.	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PI	Proporcional Integral
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse-Width Modulation</i>)
HHO	Mistura gasosa H_2/O_2
AD	Analógico / Digital
ADC	Conversor Analógico Digital (<i>Analog-To-Digital Converter</i>)
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
CPU	<i>Central Processor Unit</i>
k_p	Ganho Proporcional
k_i	Ganho Integral
T_i	Tempo de Integração
ULA	Unidade Lógica Aritmética
CI	Circuito Integrado
MCU	Unidade de Controle Multipontos
DC	Corrente Contínua

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Trabalhos relacionados	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	13
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
1.3	Justificativa do trabalho	14
1.4	Estrutura do trabalho	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	Hidrogênio	15
2.1.1	<i>Eletrólise da água</i>	16
2.1.2	<i>Fatores que influenciam na eletrólise</i>	17
2.2	Célula eletrolítica	18
2.3	Sistemas embarcados	19
2.3.1	<i>Arduino</i>	19
2.3.2	<i>Microcontrolador</i>	20
2.3.3	<i>Portas de entradas e saídas</i>	20
2.3.4	<i>Conversor analógico-digital</i>	21
2.3.5	<i>PWM</i>	21
2.3.6	<i>Ponte H</i>	22
2.3.6.1	<i>Módulo driver ponte H - BTS7960</i>	23
2.4	Sistemas de medição e instrumentação	24
2.4.1	<i>Calibração de sistemas de medição</i>	25
2.5	Funcionamento dos sensores utilizados no trabalho	26
2.5.1	<i>Sensor de corrente por efeito Hall</i>	26
2.5.2	<i>Sensor de tensão</i>	27
2.5.3	<i>Sensor de temperatura</i>	27
2.5.4	<i>Sensor de vazão</i>	28
2.6	Sistemas de controle	29
2.6.1	<i>Controle em cascata</i>	30
2.6.2	<i>Controlador proporcional integral</i>	30
2.6.3	<i>Controle digital</i>	31
2.6.4	<i>Identificação de sistemas</i>	32
2.6.5	<i>Identificação pelo método da curva de reação</i>	33
2.6.6	<i>Métodos de sintonia para controladores PI</i>	34

3	DESENVOLVIMENTO	36
3.1	Instrumentação da célula eletrolítica	36
3.2	Controle por modulação de largura de pulsos	38
3.3	Modelagem dinâmica e controle PI	39
3.3.1	<i>Controle de corrente</i>	39
3.3.2	<i>Controle de vazão</i>	40
4	RESULTADOS	42
4.1	Calibração do sensor F1012	42
4.2	Instrumentação da célula eletrolítica	42
4.3	Sistema de controle	43
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O consumo energético mundial no ano de 2010 era de 17,4 trilhões de watts e conforme o crescimento populacional esse número tende a crescer. Projeta-se para 2050 setenta e cinco por cento a mais de demanda energética e quase o triplo no final do século (IEA, 2012). Com esse alto consumo, e o uso excessivo de combustíveis fósseis, principalmente nos países emergentes, surge a necessidade de novas alternativas energéticas para suprir as gerações futuras (BENEMANN, 1996).

No Brasil, as principais fontes de energia são provenientes das hidroelétricas, usinas nucleares, combustíveis derivados de petróleo (responsáveis por cerca de oitenta por cento do consumo energético mundial (BRANCO, 2008)), energia solar ou energia eólica. Todas essas fontes energéticas têm aspectos positivos e negativos, porém vale ressaltar as consequências negativas que o uso de combustíveis fósseis pode causar.

A emissão de gases efeito estufa como o dióxido de carbono (CO_2), proveniente da queima de combustíveis fósseis, são considerados por especialistas, causadores do aumento da temperatura global do planeta e de problemas de saúde, tais como doenças respiratórias e cardiovasculares (BRAGA et al., 2001).

Dentre as possibilidades de utilização das energias renováveis destaca-se a economia do hidrogênio. A combustão direta do hidrogênio produz uma quantidade expressiva de energia liberando vapor d'água, ou seja, substância não poluente ao meio ambiente (BENEMANN, 1996). O hidrogênio é um combustível limpo, com poder calorífico superior de 141.86 kJ/g , a 25°C e 1 atm , produz apenas água como produto de combustão e pode ser utilizado em células a combustível (SANTOS; SANTOS, 2005). A economia de hidrogênio prevê um novo paradigma econômico que se baseia no hidrogênio como vetor energético e não mais em uma economia dependente quase em sua totalidade de recursos não renováveis (CGEE, 2010).

Dessa forma, a partir da necessidade de redução de poluentes oriundos da queima de combustíveis fósseis, foi desenvolvido um sistema de instrumentação e controle de um eletrolisador a seco (*dry cell*). O estudo é de caráter experimental e consiste no desenvolvimento do sistema de instrumentação e controle de uma célula de produção de gás de eletrólise. Especificamente, o projeto visa desenvolver um sistema de controle para a vazão do combustível aditivo (hidrogênio). Sendo assim, foi implementado um controlador proporcional integral (PI) do tipo cascata, de forma que para controlar a vazão de gás produzido foi manipulada a corrente da célula de hidrogênio.

Para a implementação do controle de vazão foi utilizado um sensor de vazão mássica na realimentação do sistema, de forma que seu valor medido é comparado com o sinal de referência de vazão (*SetPoint*), obtendo-se como saída do controlador a corrente do sistema. Já para a malha

de controle de corrente, um sensor de corrente foi usado para a realimentação e como sinal de controle o *duty cycle* do sinal PWM (*pulse width modulation*). O uso do PWM foi empregado de forma que foi usado o sinal de uma onda quadrada pulsada, de frequência fixa, em que é possível variar o tempo de sua duração, ou seja, o ciclo ativo da onda. Desse modo, é possível variar a tensão média aplicada à carga, uma vez que é feito um chaveamento que liga e desliga o circuito.

Para sistema de instrumentação para a célula eletrolítica, foram usados sensores de vazão, corrente, temperatura e tensão. O sensor de vazão foi calibrado de forma indireta utilizando-se um rotâmetro como dispositivo auxiliar do processo de calibração; e por regressão linear, foi obtida a equação de calibração do sensor de vazão mássica.

1.1 Trabalhos relacionados

O potencial de uso do hidrogênio como fonte intermediária de energia vem se concretizando e uma inserção desse gás na economia, vista como uma integração da geração, armazenamento e uso de hidrogênio, oferece possibilidades para a gestão de energia no futuro. O hidrogênio pode ser gerado por fontes renováveis, nuclear e por combustíveis fósseis com captura e sequestro de carbono (KNOB, 2013).

Destaca-se a obtenção do hidrogênio pelo processo de eletrólise da água, em que se obtém como produtos o hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2) puros (hidrogênio em maior proporção), sendo, portanto, o gás de eletrólise um gás rico em hidrogênio. Consequentemente, o impacto ambiental nesta forma de produção é indireto (LEROY; JANJUA; RENAUD, 2012).

A eletrólise consiste na aplicação de um potencial elétrico nos eletrodos do eletrolisador, imersos na água destilada misturada a substâncias conhecidas como eletrólito, cujo objetivo é promover uma conectividade iônica que possa tornar possível a reação química capaz de quebrar a molécula da água. Dentre os eletrólitos atualmente usados, o KOH (hidróxido de potássio) possui ampla aplicação em células eletrolíticas industriais como meio condutor (ONDA, 2004).

A injeção de hidrogênio em menores quantidades nos motores de combustão interna é capaz de reduzir a emissão de gases poluentes, melhorar o desempenho e economizar no consumo do combustível primário. Uma abordagem desse tipo torna possível a adaptação de motores já existentes no mercado, de forma a aumentar sua eficiência e, com isso, reduzir os impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis derivados do petróleo, porém sem a necessidade da substituição de tecnologia já amplamente utilizada. Da mesma forma, o direcionamento do desenvolvimento gradativo de alternativas aos combustíveis fósseis cria um cenário de transição viável, no qual a pesquisa e o desenvolvimento de produtos e patentes devem ser incentivados de forma descentralizada visando maior acessibilidade e simplicidade das soluções práticas (ZHOU, 2016).

Sistemas de automação visam controle de processos sem a intervenção humana e são amplamente usados para redução de erros e obter maior confiabilidade, produção, qualidade

e segurança. A tecnologia de se controlar processos é largamente utilizada em diversas áreas da engenharia, inclusive em abordagens de produção de hidrogênio. Tem-se, por exemplo, a indústria automobilística, a qual é uma das maiores do mundo, em que existe um crescimento das pesquisas tecnológicas em relação ao tipo de combustível a ser utilizado (BALTACIOGLU, 2018).

Existem vários parâmetros que influenciam no processo de eletrólise. Os principais são corrente, design de um gerador, material da célula, concentração de eletrólitos e espaçamento dos eletrodos (BALTACIOGLU, 2018). A utilização de princípios de Modulação por Largura de Pulsos pode ser empregada a fim de se criar pulsos de tensão com duração variada a partir de uma alimentação fixa. Dessa forma, varia-se a tensão média aplicada à carga e controla-se a transferência de potência elétrica para o eletrolizador (COELHO, 2013).

Matienzo (2018), efetuou um controle da produção de gás produto da eletrólise, usando a técnica PWM, para que o gás fosse utilizado como aditivo em um motor a diesel para rotações inferiores a 1750 *rpm*. Foi verificado que a célula obteve melhor eficiência usando uma corrente entre 6 a 10 *A*, porém a tensão e a corrente foram alteradas de forma manual.

Baltacioglu (2018), realizou um controle em malha aberta, usando a modulação por largura de pulsos de forma automática, ou seja, utilizou um microcontrolador para relacionar a rotação do motor com a tensão aplicada no eletrolizador.

De acordo com Figueredo (2018), a adição do gás de eletrólise (HHO) em um motogerador diesel proporciona 5,7% de redução no consumo de combustível diesel para a concentração de 20,0 *g/l* de *KOH* em água destilada da célula eletrolítica. Para Cervantes-Bobadilla et al. (2018), em motores de ciclo Otto, a utilização do hidrogênio como aditivo da gasolina proporciona o aumento da eficiência térmica em 4%, de combustão em 0,6% e de potência de 545 *W* reduzindo o consumo do uso de combustível fóssil. Além disso, Uludamar et al. (2017) comprovaram que a vida útil de motores pode ser aumentada com a redução da vibração do motor ao se utilizar uma quantidade ótima de hidrogênio como aditivo em motores a diesel .

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

No presente trabalho tem-se o objetivo desenvolver um sistema de instrumentação e controle do tipo proporcional integral aplicado a uma célula eletrolítica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema de instrumentação para a célula de hidrogênio para medir temperatura, corrente, tensão e vazão de gás produzida;

- Controlar a tensão de alimentação do eletrolisador por modulação de largura de pulso (PWM);
- Desenvolver um controlador PI do tipo cascata da corrente de alimentação e da vazão mássica do gás rico em hidrogênio;

1.3 Justificativa do trabalho

Tendo em vista a alta demanda energética mundial e as consequências nocivas causadas pela combustão de combustíveis fósseis, o presente trabalho é um passo importante para o uso do hidrogênio como aditivo na combustão, a fim de reduzir a emissão de gases poluentes, melhorar desempenho de motores e reduzir o consumo de combustíveis primários.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi estruturado em 5 seções: (I) introdução; (II) revisão da literatura; (III) desenvolvimento; (IV) resultados e (V) conclusão.

Na seção “Introdução”, é contextualizado o objeto de pesquisa, os objetivos do trabalho, a justificativa para realização e a estrutura do trabalho. Na “Revisão da literatura”, é feita a revisão bibliográfica acerca dos conceitos relevantes para fundamentação da pesquisa. Apresenta-se o uso de hidrogênio como aditivo, uma descrição do processo da eletrólise da água, em que são exibidos os fatores que influenciam no processo de eletrólise. São abordados também, conceitos de sistemas de controle, sistemas embarcados, metrologia e instrumentação.

Em “Desenvolvimento”, é exibida uma descrição dos métodos abordados na área de estudo e dos materiais utilizados na pesquisa. Na seção “Resultados”, são apresentados os dados obtidos nos experimentos, as saídas dos controladores desenvolvidos, a calibração do sensor de vazão mássica e a instrumentação da célula eletrolítica. Na “Conclusão” são mostradas as conclusões a respeito do sistema de medição e controle desenvolvido, bem como abordagens para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais leve da tabela periódica, possui baixíssima densidade e alto poder calorífico (o maior dos combustíveis conhecidos), isto é, possui elevada quantidade de energia por unidade de massa e possui faixa de limites de inflamabilidade: entre 4% a 74%, a 25 °C (SUJIMURA; SUZUKI, 2017). O hidrogênio possui poder calorífico inferior (PCI) de 120 kJ/g e 858 K de temperatura de autoignição, enquanto o óleo diesel apresenta 42,5 kJ/g de PCI e 553 K de temperatura de autoignição (LAMBE; WATSON, 1992).

O átomo de hidrogênio é representado quimicamente pela letra H e, como elemento mais simples descoberto, é composto por apenas um próton e um elétron. Com características muito particulares ele não se encaixa em nenhum grupo de elementos, isto porque sua natureza eletropositiva o assemelha à família dos metais alcalinos, porém também se assemelha aos halogêneos, por aceitar apenas um elétron na sua camada de valência (PASSOS, 2016).

Sua primeira evidência surgiu quando Paracelsus (1493– 1591) misturou metais com ácidos e produziu um “ar explosivo”. De acordo com Rifkin (2003) o átomo de hidrogênio foi descoberto em 1776, por Henry Cavendish (1731 – 1810), por meio de experimentos onde se realizava a decomposição da água .

Foi em 1923 em que ocorreu a descoberta que o hidrogênio pode ser utilizado como combustível. John Haldane (1892–1964) argumentou em um tratado científico, o qual relatava o gás como ele seria produzido, armazenado e aplicado (HOUSEMAN; CERINI, 1974). Somente em 1974 o hidrogênio, oriundo da eletrólise, foi estudado como aditivo em motores de combustão, no artigo *On-Board Hydrogen Generator for a Partial Hydrogen Injection Internal Combustion Engine publicado pela Society of Automotive Engineers (SAE)* (HOUSEMAN; CERINI, 1974).

Hidrogênio pode ser extraído de combustíveis fósseis, como o gás natural e carvão. Também pode ser extraído de combustíveis renováveis como etanol e outras biomassas, além da água (KNOB, 2013). Atualmente, aproximadamente 41 milhões de toneladas de hidrogênio produzidas no mundo, sendo que 96% é obtido a partir de matérias-primas fósseis, processo caro e baseia-se principalmente na gaseificação de hidrocarbonetos combinada com vapor de água a alta temperatura e pressão. Os 4% restantes da produção de hidrogênio vem da dissociação da molécula de água por meio de eletrólise, durante a qual também é obtido oxigênio, tornando-se o processo de alto desempenho capaz de tirar proveito da matéria-prima na sua totalidade (CERVANTES-BOBADILLA et al., 2018).

2.1.1 Eletrólise da água

O hidrogênio pode ser obtido por meio de combustíveis fósseis, porém é emitido gás carbônico durante o processo. Existem técnicas de produção de hidrogênio que não emitem gás carbônico, tem-se como exemplo a produção por reforma de biocombustíveis líquidos, gaseificação de biomassa, usinas térmicas (eletrólise de alta temperatura e ciclo termoquímico), eletrólise da água, quebra fotoeletroquímica da água e biológica (KNOB, 2013).

Eletrólise é a quebra da molécula d'água (H_2O) em hidrogênio e oxigênio com a passagem de corrente elétrica (SANTILLI, 2006). É um processo eletroquímico em que a energia elétrica é a força motriz da reação química. As substâncias em eletrólise são decompostas devido a passagem de corrente elétrica. O hidrogênio é produzido por eletrólise inserindo-se dois eletrodos na água destilada misturada com algum eletrólito de boa condutividade iônica. Assim, ocorrerá a transformação de energia elétrica em energia química, de forma que a molécula da água se divide, produzindo oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo (IVY, 2004).

Na Figura 1 é mostrado o diagrama esquemático de uma célula eletroquímica, em que íons de hidrogênio carregados positivamente migram para o cátodo carregado negativamente, onde são reduzidos para formar o gás hidrogênio (H_2). No outro eletrodo, o ânodo, forma-se de maneira análoga o gás oxigênio (O_2) (KNOB, 2013).

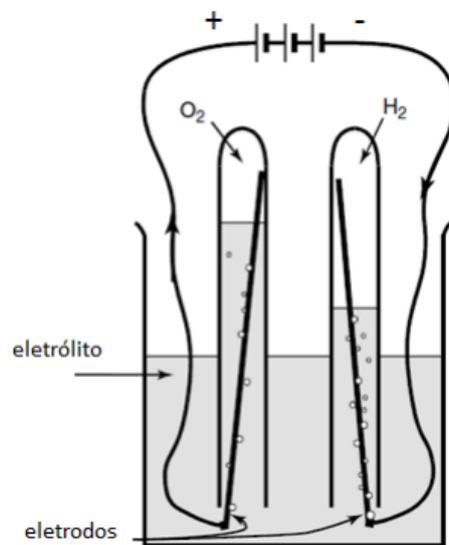
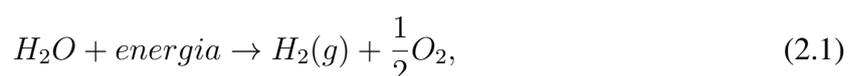


Figura 1 – Desenho de uma célula eletroquímica.

Fonte: Larminie, Dicks e McDonald (2003).

A Equação 2.1 demonstra o processo de quebra da água em hidrogênio e oxigênio, enquanto as Equações 2.2 e 2.3 mostram o processo no ânodo e no cátodo, respectivamente:





Os gases obtidos no processo de eletrólise da água são o hidrogênio, que se forma no cátodo, e o oxigênio, que se forma no ânodo, e de acordo com a lei de Faraday são proporcionais à sua massa molar no eletrólito (ESTÊVÃO, 2008). Assim a quantidade de gás teórico produzido pode ser calculada pela primeira Lei de Faraday, conforme é mostrado na Equação 2.4:

$$V = \frac{R \cdot I_f \cdot T \cdot t}{F \cdot p \cdot Z}, \quad (2.4)$$

em que: V é o volume de gás (l); R a constante universal dos gases (8.3145 kJ/kmol.K); I_f a corrente (A); T a temperatura (K); t o tempo (s); F a constante de Faraday ($96.484,56 \text{ C/mol}$); p a pressão (kPa); Z o fator que leva em consideração a quantidade de elétrons que atravessa a célula eletrolítica.

2.1.2 Fatores que influenciam na eletrólise

Geralmente, sistemas de produção de hidrogênio têm sua eficiência em torno de 40 e 70% (BALTACIOGLU, 2018). Existem alguns fatores que influenciam nessa eficiência, tais como o aumento da densidade de corrente, a pressão de operação, temperatura e a condutividade da solução eletrolítica (SUBRAMANIAN; ISMAIL, 2018). Além disso, fatores como o tipo e a qualidade do eletrólito, o material e espaçamento dos eletrodos, podem ser críticos na produção de hidrogênio.

Os eletrólitos são substâncias utilizadas para alterar a natureza não condutora da água e devem ter uma concentração em torno de 25 a 30% por litro de água (MAZLOOMI; SULAIMAN, 2012). O hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio ($NaOH$) e o cloreto de sódio ($NaCl$) são eletrólitos comumente utilizados.

A maioria dos eletrolisadores alcalinos de água convencionais são projetados para funcionar a uma temperatura em torno de 80-90 °C. No entanto, quanto maior a temperatura de operação, maior a perda de água devido à evaporação e maiores as exigências para os materiais quanto à integridade estrutural (KNOB, 2013). Segundo Ganley (2009), algumas células mais modernas chegam a temperaturas de até 400 °C, porém uma temperatura típica de trabalho esperada para este tipo de célula é entre 65 °C e 90 °C. Eletrolisadores que operam a altas temperaturas (superiores a 100 °C) apresentam melhores eficiências uma vez que a condutividade do eletrólito é diretamente proporcional à temperatura e lembrando que calor contribui na cinética das reações envolvidas.

Mazloomi e Sulaiman (2012) demonstraram que com o aumento da pressão de operação o consumo energético é diminuído, uma vez que o diâmetro das bolhas de gás são reduzidos. Al-Rousan e Sa'ed (2018) comprovaram que a pressão e a corrente são componentes críticos na produção de hidrogênio, bem como a distância entre os eletrodos, que se estiverem muito próximos, acarretam na diminuição da produção do gás em baixas temperaturas, já que o eletrodo pode obstruir as bolhas de gás.

O material do eletrodo deve possuir as seguintes características: boa resistência à corrosão, alta condutividade elétrica, propriedades catalíticas apropriadas para a reação e integridade estrutural adequada para a aplicação. Já o eletrólito deve-se manter inerte durante todas as etapas da reação, ou seja, não deve sofrer nenhum tipo de mudança química ou estrutural e principalmente, não deve reagir com o material dos eletrodos (URSÚA, 2013).

2.2 Célula eletrolítica

A célula eletrolítica é o dispositivo em que ocorre a reação eletroquímica de decomposição da água, onde se produz o hidrogênio e o oxigênio. Elas podem ser divididos em dois tipos: os eletrolisadores alcalinos e os eletrolisadores do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*) (GAMBETTA, 2010).

Os eletrolisadores alcalinos recebem esse nome pelo tipo de eletrólito utilizado que normalmente é alcalino. O gás produzido passa por um reservatório que atua como um borbulhador. Esse gás será usado no processo de combustão como aditivo ao combustível. No borbulhador, o fluido de contato com o gás retorna a célula sob gravidade (MIYAMOTO, 2011).

No mercado, podem ser encontrados dois tipos de eletrolisadores alcalinos, o do tipo molhado, o qual é caracterizado por ter as placas submersas por completo na solução eletrolítica e o seco (*dry cell* Figura 2), em que as placas possuem disposição diferente do eletrolisador seco e não entram em contato com a solução eletrolítica.

A principal característica dos eletrolisadores PEM é ter um eletrólito sólido, uma membrana polimérica capaz de transportar prótons e normalmente a membrana utilizada um polímero conhecido como Nafion. A membrana tem somente 0,25 mm de espessura e serve também como uma membrana separadora entre os gases evoluídos, permitindo maior proximidade entre os eletrodos (PERLES, 2008). O material utilizado nos eletrodos basicamente é grafite com cobertura de platina e em projetos mais recentes também aparecem misturas de óxidos como eletrocatalisadores (LYMBEROPOULOS, 2005).

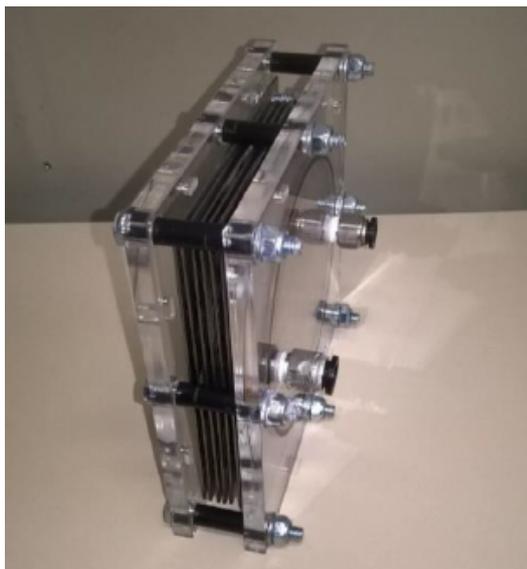


Figura 2 – Eletrolisador a seco.

Fonte: [Passos \(2016\)](#).

2.3 Sistemas embarcados

Sistemas embarcados são módulos computacionais integrados a equipamentos e dispositivos físicos que realizam um conjunto de tarefas pré-definidas, normalmente com requisitos específicos ([DOUGLASS, 2004](#))

Esses sistemas são dedicados a tarefas específicas e por meio de técnicas de engenharia pode-se otimizar um projeto reduzindo recursos computacionais, tamanho e custo do produto. Estão presentes nas indústrias automotivas, robóticas, farmacêuticas e etc ([TRINDADE et al., 2009](#)).

É necessário o uso de um microcontrolador para que as tarefas propostas sejam desenvolvidas, o qual dispõe de todos os componentes necessários ao controle de um processo. Este dispositivo está provido internamente de uma CPU (*Central Processor Unit*), memória de dados e de programa, comunicação serial, contadores, timers, conversores analógico-digitais, PWMs, dentre outros, integrados em um mesmo componente ([SOUSA; LAVINIA, 2006](#)).

2.3.1 Arduino

Arduino é uma placa microcontrolada de código aberto que conta com um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) e utiliza um microcontrolador da família Atmel. Sua multiplataforma é baseada em softwares e hardwares abertos, permitindo a interação física entre o ambiente e o computador de forma simples, a partir de portas de entradas e saídas, aliado ao baixo custo e à versatilidade ([SANTOS, 2009](#)).

Existem diversos modelos de plataformas Arduinos: NANO, MEGA, DUE, UNO, entre outros; nos quais as principais diferenças são: a capacidade de processamento, o tamanho do hardware, a memória, a quantidade de entradas e saídas (TORGA, 2016).

O Arduino UNO tem 14 pinos de entrada / saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de energia, um conector ICSP e um botão de *reset*. Na Tabela 1 são mostradas algumas características da placa (ARDUINO, 2019b).

Tabela 1 – Características Arduino UNO.

Microcontrolador	Atmega328P
Tensão Operacional	5 V
Tensão de Alimentação (recomendada)	7 – 12 V
Tensão de Alimentação (limites)	6 – 20 V
Pinos I/O Digitais	14 (dos quais 6 podem ser saídas PWM)
Pinos de Entrada Analógica	6
Corrente Contínua por Pino I/O	20 mA
Corrente Contínua do Pino 3,3 V	50 mA
Memória Flash	32 kB (Atmega328P)
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Frequência do Clock	16 MHz

2.3.2 Microcontrolador

O microcontrolador pode ser definido como um componente eletrônico, que se encarrega de executar processos lógicos e operações matemáticas por meio de sua Unidade Lógica Aritmética (ULA), que está contida na unidade de processamento central (CPU). Encapsulado em uma única pastilha de silício (conhecido como CI – circuito integrado), ele contém todos periféricos necessários para seu funcionamento; unidade de memória, unidade de processamento (CPU), portas de entrada e saída, comunicação serial, *timers*, unidade de temporização, *Watchdog*, PWM's e conversores analógicos-digitais (SOUSA; LAVINIA, 2006).

2.3.3 Portas de entradas e saídas

Para os 14 pinos de entradas e saídas digitais, utiliza-se as funções *digitalRead()* e *digitalWrite()* para leitura e escrita, respectivamente. Cada pino pode fornecer ou receber no máximo 40 mA para não ocasionar danos permanentes ao microcontrolador. Para os 6 pinos de entradas analógicas (A_0, \dots, A_5) utiliza-se a função *analogRead()*, que apresentam resolução de 10 bits, ou seja, convertem o sinal analógico para um valor de 0 a 1023. Para todos esses pinos é utilizada a função *pinMode(pin, estado)*, no qual *pin* define a porta e *estado* seleciona a opção de entrada (*Input*) ou saída (*Output*), na declaração do programa (TORGA, 2016).

2.3.4 Conversor analógico-digital

O conversor analógico-digital (*Analog to Digital Converter - ADC*) é um dispositivo que, geralmente, está disponível nas unidades de controle multiponto (SEGUNDO, 2010). Converte um sinal analógico para um sinal digital entre um componente analógico e um digital. O sinal digital que corresponde ao analógico é uma aproximação, já que o sinal analógico pode assumir um número infinito de valores, enquanto a variedade de diferentes números que podem ser formados por um conjunto finito de dígitos no processo de amostragem, é limitada (OGATA, 1995).

Conversores A/D são especialmente úteis em aplicações de monitoramento e controle, devido ao fato de grande parte dos sensores produzir tensões de saída analógicas (IBRAHIM, 2001).

2.3.5 PWM

PWM é uma técnica que consiste em variar a tensão entregue às cargas, aplicando uma onda quadrada e mantendo uma frequência fixa e variando somente o ciclo ativo desta onda (*duty cycle*). Em um sistema PWM, a chave de estado sólido (normalmente IGBT, MOSFET ou transistor bipolar) é usada para controlar o fluxo de corrente, ora conduzindo, ora não conduzindo (PEREIRA, 2005). Essa técnica permite uma variação entre 0 e 100% da tensão média entregue, conforme apresentado na Figura 3 e na Equação 2.5 (PEREIRA, 2005):

$$V_{media} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt, \quad (2.5)$$

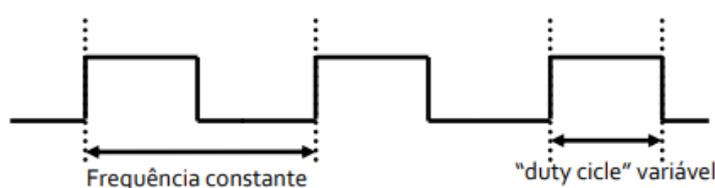


Figura 3 – Exemplo de sinal PWM.

Fonte: Sousa e Lavinia (2006)

em que, T representa o período e $V(t)$ representa a tensão em função do tempo. Na Figura 4, considerando-se t_p a duração de um pulso, e V_{pulso} representa a tensão do pulso no sinal (V), obtém-se a Equação 2.6:

$$V_{media} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_p} V_{impulso} dt + \int_{t_p}^T 0 dt \right). \quad (2.6)$$

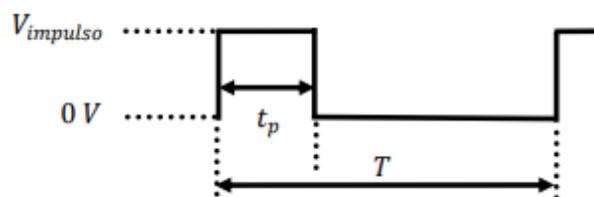


Figura 4 – Impulso PWM.

Fonte: [Sousa e Lavinia \(2006\)](#)

Dessa forma, pode-se concluir que a tensão média é diretamente proporcional ao *duty cycle* do sinal PWM ([SANTOS, 2009](#)):

$$V_{media} = \frac{t_p}{T} V_{impulso}. \quad (2.7)$$

Os pinos digitais 3, 5, 6, 9, 10 e 11 do Arduino UNO permitem a geração do sinal PWM. A frequência a dos pinos 5 e 6 é de 980 *Hz* enquanto dos demais pinos é 490 *Hz*, podendo esta ser alterada de acordo com as necessidades do projeto. As alterações são realizadas configurando-se os respectivos *timers* por meio de seus registradores:

- Pinos 5 e 6 – *Timer0*;
- Pinos 9 e 10 – *Timer1*;
- Pinos 3 e 11 – *Timer2*.

2.3.6 Ponte H

Uma ponte H é geralmente utilizada para acionamento e alteração de sentido de rotação de motores DC. É constituída de quatro elementos de chaveamento dispostos como no circuito da Figura 5. Fechando-se chaves em posições diametralmente opostas (S1:S4 ou S2:S3) na ponte H, o motor gira em sentido horário ou anti-horário, dependendo do par de chaves ligadas, de forma que o outro par de chaves permaneça desligado ([OLIVEIRA, 2014](#)).

Os elementos de chaveamento são em geral de estado sólido. Dependendo principalmente da potência da carga a ser acionada, podem ser utilizados transistores BJT, MOSFETs ou IGBTs ([OLIVEIRA, 2014](#)).

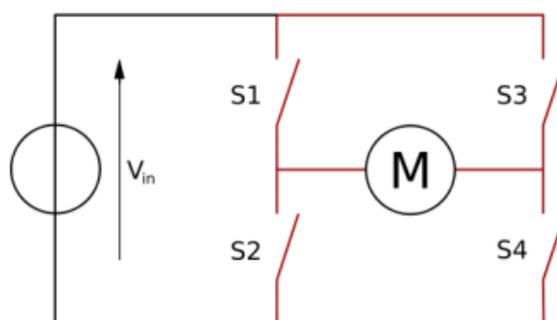


Figura 5 – Representação de uma ponte H.

Fonte: [WIKIPEDIA \(2019\)](#)

2.3.6.1 Módulo driver ponte H - BTS7960

Apesar de que na abordagem de controle de hidrogênio não existir aplicação com uso de os dois pares de chaves, já que a corrente deve percorrer apenas por um caminho, a escolha do uso de uma ponte H se deu pelo fato de que o modelo escolhido suporte alta corrente e não necessita de dobradores de tensão ou *gate drivers* para que o MOSFET seja saturado. Em outras palavras, os 5 V fornecidos pelo sinal PWM gerado pelo Arduino são capazes de chavear o MOSFET e, dessa forma, a conexão é realizada de forma direta do pino digital do Arduino para o módulo BTS7960 (Figura 6).

Dados técnicos do módulo:

- Tensão de Alimentação: 5 – 45 V DC;
- Máxima corrente contínua: 43 A;
- Máxima corrente de pico: 60 A;
- Proteção: Térmica, sobretensão, subtensão, sobrecorrente;
- Dimensões: 50x50x48 mm;
- Frequência máxima de PWM: 25 kHz (utilizando diodo de roda livre).

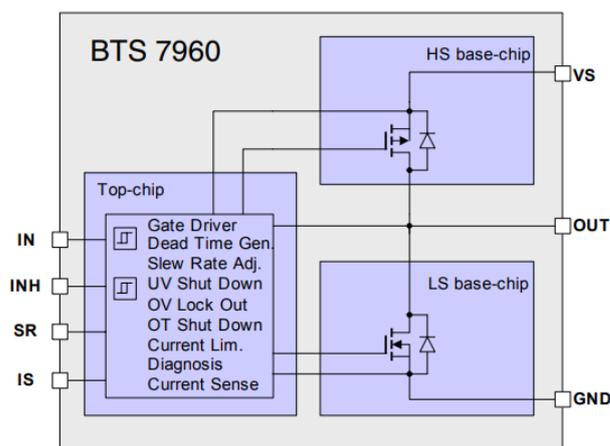
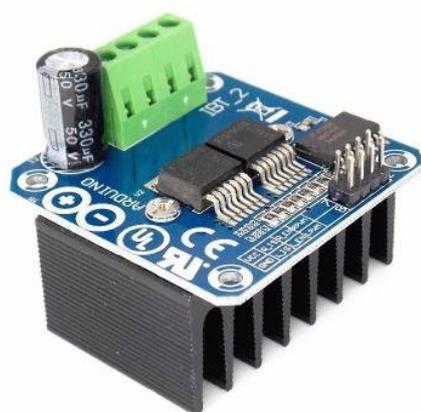


Figura 6 – Ponte H BTS7960.

Fonte: [ALSELECTRO \(2019\)](#)

2.4 Sistemas de medição e instrumentação

A instrumentação é área do conhecimento que agrega os campos da engenharia e das ciências e que se desenvolve conjuntamente com a eletrônica e a informática produzindo sensores e transdutores mais precisos ([BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011](#)).

[Albertazzi e Souza \(2008\)](#) afirmam que a grande maioria dos sistemas de medição são compostos por transdutores, unidade de tratamento de sinais e dispositivo mostrador e/ou registrador (Figura 7).

- Transdutores

Transdutor é módulo do sistema de medição que está em contato com o mensurando, gerando um sinal de medição proporcional ao sinal do mensurando. Transdutores são dispositivos compostos por um elemento sensor e um elemento conversor, que podem funcionar a partir da variação de três grandezas fundamentais: resistência, indutância e capacitância. O elemento sensor é diretamente afetado pelo mensurando, já o conversor, transforma efeitos físicos, como por exemplo, um sinal mecânico que pode ser transformado em sinal elétrico. Geralmente são usados em medições em que relacionam a grandeza de saída com a grandeza de entrada.

- Unidade de tratamento de sinais

O sinal gerado pelo transdutor deve ser amplificado, pois geralmente é de baixa potência. Essa é a função da unidade de tratamento de sinais, e em alguns dispositivos mais complexos ela ainda deve realizar algumas compensações, filtragens e tratamentos de erro. Essa unidade é também conhecida como condicionador de sinais, processa o sinal do transdutor, e normalmente amplifica sua potência.

- Dispositivo mostrador e/ou registrador

O dispositivo mostrador é o módulo do sistema de medição que torna o sinal de medição perceptível ao usuário. Ou seja, são dispositivos usados para mostrar e registrar a medida de interesse de forma que possa ser lida e interpretada.



Figura 7 – Componentes de um sistema de medição.

Fonte: [Albertazzi e Souza \(2008\)](#)

2.4.1 Calibração de sistemas de medição

Calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, os valores indicados por um instrumento de medição ou de um sistema de medição e os valores correspondentes estabelecidos por padrões. A forma usual de caracterizar o desempenho metro-lógico de um sistema de medição é a calibração. Dessa forma é possível verificar se os valores indicados pelo sistema de medição são relacionados com o mensurando. Existem quatro tipos de calibração de sistemas: direta, indireta, *in loco* e parcial ([ALBERTAZZI; SOUZA, 2008](#)).

- Calibração Direta

É utilizado um valor de referência padrão, o qual é comparado com a indicação do sistema de medição a ser calibrado. O uso de massas padrões para se calibrar uma balança é um exemplo de calibração direta, e apesar de ser um trabalho oneroso, sendo necessário possuir diversos padrões, essa técnica é mais comumente utilizada, pelo fato de ser bastante eficiente, preservando as características metrológicas do sistema de medição por longos períodos.

- Calibração Indireta

É utilizado em situações em que é inviável obter-se valores padrões de determinada grandeza, ou mesmo não existem medidas materializadas. Desse modo, é usado um dispositivo auxiliar para medir determinada grandeza e assim promover a calibração do sistema, e a medição do dispositivo auxiliar é comparada com a do sistema a ser calibrado. As incertezas do sistema de medição-padrão são dimensionadas de forma a serem dez vezes melhores que a do sistema de medição a calibrar, de tal forma que as diferenças encontradas entre as indicações possam ser atribuídas aos erros do sistema de medição a calibrar.

- Calibração *In Loco*

O sistema é calibrado em seu local de uso, apesar de que ao se realizar o procedimento em laboratório, em que todas as condições para o funcionamento são controladas, em alguns casos, as condições de uso são muito diferentes do laboratório de calibração, de forma que os resultados da calibração se tornam inválidos.

- Calibração Parcial

A calibração não é feita no sistema de medição como um todo, devido a dificuldades tecnológicas para se obter as grandezas padrões de qualidade. Dessa forma, cada módulo do sistema é calibrado de forma individual. Nestes casos, é comum efetuar calibrações separadamente em alguns módulos do sistema, tendo sempre em vista que estes devem apresentar um sinal de saída definido (resposta) para um sinal de entrada conhecido (estímulo). A análise do desempenho individual de cada módulo possibilita a determinação das características de desempenho do conjunto.

2.5 Funcionamento dos sensores utilizados no trabalho

De acordo com [Thomazini e Albuquerque \(2007\)](#), sensor é um dispositivo sensível a alguma forma de energia do ambiente que pode relacionar informações sobre uma grandeza que precisa ser medida, como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, posição, etc.

Dentre as classificações dos sensores, destacam-se a de sensor digital e sensor analógico. O sensor digital pode assumir apenas dois valores no seu sinal de saída ao longo do tempo, sendo interpretados como zero '0' ou '1'. Naturalmente, grandezas físicas não assumem esses valores, porém elas são assim representadas pelo sistema quando convertidos pelo circuito eletrônico do transdutor ([GOMIDE, 2015](#)).

Os sensores analógicos, também chamados de sensores de saída linear, são mais complexos que os digitais, porém oferecem dados mais representativos sobre um processo. Esse tipo de sensor admite qualquer valor no seu sinal de saída ao longo do tempo, desde que esteja dentro da sua faixa de operação ([THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2007](#)).

2.5.1 Sensor de corrente por efeito Hall

Em 1879 Edwin H. Hall observou uma diferença de potencial (tensão de Hall) nas extremidades de uma fina lâmina de material condutor inserido num campo magnético perpendicular à superfície, quando uma corrente flui através da lâmina, como é mostrado na Figura 8.

A tensão de Hall que aparece nos terminais da lâmina é resultado da força de Lorentz a qual todo elétron que se move dentro de um campo magnético experimenta. Esta força é perpendicular ao campo magnético e à direção do movimento do elétron. Elétrons em movimento na lâmina, atravessada pelo campo magnético serão deslocados para um dos lados da lâmina resultando numa tensão proporcional à intensidade do campo ([HALLIDAY; RESNICK, 1993](#)).

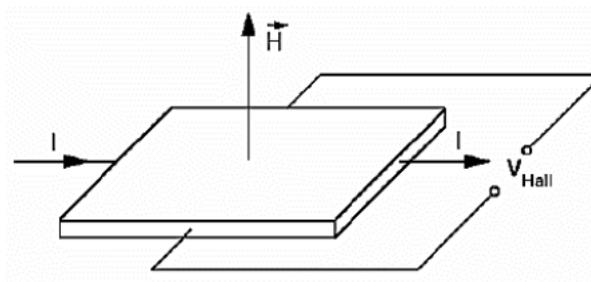


Figura 8 – Desenho esquemático de um sensor efeito Hall.

Fonte: [Halliday e Resnick \(1993\)](#)

Existem diversos sensores cujo funcionamento é baseado nesse fenômeno. Neste trabalho, foi usado o sensor de corrente ACS712, o qual é capaz de detectar a presença do campo magnético com a passagem de corrente, gerando em sua saída uma tensão proporcional de 66 mV . Na Figura 9 é mostrado o módulo ACS712.

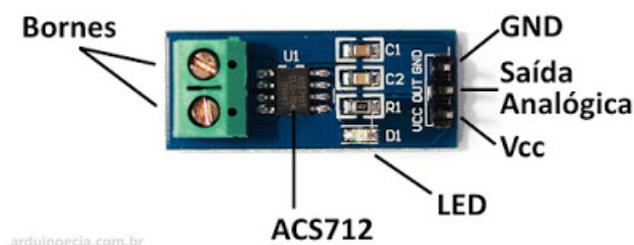


Figura 9 – Módulo sensor de corrente.

Fonte: [ARDUINO \(2019a\)](#)

2.5.2 Sensor de tensão

Para medir a tensão, foi utilizado o sensor de tensão $0\text{-}25\text{ V DC}$. Ele é baseado no princípio de divisor de tensão, ou seja, aplica-se uma tensão aos resistores associados em série e determina-se a queda de tensão sobre o resistor desejado, conforme é mostrado na Figura 10.

Com o módulo medidor de tensão, é possível realizar medições analógicas de uma tensão de entrada até 5 vezes maior, visto que a faixa de medição do conversor analógico-digital do Arduino é de $0\text{-}5\text{ V}$.

2.5.3 Sensor de temperatura

Para medir a temperatura da célula eletrolítica utilizou-se o sensor DS18B20 que fornece uma leitura de 12 bits que indicam a temperatura do dispositivo. O DS18B20 opera na faixa de

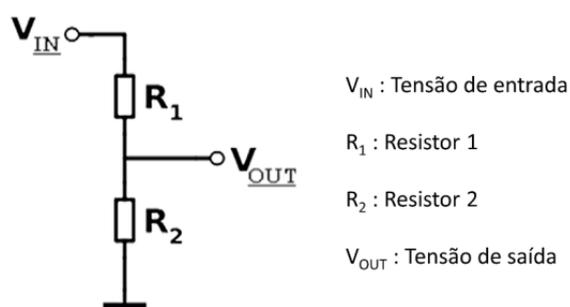


Figura 10 – Esquemático de um divisor de tensão.

Fonte: [Figueredo \(2018\)](#)

–55 °C à +125 °C e possui uma precisão de $\pm 0,5$ °C ao longo do intervalo de –10 °C a 85 °C e possui uma saída digital, ilustrado na Figura 11 ([STORE, 2019](#)).



Figura 11 – Sensor de temperatura DS18B20.

Fonte: [STORE \(2019\)](#)

2.5.4 Sensor de vazão

Para medição da vazão do gás de eletrólise (HHO) utilizou-se o sensor Winsen F1012, Figura 12, que é de baixo custo, em relação a outros sensores de vazão de gás existentes no mercado. Ele mede fluxo volumétrico de gás com alta precisão na faixa de 0 a 2000 cm^3/min na saída da célula eletrolítica.

Esse sensor adota o princípio termodinâmico para detectar o fluxo de gás. O F1012 possui sensor de temperatura que tem a função de medir a vazão de gás por gradiente de temperatura medido por dois fios que convertem esta diferença de temperatura em uma saída linear analógica de tensão. Ele apresenta boa repetibilidade e resposta rápida para temperaturas de trabalho entre 0 e 50 °C ([WINSEN, 2019](#)).

Para calibrar o sensor de vazão, foi usado um rotâmetro, cuja incerteza é de $\pm 0,1$ g/h e que tem como característica um funcionamento baseado no equilíbrio das forças peso, arraste e

empuxo sobre o flutuador, de aço inoxidável AISI 316 ou PTFE, que se move na medida em que há aumento do fluxo de gás no interior de sua tubulação de vidro (OMEL, 2019). O sensor de vazão e o rotâmetro são mostrados nas Figura 12.



Figura 12 – Sensor de vazão F1012 e rotâmetro.

Fonte: WINSEN (2019) e OMEL (2019)

2.6 Sistemas de controle

Um sistema a controlar pode ser parte de um equipamento ou apenas um conjunto de componentes de um equipamento que funcione de maneira integrada, com o objetivo de realizar determinada operação. Neste trabalho, sistema a controlar é denominado a qualquer objeto físico a ser controlado (como fornos, reatores químicos, componentes mecânicos, espaçonaves etc) (OGATA, 2003).

Sistemas de controle em malha aberta são sistemas no qual a saída (variável medida) não exerce nenhuma influência na ação de controle. Não existe retroalimentação do sinal para comparação com a entrada.

O controle de sistemas em malha fechada utiliza um sinal de medição atual da saída do sistema $C(s)$, para comparar com um sinal de referência previamente estabelecido $R(s)$. A diferença entre esses sinais é o erro do sistema $E(s)$, utilizado para aplicar um sinal de controle $U(s)$ na planta a ser controlada $G_p(s)$, de acordo com a Figura 13 (OGATA, 2003).

É necessário analisar o sinal de erro (diferença entre o sinal de saída e o valor de referência), e aplicar uma correção no sinal de entrada da planta (sistema a ser controlador). Para tanto há vários tipos de controladores, cada um de uso adequado para uma aplicação (FERREIRA, 2014).

Assim, pode-se afirmar que todo sistema de controle retroalimentado possui três componentes básicos: controlador, atuador e sensor, cuja principal característica é a realimentação das informações requeridas para seu controle (JOVIC, 1986).

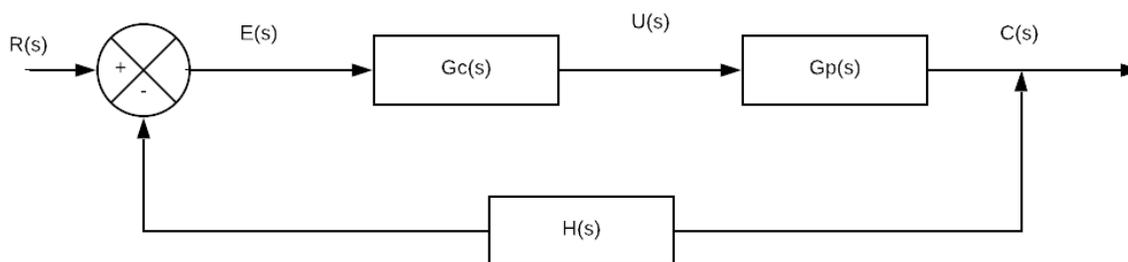


Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.

Em um controle digital, o processamento do sistema de controle é promovido por um sistema com capacidade computacional, o que acarreta em um aumento na sensibilidade da medição e a capacidade de reconfigurar facilmente, via software, o algoritmo de controle (DORF; BISHOP, 2005).

2.6.1 Controle em cascata

Na estratégia de controle em cascata utiliza-se de dois pontos de medida do processo e dois controladores convencionais por realimentação cascadeados ou em sequência, sendo um mestre e o outro escravo. O controlador escravo, utilizando-se do ponto secundário de medição, melhora significativamente a resposta dinâmica do sistema aos distúrbios. Isto se dá devido ao reconhecimento da perturbação antes da variável de controle ser afetada, embora não seja necessário medir o distúrbio. Essa abordagem é amplamente utilizada em processos industriais e muito útil quando os distúrbios estão associados à variável de controle ou quando o elemento final de controle apresenta comportamento não linear (SANTOS, 2014).

Segundo Santos (2014), a estrutura da malha de controle cascata tem duas características distintas:

- i) O sinal de saída do controlador mestre é utilizado como *setpoint* para o controlador escravo;
- ii) As duas malhas de controle são aninhadas, com a malha de controle secundária (para o controlador escravo) localizada dentro da malha de controle primária (para o controlador mestre).

Na Figura 14 é mostrado o diagrama de blocos de um controle em cascata.

Portanto, no controle cascata há duas variáveis controladas, dois sensores e uma variável manipulada, ao passo que estruturas convencionais de controle têm uma variável controlada, um sensor e uma variável manipulada (SANTOS, 2014).

2.6.2 Controlador proporcional integral

Muitas aplicações industriais utiliza o controle PI e essa popularidade decorre da simplicidade e, se sintonizado adequadamente, proporciona condições estáveis ao processo controlado

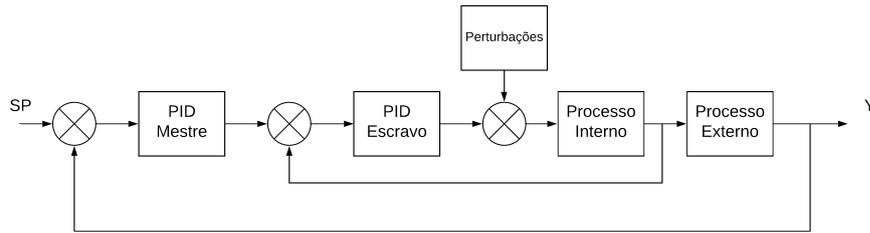


Figura 14 – Malha de controle cascata.

(LUÍZ et al., 1997). O controle PI é suficiente para os processos nos quais as dinâmicas são essencialmente de primeira ordem, em que a resposta ao degrau assemelha-se a de um sistema de primeira ordem (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2005).

Para a implementação do controlador a saída atuante da variável manipulada se dá em função do erro e da integral do erro, conforme é descrita na Equação 2.8 (PI acadêmico):

$$u(t) = k_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt), \quad (2.8)$$

em que: $u(t)$ é o sinal de controle; k_p é o ganho proporcional do controlador; $e(t)$ é o sinal de erro do processo e T_i é denominado tempo integral do controlador.

Aplicando transformada de Laplace para ação de controle (2.8) tem-se a equação expressa no domínio da variável complexa:

$$U(s) = k_p(1 + \frac{1}{T_i s})E(s). \quad (2.9)$$

Esse controlador tem como característica eliminar o erro em regime permanente, pois se adiciona um polo na origem da função de transferência do controlador (LOURENÇO, 1996).

Segundo Ibrahim (2001), a ação integral pode ser ajustada pelo ganho k_i , para conduzir o erro a zero no tempo necessário. Vale ressaltar que ganhos (k_i) elevados podem resultar em oscilações, e ganhos baixos podem levar a respostas lentas do sistema. O ganho k_i é expresso na Equação 2.10.

$$k_i = \frac{k_p}{T_i}. \quad (2.10)$$

2.6.3 Controle digital

Em um controle digital, o processamento do sistema de controle pode ser promovido por um microcontrolador, o que acarreta em um aumento na sensibilidade da medição e a capacidade de reconfigurar facilmente, via software, o algoritmo de controle (DORF; BISHOP, 2005).

Desse modo, o microcontrolador recebe e trata os sinais digitais convertidos pelos conversores analógico-digitais e, após processar as entradas de acordo com os objetivos específicos, converte os sinais de saída para analógicos por meio dos conversores digitais-analógicos atuando nas variáveis manipuladas.

Para fazer a implementação em tempo discreto da lei de controle PI utilizando um microcontrolador, são utilizadas aproximações numéricas da integral. Essas aproximações possibilitam descrever as ações de um controlador PI por uma equação de diferenças (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2005). Para isso, pode ser utilizada a Aproximação Trapezoidal para a integral:

$$\int_0^t e(t)dt \approx \sum_{k=1}^n T e(kT), \quad (2.11)$$

em que, T é o período de amostragem (s). Com as aproximações é possível encontrar a saída do controlador discretizada, como é mostrado na Equação 2.12:

$$u(kT) = u(kT - T) + k_p[e(kT) - e(kT - T)] + \frac{k_p T}{T_i} e(kT). \quad (2.12)$$

2.6.4 Identificação de sistemas

Identificação de sistemas é a área do conhecimento que estuda técnicas alternativas de modelagem matemática. Existem várias técnicas e formas de obter modelos matemáticos, tais como a modelagem caixa branca, caixa cinza e caixa preta (AGUIRRE, 2004). Na 15 é mostrado o diagrama de blocos básico da identificação de sistemas.

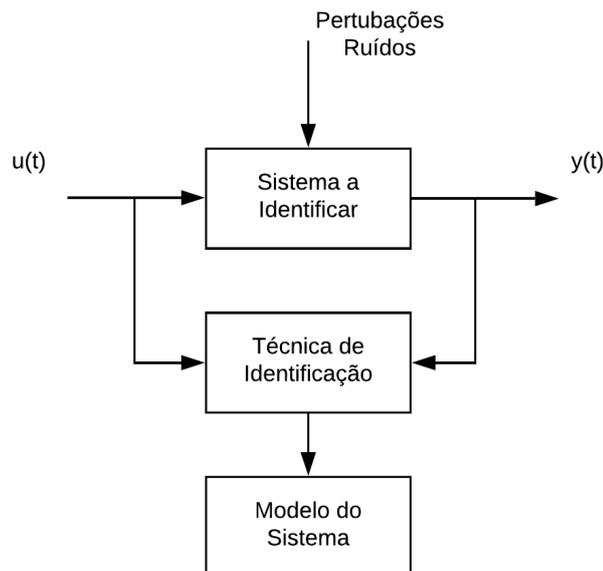


Figura 15 – Diagrama de blocos básico da identificação de sistemas.

Na modelagem caixa branca, deve-se conhecer a fundo o sistema a ser modelado, bem como as relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos (AGUIRRE, 2004). Para modelagem caixa cinza, é preciso conhecer algumas características do sistema, como linearidade, *bandwidth* e estrutura, porém, a ordem da equação dinâmica ou os valores associados aos coeficientes são desconhecidos. Já na identificação caixa preta, também conhecida como modelagem empírica, existe pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema para que se possa obter o modelo matemático.

O método de desenvolvimento do modelo empírico é a forma mais utilizada na prática para a modelagem de modelos reais. Esse método utiliza a relação de causa e efeito presente entre os dados de entrada e de saída de um sistema real (AGUIRRE, 2004).

Para implementar as técnicas de identificação, aplicam-se sinais em sua entrada em malha aberta ou em malha fechada. Existem diversos tipos de sinais de entrada, como as funções degrau, impulso, sinal binário pseudo aleatório (PRBS) e senoides.

2.6.5 Identificação pelo método da curva de reação

A função de transferência da planta pode ser obtida ao se aplicar um degrau unitário na entrada do sistema em malha aberta e, por meio da análise da resposta de saída, é possível obter os parâmetros: ganho direto (K), constante de tempo (τ) e constante de atraso (θ).

Para que o método seja aplicado, o processo não pode apresentar integradores. Então a resposta ao degrau unitário tem característica de um “S” como mostrado na Figura 16. Caso o formato da resposta não apresente essa característica, o método não pode ser aplicado (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2005).

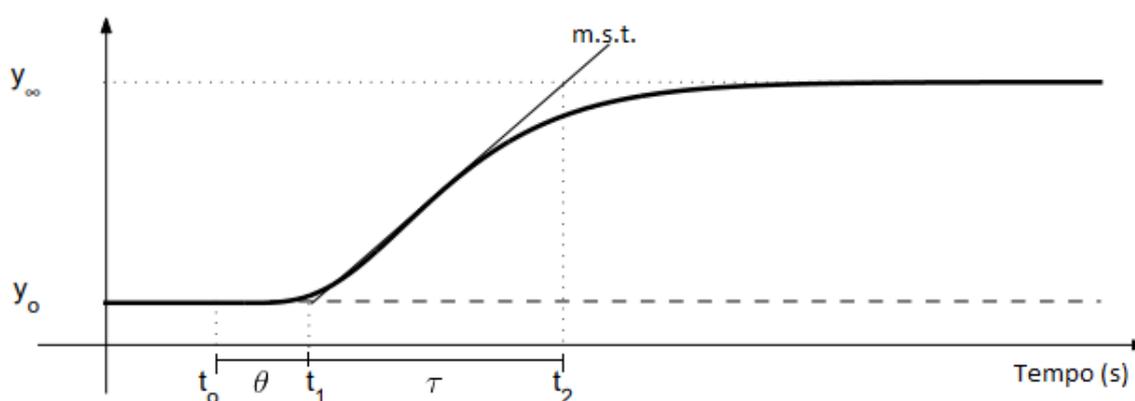


Figura 16 – Curva de reação de um sistema de 1ª ordem.

Fonte: Goodwin, Graebe e Salgado (2000) (adaptado)

Para se aplicar o método, o valor da saída do sistema em malha aberta deve estar em regime estacionário, conforme representado por y_0 na Figura 16. Nessa situação, pode-se aplicar

um degrau (de 10 a 20% do fundo de escala) na entrada em um dado instante (t_0). Dessa forma, o sistema irá responder ao estímulo até atingir um novo regime permanente (y_∞) (GOODWIN; GRAEBE; SALGADO, 2000).

Na resposta transitória é traçada uma reta tangente (*maximum slope tangent* - "m.s.t.") ao ponto máximo de inflexão para se obter o valor da constante de atraso (θ), encontrando-se t_1 (instante de tempo em que a reta tangente intercepta a linha pontilhada referente ao estado estacionário y_0), de forma que $\theta = t_1 - t_0$. Para a constante tempo de tempo (τ), é encontrado t_2 , o instante de tempo em que ocorre a intersecção entre a reta tangente e a linha pontilhada referente ao regime permanente y_∞ , de forma que $\tau = t_2 - t_1$. Sendo o ganho direto do sistema K expresso pela Equação 2.13:

$$K = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad (2.13)$$

em que y_∞ é a saída em regime permanente após o degrau, y_0 a saída em regime estacionário antes do degrau, u_∞ o sinal de entrada após o degrau e u_0 o sinal de entrada antes do degrau.

Dessa forma, é possível encontrar a função de transferência de um sistema de primeira ordem com atraso, conforme Equação 2.14:

$$G_p(s) = \frac{K e^{-s\theta}}{\tau s + 1}. \quad (2.14)$$

2.6.6 Métodos de sintonia para controladores PI

A sintonia de um controlador se dá pelo processo de selecionar parâmetros que garantam uma dada especificação de desempenho (OGATA, 2003). Existem diversos métodos para se fazer a sintonia de controladores, o método é escolhido de acordo com as informações obtidas sobre a dinâmica do processo a ser controlado (FERREIRA, 2014).

O método IMC proporciona a sintonia de um controlador de forma que a resposta ao degrau tenha uma trajetória conhecida. Define-se o parâmetro λ que indica o a rapidez de saída do processo Y para que acompanhe o *setpoint* especificado, conforme Equação 2.15 (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2005):

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{1}{\lambda s + 1}. \quad (2.15)$$

Na Tabela 2 é mostrado o cálculo do ganho proporcional (k_p) e a constante de tempo de integração (T_i) para controladores PI, por meio dos parâmetros θ e τ obtidos pelo experimento da curva de reação.

Tabela 2 – Sintonia de controladores usando o método IMC.

Método	k_p	T_i
IMC (PI)	$\frac{(2\tau+\theta)}{K^2\lambda}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$

Na Tabela 2, τ é a constante de tempo do sistema (s), θ é o tempo morto ou tempo de atraso (s), K é o ganho direto e λ é o parâmetro que define a rapidez que a saída do sistema acompanha a valor de referência.

3 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Sistemas Térmicos e Instrumentação da Universidade Federal de Ouro Preto. A pesquisa foi realizada nas seguintes etapas: (i) instrumentação da célula eletrolítica e a aquisição dos dados; (ii) desenvolvimento do controle de modulação por largura de pulsos (PWM) e (iii) implementação de um controlador PI para a corrente e para a vazão mássica.

3.1 Instrumentação da célula eletrolítica

Foi desenvolvida uma bancada para o a instrumentação da célula, de forma que para alimentação da célula eletrolítica de placas retangulares, utiliza-se uma fonte de corrente DC FA-2030 Instrutherm Digital de um canal, tensão de até 32 V, corrente de até 20 A. Os sensores foram conectados na placa de desenvolvimento Arduino com o auxílio de uma matriz de contatos. O módulo sensor de tensão 0-25 VDC foi conectado em paralelo com a fonte de tensão, tendo seu terminal de sinal inserido na porta analógica 2 do Arduino, enquanto o sensor de corrente ACS712 foi conectado em série e seu terminal de saída foi conectado ao pino analógico 1.

O sensor *DS18B20* foi usado para medir a temperatura durante o procedimento, tendo sua saída digital conectada ao pino digital 2 do Arduino. Utilizou-se o sensor de micro-vazão Winsen, modelo F1012 para medição da vazão, tendo seu terminal de saída conectado ao pino analógico 0 do Arduino e um rotâmetro para medir a vazão do gás de eletrólise de conexão em série com a saída do sensor F1012 (Figura 20), que está acoplado na saída de vazão do gás do borbulhador. O diagrama esquemático do circuito é mostrado na Figura 17.

Para validar o sistema de instrumentação, foi realizado um teste, durante 30 minutos, em que a corrente elétrica contínua da fonte de bancada foi alterada manualmente, de forma decrescente de 8 A para 4 A para coleta e análise dos dados de tensão, vazão, corrente e temperatura da célula eletrolítica. Feita a aquisição dos dados pelo Arduino, foi utilizado software PLX-DAQ para exportar os dados da serial para o Microsoft Office Excel. Os dados de vazão medidos pelo sensor F1012 foram relacionados com os dados aferidos pelo rotâmetro para efetuar a calibração indireta do micro sensor de vazão. Na Figura 18 é mostrada a bancada montada para a instrumentação da célula. Na Figura 19 é mostrado o diagrama de blocos do sistema de medição desenvolvido.

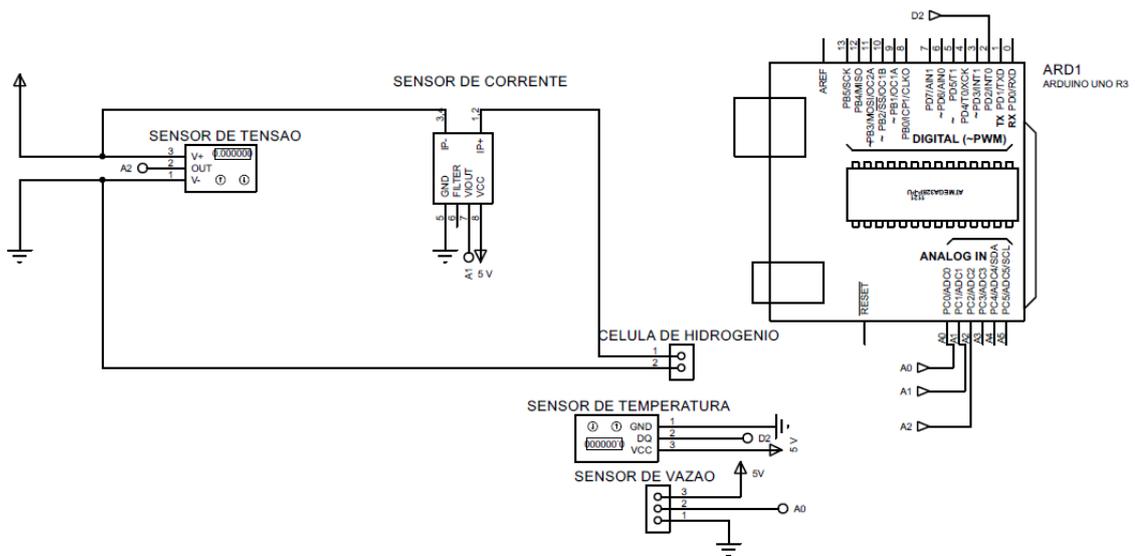


Figura 17 – Diagrama esquemático do circuito.

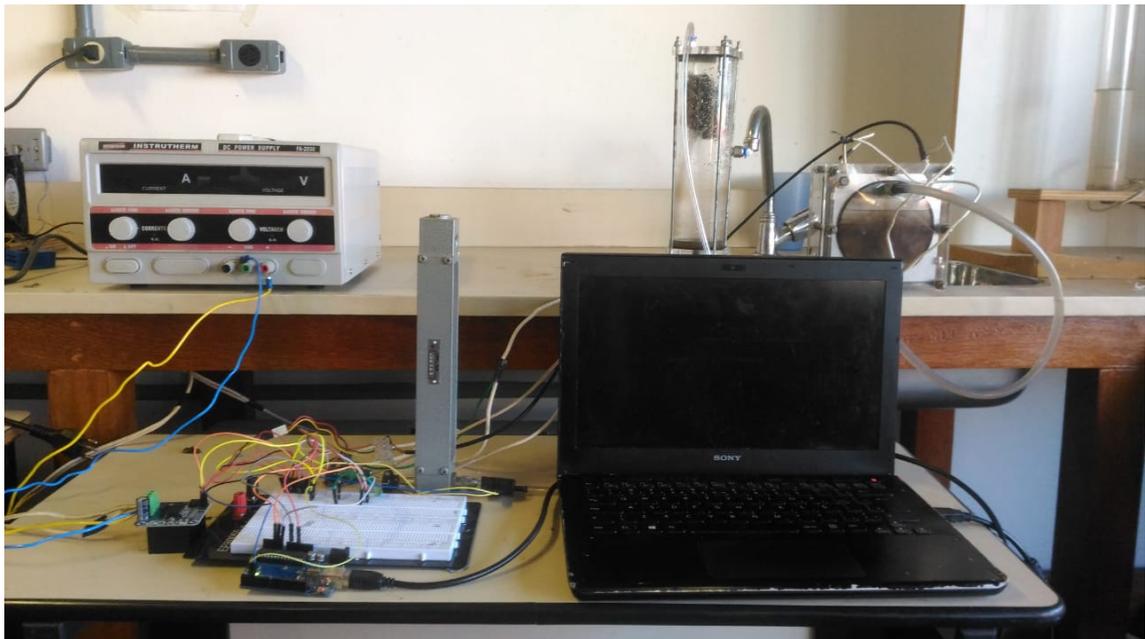


Figura 18 – Bancada de testes para a célula eletrolítica.

Para que seja efetuada a calibração do sensor de vazão, em sua saída, foi conectado um rotâmetro, o qual mede vazão mássica de hidrogênio em g/h e possui incerteza de medição igual a $0,1 g/h$ (20). Assim, a corrente elétrica contínua da fonte de bancada foi alterada manualmente de $4 A$ até $10 A$, de forma que a cada incremento de $0,5 A$, eram coletadas tanto a medição do sensor de vazão quanto a do rotâmetro, para que se possa relacionar as medidas e efetuar a calibração do sensor por regressão linear.

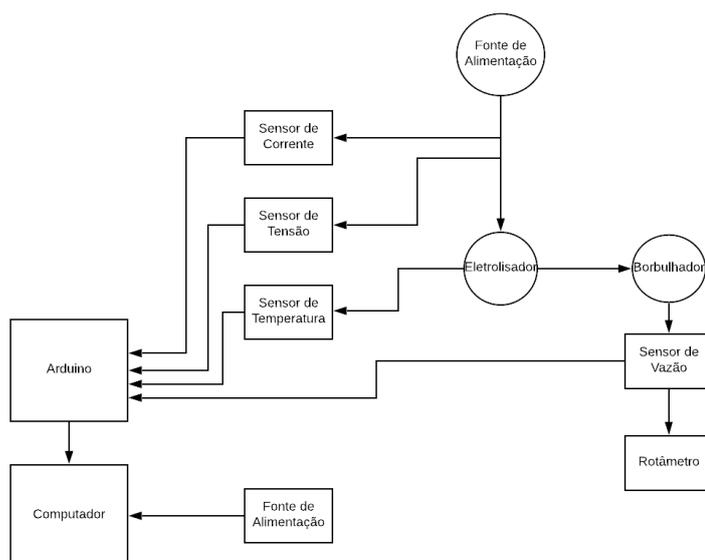


Figura 19 – Diagrama de blocos do sistema de instrumentação.



Figura 20 – Conexão do sensor de vazão no rotâmetro.

3.2 Controle por modulação de largura de pulsos

Tendo o sistema de medição desenvolvido, o próximo passo foi realizar o controle da tensão de alimentação da célula eletrolítica de forma automática, já que anteriormente o controle foi realizado de forma manual. Foi utilizada a ponte H BTS7960, a qual é capaz de suportar até 43 A de corrente. A ponte H possui duas entradas para o sinal PWM, uma para cada sentido da corrente. Como foi utilizado apenas um sentido, o sinal gerado pelo pino digital 3 do Arduino foi conectado em um dos terminais da ponte H.

Foi necessário alterar a frequência do sinal PWM gerado pelo Arduino, já que com a frequência padrão, o sensor ACS712 não foi capaz de medir a corrente de saída da ponte H, já que é uma corrente pulsada proveniente do chaveamento dos MOSFETs. Ou seja, além da corrente média, o sensor mediu valores da borda de subida ou de descida dos pulsos de corrente, gerando inconsistências na medição.

Dessa forma a frequência foi alterada para 25 kHz (máxima suportada pela ponte H), de forma que foram criadas funções no código para alterar o *timer 2* do Arduino. Sendo assim, foi utilizada a função *analogWrite()* do Arduino para alterar a largura de pulso do sinal, trabalhando-se com um faixa de operação de 0 (tensão mínima) a 79 (tensão máxima).

Com uma alta frequência de PWM, foi necessário inserir um diodo de roda livre em paralelo com a carga, já que com altas frequências é gerada uma força contra-eletromotriz que pode danificar o circuito de acionamento. Foi utilizado o diodo *1n4007* para a proteção do circuito. Na Figura 21 mostra-se a conexão da ponte H juntamente com o sistema de medição.

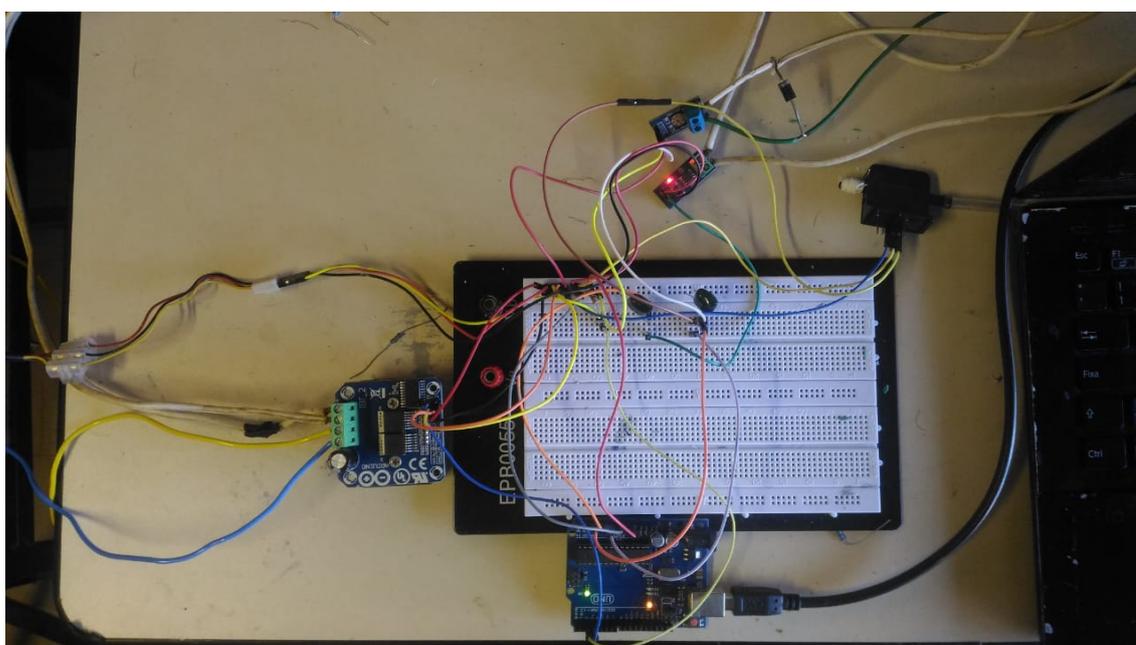


Figura 21 – Ponte H e instrumentação.

3.3 Modelagem dinâmica e controle PI

3.3.1 Controle de corrente

Para o controle da corrente, foram feitos testes para observar o comportamento do sistema para que se possa modelar o processo. Assim, foram aplicados degraus crescentes no ciclo de trabalho referente à tensão de alimentação da célula eletrolítica, com a função *analogWrite()* e as medições do sensor de corrente ACS712 foram coletadas. Na Figura 22(a) são mostrados os dados coletados durante o experimento.

Tendo os dados coletados foram escolhidos os valores do degrau de 49 para 59, por apresentar menor constante de tempo (Figura 22(b)) e foi utilizada a *toolbox* do software Matlab *System Identification* para obtenção da função de transferência do sistema, para que assim o controlador seja sintonizado com o método do modelo interno IMC (Tabela 2).

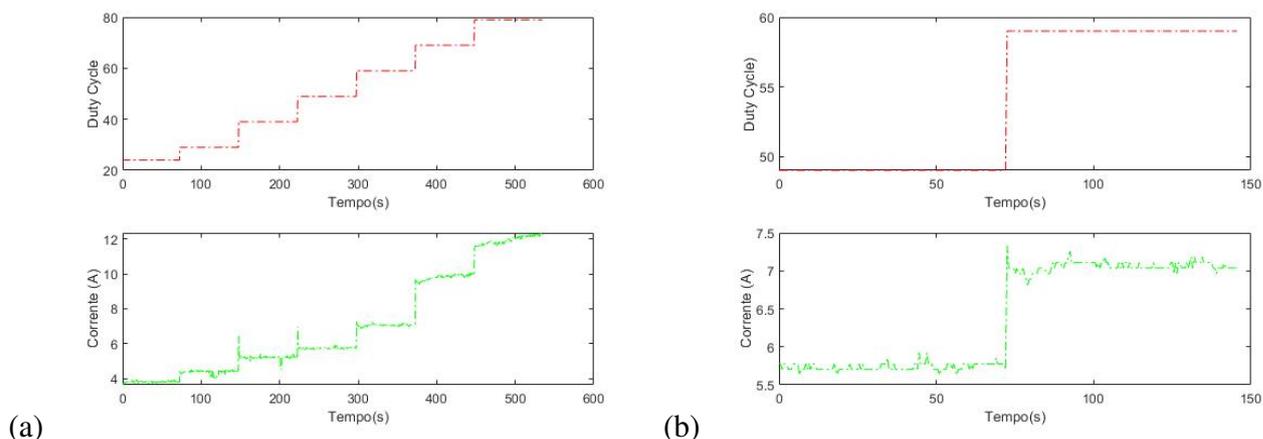


Figura 22 – (a) Entrada e saída do sistema em malha aberta.(b) Entrada e saída para obtenção do modelo.

3.3.2 Controle de vazão

Tendo o controlador PI de corrente implementado, foi realizado o mesmo teste, desta vez tendo a corrente como entrada e a vazão mássica como saída do sistema em malha aberta. Os degraus foram aplicados de forma que o valor de referência do controle de corrente (*setpoint*) foi alterado de forma crescente enquanto os valores medidos pelo sensor de vazão F1012 foram coletados. Na Figura 23 é mostrado o experimento. Pode-se perceber que o sensor de vazão não tem sensibilidade para medir vazões cuja corrente é menor que 4 A, dessa forma adotou-se uma faixa de trabalho de 4 a 12 A de corrente.

Para identificação do sistema foram usados os dados do degrau de 6 para 7 A, pelo fato de ter uma dinâmica mais rápida, ou seja, apresentou menor constante de tempo e com o auxílio do *script* do MATLAB disponível no site do laboratório remoto para práticas de controle de nível de dois tanques acoplados, desenvolvido por Oliveira et al. (2018). Dessa forma, com o método da curva de reação (Figura 24) foram encontrados os parâmetros para descobrir a função de transferência do sistema e para sintonizar o controlador, que foi sintonizado também pelo método do modelo interno IMC.

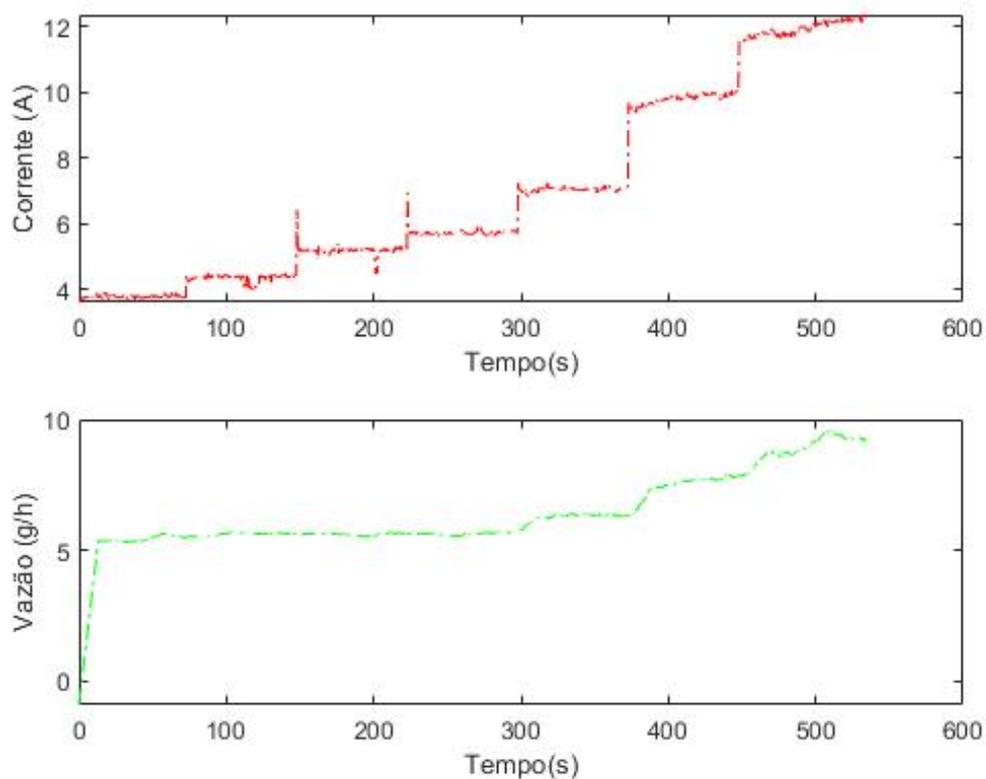


Figura 23 – Entrada e saída em malha aberta.

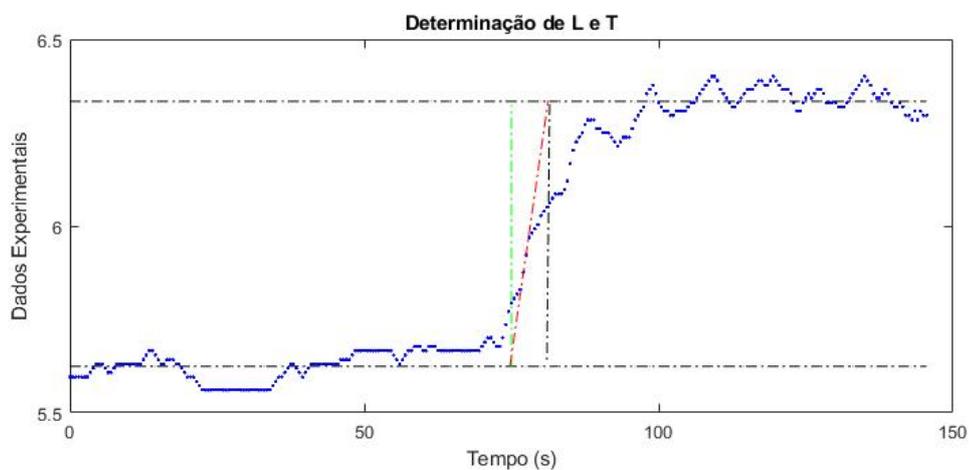


Figura 24 – Determinação de parâmetros pelo método da curva de reação.

4 RESULTADOS

4.1 Calibração do sensor F1012

Os valores obtidos no processo de calibração do sensor são mostrados na Figura 25. Por meio de regressão linear, obteve-se um modelo de primeira ordem e por meio da norma dos resíduos igual a 0,47416 foi calculado um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9957. Em seguida, essa equação de calibração foi inserida no código do Arduino.

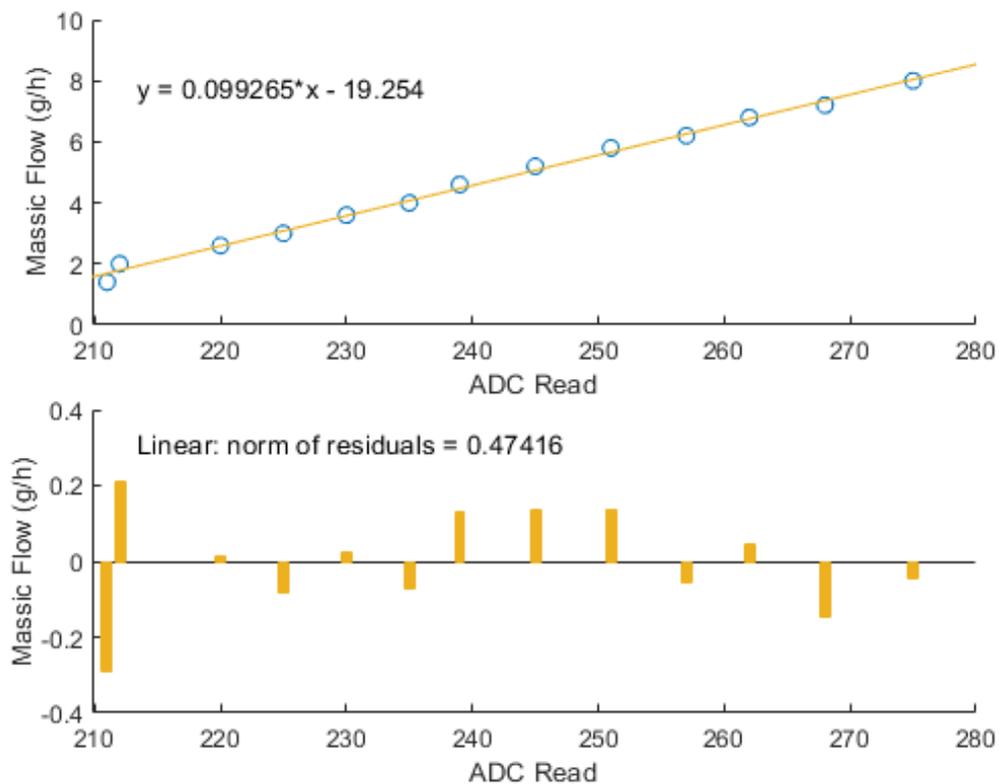


Figura 25 – Calibração do sensor F1012.

4.2 Instrumentação da célula eletrolítica

A corrente de alimentação foi decrescida de forma manual de 8 para 4 A, para coleta e análise dos dados de tensão, vazão, corrente e temperatura da célula eletrolítica. Os valores das variáveis medidas em relação ao tempo são mostrados na Figura 26.

Na Figura 26 (a), são mostradas as medições das correntes decrescentes de 8 , 7 , 6 , 5 e 4 A durante 2000 segundos (33 minutos e 20 segundos) através do sensor de corrente ACS712.

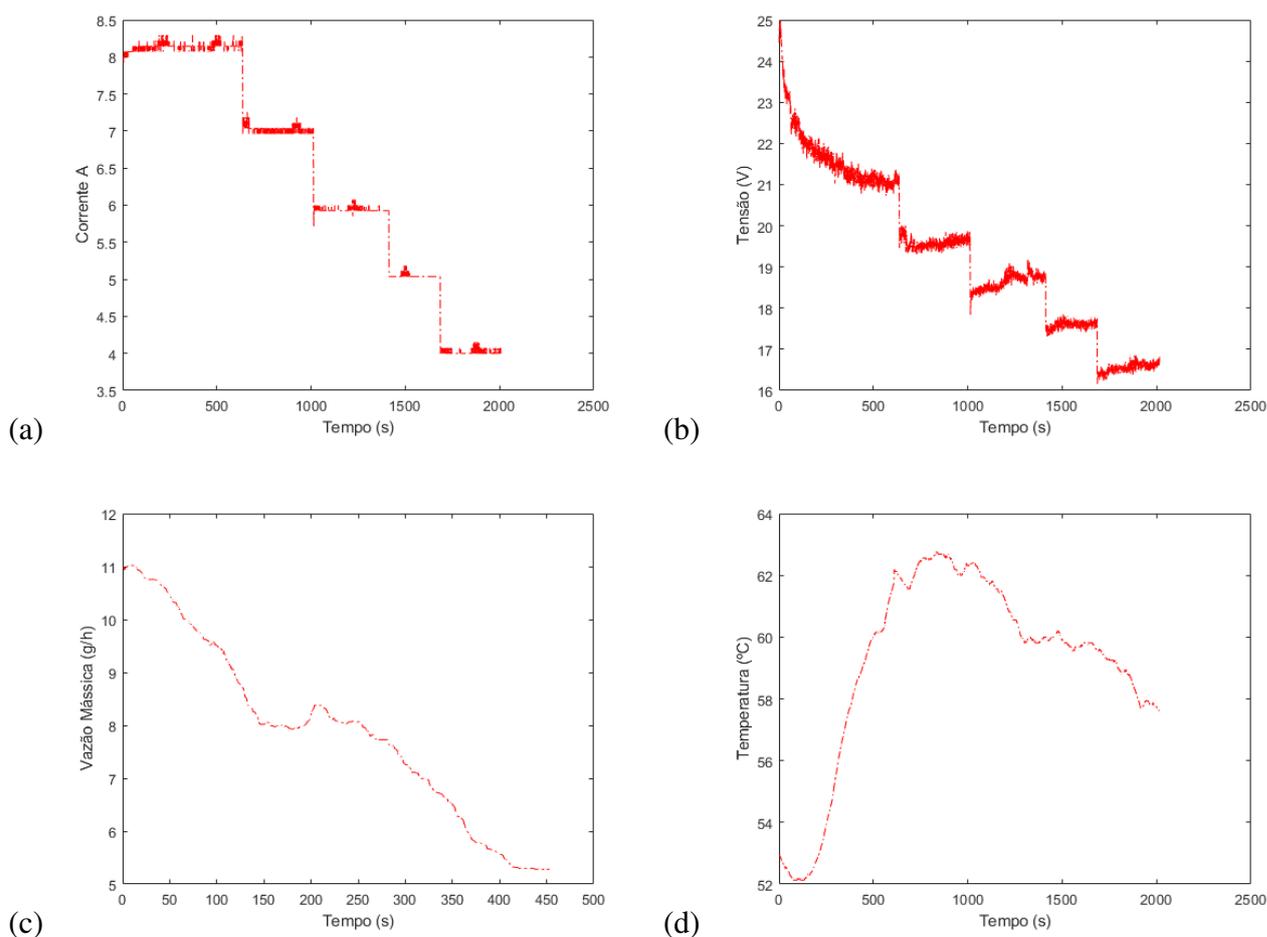


Figura 26 – Tensão, vazão, corrente e temperatura em função do tempo.

Na Figura 26 (b), nota-se o decréscimo da tensão de 25 V até 16 V para redução de 8 A até 4 A, para tempo decorrido de 2000 s. Na Figura 26 (c), a vazão do gás de eletrólise decresce de 11 g/h até aproximadamente 5 g/h na medida em que há redução da corrente elétrica, de 8 A para 4 A, fornecida para a célula eletrolítica .

Na Figura 26 (d), observa-se que a temperatura medida na célula aumenta de 52 ° C até 63 ° C de 0 a 1000 s, entre 8 A e 6 A. A partir deste ponto, a temperatura diminui de forma diretamente proporcional à corrente, de 63 ° C até atingir o patamar de 58 ° C.

4.3 Sistema de controle

Para o controle da corrente utilizou-se a *toolbox* de identificação de sistemas do MATLAB e foi obtida a modelagem de saída que é mostrada na Figura 27 e foi obtida a função de transferência mostrada na Equação 4.1:

$$G_{pc}(s) = \frac{0,1188}{1,4392s + 1}. \quad (4.1)$$

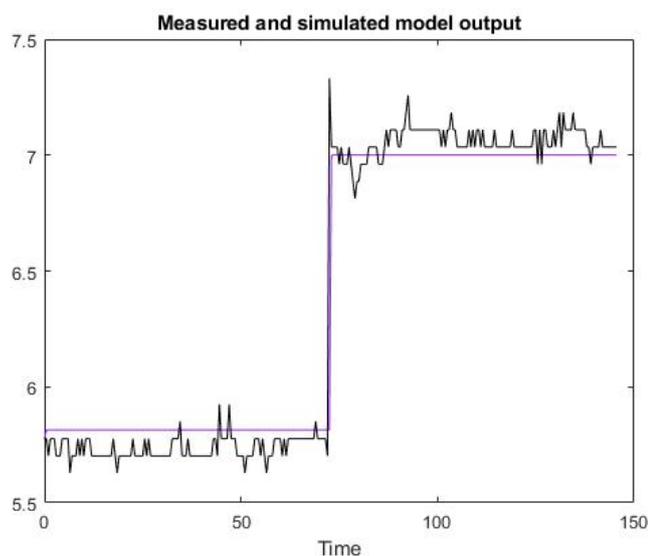


Figura 27 – Modelo de saída encontrado pela *toolbox system identification*.

Com os parâmetros encontrados por meio da função de transferência, foi possível sintonizar o controlador com o método do modelo interno IMC, usando a Tabela 1, de forma que foram encontrados um ganho proporcional (k_p) de 8,41 e um tempo de integração (T_i) de 1,43 s, obtendo-se um ganho integral (k_i) de 5,85. Porém, para esses ganhos o valor de saída do controlador se tornou instável de forma que os ganhos foram reduzidos empiricamente até chegar aos valores de k_p igual a 2 e k_i igual a 5, obtendo-se o ganho do controlador de corrente que é mostrado na Equação 4.2.

$$G_{cv}(s) = 2 + \frac{5}{s}. \quad (4.2)$$

Foi efetuado um teste em que o valor de referência do sistema foi alterado 5 vezes. Inicialmente o *setpoint* foi mantido em 4 A e logo após a acomodação do sistema, alterado para 6.5, 7, 5.5 e 8 A. O controle convergiu para os 5 valores desejados, como mostrado na Figura 28.

Com o controlador de corrente desenvolvido, pode-se implementar o controle de vazão, na configuração cascata, ou seja, a saída do sistema de controle de corrente é o valor de referência do sistema de controle de vazão. Com o método da curva de reação foi possível encontrar a função de transferência do sistema e sintonizar o controlador pelo método do modelo interno (IMC). Foi encontrada a função de transferência mostrada na Equação 4.3 e com o auxílio da Tabela 1, foi calculado o ganho do controlador de vazão (G_{cv}), levando em consideração um ganho proporcional igual a 2,25 e um tempo de integração igual a 6,5 s.

$$G_{pv}(s) = \frac{0,4438}{6,5s + 1}. \quad (4.3)$$

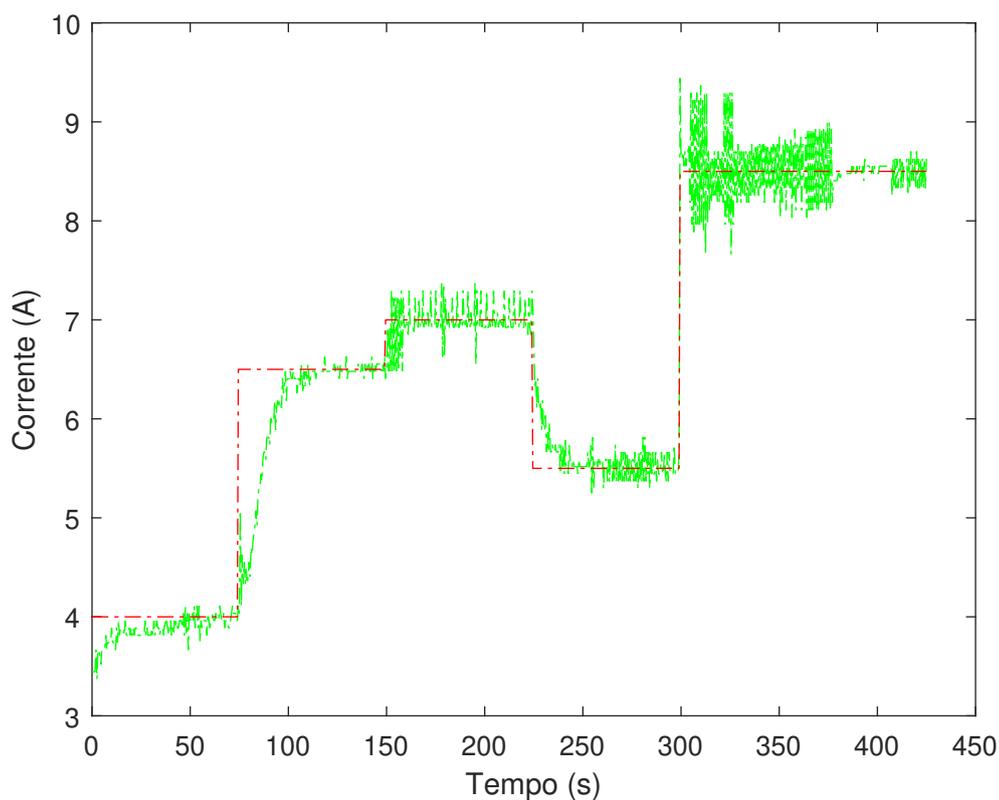


Figura 28 – Controle de corrente, em que o valor de referência é mostrado em vermelho e a medida do sensor de corrente em verde.

$$G_{cv}(s) = 2,25 + \frac{0,34}{s}. \quad (4.4)$$

O diagrama de blocos do controle em cascata desenvolvido é mostrado na Figura 29. Na Figura 30 é ilustrado o controle de vazão e na Figura 31, o controle de corrente, já que na configuração cascata, a saída do controle de vazão é o sinal de referência do controle de corrente. Da mesma forma do teste anterior foram utilizados cinco *setpoints*: inicialmente o valor foi fixado em 5,5, depois 6,5, 8, 7 e 8,5 g/h.

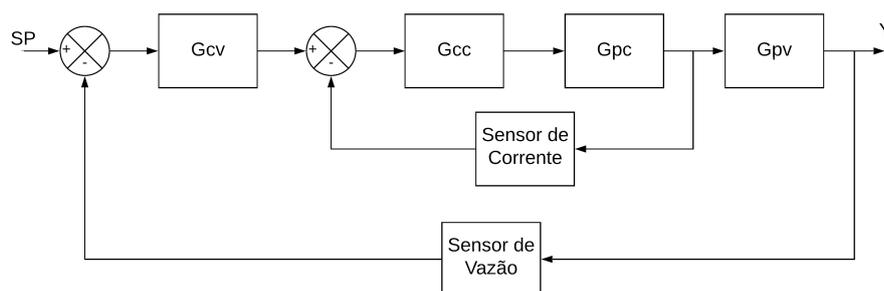


Figura 29 – Diagrama de blocos do controle em cascata.

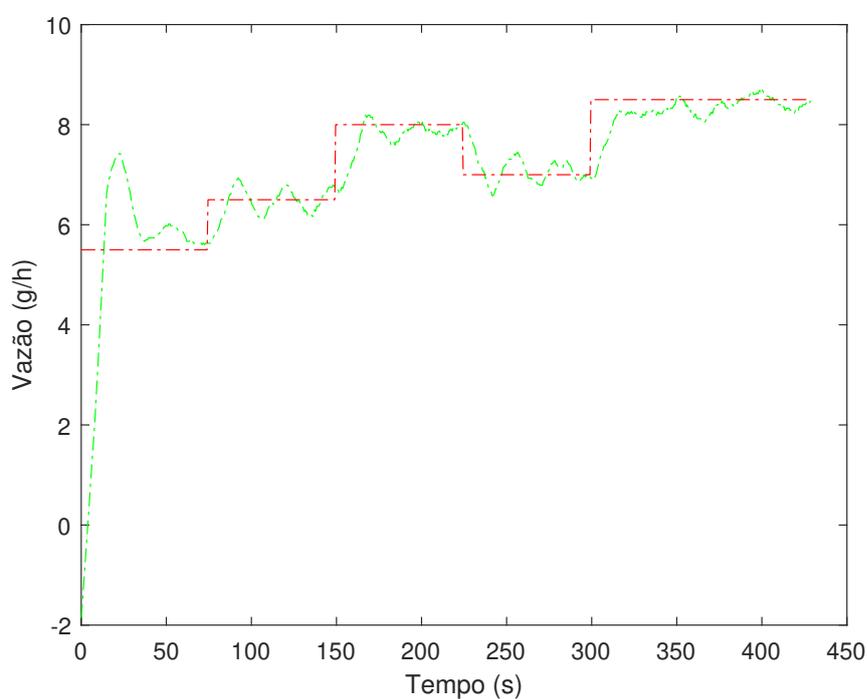


Figura 30 – Controle de vazão, em que o valor de referência é mostrado em vermelho e a medida do sensor de vazão em verde.

Na Figura 32 é mostrada a variação erro do controle de vazão do teste supracitado. Pode-se perceber que quando em regime permanente o erro é menor que $0,5 \text{ g/h}$ para os 5 valores de referência.

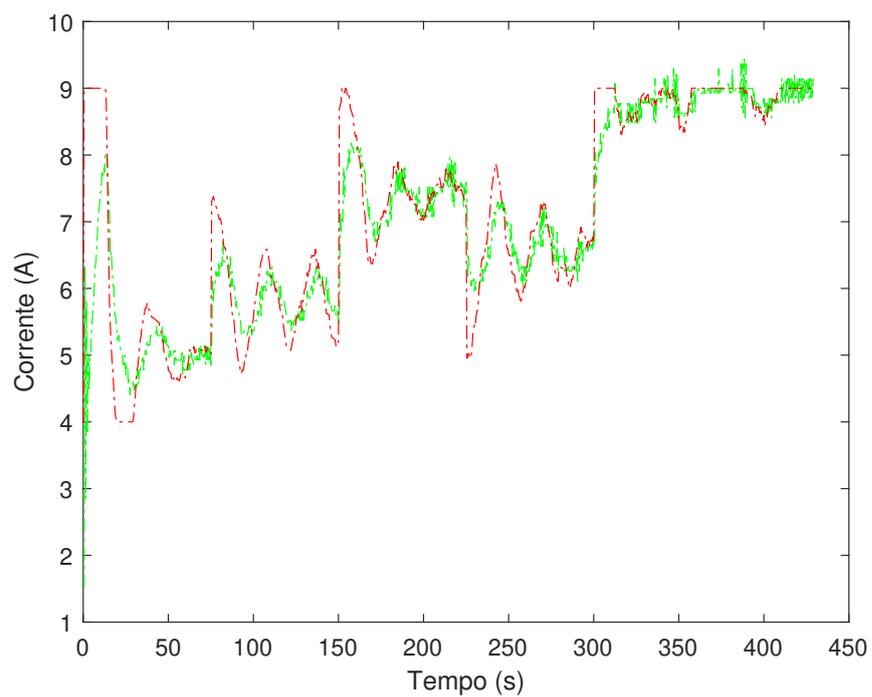


Figura 31 – Controle de corrente, em que o valor de referência é mostrado em vermelho e a medida do sensor de corrente em verde.

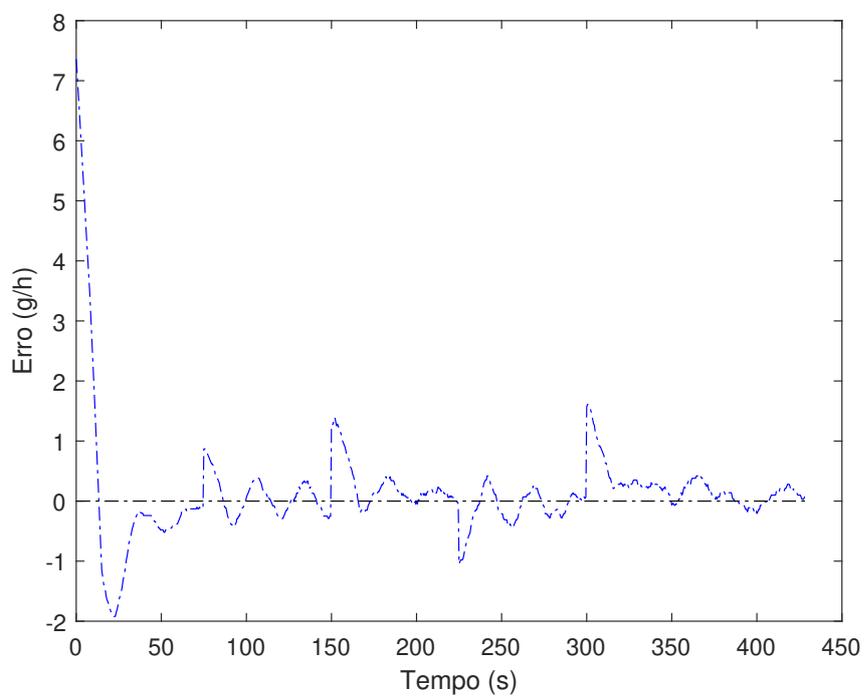


Figura 32 – Erro do controle de vazão.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a instrumentação de uma célula de eletrolítica, a calibração de um sensor de vazão de gás e o controle da produção do gás produto. Os dados obtidos foram plotados em relação ao tempo para análise do comportamento do dispositivo eletrolisador. A calibração do sensor de fluxo de gás foi efetiva, uma vez que se obteve se um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9957. Logo, a utilização do sensor de baixo custo F1012 se mostrou uma alternativa viável para medição do gás de eletrólise.

O sensor de baixo custo F1012 representou uma economia de aproximadamente 97% no projeto, pois os sensores medidores de vazão de H_2 , são de alto custo. Com a viabilidade da utilização do sensor de baixo custo F1012, pode-se realizar a identificação do modelo do sistema para efetuar um controle automático da produção de gás de eletrólise para proporcionar a continuidade deste projeto.

Foi desenvolvido um sistema de controle do tipo cascata, já que para se controlar a vazão mássica foi necessário efetuar um controle de corrente. Dessa forma, utilizou-se dois controladores PI, um para a vazão e outro para a corrente. Foi usado o valor do sensor de corrente como realimentação no controle da corrente, o qual atua no *duty cycle* do PWM, referente à tensão de alimentação da célula. Já no controle de vazão, o sinal do sensor F1012 foi usado como realimentação e a variável manipulada foi a corrente.

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação e a implementação de um sistema de geração e controle de hidrogênio alimentado por módulos fotovoltaicos, e alterar a abordagem de controle do gás levando em consideração a rotação do motogerador.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas –Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. Minas Gerais: Editora UFMG, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- AL-ROUSAN, A.; SA'ED, A. Effect of anodes-cathodes interdistances of hho fuel cell on gasoline engine performance operating by a blend of hho. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. 2018. Citado na página 18.
- ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. *Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*. São Paulo: Manole, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- ALSELECTRO. 2019. <http://www.alselectro.com/files/BTS7960.pdf>. Online; Acesso em: 03, jun. 2013. Citado na página 24.
- ARDUINO. 2019. <https://www.arduinoocia.com.br/2016/04/como-usar-osensor-de-corrente-ac712.html>. Online; Acesso em: 03, jun. 2013. Citado na página 27.
- ARDUINO. *Arduino uno*. 2019. <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Online; Acesso em: 23 abr. 2019. Citado na página 20.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. 2. ed. São Paulo: LTC/Grupo Gen, 2011. Citado na página 24.
- BALTACIOGLU, M. K. A novel application of pulse width modulation technique on hydroxy gas production. *Journal of Hydrogen Energy*, 2018. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 17.
- BENEMANN, J. R. Hydrogen biotechnology: Progress and prospects. *Natural Biotechnol*, 1996. v. 14, p. 1101–1103, 1996. Citado na página 11.
- BRAGA, A. et al. Poluição atmosférica e saúde humana. *Revista USP*, 2001. v. 51, p. 58–71, 2001. Citado na página 11.
- BRANCO, S. M. *Energia e meio ambiente*. 2nd. ed. São Paulo, SP: Moderna, 2008. Citado na página 11.
- CERVANTES-BOBADILLA, M. et al. Experimental study on the performance of controllers for the hydrogen gas production demanded by an internal combustion engine. *Energies*, 2018. v. 11, n. 8, 2018. Citado na página 13.
- CERVANTES-BOBADILLA, M. et al. Modelling and control of an alkaline water electrolysis process. *International journal of hydrogen energy*, 2018. v. 1, n. 2, p. 9–14, 2018. Citado na página 15.
- CGEE. *Hidrogênio energético no Brasil: subsídios para políticas de competitividade, 2010-2025; Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários*. Brasília, 2010. 68p p. Citado na página 11.

- COELHO, D. A. *Gás Produto de Eletrólise Utilizado em Motores de Combustão Interna*. 134 p. Monografia (Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia (Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia) – Núcleo de Excelência em Eficiência Energética) — Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2013. Citado na página 13.
- DORF, R.; BISHOP, R. H. *Modern Control Systems*. 10^a. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- DOUGLASS, B. P. *Real Time UML: Advances in The UML for Real-Time Systems*. 3. ed. Oxford: Addison Wesley, 2004. Citado na página 19.
- ESTÊVÃO, T. E. R. *O Hidrogênio como combustível*. Monografia (Relatório do Projeto Final/Dissertação do MIEM (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica)) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008. Citado na página 17.
- FERREIRA, D. V. M. *Desenvolvimento de Sistema Educacional para Teoria de Controle de Sistemas*. 48 p. Monografia (Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação)) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 34.
- FIGUEREDO, R. L. Dissertação (Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração). *Desenvolvimento de um sistema de monitoramento aplicado a um motorizador a diesel com injeção de gás de eletrólise visando redução de consumo de combustível*. Minas Gerais: [s.n.], 2018. 82 p. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.
- GAMBETTA, F. Dissertação de Mestrado-Faculdade de Engenharia Mecânica. *Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de caso aproveitando a EVT da UHE de Itaipú*. São Paulo: [s.n.], 2010. 163 p. Citado na página 18.
- GANLEY, J. C. High temperature and pressure alkaline electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009. v. 34, n. 9, p. 3604–3611, 2009. Citado na página 17.
- GOMIDE, V. O. *SISTEMA DIDÁTICO DE CONTROLE DE TEMPERATURA*. Monografia (Monografia (Trabalho Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação)) — Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2015. Citado na página 26.
- GOODWIN, G. C.; GRAEBE, S. F.; SALGADO, M. E. *Control System Design*. 1^a. ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentos da Física*. 4. ed. São Paulo: S.A, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- HOUSEMAN, J.; CERINI. *On Board Hydrogen Generator for a Partial Hydrogen Injection Internal Combustion EngineJet*. USA: Propulsion Lab, 1974. Citado na página 15.
- IBRAHIM, D. *Advanced PIC Microcontroller Projects in C: From USB to Zigbee with the PIC 18F Series*. USA: Newnes, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 31.
- IEA. *Key World Energy Statics*. 2012. http://alofatuvalu.tv/FR/12_liens/12_articles_rapports/IEA_rpt_2012_us.pdf. Online; Acesso em: 23 abr. 2019. Citado na página 11.

- IVY, J. *Summary of electrolytic hydrogen production - milestone completion report*. [S.l.: s.n.], 2004. Summary of electrolytic hydrogen production - milestone completion report, Setembro. Citado na página 16.
- JOVIC, F. *Process control systems: Principles of design and operation*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1986. Citado na página 29.
- KNOB, D. *Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica*. 125 p. Monografia (Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais)) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 12, 15, 16 e 17.
- LAMBE, S. M.; WATSON, H. C. Low polluting, energy efficient hydrogen engine. *International journal of hydrogen energy*, 1992. v. 17, n. 7, p. 513–525, 1992. Citado na página 15.
- LARMINIE, J.; DICKS, A.; MCDONALD, M. *Fuel cell systems explained*. USA: SAE International, 2003. Citado na página 16.
- LEROY, R. L.; JANJUA, M. B. I.; RENAUD, R. L. U. Analysis of time-variation effects in water electrolyzers. *J Electrochem Soc*, 2012. v. 2, n. 1, p. 126–674, 2012. Citado na página 12.
- LOURENÇO, J. *Sintonia De Controladores P.I.D*. Rio de Janeiro: Escola Superior de Tecnologia, 1996. Citado na página 31.
- LUÍZ, C. et al. Controle adaptativo versus controle fuzzy: Um estudo de caso em um processo de nível. *SBA Controle Automação*, 1997. p. 43–51, 1997. Citado na página 31.
- LYMBEROPOULOS, N. *Centre of Renewable Energy*. 2005. <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells>. Online; Acesso em: 03, jun. 2013. Citado na página 18.
- MATIENZO, J. Influence of addition of hydrogen produced on board in the performance of a stationary diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. v. 43, 08 2018. Citado na página 13.
- MAZLOOMI, S. K.; SULAIMAN, N. Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. v. 16, n. 6, p. 4257–4263, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- MIYAMOTO, T. Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011. v. 36, n. 20, p. 13138–13149, 2011. Citado na página 18.
- OGATA, K. *Discrete-Time Control Systems*. 2. ed. USA: Prentice Hall, 1995. Citado na página 21.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5ª. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 34.
- OLIVEIRA, L. O. M. et al. Bancada remota para práticas de controle de nível de tanque. In: . Paraíba: XXII Congresso Brasileiro de Automática, 2018. Citado na página 40.

OLIVEIRA, R. S. *Projeto da Eletrônica Embarcada para um Robô Móvel Aplicado a Atividades de Terapia Ocupacional*. 62 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola Politécnica, Departamento de Eletrônica e de Computação, Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Citado na página 22.

OMEL. 2019. http://www.omel.com.br/cms-lang/wp-content/uploads/2014/07/Catalogo_rotametro_4N.pdf. Online; Acesso em: 03, jun. 2013. Citado na página 29.

ONDA, K. Prediction of production power for high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis. *Journal of Power Sources*, 2004. v. 132, n. 1-2, p. 64–70, 2004. Citado na página 12.

PASSOS, I. E. V. *Análise de Desempenho de um Motor de Combustão Interna de uma Motocicleta com o Uso de Mistura Combustível-Hidrogênio*. Monografia (TCC Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.

PEREIRA, F. *Microcontroladores PIC: Programação em C*. 1. ed. São Paulo: Érica, 2005. Citado na página 21.

PERLES, C. E. propriedades físico-químicas relacionadas ao desenvolvimento de membranas de nafion® para aplicações em células a combustível do tipo pemfc. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 2008. v. 18, n. 4, p. 281–288, 2008. Citado na página 18.

RIFKIN, J. A. *A economia do hidrogênio*. USA: M. Books, 2003. Citado na página 15.

SANTILLI, R. M. A new gaseous and combustible form of water. *International journal of hydrogen energy*, 2006. v. 31, n. 9, p. 1113–1128, 2006. Citado na página 16.

SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M. O combustível hidrogênio. *Revista do ISPV*, 2005. n. 35, 2005. Citado na página 11.

SANTOS, N. *Arduino Introdução e Recursos Avançados*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.

SANTOS, R. M. *CONTROLE CASCATA E SUPERVISÃO APLICADA A CONTROLE DE NÍVEL EM PLANTA DIDÁTICA DE PROCESSOS*. 92 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”, São Paulo, 2014. Citado na página 30.

SEGUNDO, A. K. R. *Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação*. Monografia (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Federal de Viçosa, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Minas Gerais, 2010. Citado na página 21.

SOUSA, D. J. D. S.; LAVINIA, N. C. *Conectando o PIC 16F877A Recursos Avançados*. 4. ed. São Paulo: Érica, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 21 e 22.

STORE, R. *Sensor de temperatura ds18b20*. 2019. <https://robotica.store/produto/sensor-temperatura-ds18b20-waterproof/?v=19d3326f3137>. Online; Acesso em: 03, jun. 2013. Citado na página 28.

SUBRAMANIAN, B.; ISMAIL, S. Production and use of hho gas in ic engines. *International journal of hydrogen energy*, 2018. v. 43, n. 14, 2018. Citado na página 17.

SUJIMURA, T.; SUZUKI, Y. The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine. *International journal of hydrogen energy*, 2017. v. 42, n. 19, p. 14019–14029, 2017. Citado na página 15.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. *Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: Érica, 2007. Citado na página 26.

TORGA, D. S. *Desenvolvimento de uma Plataforma Didática para Práticas de Controle de Velocidade de Motor de Corrente Contínua*. 76 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2016. Citado na página 20.

TRINDADE, O. et al. Uma metodologia para desenvolvimento de sistemas embarcados críticos com vistas a certificação. *IX Simpósio de Automação Inteligente-IX SBAI*, 2009. 2009. Citado na página 19.

ULUDAMAR, E. et al. Evaluation of vibration characteristics of a hydroxyl (hho) gas generator installed diesel engine fuelled with different dieselebiodiesel blends. *Int J Hydrogen Energy*, 2017. p. 110–123, 2017. Citado na página 13.

URSÚA, A. Stand-alone operation of an alkaline water electrolyser fed by wind and photovoltaic systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013. v. 38, n. 35, p. 14952– 14967, 2013. Citado na página 18.

WIKIPEDIA. 2019. <http://en.wikipedia.org/wiki/H-bridge>. Online; Acesso em: 03, jun. 2013. Citado na página 23.

WINSEN. *Micro flow sensor manual*. 2019. <https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Micro%20Flow%20Sensor/F1012%20Flow%20sensor%20-%20Manual%20V2.1.pdf>. Online; Acesso em: 03, jun. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

ZHOU, J. H. Diesel–hydrogen dual-fuel combustion and its impact on unregulated gaseous emissions and particulate emissions under different engine loads and engine speeds. *Energy*, 2016. v. 94, p. 110–123, 2016. Citado na página 12.

ÅSTRÖM, K. J.; HäGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2^a. ed. USA: Instrument Society of America, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 34.