

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
ENGENHARIA MECATRÔNICA

FELIPE JOSÉ AKERLEY GUOLO

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EM UMA BANCADA
DE TESTES PARA UM REATOR DE HIDROGÊNIO AUTÔNOMO

Joinville
2024

FELIPE JOSÉ AKERLEY GUOLO

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA EM UMA BANCADA
DE TESTES PARA UM REATOR DE HIDROGÊNIO AUTÔNOMO

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica, no curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Anderson Wedderhoff Spengler

Joinville
2024

Dedico este trabalho à minha família, a qual foi responsável por me incentivar ao longo de toda minha jornada acadêmica. Principalmente dedico à minha mãe, ela que foi responsável por compartilhar dos meus momentos de ansiedade e conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Deise, por ter me apoiado durante todo o meu percurso acadêmico, seu incentivo constante foi essencial para a minha jornada nesta etapa e me permitiu manter a motivação ao longo da graduação.

Agradeço à minha tia, Lizete, por estar sempre presente ao meu lado, me oferecendo suporte durante os momentos difíceis e celebração durante cada uma de minhas conquistas.

Agradeço à equipe do Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas e aos professores Rafael de Camargo Catapan e Anderson Wedderhoff Spengler, primeiramente por me oferecerem a oportunidade de me tornar um integrante da equipe e também por fazer parte da conclusão deste projeto. O tempo investido me rendeu aprendizados que irão ser relevantes durante toda a minha carreira e vida pessoal.

Agradeço à equipe do Laboratório de Integração Software/Hardware por oferecerem suporte, pelo conhecimento e orientação ao longo do projeto.

Por fim, gostaria também de agradecer a todos os amigos que se mostraram presentes ao longo da minha jornada acadêmica e ao decorrer deste trabalho, sendo alguns deles: Allan, André, Arthur, Bernardo, Eryk, Lara, Lucas, Pedro Henrique, Vinícius e Vitor José. Agradeço também à Ana Flávia, pelo companheirismo e suporte durante a finalização do projeto. Minha profunda gratidão por terem feito a minha vida universitária uma experiência única.

“ Persistência é a chave para qualquer coisa que você queira na vida. ”

Hayao Miyazaki

RESUMO

A busca por fontes limpas e renováveis de energia tornou-se vital em um cenário global de desafios ambientais e esgotamento de recursos não renováveis. Nessa conjuntura, a reforma de hidrogênio tem sido destacada como uma tecnologia promissora em um vetor energético limpo no meio automobilístico. Este trabalho descreve o desenvolvimento e otimização de uma instrumentação eletrônica para uma bancada de testes de um reator baseado na reforma de hidrogênio. Inicialmente, identificou-se na literatura soluções para o projeto, em seguida, foram selecionadas as ferramentas e materiais para o reformador. A montagem foi realizada de forma fracionada decompondo o reator em subsetores, realizados testes de validação em componentes eletrônicos, a fim de alcançar a função pretendida durante a montagem e efetuar a reestruturação de divergências. Por fim, a instrumentação da bancada foi finalizada com êxito e foram obtidos os resultados das implementações por meio da validação de uso da bancada completamente integrada.

Palavra-chave: Instrumentação; Montagem Eletrônica; Reformador.

ABSTRACT

The pursuit of clean and renewable energy sources has become imperative in a global context of environmental challenges and the depletion of non-renewable resources. In this scenario, hydrogen reforming has emerged as a promising technology within the clean energy landscape, particularly in the automotive sector. This work outlines the development and optimization of an electronic instrumentation system for a test bench of a hydrogen reforming-based reactor. Thus, the work undertaken primarily involves researching articles related to similar projects to establish a solid foundation for the appropriate development of solutions for the designated project. Subsequently, it encompasses an examination of the tools and materials designed for the reformer, validation tests on components to confirm their intended functionality during assembly, and the reconfiguration of inefficient electronic components. As a result, the instrumentation of the test bench was successfully completed, and the results of the implementations were obtained through the validation of the fully integrated bench.

Keywords: Instrumentation; Electronic Assembly; Reformer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama do Reator de H ₂	15
Figura 2 – Diagrama de Blocos em Malha Fechada	16
Figura 3 – Modulação de uma onda senoidal por PWM	19
Figura 4 – Esquemático Mecânico	22
Figura 5 – PCI Inicial	24
Figura 6 – Operação de um termopar	25
Figura 7 – Diagrama Esquemático do Circuito de PWM de Potência	27
Figura 8 – Diagrama P&ID da linha de Combustível em destaque	28
Figura 9 – Sinais do SPI mostrando as linhas de <i>clock</i> , seleção do escravo, MOSI e MISO	30
Figura 10 – Imagem da Bancada de Testes para a Linha de Combustível	31
Figura 11 – Gráfico de Relação PWM x Média em gramas	33
Figura 12 – Sensor de Vazão Instalado	35
Figura 13 – Modelo de Ativação do MOC utilizando Transistor	36
Figura 14 – Esquemático Inicial do Circuito AC	37
Figura 15 – Esquemático atualizado do circuito AC	37
Figura 16 – Esquemático de Conexões da Bomba BLDC	38
Figura 17 – Sinal do PWM no Osciloscópio	39
Figura 18 – Relação entre os circuitos de acionamento da bomba	40
Figura 19 – Interface Visual da Bancada	41
Figura 20 – Projeto da Bancada Inicial	42
Figura 21 – Sinal de Acionamento do Vaporizador no Osciloscópio	43
Figura 22 – Diagrama Mecânico Final	44
Figura 23 – Bancada Final	45
Figura 24 – Dados de Temperatura dos Termopares	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sequenciamento de Etapas na Montagem do Sistema de Controle do Soprador	26
Quadro 2 – Sequenciamento de Etapas na Montagem do Sistema de Controle AC	28
Quadro 3 – Resultados dos Testes de Sinal PWM em Diferentes Tempos . . .	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada (Alternating Current)
ADC	Conversor Analógico-Digital (Analog-to-Digital Converter)
CAN	Rede de Controle de Área (Controller Area Network)
CI	Circuito Integrado
CS	Seleção do Chip (Chip Select)
DC	Corrente Contínua (Direct Current)
ECU	Unidade de Controle Eletrônico (Electronic Control Unit)
EGR	Recirculação de Gases de Escape (Exhaust Gas Recirculation)
I2C	Circuito Inter-integrado (Inter-Integrated Circuit)
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado (Integrated Development Environment)
LAC	Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas
LED	Diodo Emissor de Luz (Light Emitting Diode)
MISO	Mestre Entrada Escravo Saída (Master In Slave Out)
MOSI	Mestre Saída Escravo Entrada (Master Out Slave In)
PCI	Placa de Circuito Impresso
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo
PMW	Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation)
SDA	Dados Seriais (Serial Data)
SCL	Clock Serial (Serial Clock)
SPI	Interface Serial Periférica (Serial Peripheral Interface)
SS	Seleção do Escravo (Slave Select)
UART	Transmissor Assíncrono Universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	REFORMA DE ETANOL	14
2.2	SISTEMA DE CONTROLE	16
2.3	ELETRÔNICA	17
2.4	PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO	17
2.4.1	Interface Serial Periférica (SPI)	18
2.4.2	<i>Inter-Integrated Circuit (I2C)</i>	18
2.5	MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM)	19
3	TRABALHOS CORRELATOS	20
4	METODOLOGIA	22
4.1	MODELAGEM DO SISTEMA	22
4.1.1	Modelagem dos Subsistemas	23
4.1.1.1	Subsistema de Fornecimento de Ar	23
4.1.1.2	Subsistema de Injeção de Combustível	23
4.1.1.3	Subsistema de Reforma	23
4.1.2	Funções de Controle e Monitoramento	23
4.2	PLANEJAMENTO DE MONTAGEM	23
4.2.1	Termopares	25
4.2.2	Controle do Soprador	26
4.2.3	Potência PWM	27
4.2.4	Controle AC e Linha de Combustível	27
5	DESENVOLVIMENTO	30
5.1	ESTRATÉGIA DE PARTIDA A FRIO	30
5.1.1	Avaliação dos Termopares	30
5.1.2	Montagem da Linha de Combustível	31
5.1.2.1	Calibração dos bicos injetores	32
5.1.3	Montagem da Linha de Ar	34
5.2	MODIFICAÇÕES PCI	35
5.2.1	Subsistema de Controle AC	36
5.2.2	Subsistema de Sinal da Bomba BLDC	37
5.2.3	Comunicação com os Termopares	39
5.3	INTEGRAÇÃO COM O SOFTWARE	40

6	AVALIAÇÃO DE DADOS	42
7	CONCLUSÃO	47
8	TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE A – ESQUEMÁTICOS	51

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda por novas fontes de energia renovável tem sido um dos principais focos do setor automobilístico. Isso se deve, em parte, à crescente preocupação com o elevado índice de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e seus impactos no meio ambiente e na qualidade do ar (Holmes *et al.*, 2021). Por consequência, a busca por alternativas energéticas sustentáveis e eficazes tornou-se imperativa para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e minimizar o impacto ambiental da indústria automobilística.

O setor de transporte é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂, impulsionadas principalmente pelo uso de combustíveis fósseis (STR, 2023). Para enfrentar esse desafio, uma das soluções promissoras é a utilização do hidrogênio como combustível, devido a sua capacidade de fornecer energia limpa e eficiente (Hou *et al.*, 2015), já que o hidrogênio pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como o etanol, por meio de processos de reforma.

Para tal cenário, o Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas (LAC) propôs o uso de um reator de reforma de hidrogênio a partir do etanol como uma solução para atenuar as emissões e oferecer uma fonte de energia limpa para veículos (LAC, 2023). O etanol se destaca como uma fonte de energia renovável e sustentável com vasta e bem sucedida produção no Brasil (Kohlhepp, 2010). No entanto, para que essa utilização seja eficaz, é necessário um sistema de hardware otimizado capaz de operar um sistema autônomo de produção de hidrogênio a partir do etanol (Aguiar *et al.*, 2005). Tal sistema, além de reduzir as emissões de CO₂, contribui para a diversificação da matriz energética e a promoção de alternativas sustentáveis.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma instrumentação em uma bancada de testes capaz de produzir hidrogênio de forma autônoma, servindo como um protótipo para demonstrar a viabilidade do uso de hidrogênio como combustível automobilístico. Além disso, essa bancada de testes será utilizada para avaliar o desempenho de sistemas de produção de hidrogênio a partir de etanol. A metodologia empregada abrangeu a instrumentação em uma interface de hardware dedicada à bancada de testes, e a readequação de uma placa de circuito impresso (PCI) pré-existente para o processo atual, permitindo um controle do sistema de produção de hidrogênio. Realizou-se a integração de hardware e software em um modelo de bancada de testes para um reator de hidrogênio autônomo, capaz de realizar testes e coleta de dados em condições controladas. O escopo do projeto abrange: A montagem da bancada de testes, a otimização dos componentes da placa de circuito impresso (PCI).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um instrumentação eletrônica em uma bancada de testes para um reator de hidrogênio autônomo e realizar a verificação de componentes utilizados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir recursos necessários para a montagem, conforme os requisitos propostos previamente.
- Montagem dos subsistemas;
- Estabelecer estratégias de calibração, testes e validação dos atuadores;
- Realizar testes de coleta de dados;
- Calibração dos sensores
- Avaliar o desempenho de ruído no sistema
- Validar o controle de sinais e alimentação do sistema.

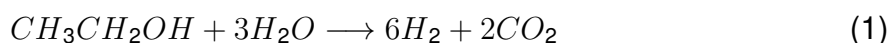
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A remodelagem da PCI para a bancada de testes do reformador de etanol impulsionou a exploração teórica dos elementos cruciais a essa transformação. Ao longo do desenvolvimento deste projeto, evidenciou-se a necessidade de compreender os conceitos relacionados à integração dos elementos eletrônicos controlados em sistemas de teste, especialmente em cenários específicos como o do reformador de etanol. As propriedades da interconexão entre componentes, a otimização da comunicação de dados e a garantia da confiabilidade sistêmica emergem como pilares teóricos essenciais.

Portanto, neste capítulo serão elucidados os conceitos aplicados para a construção de uma instrumentação em um ambiente de testes para o funcionamento ideal de um reator de hidrogênio, apresentando-se a reforma de etanol, o sistema de controle e a eletrônica.

2.1 REFORMA DE ETANOL

A geração de energia por reforma de etanol é uma técnica que consiste em realizar a decomposição do etanol em uma mistura gasosa de H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , H_2 e uma pequena quantidade de etanol não reagido (Thanomjit *et al.*, 2015). Esse processo é definido pela reação auto térmica que ocorre dentro do reformador catalítico, a qual precisa ser mantida em uma temperatura ideal de 400° a 700° C a fim de obter uma alta de conversão de etanol e uma seletividade próxima de 100%, isso se dá pela análise termodinâmica realizada a partir de testes em ambientes diversos utilizando-se a técnica de reforma por vapor, com base na Equação 1 (Hou *et al.*, 2015).

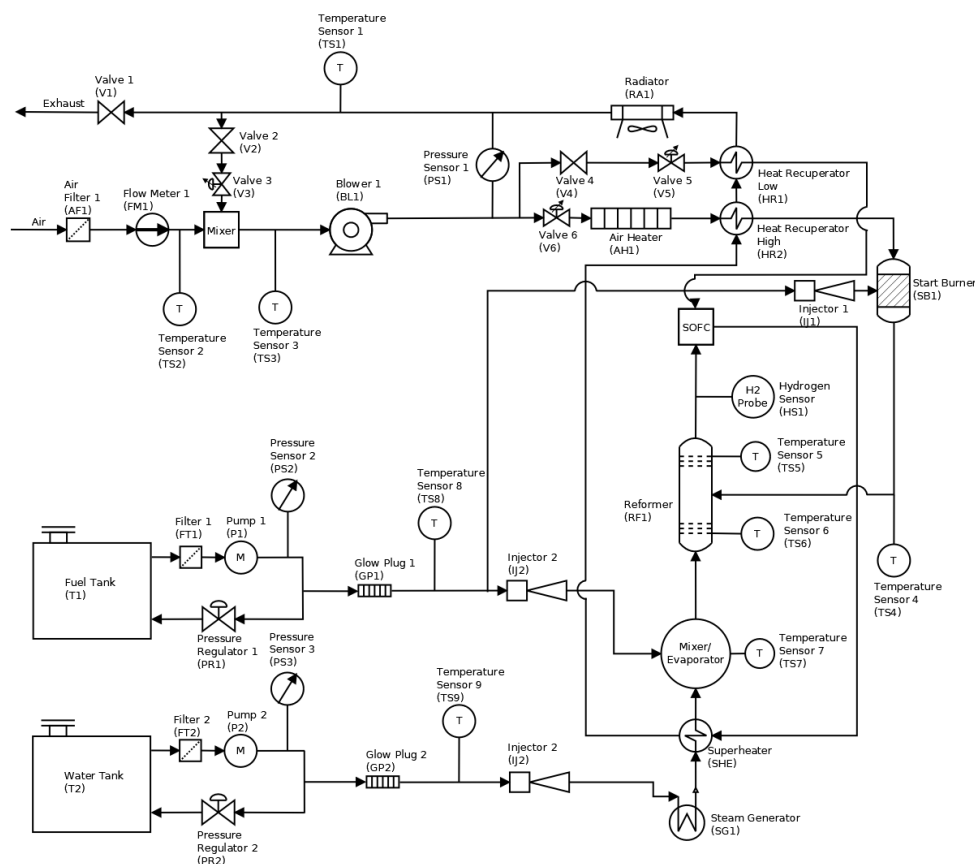


A montagem ideal do reformador de etanol pode ser obtida com a construção de uma estrutura que suporte a injeção de água e etanol vaporizados em uma câmara de alta temperatura com a presença da superfície de reação, a qual é responsável por realizar o rompimento das ligações carbono-carbono presentes na molécula de etanol, formando CO , CO_2 e CH . Deste modo, é possível observar na Equação 2, que a reforma ocorre com um gás de síntese, seguido pela etapa de mudança água/gás (Hou *et al.*, 2015).



A partir dessa conjuntura, o reator precisa operar em condições favoráveis à alta temperatura e em um ambiente que favoreça a dispersão dos gases de reação de modo a garantir uma distribuição uniforme sobre a superfície de reação, a qual é comumente composta por um substrato cerâmico monolítico, o qual, sob a intenção de aumentar a área de superfície, pode ser composta por uma camada de Al_2O_3 e CeO_2 . Em seguida, são implantados catalisadores de Ródio/Platina capazes de suportar as reações de reforma auto térmica (Pasel *et al.*, 2017). Nesse sentido, é possível observar na Figura 1, o diagrama de processos de um reator de hidrogênio baseado na reforma de etanol projetado e desenvolvido pelo Laboratório de Combustão e Catálise Aplicados (LAC, 2023). Nesta imagem estão destacados os componentes que foram previstos no início do projeto, na forma de um diagrama de tubulação e instrumentação, o qual destaca o sistema do reator por completo.

Figura 1 – Diagrama do Reator de H₂



Fonte: LAC (2022).

Deste projeto do LAC, surgiu a importância de uma Unidade de Controle Ele-

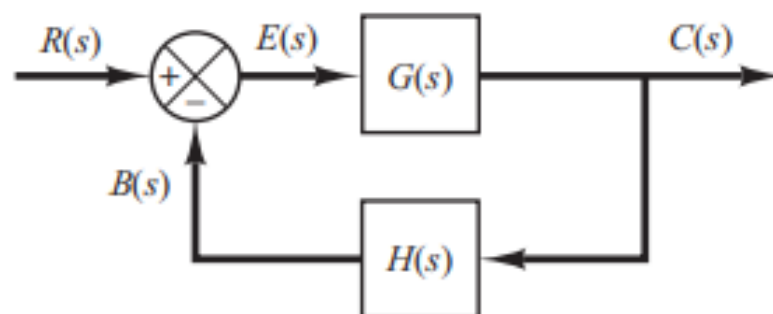
trônico (ECU - Electronic Control Unit) para garantir o funcionamento otimizado dos atuadores, assim como para possibilitar o controle autônomo do sistema.

2.2 SISTEMA DE CONTROLE

No âmbito da engenharia, os sistemas de controle desempenham um papel fundamental na regulação e estabilidade de sistemas dinâmicos. Os princípios e técnicas subjacentes a esses sistemas representam uma área de estudo crucial para o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias modernas. Sendo assim, a compreensão dos sistemas de controle é vital para o funcionamento eficaz de sistemas complexos, permitindo o gerenciamento preciso de variáveis e a resposta a perturbações (Ogata, 2010).

O controle em malha fechada é fundamental na engenharia de sistemas, onde a utilização de sensores e atuadores desempenha um papel crucial (Dorf; Bishop, 2008). A malha fechada consiste em um sistema no qual um dispositivo de medição (sensor), representado pelo $H(s)$, fornece informações sobre a saída do sistema, de tal forma que sejam avaliados em relação com a referência desejada, representado pelo $R(s)$, a fim de obter um sinal de erro $E(s)$, como ilustrado na Figura 2. Com base nessa diferença entre o sinal de referência e a saída real, o controlador toma decisões e emite comandos para os atuadores, que modificam o sistema para minimizar essa discrepância (Ogata, 2010).

Figura 2 – Diagrama de Blocos em Malha Fechada



Fonte: Ogata (2010 p. 16.)

Os sensores desempenham o papel de coletar informações do sistema, enquanto os atuadores agem sobre a entrada do sistema, de modo a implementar as correções necessárias. Esse ciclo, regido pelo controlador, visa manter a saída do sistema o mais próxima possível do valor desejado, através do ajuste das variáveis de controle com base nas informações fornecidas pelos sensores (Ogata, 2010).

Os subsistemas de alimentação de combustível, controle interno de temperatura e injeção de ar no reator demandam um controle preciso para operação ideal, visando assegurar uma concentração mais elevada de H₂ na saída. A eficiência de sua produção é influenciada por vários fatores, como a proporção dos reagentes, a temperatura de reação e o tipo de catalisador, tornando essencial uma gestão refinada para otimizar o processo (LAC, 2023).

2.3 ELETRÔNICA

No contexto da eletrônica o termo *hardware* se refere aos componentes físicos que compõem um sistema eletrônico, tais como capacitores, resistores e até dispositivos complexos como circuitos integrados e microcontroladores. Esses elementos constituem a base física sobre a qual os sistemas eletrônicos operam, de modo a suportar operações críticas e integração de componentes fundamentais (Sedra; Smith, 2004).

Para a montagem da interface de controle da bancada, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso, levando em consideração os requisitos funcionais e não funcionais estabelecidos pela equipe do projeto (Slovinski, 2023). A versão inicial da PCI foi concebida como um elemento-chave para facilitar a interação entre os componentes do reator, proporcionando a infraestrutura necessária para a coleta de dados, controle e comunicação.

A análise crítica dessa versão inicial da PCI é crucial para compreender as melhorias necessárias, fornecendo uma base sólida para a evolução da interface de hardware ao longo do desenvolvimento do projeto. Essa revisão detalhada permitirá a identificação de oportunidades de aprimoramento, garantindo que a versão final da PCI atenda de maneira eficaz e otimizada às exigências do sistema.

O controle dos atuadores implica uma segurança crítica para o funcionamento do microcontrolador, visto que a alta potência que os mesmos demandam são capazes de desequilibrar o referencial mútuo entre as tensões de sinal e potência do sistema, bem como possíveis falhas de alimentação e funcionamento podem danificar permanentemente a interface de processamento de controle (Cording, 2022). Disso surgiu-se a necessidade de utilizar *drivers* para a ativação dos MOSFETs (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) com a utilização de circuitos opto acopladores.

2.4 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Em sistemas eletrônicos, a comunicação entre os componentes é fundamental para o funcionamento eficiente e coordenado do sistema de dispositivos, como sensores, atuadores e os próprios microcontroladores. Conforme Sedra e Smith (2004), a

escolha do protocolo de comunicação adequado é fundamental para a confiabilidade e eficiência do sistema eletrônico.

Os diversos protocolos de comunicação podem ser categorizados em duas grandes classes: comunicação paralela e comunicação serial. A comunicação paralela é definida pela capacidade de transmitir múltiplos bits simultaneamente através de várias linhas, já a comunicação serial envia dados em uma única linha. Em sistemas embarcados, a comunicação serial é preferível devido à simplicidade e poucas conexões necessárias (Horowitz; Hill, 2015).

2.4.1 Interface Serial Periférica (SPI)

A Interface Serial Periférica (SPI) é um protocolo de comunicação serial síncrona que facilita a transferência de dados entre um dispositivo mestre e um ou mais dispositivos escravos, possui alta velocidade de comunicação e é amplamente utilizado em aplicações que requerem rápida troca de dados, como sensores e controladores.

O SPI utiliza quatro linhas principais para a comunicação: MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out), SCLK (Serial Clock), e SS (Slave Select). O dispositivo mestre, geralmente o microcontrolador, gera o sinal de clock e controla a linha de seleção do escravo através do SS, coordenando a comunicação bidirecional entre o mestre e os escravos. Os dados são transferidos simultaneamente em cada pulso de *clock* e escolha do escravo, permitindo uma comunicação eficiente e rápida.

2.4.2 Inter-Integrated Circuit (I2C)

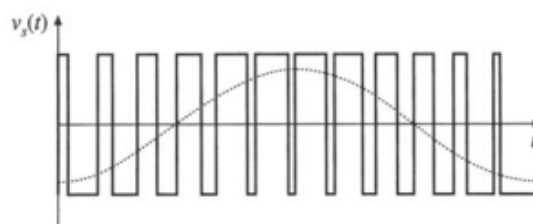
O *Inter-Integrated Circuit* (I2C) é um protocolo de comunicação serial síncrona que permite a interconexão de múltiplos dispositivos através de um barramento de duas linhas, o SDA (Serial Data) e o SCL (Serial Clock). Desenvolvido para suportar comunicação com endereçamento, o I²C é amplamente utilizado em sistemas onde a simplicidade e a flexibilidade são necessárias para conectar vários dispositivos, como sensores e periféricos em sistemas embarcados.

O dispositivo mestre gera o sinal de *clock* e inicia a comunicação enviando uma condição de início seguida pelo endereço do dispositivo escravo. Os dados são transmitidos e recebidos através da linha SDA, enquanto a linha SCL sincroniza a comunicação com pulsos de *clock*. Cada dispositivo no barramento possui um endereço único, o que permite a comunicação com múltiplos escravos através do mesmo conjunto de linhas (Wakerly, 2018).

2.5 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM)

A Modulação por Largura de Pulso (PWM) pode ser descrita como um método de acionamento que ajusta a largura dos pulsos de uma onda de sinal para simular uma quantidade de tensão entregue a uma carga. Nesse controle, o sinal digital alterna entre pulsos em dois níveis de tensão, normalmente 0V e uma tensão máxima pré estabelecida, com a largura desses pulsos variando de acordo com a necessidade do controle, assim como pode-se observar na Figura 3, a qual demonstra a modulação de largura de pulso para simular um sinal senoidal.

Figura 3 – Modulação de uma onda senoidal por PWM



Fonte: Erickson; Maksimovic (2001)

De acordo com Erickson e Maksimovic (2001), o PWM é um método fundamental para a eficiência de conversão em circuitos de comutação, pois ele consegue adaptar de acordo com a energia necessária para as cargas. O *duty cycle*, ou razão cíclica, determina a média da tensão que a carga recebe, sendo uma técnica eficaz para o controle de cargas que necessitam de ajustes de potência em tempo real e controle de velocidade em motores.

A técnica de PWM, apesar de ser versátil, não opera com uma carga que necessite que uma alimentação de corrente alternada, sendo assim, a técnica de *Zero Crossing* é empregada nestes casos, ela é utilizada para a detecção do momento em que a forma de onda senoidal da corrente passa pelo referencial zero. Essa técnica é importante para os sistemas de controle que necessitam de acionamento de potência AC, na qual a sincronização com a forma de onda da alimentação é utilizada para reduzir o ruído e melhorar a eficiência (Rashid, 2013).

Quando essas técnicas são aplicadas corretamente, contribuem significativamente para a eficiência e precisão do controle.

3 TRABALHOS CORRELATOS

Este capítulo aborda os principais trabalhos correlatos para o desenvolvimento de uma instrumentação em bancadas para reatores de reforma de hidrogênio, enfatizando aspectos relacionados a desafios ambientais e demanda no setor automotivo. A análise desses estudos abrange desde o design de processos a simulações e implementações de sistemas de controle em tempo real.

A capacidade de modelar e prever o comportamento do reator permite o design de um experimento que possa replicar as condições operacionais de um reator de reforma a vapor ideal. Sob essa perspectiva, a bancada de testes desenvolvida pode ser capaz de fornecer dados confiáveis para a avaliação de novas tecnologias de reforma de hidrogênio.

A reforma a vapor de hidrocarbonetos é amplamente utilizada para a produção de hidrogênio, pois ela proporciona uma rota eficiente e relativamente econômica. Em um estudo abrangente sobre a reforma a vapor de etanol, Hou *et al.* (2015) investigaram os catalisadores e o mecanismo de reação, de modo a oferecer uma visão detalhada sobre a otimização de processos e a escolha de materiais catalíticos. O estudo identificou condições ideais de operação e características de catalisadores que podem melhorar a eficiência da produção de hidrogênio e minimizar a formação de subprodutos indesejados.

Hou *et al.* (2015) destacam a importância de otimizar as condições de operação para maximizar a produção de hidrogênio, sugerindo que a escolha de catalisadores e o controle preciso das condições reacionais, como temperatura e pressão, são cruciais para a eficiência do processo. O estudo demonstra que, ao ajustar a composição do catalisador e as condições de reação, é possível alcançar uma alta taxa de conversão de etanol e uma produção eficiente de hidrogênio.

A construção e otimização de bancadas de teste são fundamentais para a validação de novos processos de reforma de hidrogênio. Aguiar *et al.* (2005) exploraram o desempenho dinâmico e as estratégias de controle de uma célula a combustível de óxido sólido (SOFC) com reforma interna direta, destacando a importância de simulações dinâmicas para a avaliação de sistemas de controle.

Aguiar *et al.* (2005) desenvolveram um modelo dinâmico para prever o comportamento de uma SOFC submetida a mudanças de carga. O estudo implementou estratégias de controle que ajustam as taxas de fluxo de combustível e ar para manter a estabilidade operacional e evitar gradientes de temperatura potencialmente prejudiciais.

Pasel *et al.* (2017) discutem os avanços no design de reformadores autotérmicos (ATR), focando no desenvolvimento de reatores que utilizam hidrocarbonetos

líquidos, como diesel e querosene, para a produção de hidrogênio. O estudo introduz o ATR 12, um reformador com capacidade de geração interna de vapor superaquecido e um fio de aquecimento elétrico integrado para um início rápido e autônomo.

O ATR 12, conforme descrito por Pasel *et al.* (2017), é caracterizado por um conceito inovador que utiliza conchas concêntricas para a geração de vapor superaquecido e um fio de aquecimento para permitir o start-up rápido em cerca de 15 minutos. Os autores discutem três procedimentos experimentais para o aquecimento do ATR 12, identificando as condições de reação mais adequadas para a operação eficiente do reator.

Os avanços no design e nas metodologias de aquecimento do ATR 12 descritos por Pasel *et al.* (2017), são aplicáveis ao projeto atual. A integração de sistemas de aquecimento e controle em reatores de bancada permitirá a avaliação de diferentes estratégias de reforma e sua eficiência, de modo a oferecer uma plataforma para experimentação e otimização do processo de reforma autotérmica.

4 METODOLOGIA

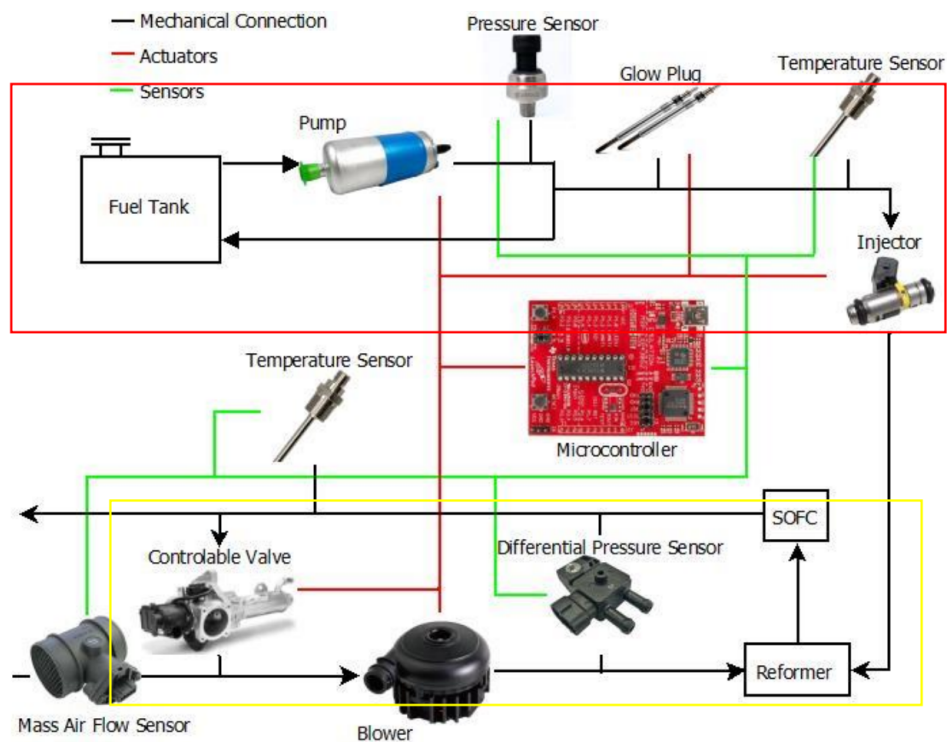
No percurso que conduziu à etapa metodológica, delineada neste capítulo, é necessário resgatar os elementos que fundamentaram a remodelagem da PCI para a bancada de testes do reformador de etanol. Neste capítulo, serão evidenciados métodos empregados, materiais escolhidos e os passos de adaptação na integração eficiente da PCI à bancada de testes, para atingir os objetivos propostos.

Agora, ancorada nos preceitos teóricos previamente discutidos, a metodologia aplicada tem a função de expor os passos a serem executados. O objetivo é oferecer uma compreensão clara e direta das decisões práticas tomadas nesse processo. Para tanto, este capítulo aborda o processo de remodelagem da PCI para a criação da bancada de testes do reformador de etanol.

4.1 MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem é baseada no diagrama mecânico apresentado na Figura 4 e no texto descritivo fornecido, abrangendo a identificação dos subsistemas principais e suas funções atribuídas a cada subsistema.

Figura 4 – Esquemático Mecânico



Fonte: LAC (2023)

4.1.1 Modelagem dos Subsistemas

A seguir, são descritos os principais subsistemas modelados inicialmente, com ênfase nas suas funções e interações no sistema global.

4.1.1.1 Subsistema de Fornecimento de Ar

Um dos reagentes necessários para a reação de reforma é o oxigênio, fornecido através do ar. Para garantir a quantidade adequada de ar, foi planejado a utilização de um soprador controlado pelo microcontrolador que direciona o fluxo de ar para o reformador. A principal tarefa deste subsistema é o controle do fluxo de ar através da regulação da velocidade do soprador.

4.1.1.2 Subsistema de Injeção de Combustível

O processo de reforma do hidrogênio utiliza duas linhas de combustível pressurizadas: uma para água e outra para etanol. Estes são os reagentes para a conversão de hidrogênio. As tarefas principais deste subsistema envolvem a injeção de etanol e água no reformador e a manutenção das condições adequadas de pressão e temperatura.

4.1.1.3 Subsistema de Reforma

O processo de reforma é controlado indiretamente pelos outros subsistemas, mas seu resultado é crucial, uma vez que o hidrogênio é o produto final desejado. As principais tarefas deste subsistema incluem o monitoramento e a exibição dos dados necessários.

4.1.2 Funções de Controle e Monitoramento

A integração dos componentes e subsistemas descritos é fundamental para o funcionamento adequado do sistema de reforma de hidrogênio. As funções de controle e monitoramento são desempenhadas por um microcontrolador que suporta diversos protocolos de comunicação (UART, CAN, SPI, I2C). O suprimento elétrico é fornecido por uma ou mais baterias automotivas, contudo para via de testes serão utilizadas fontes chaveadas para simular uma bateria automotiva e garantir um período maior de testes.

4.2 PLANEJAMENTO DE MONTAGEM

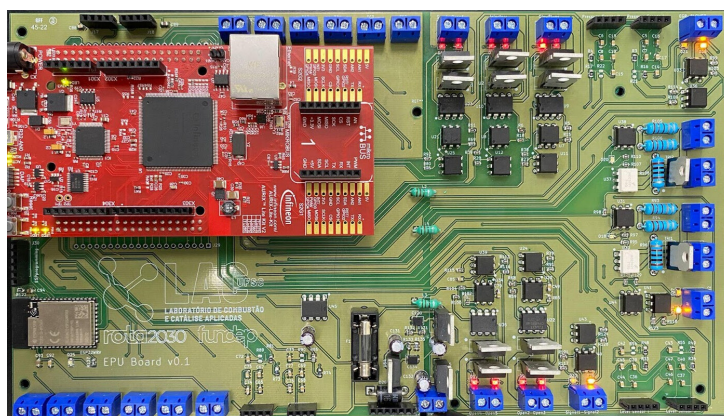
De modo a garantir uma boa precisão de sinais e um controle adequado dos valores enviados e recebidos entre o microcontrolador e os componentes periféricos, foi realizada uma modelagem inicial de uma Placa de Circuito Impresso (PCI) para a

bancada de testes em um trabalho anterior, levando em consideração aspectos essenciais para o funcionamento da mesma. Desse modo, através da decomposição destes aspectos em requisitos funcionais e não-funcionais, foi realizado todo o processo de criação da primeira versão da PCI utilizada no reator (Slovinski, 2023).

É possível dividir seções da placa em subsistemas interligados, cada um com sua função específica, a fim de realizar a verificação de comportamento individual de cada subsistema e validar seu funcionamento pleno quando interligado à bancada de testes. Esta abordagem permite uma análise detalhada de cada componente, facilitando a identificação de problemas antes da integração completa.

Desse modo, planejou-se iniciar a etapa de testes utilizando sensores e atuadores reais em condições controladas de operação, empregando bancadas individuais para cada subsistema. Primeiramente, foi realizado o teste de comunicação e obtenção de dados dos sensores termopares tipo K e dos circuitos integrados (CIs) de leitura, sendo eles os modelos MAX31855KASA+(MAXIM Integrated Products, Inc., 2012).

Figura 5 – PCI Inicial



Fonte: Slovinski (2023)

Para esses testes, os termopares tipo K foram conectados a pontos de medição conhecidos e os CIs MAX31855KASA+ foram configurados para leitura precisa das temperaturas. Pretende-se verificar as conexões entre os termopares e os CIs, assegurando a correta transmissão dos dados. Posteriormente, os dados de temperatura foram coletados e analisados para validar a precisão e consistência das medições. Esta abordagem permitiu confirmar que cada conexão funcione conforme o esperado e que a comunicação de dados seja confiável, facilitando a integração subsequente à bancada de testes completa.

4.2.1 Termopares

Para essa leitura, o projeto inicial tinha como objetivo, obter uma forma precisa da captura de informações. O termopar possui uma curva de operação que relaciona a tensão de saída com a temperatura observada no terminal de medição, assim como pode ser observado na Figura 6. A faixa de tensão está entre 0 e aproximadamente 55mV para um termopar tipo K em todo o seu intervalo de leitura, o qual varia de -220 °C até 1260 °C, com uma sensibilidade aproximada de 41µV/°C. (Omega Engineering, Inc., 2018)

Para tal cenário, foi realizada a escolha de um sensor de alta resolução, o MAX31855. Este componente requer um barramento de comunicação utilizando o protocolo SPI. Neste tipo de arquitetura de comunicação, o fluxo de dados é efetuado de forma síncrona, com o auxílio de um sinal de *clock* do microcontrolador em um barramento único. A transferência de dados obedece essa frequência durante o envio de sinais, em um barramento compartilhado chamado MISO (Master IN Slave Out), enquanto a seleção de envio é efetuada por um sinal chamado CS (Chip Select), o qual determina qual componente irá enviar os dados para o microcontrolador. Dessa forma, todos os módulos MAX31855 utilizam a mesmo pino de entrada no microcontrolador.

Figura 6 – Operação de um termopar



Fonte: Modificada de Omega Engineering, Inc.(2018)

Sob essa perspectiva, optou-se por seguir a seguinte sequência de testes:

- Realizar a leitura de sinais com o envio do CS de um MAX31855
- Realizar a decodificação dos protocolos de comunicação com o auxílio de um osciloscópio digital
- Realizar a leitura das mensagens enviadas ao microcontrolador
- Avaliar resultados de leitura aplicando variações de temperatura no sensor.
- Repetir o teste em todos os outros módulos MAX31855.

Essa etapa de testes será utilizada para quantificar os resultados obtidos do teste genérico feito inicialmente.

4.2.2 Controle do Soprador

Em relação ao fluxo de ar necessário para a reação da reforma, foram utilizados alguns componentes que atendessem os requisitos do sistema, para isso foi escolhido um sensor de pressão diferencial ELVH para averiguar o fluxo de ar que estaria entrando no reator, a fim de relacionar diretamente com a quantidade dos outros reagentes durante o processo de reforma. Dessa forma, para garantir que fosse entregue 4379kg/h e 10kPa, em regime permanente, o modelo de soprador utilizado foi o DOMEL 24VDC 800W(LAC, 2023). A fim de realizar o controle baseado na realimentação de fluxo de ar, a qual será realizada pelo sensor ELVH, é necessário garantir que os componentes podem ser controlados por comandos elétricos a partir do micro-controlador, realizar a montagem dos equipamentos em bancada e testar a sinergia com os outros subsistemas.

Quadro 1 – Sequenciamento de Etapas na Montagem do Sistema de Controle do Soprador

Etapas	Descrição
1. Planejamento	Definição de requisitos e seleção de componentes.
2. Instalação dos Componentes	Instalação mecânica e elétrica do soprador, sensor de pressão, controlador e componentes de interface.
3. Configuração do Sistema	Configuração do controlador, integração de sistemas e definição de parâmetros de controle.
4. Testes de Verificação	Verificação das conexões elétricas e mecânicas, calibração do sensor de pressão e testes de comunicação.
5. Testes de Funcionamento	Execução do sistema em modo manual, ajustes de parâmetros de controle e testes de resposta a variações.
6. Validação	Validação final do sistema e documentação dos testes.

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2024)

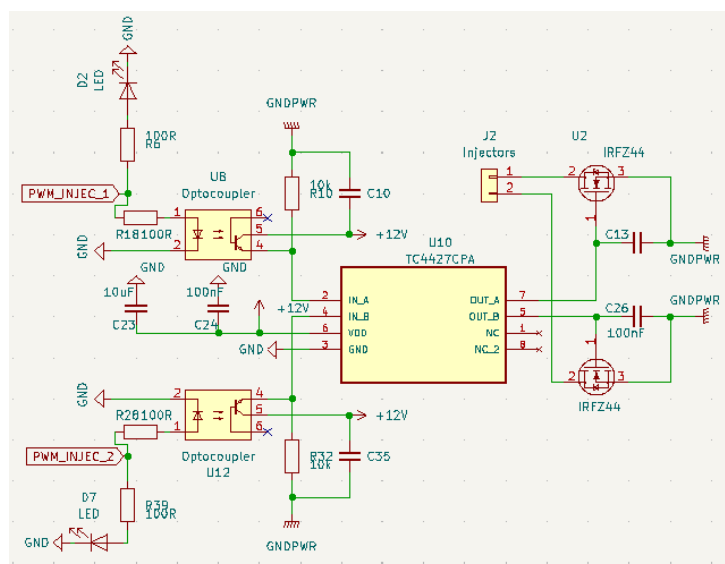
A sequência ideal para a realização de testes consiste em analisar ordenadamente uma série de passos específicos, esse sequenciamento visa minimizar a possibilidade de erros que podem levar a atrasos e retrabalhos no projeto. Sendo assim, no Quadro 1, podem ser observadas as etapas de trabalho desenvolvidas para este subsistema.

A descrição detalhada da implementação pode ser observada na Seção 5.1.3, a qual é responsável por relatar os processos utilizados durante o desenvolvimento e aplicação das etapas.

4.2.3 Potência PWM

O circuito utilizado para o controle de Potencia PWM pode ser observado na Figura 7, nela podem ser observados três componentes principais, sendo eles: o optoacoplador 4N25, o driver TC4427 e o MOSFET IRFZ44.

Figura 7 – Diagrama Esquemático do Circuito de PWM de Potência



Fonte: LAC (2022)

Essa parte do sistema é responsável por enviar sinais PWM de potência para alguns atuadores do sistema, por exemplo: a vela aquecedora, os bicos injetores e as bombas DC. Tais dispositivos necessitam de corrente para acionamento de potência e podem ser acionados completamente através de sinais da placa.

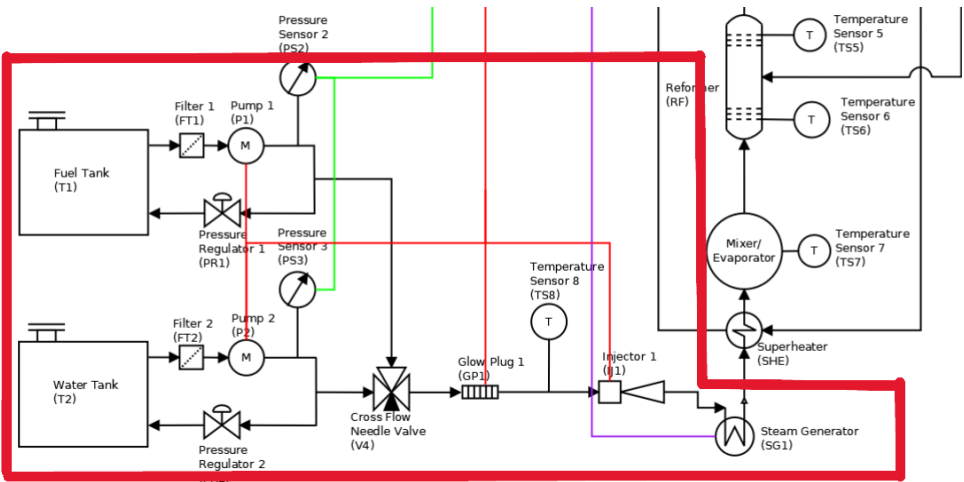
Seu planejamento de montagem e validação consiste em garantir que o sinal de PWM está sendo enviado à carga e que o sistema completo opera com os atuadores sem interferência de sinais. Tais verificações serão realizadas através da leitura de sinais com auxílio de osciloscópios e leituras na saída terminal do microcontrolador.

4.2.4 Controle AC e Linha de Combustível

O controle AC foi concebido, inicialmente, para a entrada de vapor de água no reator. Assim como pode-se observar em destaque na Figura 8, existe uma caldeira (SG1) entre o bico injetor do tanque de água e o reformador, esse componente foi projetado a partir de uma passadeira a vapor, dispositivo que utiliza o calor para transformar água em vapor e higienizar roupas, e seu funcionamento é baseado no efeito Joule, ou seja, ele atua como uma resistência elétrica.

Com a necessidade de obter um controle de vazão na entrada de combustível, a escolha que mais se encaixava nos requisitos de vazão foi um modelo de passadeira a vapor comercial 220V. Nesse contexto, apenas a caldeira interna foi aproveitada e

Figura 8 – Diagrama P&ID da linha de Combustível em destaque



Fonte: LAC (2022)

projetada em combinação com a linha de pressão e o bico injetor. O sequenciamento de etapas para essa montagem pode ser observado no Quadro 2.

Quadro 2 – Sequenciamento de Etapas na Montagem do Sistema de Controle AC

Etapas	Descrição
1. Planejamento	Definição de requisitos do subsistema, como temperatura e especificações mecânicas, planejamento e seleção de componentes.
2. Instalação dos Componentes	Instalação mecânica das mangueiras e conexões, instalação elétrica e eletrônica dos componentes.
3. Testes de Verificação	Realização de testes empíricos para validar as conexões mecânicas e a comunicação entre o sensor e o microcontrolador. Testes do sistema de aquecimento sem carga.
4. Configuração do Sistema	Configuração e monitoramento do controle de sinal para ajustar a corrente alternada fornecida à resistência elétrica.
5. Testes de Funcionamento	Execução do sistema em modo manual, ajustes de parâmetros de controle e testes de resposta a variações.
6. Validação	Validação final do sistema e documentação.

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2024)

Para fins de controle, foram utilizados componentes como um retificador de sinal, optoacopladores e um TRIAC (Triodo de Corrente Alternada), além de alguns resistores. Nessa configuração, o controle da potência, será realizada através de uma técnica chamada *Zero Cross Detection*, a qual é uma forma utilizada para detectar o momento que uma forma de onda alternada cruza o ponto zero de um ciclo de 360°.

Dessa forma, o controle permite sincronização com a frequência da rede, reduzindo ruídos e minimizando as interferências eletromagnéticas.

O circuito utiliza o retificador de sinal e alguns resistores para reduzir a tensão e corrente de entrada da rede, a um nível operacional para optoacopladores os quais conseguem detectar o ponto na qual a onda passa pelo ponto zero e emitir um sinal de pulso ao microcontrolador, dessa forma, os sinais refletem a frequência e posição da onda de entrada, permitindo que o circuito de controle possa funcionar em sincronismo com a rede, isso possibilita o controle baseado na frequência da rede.

5 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão apresentados os passos para a montagem e instalação eletrônica dos componentes de *hardware* apresentados no reator.

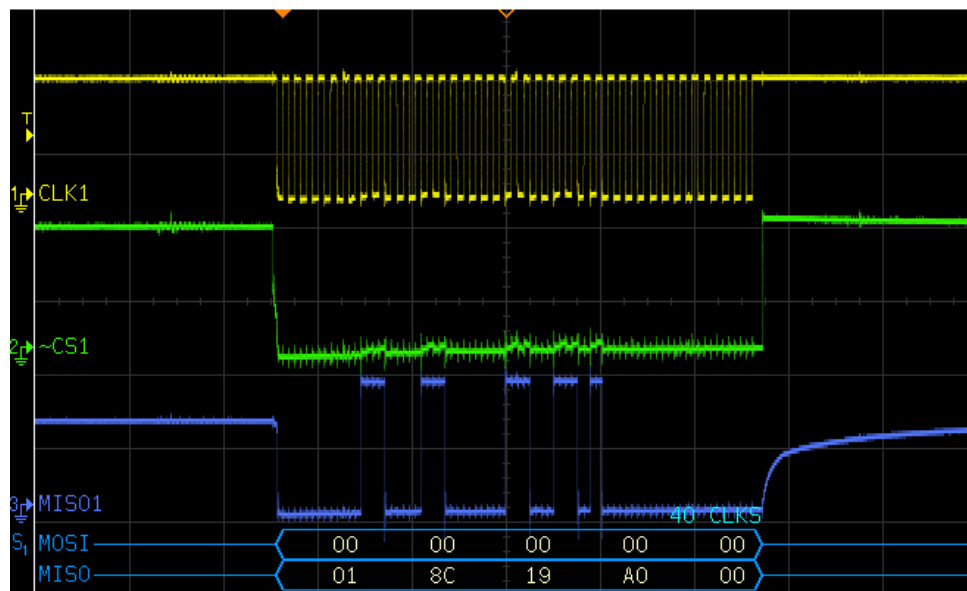
5.1 ESTRATÉGIA DE PARTIDA A FRIO

Devido à necessidade de garantir a segurança e resultados confiáveis durante a etapa de montagem, os testes com os atuadores foram realizados de forma individual. Inicialmente, foi realizado o tratamento de dados e leitura de sinais de cada componente e após obter confiabilidade individual, foram iniciados novas avaliações.

5.1.1 Avaliação dos Termopares

A primeira fase de avaliação foi verificar a comunicação e precisão dos dados recebidos pelos termopares. Neste momento, foi utilizado a PCI previamente montada para a realização dos testes.

Figura 9 – Sinais do SPI mostrando as linhas de *clock*, seleção do escravo, MOSI e MISO



Fonte: LAC (2023)

Durante a etapa de testes, a leitura dos sinais se provou um desafio, visto que a comunicação SPI com a interface do microcontrolador era algo novo para a equipe, sendo assim, foi utilizado apenas um módulo para a identificação dos sinais. A Figura 9 representa um dos testes realizados para averiguar os sinais enviados e recebidos pelo microcontrolador, na figura é possível identificar a seleção do escravo

pela linha verde, o *clock* pela linha amarela e o protocolo de comunicação enviando os dados pela linha azul.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que após a verificação isolada, foi possível verificar a temperatura do sistema com diversos termopares conectados no mesmo barramento, dessa forma, foi possível avançar para as próximas fases. Foi necessário realizar algumas alterações nas trilhas da placa devido à incompatibilidade em relação a alguns pinos do microcontrolador em determinadas rotinas, tais modificações podem ser observadas no Capítulo 5.2.

5.1.2 Montagem da Linha de Combustível

A montagem da linha de combustível iniciou-se com a conexão hidráulica entre a bomba e o conector do bico injetor. Em uma primeira etapa, utilizou-se uma configuração prematura com o auxílio de uma caixa de isopor e uma base com haste para vidrarias, para o fluido e uma bomba de carro flex modelo GAUSS GI-3120 FLEX, assim como pode-se observar na Figura 10. Essa bomba possui a capacidade de exercer a pressão em 4 bar, conforme os requisitos e também é um modelo próprio para biocombustíveis. Visto que a utilização com o etanol iria acelerar o deterioramento por oxidação das partes mecânicas da bomba.

Figura 10 – Imagem da Bancada de Testes para a Linha de Combustível



Fonte: Autor (2023)

Por sequência, iniciou-se os testes com a instrumentação conectada ao suporte do bico injetor, sendo elas: um termopar tipo K, uma vela aquecedora e o próprio bico injetor. Primeiramente, foi feita uma reavaliação dos componentes projetados e optou-se por não utilizar o modelo de vela aquecedora escolhida, pois a mesma não possui capacidade para a alimentação de potência da placa. Foi possível identificar

que a extremidade aquecedora apresentava algumas condições de falha de sobretenção (BorgWarner Inc., 2019). Sob essa perspectiva, a utilização da vela aquecedora tornou-se inviável, tendo em vista que o encaixe do suporte foi projetado com dimensões de rosca e comprimento específicas para este modelo.

O próximo passo foi manter a linha pressurizada de forma estável. Considerando que o circuito de sinal do sensor de pressão da linha de combustível não se provou capaz de receber dados, pois não havia um componente essencial para seu funcionamento, utilizou-se um manômetro analógico e uma válvula reguladora de pressão para a calibração da bomba de combustível em 4 bar.

Inicialmente o projeto contava com duas linhas pressurizadas, sendo uma de água e outra de etanol, assim como é possível observar na Figura 8. Com isso em mente, levantou-se uma opção para realinhar a necessidade de uma bomba flex para a pressurização da linha de água e foi definido a utilização de uma bomba d'água de 60W com capacidade de fornecer 8 bar de pressurização máxima. Por ser uma bomba DC, o seu acionamento poderia ser feito pelo mesmo circuito de potência 12V da placa, logo tornou-se uma opção viável. Apesar da mudança na utilização da bomba, o projeto identificou uma falha mecânica na entrada de combustível do reator, a abertura pela qual seria conectado o bico injetor de combustível não possui nenhuma espécie de flange para fixação, logo optou-se pela opção de fornecer uma mistura prévia de etanol e água para o reator, diretamente pela saída do bico injetor do sistema de vazão d'água.

5.1.2.1 Calibração dos bicos injetores

A etapa de calibração dos bicos injetores foi realizada com o sistema pressurizado em 4 bar e a medição da vazão foi relacionada com o peso da mistura utilizada e o sinal PWM enviado através da ECU.

No Quadro 3, é possível ver os parâmetros utilizados para a realização dos testes, para uma análise prévia foram utilizados testes de 10s para averiguar se havia uma linearidade nos resultados. Os valores de cada coluna simbolizam a quantidade em gramas de mistura que foi despejada em um recipiente de teste. Esse recipiente teve o valor do seu peso aferido em uma balança com três casas decimais de precisão e os valores salvos em uma tabela. A ativação do bico injetor foi realizado um teste em unidade isolada, ou seja, apenas a bomba de combustível e o bico injetor estavam ligados durante o processo.

Através da Figura 11, é possível afirmar que a relação de vazão com a potência regulada através da modulação PWM se assemelha a uma linha reta, portanto essa relação se aproxima a uma função linear de primeiro grau e pode ser descrita em uma equação.

Quadro 3 – Resultados dos Testes de Sinal PWM em Diferentes Tempos

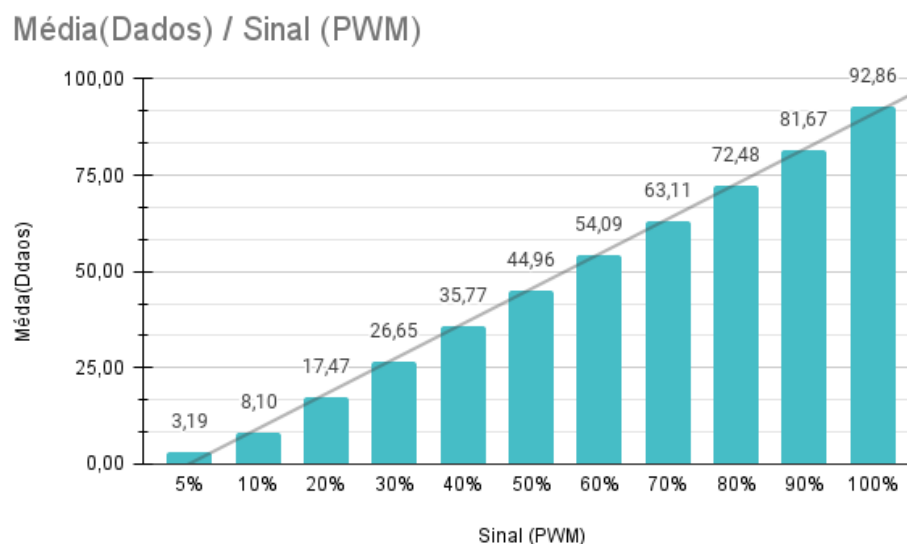
Sinal (PWM)	Teste 10s	Teste 30s (1)	Teste 30s (2)	Teste 30s (3)	Média
5%	0,5	3,05	3,23	3,28	3,19
10%	2,43	8,18	8,07	8,04	8,10
20%	2,92	17,6	17,38	17,43	17,47
30%	4,51	26,8	26,53	26,63	26,65
40%	6,13	36	35,63	35,69	35,77
50%	7,6	45,03	45,08	44,77	44,96
60%	9,13	54,22	54,25	53,81	54,09
70%	10,38	63,28	63,12	62,94	63,11
80%	12	72,55	72,63	72,27	72,48
90%	13,56	81,74	82,52	80,75	81,67
100%	14,36	92,6	93,18	92,81	92,86

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2024)

O valor então precisa ser convertido para L/min para se adequar aos requisitos de mistura estabelecidos pelo projeto e garantir uma visualização mais simplificada do fluxo gerado pelo acionamento do bico injetor.

Para converter um valor de fluxo de g/min (gramas por minuto) para L/min (litros por minuto), é preciso utilizar a densidade da mistura de etanol e água.

Figura 11 – Gráfico de Relação PWM x Média em gramas



Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2023)

Dada a densidade da mistura $\rho = 0,947 \text{ kg/L}$, a fórmula de conversão é:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

onde:

- V é o volume em litros por minuto (L/min),
- m é a massa em gramas por minuto (g/min),
- ρ é a densidade da mistura em kg/L .

Sob essa perspectiva, para converter um fluxo de 10 g/min para litros por minuto:

$$V = \frac{10}{0,947} \quad (4)$$

E ao realizar a divisão:

$$V \approx 10,55 L/min \quad (5)$$

Portanto, 10 g/min de uma mistura com densidade 0,947 kg/L é aproximadamente igual a 10,55 L/min. Utilizando essa relação obtida na Equação 5.1.2.1, é possível alterar qualquer valor da tabela em L/min em função do valor de PWM enviado.

5.1.3 Montagem da Linha de Ar

Por fim, foi realizada a montagem da linha de ar, a qual possui um soprador e um sensor de pressão diferencial para aferir o fluxo de ar, através do processo de medição de vazão por placa de orifício. Esse modelo de medição requer a presença de um sensor de pressão, em uma tubulação, em dois pontos, um anterior a uma abertura restritiva na placa, e outro após. Para este cenário, o projeto foi formulado para uma configuração de baixa pressão e alta resolução. Logo, com os materiais disponíveis, a montagem foi efetuada através de testes dos componentes, individualmente. O soprador, por padrão, já possui uma fonte de alimentação própria derivada de uma fonte 24V instalada particularmente para ele, visto que é o único dispositivo que requer uma tensão de alimentação 24V do sistema, assim como pode-se observar na Figura 8.

Em relação à parte mecânica, foram utilizados alguns componentes para vedação entre o soprador, o tubo de entrada e a mangueira que conecta ao reformador, sendo eles: conectores de borracha, mangueiras pneumáticas, abraçadeiras e um silicone de alta temperatura automotivo.

Para a conexão com o sensor, foi utilizado uma mangueira fina de silicone 2mm disponível no ambiente do laboratório, tal material se provou vital para a utilização deste componente. O sensor montado em um circuito impresso, está conectado à linha de ar com a tubulação de silicone, assim como pode-se observar na Figura 12.

Após a instalação, foi efetuada uma medição de dados para encontrar uma forma de associar o fluxo de ar ao sinal de pressão enviado pelo sensor à ECU. Esse

Figura 12 – Sensor de Vazão Instalado



Fonte: Autor (2023)

modelo de sensor tem uma comunicação I2C, logo foi possível estabelecer uma conexão com quatro fios revestidos com a bitola: 23AWG (Diâmetro 0.57mm).

5.2 MODIFICAÇÕES PCI

Durante o decorrer do projeto, observou-se que poderia haver a necessidade de realizar algumas mudanças no *design* da PCI para adequá-lo aos requisitos e necessidades do sistema completo, assim como algumas irregularidades que poderiam aparecer conforme o andamento do projeto e realização de testes.

A partir do modelo base observado na Figura 5 foram feitos testes iniciais e alterações no mesmo, utilizando o software KiCAD. Por ser um programa gratuito e empregado na primeira etapa do projeto, optou-se por seguir com a utilização para concluir algumas alterações no modelo da segunda versão da placa. Nesta seção serão abordadas as mudanças realizadas na placa para atender necessidades que não haviam sido validadas até o momento.

5.2.1 Subsistema de Controle AC

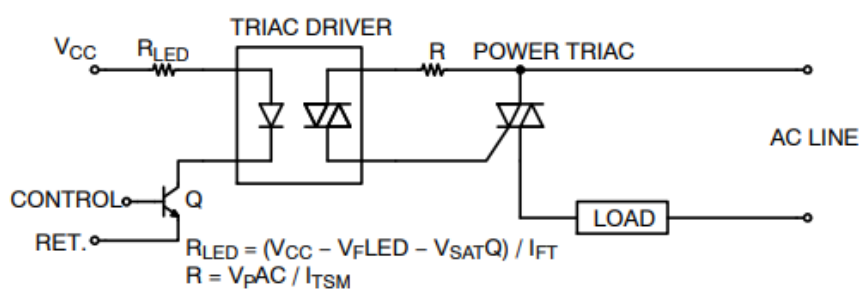
O método de verificação deste circuito consistiu em realizar uma análise visual dos sinais de entrada e saída no optoacoplador utilizando um osciloscópio digital, verificando a amplitude e a frequência do sinal enviado ao microcontrolador. Dessa forma, foi possível correlacionar os resultados obtidos de forma analógica com a entrada digital.

Nessa configuração, após realizar a conexão com a fonte de alimentação da tomada, o retificador recebe a tensão da rede e converte em pulsos de 3,3V através de um optoacoplador. Quando o fototransistor do optoacoplador for excitado, o *ground* será chaveado através dos pinos da base e do coletor para o microcontrolador, desta forma, no momento que o LED não excitar o fototransmissor do CI, um pulso será gerado a partir da conexão com a 3,3V de alimentação do circuito regulador de tensão.

Para a segunda etapa do processo, foi necessário realizar o controle de corte da onda da tensão de rede, de acordo com a potência mínima para vaporizar o volume de líquido no interior do evaporador, tal processo requiriu a informação do período e posição da frequência enviada pelo optoacoplador ao microcontrolador. Durante a verificação, houve um imprevisto e a fonte que estava alimentando a placa apresentou um pico de tensão inesperado, danificando-a permanentemente.

Devido ao acontecimento previamente descrito, realizou-se a montagem de uma nova placa com novos componentes eletrônicos, documentando todos os procedimentos relacionados à montagem. Em primeira instância, foram feitos os testes no circuito AC.

Figura 13 – Modelo de Ativação do MOC utilizando Transistor

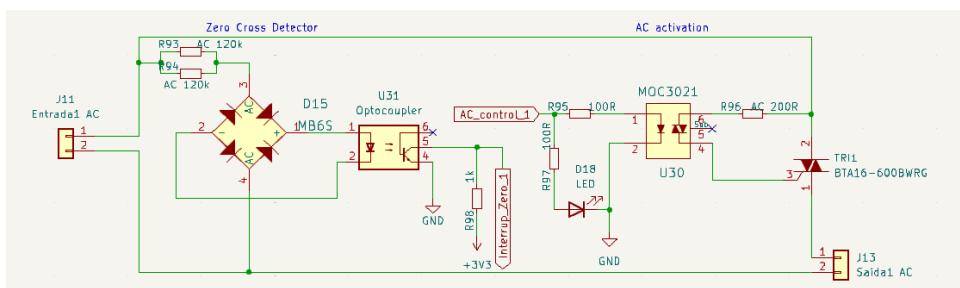


Fonte: Fairchild Semiconductor Corporation (2009)

Os quais serviram de base para encontrar uma falha no projeto do acionamento elétrico do TRIAC, tal falha reside na entrada do optoacoplador MOC3021. O projeto inicial era promover a excitação do LED do optoacoplador por meio de um sinal PWM enviado através de um pino do microcontrolador, contudo, ao realizar uma análise no *datasheet* do componente, foi observado que o requisito de corrente mínima necessária para a ativação do LED, não foi cumprido, dessa forma optou-se por utilizar

outro método de acionamento por meio de um transistor NPN BC457N, na orientação que é descrita na Figura 13(Fairchild Semiconductor Corporation, 2009).

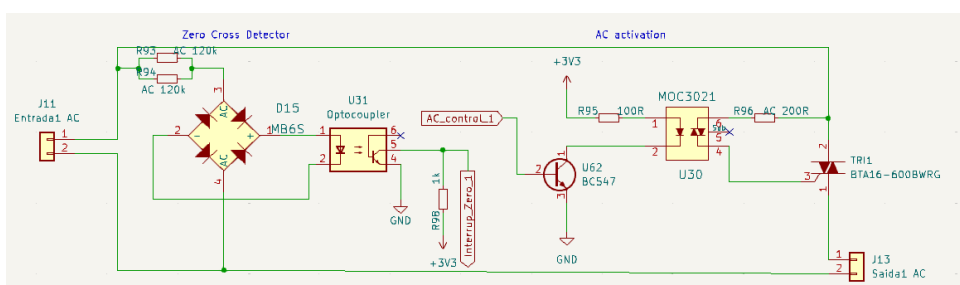
Figura 14 – Esquemático Inicial do Circuito AC



Fonte: Slovinski (2022)

Sendo assim, foi necessário reorganizar algumas trilhas e adaptar o circuito para a implementação do transistor. Os testes e validações foram efetuados com o apoio de um osciloscópio digital, que foi responsável por detectar a queda incomum de tensão na entrada do optoacoplador. Sendo assim, o modelo esquemático da placa inicial, observado na Figura 14, foi alterado para o modelo funcional, com a utilização do transistor, o mesmo pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Esquemático atualizado do circuito AC



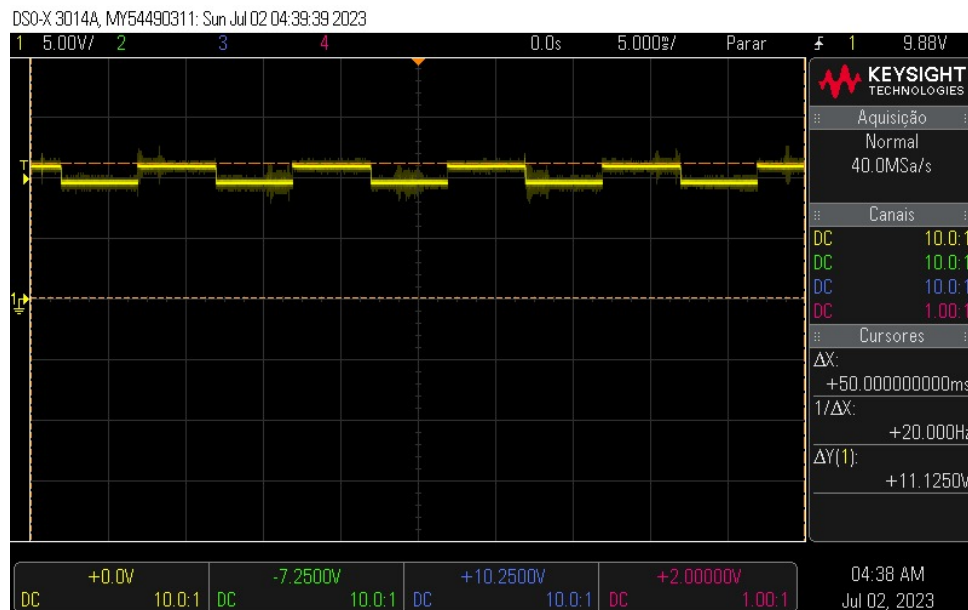
Fonte: Autor (2023)

Para fins de utilização, foi feita uma alteração provisória na placa original para que fosse possível a empregar esse sistema sem as trilhas remodeladas. Tal solução improvisada foi realizada utilizando as trilhas existentes na placa e fazendo as devidas substituições nos componentes conforme o diagrama da Figura 15. O circuito com as trilhas remodeladas também foi realizado e ainda precisa ser montado e testado em projetos futuros, contudo, sendo que sua construção se aproxima muito ao modelo improvisado, é possível afirmar que o funcionamento será similar.

5.2.2 Subsistema de Sinal da Bomba BLDC

O projeto inicial levou em consideração a utilização de bombas de combustível BLDC (Brushless Direct Current), tal escolha implicou na necessidade de um inversor

Figura 17 – Sinal do PWM no Osciloscópio



Fonte: Autor (2023)

fornecer um referencial *ground* e realizar o sinal enviando pulsos de 12V para o inversor. Contudo, o inversor utiliza um esquema de referência em que o estado alto do sinal PWM é referenciado a uma tensão própria do inversor e não ao *ground*. O *ground* é conectado à parte inferior do circuito, e a comutação efetiva do PWM ocorre pela chaveamento entre o nível alto do sinal e o *ground*.

O sinal alto referência é definido pela tensão interna do inversor, V_{in} , com uma amplitude de 12V. Já o *ground* é o comum dos sistemas (GND).

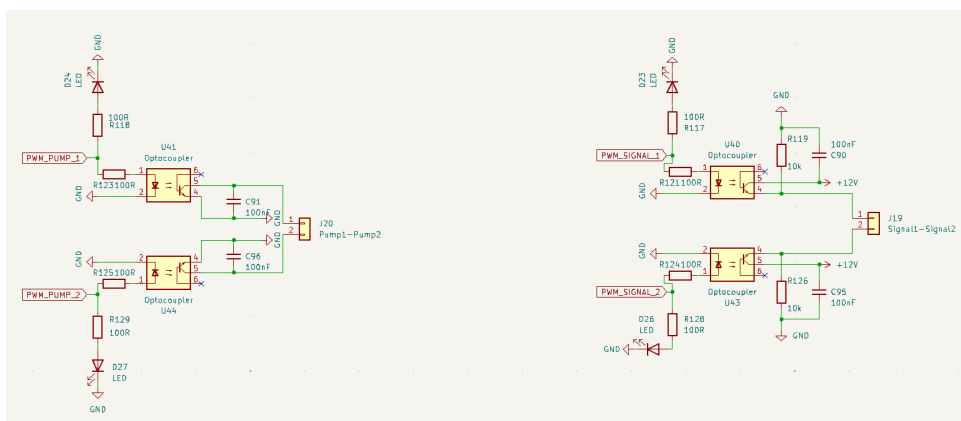
A Figura 18 representa, à esquerda, o modelo atualizado conforme os testes realizados para a validação do circuito, e à direita o modelo atual sem as alterações realizadas.

5.2.3 Comunicação com os Termopares

Inicialmente, a comunicação com os termopares não estava funcionando, isso se deve a dois fatos: o pino de barramento MISO e o pino de *clock* do SPI.

Um dos problemas identificados estava relacionado à configuração dos pinos de MISO (Master In Slave Out) e *Slave Select*. O projeto original da placa conectava o pino MISO pertencente a um módulo SPI, enquanto os outros pinos necessários para a comunicação SPI estavam conectados a um módulo diferente. Essa inconsistência impedia o funcionamento correto do SPI. Para corrigir essa configuração, foi realizada a soldagem de um novo pino MISO em uma posição diferente na parte inferior da placa. O novo pino foi selecionado entre os disponíveis no microcontrolador e redirecionado para a comunicação SPI. Entretanto, essa modificação resultou na

Figura 18 – Relação entre os circuitos de acionamento da bomba



Fonte: Autor (2023)

necessidade de alterar a conexão do pino *Slave Select* do termopar 01.

O *jumper* que foi conectado no microcontrolador serve para alterar a porta de utilização do *clock* do SPI, pois o pino que tinha sido escolhido necessitava de uma configuração especial do microcontrolador: precisava conectar outro pino para funcionar. A conexão com o pino *clock* disponível na parte superior do microcontrolador foi um método utilizado para solucionar o problema sem efetuar alterações no circuito. Essa mudança simplificou a configuração e garantiu a funcionalidade do *clock* SPI sem a necessidade de ajustes adicionais no software do microcontrolador.

Tais mudanças não apenas solucionaram os problemas técnicos, mas também facilitaram futuras manutenções e ajustes no sistema, proporcionando maior flexibilidade na configuração dos pinos do microcontrolador.

5.3 INTEGRAÇÃO COM O SOFTWARE

Para a integração com o software, o método de testes descrito na Seção 5.1 foi realizado através do IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) AURIX Infineon. Este software permitiu a programação e avaliação de resultados do microcontrolador responsável pelo controle dos diversos subsistemas da bancada de testes.

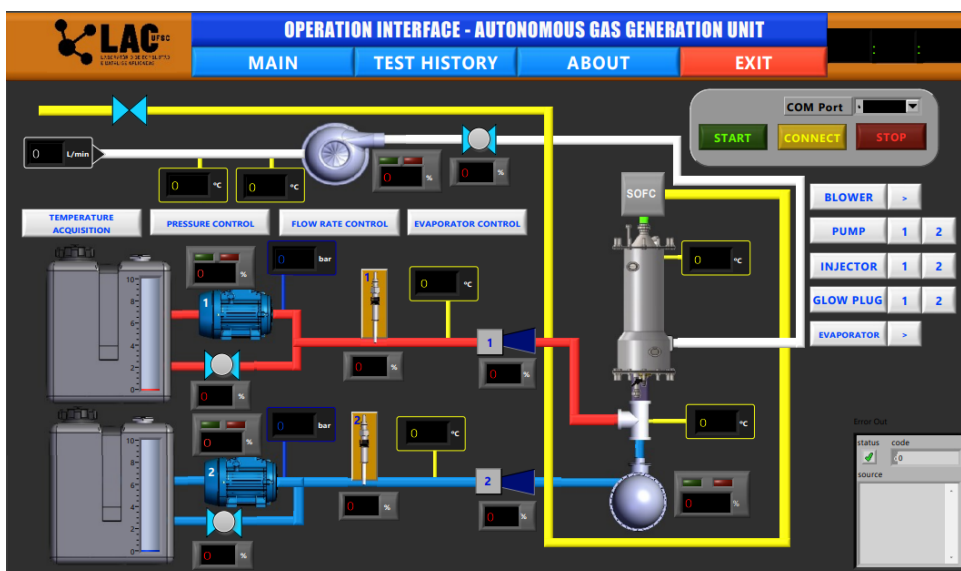
Durante a fase de testes, a estratégia inicial envolveu a configuração individual dos periféricos do microcontrolador, incluindo interfaces de comunicação SPI para a leitura de sensores e controladores PWM para os diversos atuadores. O levantamento de informações foi efetuado através da avaliação visual dos testes práticos e retorno de dados do terminal do IDE, tais métodos permitiram verificar a funcionalidade dos subsistemas e a precisão das leituras dos sensores.

Após a validação inicial e montagem preliminar da bancada de testes, foi-se integrado ao sistema a interface LabVIEW, utilizada principalmente para monitoramento e controle em tempo real. Segundo Travis e Kring (2007), o LabVIEW é uma ferra-

menta para o desenvolvimento de interfaces de usuário personalizadas devido à sua flexibilidade para atuar em diversos tipos de hardware de medição e controle. A integração foi realizada através de uma comunicação serial, permitindo a transmissão de dados de sensor e envio de comandos de controle ao microcontrolador.

Essa atribuição no projeto não se limitou ao monitoramento de variáveis críticas como temperatura, vazão e fluxo de reagentes, mas também permitiu o acionamento direto de qualquer atuador através da interface gráfica desenvolvida. Tal ferramenta proporcionou um controle centralizado e em tempo real de todos os componentes do sistema, facilitando a execução de testes e a realização de ajustes finos. A Figura 19 ilustra a interface desenvolvida.

Figura 19 – Interface Visual da Bancada

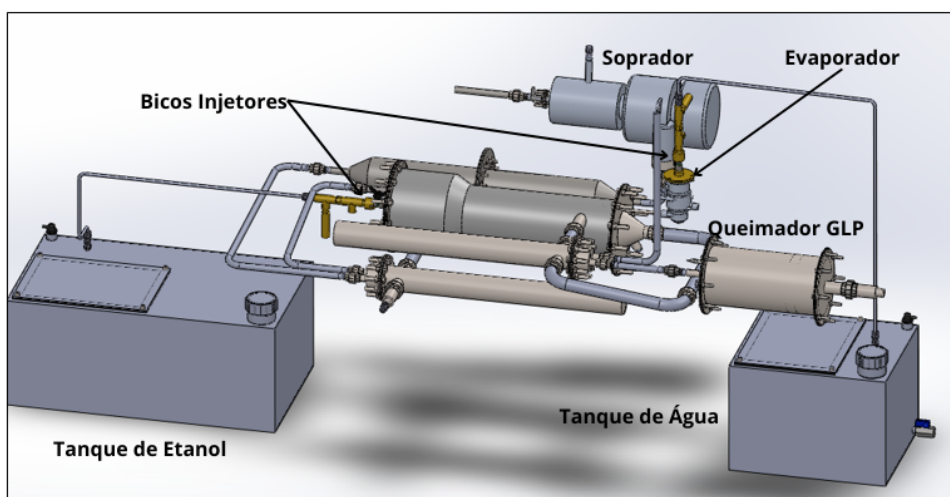


Fonte: LAC (2023)

6 AVALIAÇÃO DE DADOS

A finalização do projeto se encontra no acoplamento dos componentes mecânicos e eletrônicos em uma estrutura única. Sob essa perspectiva a equipe responsável pela mecânica do projeto realizou a modelagem 3D de uma possível disposição dos componentes em uma estrutura de bancada, a qual pode ser observada na Figura 20. Contudo algumas alterações na montagem foram necessárias para a finalização experimental da bancada.

Figura 20 – Projeto da Bancada Inicial



Fonte: LAC (Modificado) (2023)

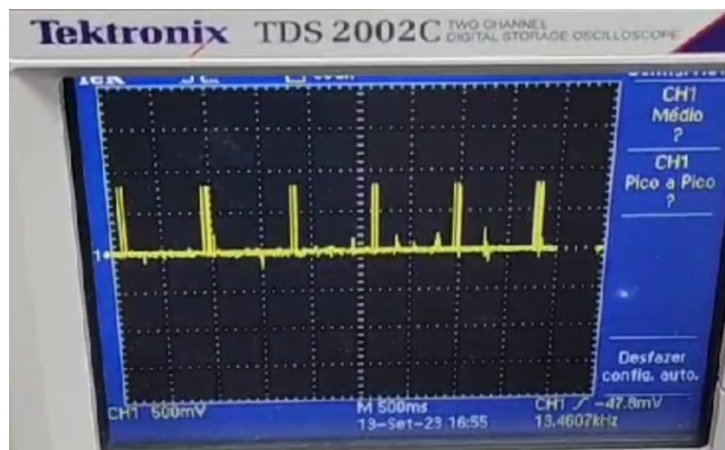
Algumas das modificações que interferiram diretamente no *hardware* da bancada, foram: a utilização de apenas um sistema de alimentação hidráulico de reagentes, a orientação de posição do evaporador e a instrumentação do queimador GLP em interface de software.

A utilização de apenas uma entrada de reagentes, como já foi descrita na Seção 5.1.2, foi realizada a partir de uma impossibilidade mecânica de conectar o bico injetor de etanol na carcaça do reformador. Tendo isso em mente, a utilização de uma bomba DC flex em substituição à bomba BLDC, foi uma decisão justificada pela necessidade de realizar testes extensivos dos outros componentes, o que causaria uma redução drástica da vida útil devido a desgastes relacionados a oxidação. Sendo assim, iniciou-se a conexão entre o vaporizador, o bico injetor e a ativação da bomba em conjunto, com o objetivo de validar a capacidade de evaporar a mistura antes de entrar no sistema interno do reformador.

A primeira etapa foi ativar a bomba com um sinal PWM definido de acordo com a calibração do regulador de pressão instalado no sistema hidráulico.

Um problema foi encontrado durante a ativação de todos os componentes e a análise foi realizada com a utilização de um osciloscópio digital conectado aos circuitos e realizando a ativação individual de cada componente. Nesse cenário, foi possível analisar os resultados obtidos no osciloscópio e associá-los a possíveis causas.

Figura 21 – Sinal de Acionamento do Vaporizador no Osciloscópio



Fonte: Autor (2023)

A Figura 21 simboliza o sinal que o microcontrolador envia ao circuito responsável por realizar o controle de potência enviada ao vaporizador, nela pode-se observar a presença de uma série de pulsos em uma frequência de 60Hz (frequência da rede). Essa frequência é utilizada como métrica para manter uma janela de leitura e controle entre 100 pulsos da rede. Os quais compõem a resolução do controle, variando de 0 a 100 pulsos.

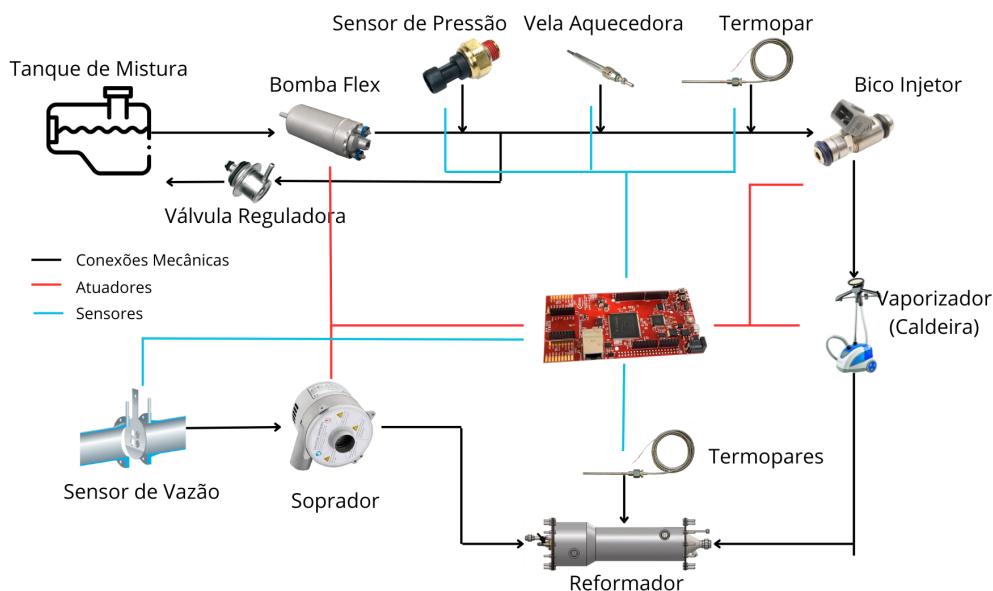
Devido a ruídos projetados na malha de terra através do acionamento da bomba DC, os comandos e sinais que operam no sistema foram alterados e provou-se necessário o uso de uma nova técnica de acionamento da bomba: através de um relé de estado sólido. A utilização desse componente foi justificada pelo curto tempo de projeto e simples implementação do ao circuito existente. Neste caso, o relé foi conectado à saída do circuito de potência, atuando como a carga a ser chaveada, apesar dessa aplicação, o circuito de sinal também poderia ser utilizado para efetuar o acionamento do relé.

Além disso, a fonte de alimentação também foi alterada, empregando uma segunda fonte DC de 12V para enviar a potência necessária para a ativação da bomba de combustível e quaisquer outros atuadores de potência. Essa solução foi utilizada pois o referencial *ground*, previamente compartilhado entre a placa, os atuadores e a própria fonte, estava com um alto ruído.

Por fim, a adequação da ECU na bancada foi realizada utilizando um *case* projetado pela equipe do laboratório e ajustado conforme necessidades mecânicas,

tais como: uma entrada para o cabo de conexão e um aumento no diâmetro do furo para os parafusos de fixação da placa.

Figura 22 – Diagrama Mecânico Final



Fonte: Autor (2024)

Dessa forma, o diagrama mecânico da bancada finalizada pode ser observada na Figura 22. Apesar de estar finalizada a parte de implementação de *hardware* para o funcionamento preliminar do reformador, ainda existem alguns ajustes a serem feitos para validar os requisitos propostos inicialmente.

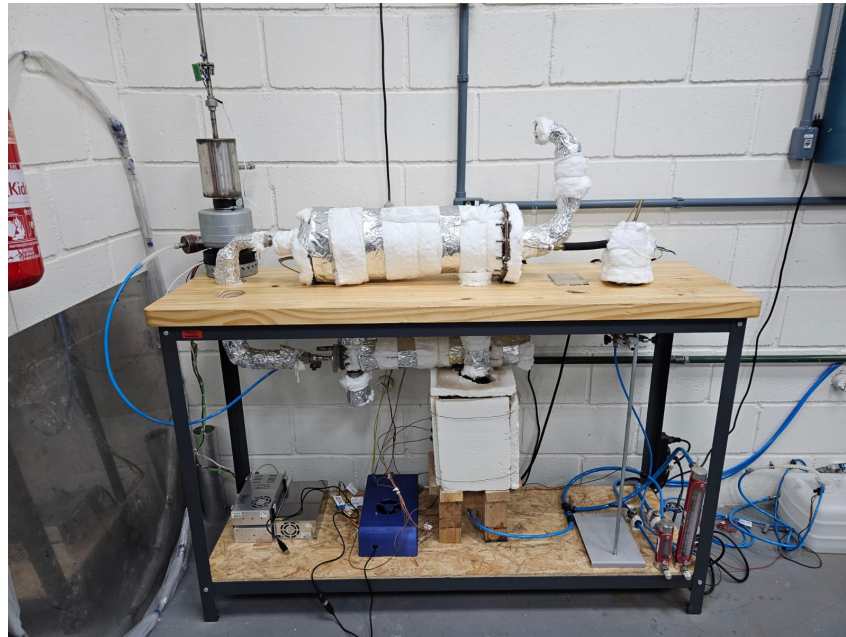
Durante o desenvolvimento e a implementação do sistema de controle para o reator de hidrogênio autônomo, dados foram coletados e analisados para validar o desempenho e a eficácia da instrumentação desenvolvida na bancada finalizada, assim como é possível observar na Figura 23. Alguns dos dados foram validados conforme descrito nos capítulos anteriores, enquanto outros não puderam ser avaliados devido a limitações de componentes e falhas mecânicas.

Os dados referentes à configuração e validação dos sensores de termopares, descritos na Seção 5.1.1, e a calibração dos bicos injetores apresentados na Seção 5.1.2.1, foram coletados e validados com sucesso. Esses dados foram essenciais para garantir a precisão e a confiabilidade do sistema de controle.

No entanto, a validação dos dados do sensor de pressão não pôde ser realizada, pois alguns componentes necessários para o seu uso, como o circuito integrado MAX660, não estavam disponíveis durante a fase de testes. Essa limitação impediu a avaliação completa do desempenho do sistema de pressão no reator e foi substituída por um medidor analógico.

Como pode ser observado na Figura 24, o desempenho do reator não pôde

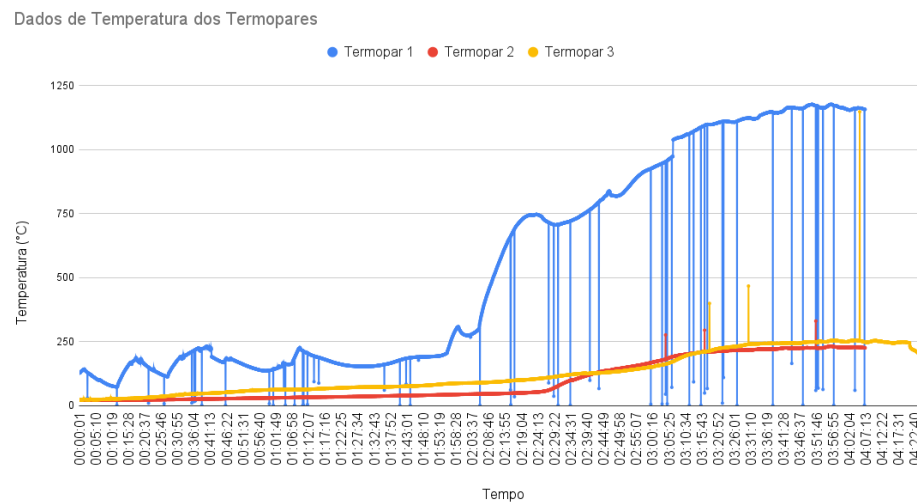
Figura 23 – Bancada Final



Fonte: Autor (2024)

ser avaliado completamente devido a uma falha mecânica que impediu o fornecimento do calor necessário para manter o reformador a 700 graus Celsius.

Figura 24 – Dados de Temperatura dos Termopares



Fonte: Autor (2024)

Nessa figura, as linhas vermelho (Termopar 2) e amarelo (Termopar 3) simbolizam os termopares localizados no interior do reformador, onde deveria atingir a marca de 700 graus Celsius, a linha azul (Termopar 1) é referente ao termopar localizado no interior do queimador GLP, os dados de temperatura deste termopar mostram claramente a dificuldade em alcançar e manter a temperatura desejada, indicando

que houve tentativas de aquecimento, com picos de temperatura significativos. No entanto, esses picos não foram sustentáveis, resultando em uma temperatura média insuficiente para suportar o processo de reforma.

O teste durou aproximadamente 4 horas e 22 minutos e a temperatura máxima alcançada no interior do reformador foi de aproximadamente 250 graus. Essa falha impossibilitou a ocorrência do processo de reforma de hidrogênio, limitando a avaliação do sistema como um todo.

7 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma instrumentação em uma bancada de testes para um reator de hidrogênio autônomo. Através das etapas detalhadas nos capítulos anteriores, foi possível alcançar uma conclusão sólida sobre a viabilidade e a eficácia do sistema proposto.

Durante o desenvolvimento, os recursos disponíveis se mostraram adequados para a finalização do projeto, permitindo que todas as operações autônomas fossem implementadas com sucesso. Estratégias de calibração foram definidas e descritas, como a configuração e validação dos sensores de termopares na Seção 5.1.1 e a calibração dos bicos injetores na Seção 5.1.2.1. Esses procedimentos garantiram a precisão necessária para o controle e monitoramento das variáveis do sistema.

A coleta de dados e a avaliação de ruído, descritas no Capítulo 6, permitiram identificar e mitigar possíveis interferências, assegurando a confiabilidade das leituras e do controle de sinais. Além disso, a integração dos diversos componentes eletrônicos e de controle foi validada através de testes.

A implementação do sistema de controle e monitoramento, utilizando ferramentas como o IDE AURIX Infineon e o LabVIEW, possibilitou um controle centralizado e eficiente do reator de hidrogênio, facilitando a execução de testes e ajustes finos. Este trabalho destaca a importância do uso dessas ferramentas para o desenvolvimento de interfaces de usuário personalizadas e controle em tempo real, conforme discutido na Seção 5.3.

Em resumo, o desenvolvimento da bancada de testes para o reator de hidrogênio autônomo atingiu quase todos os objetivos propostos. A metodologia adotada e as estratégias de calibração e validação implementadas garantiram a funcionalidade e a eficiência do sistema, proporcionando uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área de produção de hidrogênio a partir do etanol.

8 TRABALHOS FUTUROS

Embora o desenvolvimento da instrumentação e a implementação do sistema de controle tenham alcançado resultados significativos, ainda existem oportunidades para melhorias e avanços futuros que podem aprimorar a funcionalidade e a eficiência do sistema.

Uma das possíveis melhorias é a reavaliação e modificação do chicote elétrico da bancada. Ajustes no chicote podem reduzir a interferência eletromagnética e melhorar a qualidade do sinal, resultando em leituras mais precisas e controle mais estável dos atuadores e sensores, além de melhorar a organização dos cabos no ambiente de teste.

Além disso, é recomendável realizar adequações nos circuitos existentes da placa para compatibilidade com células a combustível de óxido sólido (SOFC). Essas alterações podem incluir a implementação de novos componentes eletrônicos e a otimização dos circuitos de potência para suportar as exigências específicas de um aquecedor elétrico para a entrada de ar e outros possíveis componentes que possam ser controlados eletronicamente.

Outra sugestão é a integração de um módulo de comunicação ESP-32. O ESP-32 oferece capacidades de comunicação sem fio, o que pode reestruturar a transmissão de dados e o controle remoto do sistema. A adição deste módulo pode proporcionar maior flexibilidade e permitir o monitoramento em tempo real através de uma rede sem fio, eliminando a fragilidade do conector do microcontrolador Aurix atualmente utilizado.

Essas sugestões de melhorias representam apenas algumas das várias possibilidades para aprimorar o sistema de produção de hidrogênio. A implementação dessas alterações não só aumentaria a robustez e a eficiência do sistema, mas também abriria novas oportunidades para pesquisa e desenvolvimento de tecnologias e métodos de controle utilizando a bancada desenvolvida.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, P.; ADJIMAN, C.; BRANDON, N. Anode-supported intermediate-temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell: II. model-based dynamic performance and control. **Journal of Power Sources**, v. 147, n. 1, p. 136–147, 2005.

BorgWarner Inc. **Troubleshooting Glow Plugs**. 2019. Disponível em: <https://www.borgwarner.com/aftermarket/diesel-cold-start-ignition/troubleshooting-glow-plugs>. Acesso em: 22 jun. 2024.

CORDING, S. **Why Do MOSFETs Need Drivers?** 2022. Disponível em: <https://www.elektormagazine.com/articles/why-do-mosfets-need-drivers#>. Acesso em: 16 nov. 2023.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of Power Electronics**. 2nd. ed. [S.l.]: Springer, 2001. ISBN 978-0792372707.

Fairchild Semiconductor Corporation. **MOC301XM, MOC302XM: 6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output (250/400 Volt Peak)**. 2009. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5029/MOTOROLA/MOC119.html>. Acesso em: 12 nov. 2023.

GENERATION. **The sustainability trends report: Transportation**. London, 2023. 92 p. Disponível em: https://str2023.generationim.com/media/Generation_Sustainability_Trends_Report_2023.pdf. Acesso em: 18 out. 2023.

HOLMES, K.; ZEITLER, E.; KERXHALLI-KLEINFELD, M.; DEBOER, R. Scaling deep decarbonization technologies. **Earth's Future**, Wiley Online Library, v. 9, n. 11, p. e2021EF002399, 2021.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **The Art of Electronics**. 3rd. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-0521809269.

HOU, T.; ZHANG, S.; CHEN, Y.; WANG, D.; CAI, W. Hydrogen production from ethanol reforming: Catalysts and reaction mechanism. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 132–148, 2015.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos avançados**, v. 24, p. 223–253, 2010.

LABORATÓRIO DE COMBUSTÃO E CATÁLISE APLICADAS. **EPU - Rota 2030: Compact reformer**. Joinville, 2023. Disponível em: <https://codigos.ufsc.br/lacpdi/epu-rota2030>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MAXIM Integrated Products, Inc. **MAX31855KASA+ Datasheet**. 2012. Disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/453316/MAXIM/MAX31855KASA+.html>. Acesso em: 28 out. 2023.

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

Omega Engineering, Inc. **The thermocouple: an introduction to temperature measurement**. 2018. Disponível em: https://minerva.union.edu/bumat/Teaching/BME386/Labs/Thermocouple_Omega2.pdf. Acesso em: 17 jun. 2024.

PASEL, J.; SAMSUN, R. C.; TSCHAUDER, A.; PETERS, R.; STOLTEN, D. Advances in autothermal reformer design. **Applied Energy**, v. 198, p. 88–98, 2017.

RASHID, M. H. **Power Electronics Handbook**. 3rd. ed. [S.l.]: Academic Press, 2013. ISBN 978-0123820367.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic circuits**. 4. ed. New York: Oxford University Press, 2004.

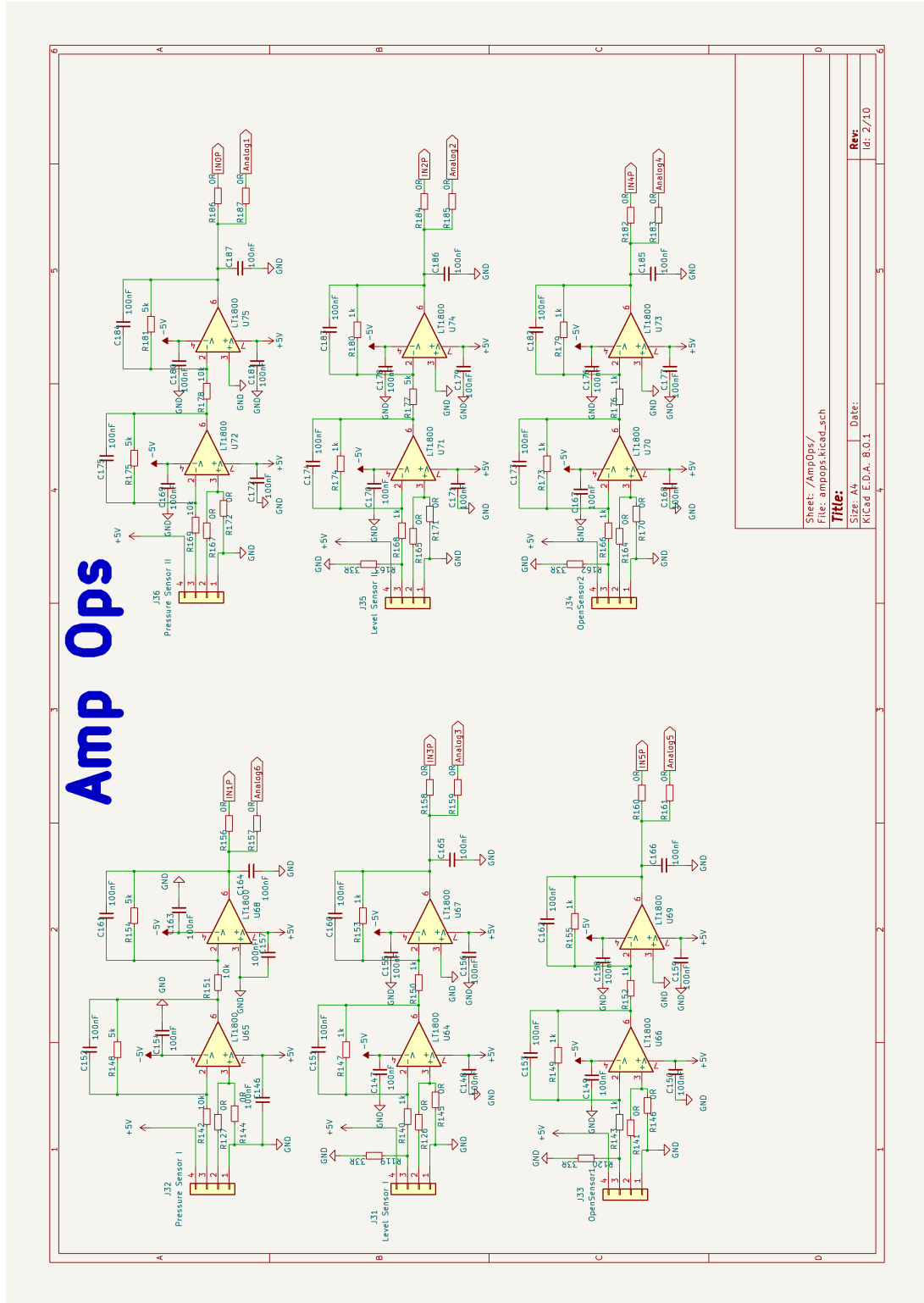
SLOVINSKI, V. **Análise de requisitos e projeto de uma ECU para automatizar um sistema SOFC à base de etanol**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

THANOMJIT, C.; PATCHARAVORACHOT, Y.; PONPESH, P.; ARPORNWICHANOP, A. Thermodynamic analysis of solid oxide fuel cell system using different ethanol reforming processes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 21, p. 6950–6958, 2015.

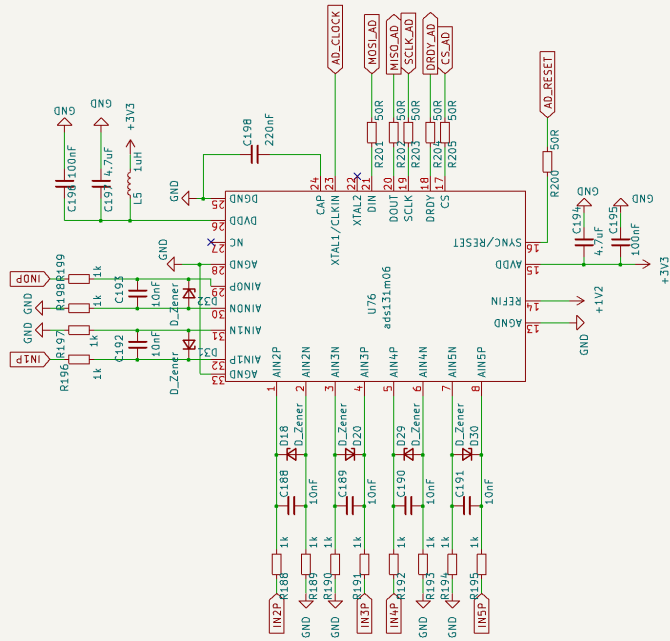
TRAVIS, J.; KRING, J. **LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun**. 3rd. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2007. ISBN 978-0131856721.

WAKERLY, J. F. **Digital Design: Principles and Practices**. 5th. ed. [S.l.]: Pearson, 2018. ISBN 978-0134460093.

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICOS

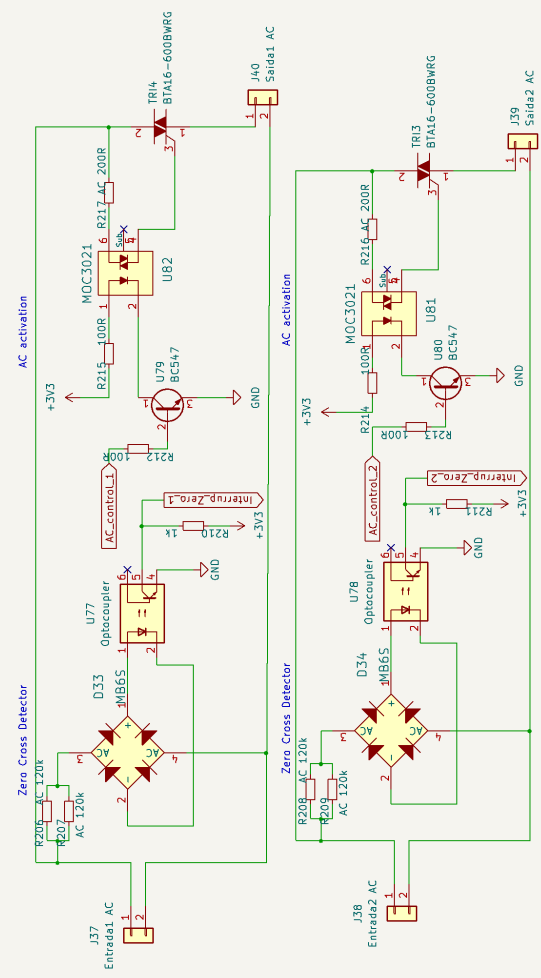


AD Externo



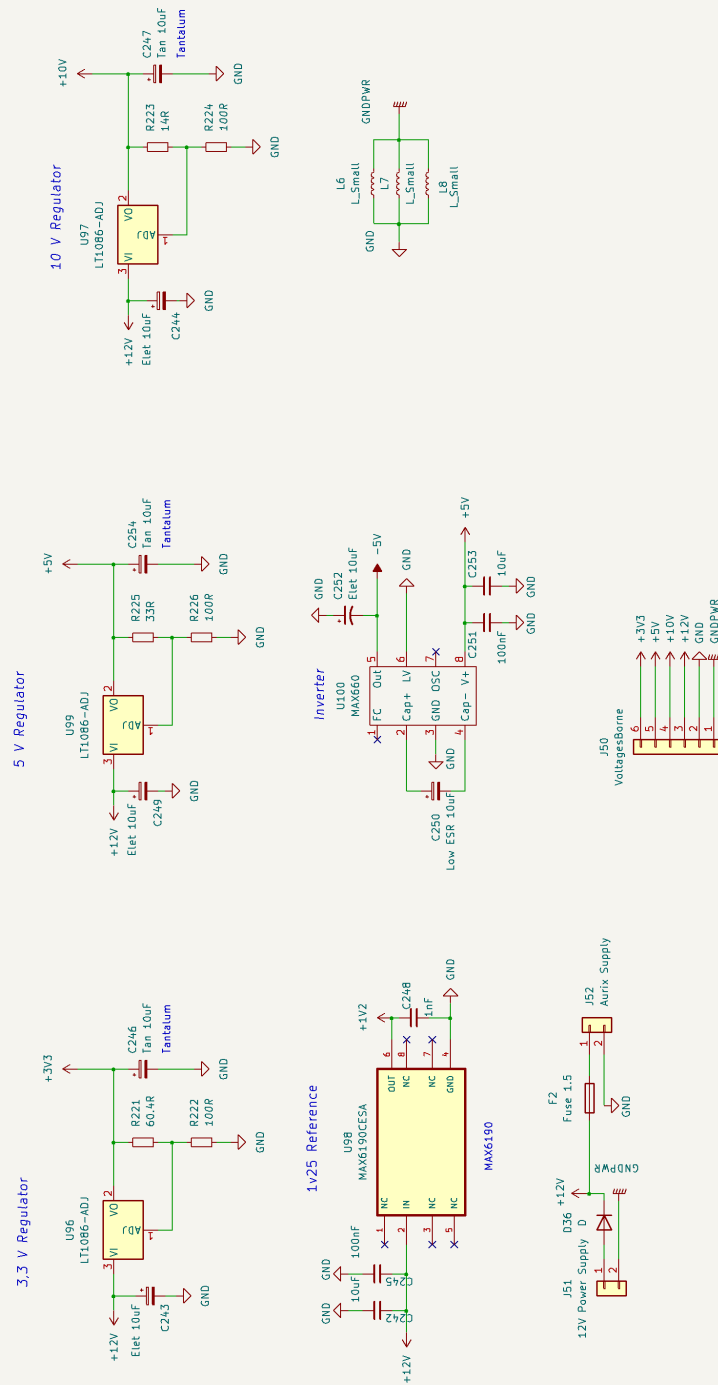
Sheet: /AD Externo/ File: ad_externo.kicad_sch	
Title:	
Size: A4	Date:
Kicad E.D.A. 8.0.1	
Rev: 3/10	

Control AC



Sheet: /Control AC/
File: controle_ac.kicad.sch
Title:
Size: A4 Date:
Kicad E.D.A. 8.0.1
Rev:
Id: 4/10

Reguladores de Tensão



Sheet: /Reguladores de Tensão/
File: reguladores_de_tensao.kicad_sch

Title:

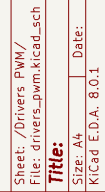
Size: A4

Size: A4 Date:

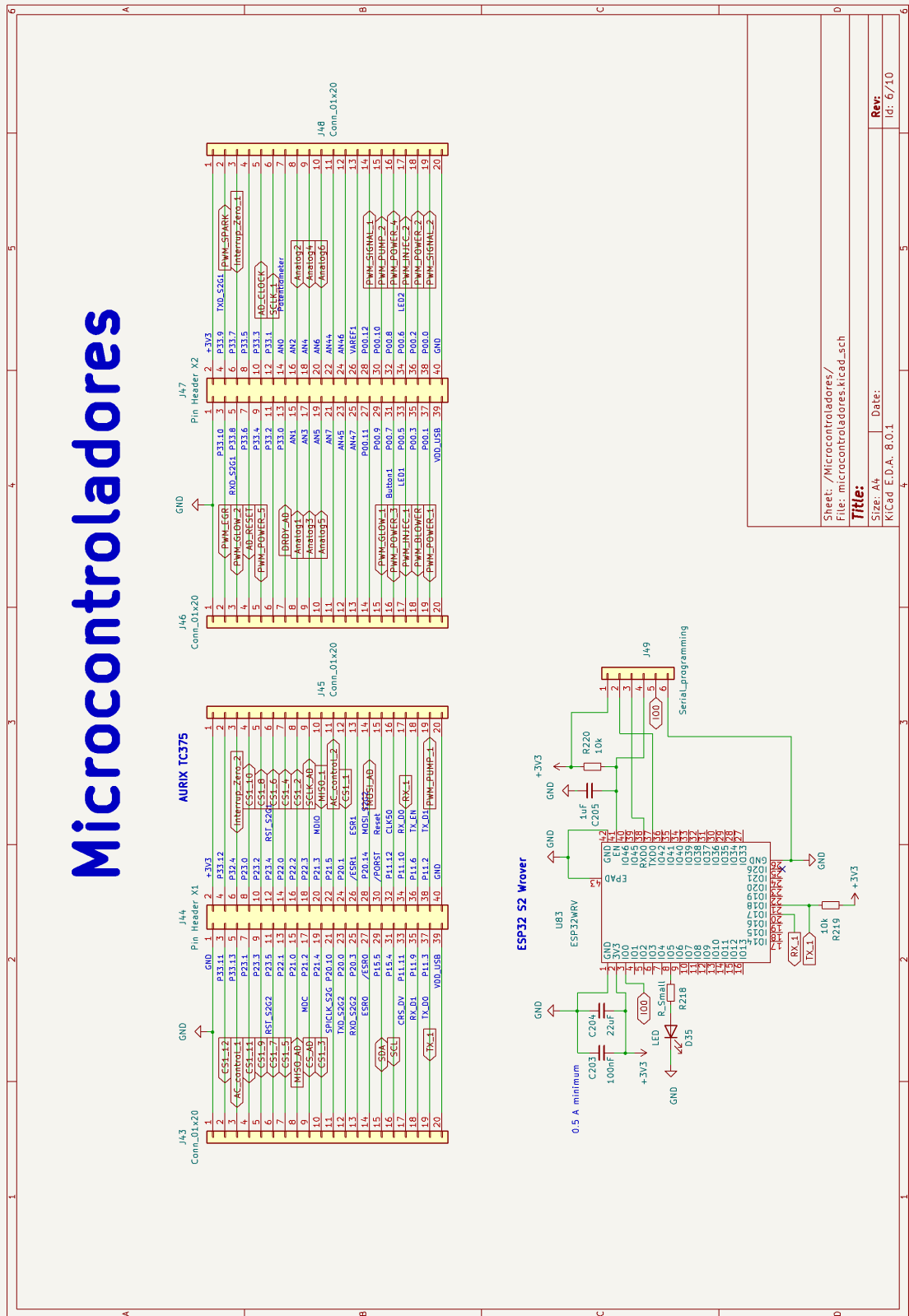
SIZE: A4	
KiCad E.D.A. 8.0.1	

Rev: 01/8/10

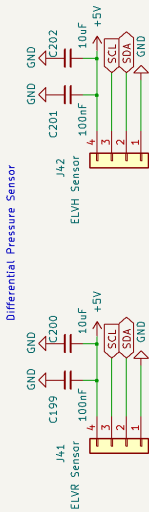
Drivers PWM DC Signal



Microcontroladores



Sensores



Sheet: /Sensores/ File: sensores.kicad_sch		0
Title:		
Size: A4	Date:	
KiCad E.D.A. 8.0.1	Rev:	Id: 5/10