

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

VINÍCIUS SLOVINSKI

ANÁLISE DE REQUISITOS E PROJETO DE UMA ECU PARA AUTOMATIZAR UM
SISTEMA SOFC A BASE DE ETANOL

Joinville
2023

VINÍCIUS SLOVINSKI

ANÁLISE DE REQUISITOS E PROJETO DE UMA ECU PARA AUTOMATIZAR UM
SISTEMA SOFC A BASE DE ETANOL

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

Orientador: Dr. Anderson
Wedderhoff Spengler

Joinville
2023

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Expresso primeiramente gratidão à minha família por todo o apoio durante a minha graduação, sua exigência e incentivos para que eu sempre buscasse a excelência foram muito importantes no meu desempenho acadêmico. Agradeço também à Paola, por estar do meu lado em todos os momentos, oferecendo suporte e me mantendo motivado.

Agradeço carinhosamente aos professores Anderson Wedderhoff Spengler, Giovani Gracioli, Rafael de Camargo Catapan e à Camilla Daniela Moura Nickel pela oportunidade de participar desse projeto e ser integrante do Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas. Foi um período de muitos aprendizados onde pude me desenvolver em todos os aspectos e tenho certeza que isso será sempre relevante na minha carreira. Sua orientação, suporte e cobrança foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal, por isso sou extremamente grato. Também agradeço aos membros dos laboratórios, especialmente aos colegas Eduardo Forster Beathalter, João Pedro Guckert, Victor Noster e Thiago Martins por todo o suporte que me deram nesse período.

Agradeço à BMW Brasil por fornecer os materiais da linha de combustível durante o desenvolvimento do projeto e pela presença em nossas reuniões e workshops para acompanhamento e esclarecimento de dúvidas.

Por fim, agradeço à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa – Fundep, Rota 2030 - Linha V pelo financiamento da pesquisa.

RESUMO

A demanda crescente por descarbonização no setor de transporte requer inovação nos powertrains atuais, incluindo novas estratégias de propulsão. Nesse cenário o bioetanol, um combustível alternativo com ciclo de carbono aproximadamente neutro, tem sido amplamente utilizado. No entanto, sua utilização em motores de combustão interna ainda resulta em redução da eficiência térmica dos veículos. Por outro lado, a integração de Células a Combustível de Óxido Sólido (SOFC) com um reformador de etanol se apresenta como uma abordagem promissora para powertrains inovadores e eficientes. A fim de alcançar a máxima conversão e seletividade do etanol para o hidrogênio, é essencial o desenvolvimento de um sistema autônomo capaz de realizar todo o processo, exigindo a integração de hardware e software para sensorar, atuar e controlar o sistema. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma unidade de controle eletrônico (ECU) para um sistema SOFC com reformador de etanol, abrangendo a avaliação de requisitos funcionais e não funcionais, a especificação de sensores e atuadores, a conceptualização dos circuitos e criação dos esquemáticos, o design e montagem da placa de circuito impressa (PCB), e, por fim, testes abrangentes na placa para comprovar seu funcionamento.

Palavras-chave: ECU. Automação. PCB. Sistemas Embarcados. SOFC.

ABSTRACT

The growing demand for decarbonization in the transportation sector calls for innovation in current powertrains, including new propulsion strategies. In this scenario the bioethanol, an alternative fuel with approximately neutral carbon cycle, has been widely known and utilized. However, its use in internal combustion engines still decreases vehicle thermal efficiency. On the other hand, the integration of Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) with an ethanol reformer is a promising approach for new and efficient powertrains. To achieve maximum ethanol conversion and selectivity to hydrogen, the development of an autonomous system that performs the entire process is crucial, requiring the integration of hardware and software for sensing, actuating, and control. This work presents the development of an Electronic Control Unit (ECU) for a SOFC with an ethanol reformer system, including the evaluation of functional and non-functional requirements, specification of sensors and actuators, creation of circuits and schematics, printed circuit board (PCB) design and assembly, and finally, extensive tests on the board to prove its operation.

Keywords: ECU. Automation. PCB. Embedded system. SOFC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama Mecânico Completo.	15
Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema em malha aberta.	20
Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.	21
Figura 4 – Circuito amplificador operacional com realimentação negativa.	23
Figura 5 – Esquemático interno de um optoacoplador.	24
Figura 6 – Comparação entre transistores TBJ e MOSFET.	25
Figura 7 – Ilustração placa desenvolvimento Aurix375.	30
Figura 8 – Sensor Pressão Combustível.	32
Figura 9 – Sensor de Nível de Combustível.	33
Figura 10 – Termopar tipo K.	34
Figura 11 – Sensor de pressão diferencial (aferição entre linhas de entrada).	35
Figura 12 – Sensor de pressão diferencial (aferição da vazão mássica).	35
Figura 13 – Dimensionamento das fontes.	38
Figura 14 – Diagrama simplificado.	39
Figura 15 – Passos desenvolvimento do hardware.	40
Figura 16 – Diagrama de blocos interno do MAX31855.	42
Figura 17 – Esquemático do condicionamento de sinal dos termopares.	42
Figura 18 – Planejamento do circuito divisor de tensão.	44
Figura 19 – Esquemático do circuito de ajuste de ganho e filtro.	44
Figura 20 – Esquemático do conversor Analógico/Digital.	46
Figura 21 – Esquemático do circuito de controle por sinal.	47
Figura 22 – Esquemático do circuito de controle por potência.	47
Figura 23 – Esquemático do circuito de controle AC.	48
Figura 24 – Esquemático dos reguladores de tensão.	50
Figura 25 – Esquemático do circuito inversor de tensão.	51
Figura 26 – Esquemático do circuito de referência de 1.2 V.	51
Figura 27 – Esquemático do ESP32.	53
Figura 28 – Esquemático do circuito de proteção.	53
Figura 29 – Desenho inicial da disposição de circuitos na placa.	55
Figura 30 – Layout ECU com zonas de ground invisíveis.	56
Figura 31 – ECU vista frontal.	57
Figura 32 – ECU vista traseira.	58
Figura 33 – Sinal antes do amplificador operacional.	61
Figura 34 – Sinal após o primeiro amplificador operacional.	61
Figura 35 – Sinal condicionado no circuito do sensor de pressão.	62

Figura 36 – Sinal condicionado do sensor de nível.	62
Figura 37 – Sinais da comunicação SPI entre microcontrolador e MAX31855. . .	63
Figura 38 – Sinais da comunicação I2C entre microcontrolador e sensores de pressão diferencial.	64
Figura 39 – Sinal de controle dos atuadores DC.	65
Figura 40 – Sinal de controle do bico injetor.	66
Figura 41 – Sinal de controle e resposta do soprador.	66
Figura 42 – Sinal de controle e resposta do soprador.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do reformador utilizando temperatura base de 600 °C . . .	19
Tabela 2 – Especificações elétricas do Aurix TC375	31
Tabela 3 – Especificações elétricas do ESP32-S2-WROVER	31
Tabela 4 – Especificações elétricas do sensor de pressão eletrônico	32
Tabela 5 – Especificações elétricas dos atuadores da linha de combustível . . .	36
Tabela 6 – Especificações do soprador	37
Tabela 7 – Consumo de corrente por nível de tensão elétrica	49

LISTA DE SIGLAS

AC	Alternating current
ADC	Analog-to-digital converter
CAN	Controller Area Network
CI	Circuito Integrado
CS	Chip Select
CTJ	Centro Tecnológico de Joinville
DC	Direct Current
ECU	Electronic Control Unit
EN	Enable
ESR	Equivalent Series Resistance
H ₂	Hidrogênio
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IOT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
LED	light-emitting diode
MAF	Mass Air Flow
MAP	manifold Absolute Pressure
MCU	Microcontroller Unit
MISO	Master In Slave Out
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MOSI	Master Out Slave In
PCB	Printed Circuit Board
PEM	Proton-exchange membrane

PID Proporcional Integral Derivativo

PSRAM Pseudo Static RAM

PWM Pulse-width Modulation

RF Requisito Funcional

RNF Requisito Não Funcional

SCLK Serial Clock

SMD Surface Mount Device

SOFC Solid Oxide Fuel Cell

SPI Serial Peripheral Interface

SPICE Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

TBJ Transistor Bipolar de Junção

UART Universal asynchronous receiver-transmitter

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
2	TRABALHOS RELACIONADOS	15
2.1	Soluções comerciais relacionadas	17
3	CONCEITOS RELACIONADOS AO TRABALHO	18
3.1	Solid Oxide Fuel Cell	18
3.2	Reformador de etanol	18
3.3	Sistemas de Controle	20
3.4	Electronic Control Unit (ECU)	22
3.5	Eletrônica	22
3.6	Especificação de sensores	24
3.7	Protocolos de comunicação	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Requisitos	27
4.1.1	Requisitos funcionais da ECU	27
4.1.2	Requisitos funcionais de sensores	27
4.1.3	Requisitos funcionais de atuadores	27
4.1.4	Requisitos funcionais eletrônica	27
4.1.5	Requisitos não funcionais da ECU	28
4.1.6	Requisitos não funcionais de Sensores	28
4.1.7	Requisitos não funcionais de atuadores	28
4.1.8	Requisitos não funcionais de alimentação	29
4.1.9	Requisitos não funcionais de eletrônica	29
4.1.10	Features	29
4.2	Aurix TC375	29
4.3	ESP32-S2-WROVER	31
4.4	Sensor de pressão do combustível	31
4.5	Sensor de nível do combustível	32
4.6	Sensores de temperatura	33
4.7	Sensor de pressão diferencial	34
4.8	Sensor de massa de ar	34
4.9	Atuadores da linha de combustível	35

4.10	Atuadores da linha de ar	36
4.11	Fontes	37
5	DESENVOLVIMENTO	39
5.1	Diagrama adaptado	39
5.2	Projeto Eletrônico	40
5.2.1	Esquemático termopares tipo K	41
5.2.2	Esquemático do condicionamento de sensores analógicos . . .	43
5.2.3	Esquemáticos dos circuitos de controle DC	45
5.2.4	Esquemático do circuito de controle AC	48
5.2.5	Esquemático dos reguladores, inversores e referência de tensão	49
5.2.6	Esquemático Aurix	51
5.2.7	Esquemático ESP32	52
5.2.8	Esquemático de proteção da placa	52
5.3	Desenvolvimento da placa	53
5.3.1	Layout da PCB	54
5.3.2	Montagem e solda dos componentes	56
6	RESULTADOS	59
6.1	Testes de continuidade	59
6.2	Verificação de tensão	59
6.3	Testes funcionais	60
6.3.1	Condicionamento de sinais analógicos	60
6.3.2	Circuito de condicionamento dos termopares	63
6.3.3	Leitura de sensores de pressão diferencial	64
6.3.4	Circuitos de controle de atuadores DC	64
6.3.5	Circuitos de controle de atuadores AC	67
6.4	Revisão do cumprimento dos requisitos	67
6.4.1	Requisitos não funcionais de Sensores	68
6.4.2	Requisitos não funcionais de atuadores	68
6.4.3	Requisitos não funcionais de alimentação	68
6.4.4	Requisitos não funcionais de eletrônica	68
7	CONCLUSÕES	69
7.1	Trabalhos futuros	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A	77

1 INTRODUÇÃO

As preocupações com as emissões de gases do efeito estufa têm se intensificado nos dias modernos. Estudos recentes que registram a diminuição das descobertas de fontes de petróleo, juntamente com a crescente demanda global de energia, ressaltam a necessidade urgente de tecnologias de baixo carbono (HIRSCH; BEZDEK; WENDLING, 2007). Nesse contexto, o Hidrogênio (H₂) apresenta-se como uma alternativa promissora para o futuro do transporte mecanizado (BALAT, 2008).

Na indústria automotiva contemporânea, existem exemplos de veículos que utilizam hidrogênio como combustível, representando uma inovação importante, visto que o mundo ainda é dominado por motores de combustão interna (TOYOTA, 2023; NISSAN MOTOR CO, 2016). No entanto, problemas como o armazenamento de hidrogênio e a falta de estações de combustível apropriadas ainda restringem o seu potencial. Apesar desses problemas, tal avanço abriu portas para a busca por soluções alternativas (GOEBEL et al., 2005).

Uma das abordagens promissoras é a produção in situ de hidrogênio por meio de um reformador de combustível. Essa aplicação elimina a dependência de infraestruturas de reabastecimento especializadas, que geralmente estão associadas ao uso do hidrogênio (MARTIN; WORNER, 2011).

Nesse contexto, a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), juntamente a *Bayerische Motoren Werke* (BMW, 2023) e a *Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List* (AVL LIST GMBH, 2023), iniciaram, em 2021, um projeto de investigação no âmbito do programa Rota 2030, para produzir o equivalente a 5 kW de energia elétrica em hidrogênio (SLOVINSKI et al., 2022). Esse objetivo será alcançado utilizando um reator que emprega uma reação catalítica e auto térmica para converter água, etanol, e ar em hidrogênio (HOU et al., 2015).

O processo descrito requer um ambiente estritamente controlado para assegurar a estabilidade e a máxima eficiência, isso corresponde à vazão, temperatura e controle da pressão dos reatores. Além disso, o sistema deve ser capaz de lidar com uma vasta gama de variáveis e parâmetros físicos, permitindo flexibilidade para os testes que serão conduzidos no Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas (LABORATORIO DE COMBUSTAO E CATALISE APLICADAS, 2023), do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ), da UFSC (SLOVINSKI et al., 2022).

Com o intuito de atingir os objetivos de automatização e eficiência do sistema em questão, propõe-se o desenvolvimento de um *hardware* de controle, embasado nos requisitos levantados. Serão apresentados os sensores, atuadores e microcontroladores especificados, empregados na concepção dos circuitos e no projeto da *Printed Circuit*

Board (PCB). Posteriormente, testes extensivos serão realizados na placa para comprovar o seu funcionamento, enquanto os requisitos são avaliados para validar o seu cumprimento.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar os requisitos de projeto e desenvolver o *hardware* que permitirá automatizar o processo de reforma de etanol que alimenta uma Célula a Combustível de Óxido Sólido (SOFC - *Solid Oxide Fuel Cell*).

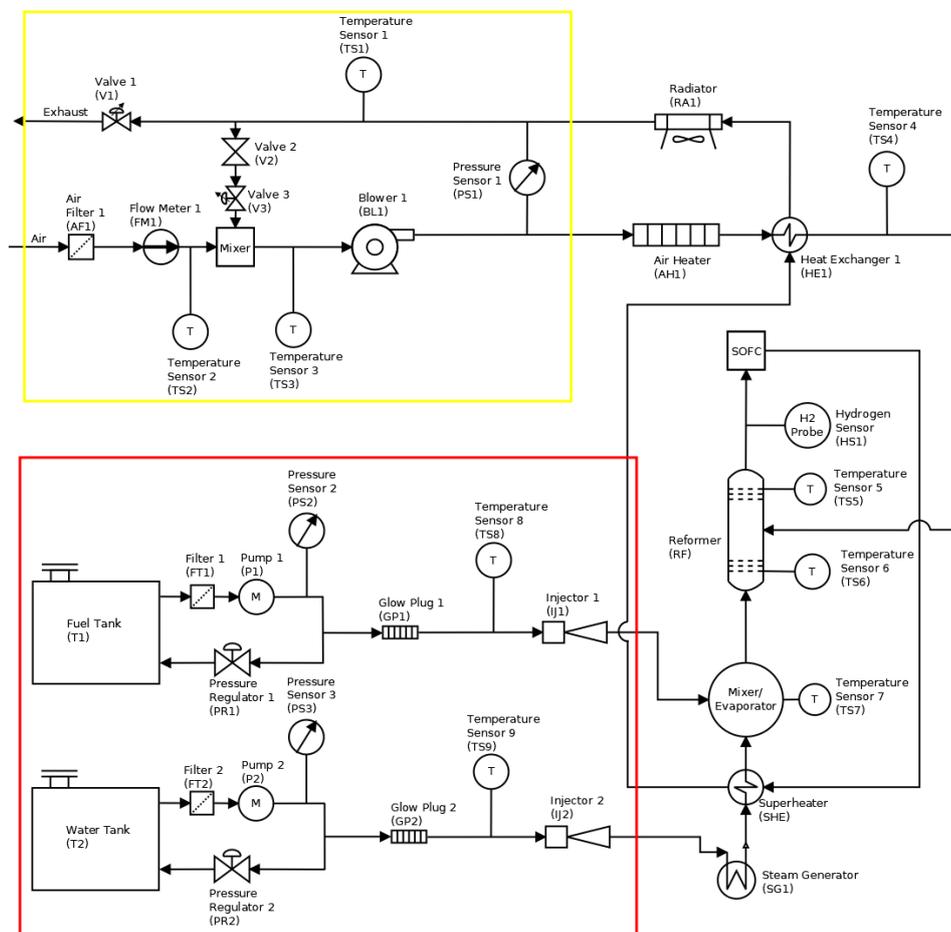
1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os requisitos funcionais e não funcionais do projeto e definir o passo a passo para automatizar o sistema;
- Desenvolver o *hardware* do sistema, incluindo projetar uma *Electronic Control Unit* (ECU) e especificar sensores e atuadores;
- Avaliar a funcionalidade do sistema por meio de testes e validar o cumprimento dos requisitos.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Uma vez que os requisitos de projeto são específicos para essa aplicação, a disponibilidade de estudos prévios com relevância é um fator limitante no desenvolvimento. Dessa maneira, os principais guias serão o Digrama Mecânico Completo da Figura 1, os requisitos funcionais e não funcionais, e as metodologias indicadas para o desenvolvimento de um projeto de engenharia (MAGUIRE, 1998).

Figura 1 – Diagrama Mecânico Completo.



Fonte: Adaptado de Laboratório de Combustão e Catalise Aplicadas (2023).

O diagrama é uma peça fundamental para esse trabalho, pois apresenta todos os sensores e atuadores que deverão ser empregados, além de fornecer informações sobre as malhas de controle. A região destacada em vermelho se refere à linha de combustível e em amarelo está a linha de ar, ambas são de maior importância com relação ao restante do sistema, pois são os subsistemas que serão automatizados e sensoreados pela ECU desenvolvida.

O trabalho de Waller (2016) contém uma proposta de sistema integrado de reformador e célula a combustível para aplicação portátil, onde são relatados os desafios de controle, como a relação de ar e combustível e também a temperatura. Faz-se também a descrição do procedimento de *startup* e *shutdown* do sistema e propõe-se uma ECU, com o microcontrolador Arduino Uno (ARDUINO, 2023), termopares tipo K e conversores *Direct Current to Direct Current* (DC-DC) para controle dos atuadores. Darjat et al. (2020), em sua avaliação da temperatura de reação e tensão de saída da SOFC, também emprega termopares tipo K e um microcontrolador Arduino (ARDUINO, 2023).

Kohonen (2011) propõe um controle baseado em microcontrolador sobre um sistema similar. Para isso, utiliza o microcontrolador modelo sbRIO-9631, que pode ser programado por meio do *software* LabVIEW, ambos da National Instruments Corp (2023), proporcionando benefícios como a fácil implementação de um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). Do mesmo modo, a implementação de malhas de controle de vazão, é realizada por meio de bombas controladas por potenciômetro em conjunto com um sensor de vazão.

O sistema desenvolvido demonstrou alto consumo de energia e tamanho exagerado para um sistema embarcado, além de possuir capacidade de processamento e quantidade de pinos de entrada e saída muito maiores do que o necessário. Reforçando a importância do dimensionamento da quantidade de pinos, consumo energético e da especificação dos componentes atendendo esses valores. Esses pontos foram anotados e serão levados em consideração no projeto de ECU do sistema proposto (KOHONEN, 2011).

Nos trabalhos de Li et al. (2015) e Gao et al. (2015) também houve interesse em acompanhar a temperatura, o que deu-se por meio de termopares do tipo K. Os autores obtiveram gráficos de produtos em função da temperatura, o que permitiu o acompanhamento das variáveis do sistema e da conversão do etanol em subprodutos. Tal abordagem permite a compreensão do funcionamento sistema e a avaliação da eficiência do sistema em produzir hidrogênio, o que reforça a necessidade de pontos de aferição e adequação dos sensores.

Carneiro (2011), em proposta similar, utiliza sensores de temperatura, sensor *Manifold Absolute Pressure* (MAP) e sonda lambda no subsistema equivalente. Como atuadores, foram utilizados vela de ignição e bico injetor. O autor reforça que um sistema de injeção convencional é composto por sensores, atuadores e uma ECU sendo esta responsável por ler os sensores, calcular o de tempo de injeção e comandar os atuadores.

Carneiro (2011), em seu processo de abertura do bico injetor, estabelece uma conexão entre um terminal do injetor e o positivo da bateria, enquanto a ECU (Unidade de Controle Eletrônico) cria um caminho de terra através do outro terminal, permitindo a

passagem de corrente. O autor menciona que é possível realizar essa implementação utilizando *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET).

Aras (2005) demonstra em seu trabalho o passo a passo para o desenvolvimento de uma ECU para aplicação automotiva, incluindo especificação de componentes e projeto da PCB. O autor faz o levantamento de requisitos, identificando as variáveis que necessitam de controle e então apresenta o esboço de ideias das quais os circuitos se originarão. Apesar das diferenças no sistema, a metodologia empregada é a mesma e o trabalho de Aras (2005) pode também ser usado como referência.

2.1 SOLUÇÕES COMERCIAIS RELACIONADAS

As ECUs são específicas para cada aplicação e, portanto, devem ser desenvolvidas levando em consideração os requisitos específicos de cada caso. Isso envolve a especificação e aquisição de elementos como sensores, atuadores, componentes e microcontroladores (CARVALHO, 2005; ALAM, 2018). Além disso, alguns exemplos comerciais podem servir como base para essa etapa de seleção.

O modelo Toyota (2023) Mirai tem liderado a indústria automotiva no segmento de veículos movidos a hidrogênio, logo atrás está a Hyundai Motor Company (2018) com o Nexu (VOELCKER, 2022). O Mirai é um carro movido a células de combustível do tipo proton-exchange membrane (PEM), que operam em temperaturas mais baixas. O veículo dispõe de tanques de hidrogênio que permitem que as células a combustível realizem a reação para geração de energia elétrica e água. Várias ECUs realizam o monitoramento e controle preciso da reação, garantindo segurança e eficiência (TOYOTA, 2023; DENSO CORPORATION, 2021).

Em 2016, a Nissan Motor Co (2016), apresentou o veículo E-BIO. Diferente dos modelos anteriores, esse conta com reação interna para produção do hidrogênio a partir do etanol, o que traz benefícios como a não dependência de infraestrutura nova para abastecimento de hidrogênio e ciclo de carbono neutro. Entretanto, o protótipo faz uso de uma SOFC, que trabalha à temperatura mais altas. Por conta disso, o tempo de aquecimento e a potência gerada apresentam desafios tecnológicos ainda não resolvidos (MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2012).

3 CONCEITOS RELACIONADOS AO TRABALHO

A automatização de um processo de reforma do etanol requer conhecimentos de mecânica, combustão, elétrica e computação. Esses estudos são indispensáveis para reproduzir as variáveis que levam à máxima eficiência energética na reação. Dessa maneira, a familiarização com SOFC, reformador de etanol e seus parâmetros são importantes para o projeto de *hardware* e serão analisados nessa seção.

3.1 SOLID OXIDE FUEL CELL

Células a combustível são sistemas termodinâmicos que geram eletricidade e calor durante reações eletroquímicas de combustíveis (FIUZA et al., 2012). A alta eficiência teórica e a formação de subprodutos limpos tornam a utilização de hidrogênio verde, obtido por meio de processos como a reforma do etanol, uma solução atraente para a descarbonização (RABENSTEIN; HACKER, 2008). Sua equação estequiométrica pode ser visualizada na Equação 1 retirada de Mekhilef, Saidur e Safari (2012), onde os produtos são água e energia.



No ramo automotivo, a queima de combustíveis fósseis predomina como fonte de energia, devido à sua densidade energética, facilidade de estoque e transporte (YU et al., 2020). A utilização de células combustível em veículos tem a finalidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e conseqüentemente as emissões de carbono (FAN; TU; CHAN, 2021).

A SOFC é um tipo de célula combustível que vem ganhando espaço devido a eficiência combinada de calor e potência de até 90%, alta capacidade de produção energética, confiabilidade, flexibilidade de combustíveis e baixa emissão de gases poluentes. Entretanto a desvantagem reside na alta temperatura de operação, situada entre 600 °C e 1000 °C, o que implica em longos períodos de inicialização, além de gerar incompatibilidades químicas e mecânicas (MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2012).

3.2 REFORMADOR DE ETANOL

Ao compreender a operação de um reformador é possível identificar as variáveis de entrada e saída do sistema, pois esse é o dispositivo fundamental que realiza a transformação química dos reagentes. Um reformador de etanol é uma unidade onde

uma mistura de etanol, água e ar reage a dada temperatura e pressão, e tem como um dos produtos de sua reação o hidrogênio (HARYANTO et al., 2005).

A produção de H₂ é influenciada por diversos fatores, tais como temperatura, tipo de catalisador e proporções dos reagentes. Com a finalidade de obter maior eficiência na conversão de H₂ e menor quantidade de carbono sólido, alguns parâmetros dessa reação, temperatura e vazões de reagentes, devem ser controlados (LABORATORIO DE COMBUSTAO E CATALISE APLICADAS, 2023). Portanto, o controle das variáveis que atuam sobre o reformador, permite o domínio sobre o processo e os produtos.

Vários estudos e avaliações quanto à temperatura ideal no momento da reação já foram realizados. Nas pesquisas de Rabenstein e Hacker (2008) as temperaturas ótimas encontradas ficaram próximas aos 727 °C ou 1000 K. Nessa faixa de temperatura são obtidas as maiores taxas de eficiência de conversão. Em temperaturas fora dessa faixa agregam-se elementos não desejados como o carbono e baixa seletividade de hidrogênio (RABENSTEIN; HACKER, 2008). Dessa maneira, é possível concluir que a temperatura é um parâmetro crítico para o bom desempenho do sistema.

O segundo parâmetro que deve ser controlado no projeto é a vazão de reagentes, apenas as quantidades necessárias de etanol, água e ar devem ser injetadas no sistema para obtenção de hidrogênio, conforme valores apresentados na Tabela 1. Um sistema de injeção de combustível similar ao automotivo pode ser empregado para realizar tal tarefa, constituído por tanque, bomba, regulador de pressão e bico injetor, além de sensores de nível e pressão para compor o controlador eletrônico (DELUGA et al., 2004).

Tabela 1 – Parâmetros do reformador utilizando temperatura base de 600 °C

Parâmetro	Vazão Mássica [kg/s]	Vazão Volumétrica [ml/s]
Água (H_2O)	0.000337	0.33796
Etanol	0.00057	0.72814
O_2	0.0002	155.38642

Fonte: Laboratorio de Combustao e Catalise Aplicadas (2023).

Para o fornecimento de oxigênio, sopradores de ar podem ser utilizados desde que atendam as condições de temperatura e pressão do sistema (KOHONEN, 2011). Vale ressaltar que os valores apresentados se referem a oxigênio puro, enquanto o reformador irá trabalhar com ar. Calculando a composição em massa do oxigênio no ar na Equação 2, encontra-se aproximadamente 23.2% de oxigênio na atmosfera em massa, a vazão mássica de ar para o reformador seria em torno de 0.000 86 kg/s (TURNS, 2012).

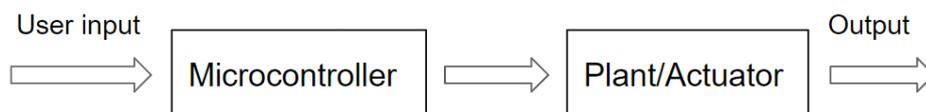
$$\begin{aligned}
 M_{mistura} &= (x_1 \cdot M_1 + \dots + x_n \cdot M_n) \\
 M_{dry-air} &= 28.9647 \text{ g/mol} \\
 O_2 &= 32 \text{ g/mol} \\
 O_{2-massa} &= 32 \text{ g/mol} \times 21\% \text{ composição molar do ar} \\
 O_{2-massa} &= 6.72 \\
 \frac{O_{2-massa}}{M_{dry-air}} &= \frac{6.72}{28.9647} = 0.23
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

3.3 SISTEMAS DE CONTROLE

Na seção anterior foi descrita a dependência que o comportamento do sistema apresenta com as variáveis impostas. Dessa forma é necessário o conhecimento de sistemas de controle para projetar a malha que possa abastecer o sistema de maneira apropriada. Os sistemas de controle podem ser classificados em dois, malha aberta ou malha fechada (OGATA, 2010).

Em sistemas de malha aberta, a referência é enviada para o atuador e sua saída não é avaliada. Esse tipo de sistema é caracterizado por uma implementação mais simples, pois conta apenas com a avaliação da entrada para mapear as saídas, como ilustrado no diagrama de blocos da Figura 2. No entanto, são menos robustos, perturbações podem levar à saídas não esperadas (OGATA, 2010). O chuveiro elétrico tradicional é um exemplo, o usuário define a temperatura e o chuveiro a responde, porém fatores como a temperatura ambiente ou vazão da água podem fazer a temperatura da água variar.

Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema em malha aberta.

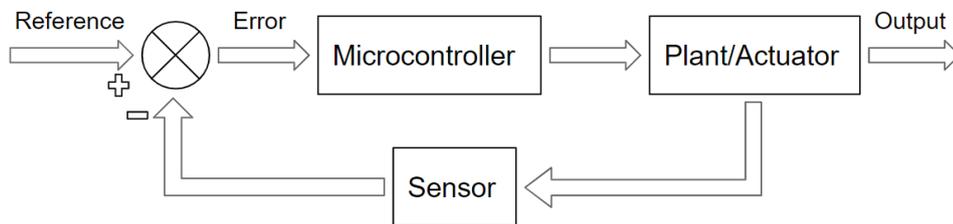


Fonte: Autor (2023).

Por outro lado, o sistema em malha fechada envolve a realimentação da saída do sistema, sendo mais complexo e requerendo um conhecimento mais avançado em técnicas de controle, como o PID, e a modelagem da planta por meio de equações diferenciais (OGATA, 2010). O diagrama de bloco de uma malha fechada é apresentado na Figura 3. Um exemplo cotidiano de malha fechada pode ser visualizado no ar

condicionado, que tenta manter a temperatura escolhida pelo usuário verificando a temperatura da sala em que se encontra.

Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.



Fonte: Autor (2023).

Ao explorar em maior detalhe a linha de combustível, fica evidente que os aspectos de controle se concentram principalmente na quantidade de combustível injetado e na temperatura. A quantidade de combustível injetado é determinada pelo tempo de abertura da válvula de injeção, geralmente medido em milissegundo (CARNEIRO, 2011). É responsabilidade do controlador garantir que os valores de vazão listados na Tabela 1 sejam atingidos.

Para que a massa de combustível injetada seja proporcional ao tempo de abertura, a pressão na linha de combustível deve ser mantida constante. Um dispositivo exclusivamente mecânico pode ser empregado para essa função, este é o regulador de pressão. Dessa maneira, basta fazer o controle do tempo de abertura do bico injetor, uma vez que é conhecida sua vazão mássica e não há alterações significativas de pressão na linha (CARVALHO, 2005). Portanto, as vazões de combustíveis são controladas em malha aberta.

Como demonstrado no diagrama da Figura 1, a água e o etanol são aquecidos por um atuador logo antes de serem injetados. Uma vez que o ponto de ebulição à 1 atm de ambos devem ser respeitados, 78.37 °C para o etanol e 100 °C para a água, uma temperatura deve ser escolhida e mantida (WANG et al., 2009). Nesse caso, há várias possibilidades de perturbação, como alterações na própria temperatura ambiente e variações na injeção de combustível durante o processo, portanto faz-se necessária a aplicação de controle em malha fechada.

No caso da linha de ar, há duas malhas de controle. A primeira se trata da alimentação de oxigênio, na qual um soprador deve garantir a quantidade de oxigênio especificado na Tabela 1. Um sensor de vazão mássica deve ser usado para fechar a malha. A segunda malha de controle fechada na linha de ar está relacionada à temperatura na entrada do reformador, que é definida pela quantidade de gás recirculando, que por sua vez é controlado por uma válvula. Dessa maneira, por meio da temperatura é possível controlar o fluxo da recirculação (LABORATORIO DE

COMBUSTAO E CATALISE APLICADAS, 2023).

3.4 ELECTRONIC CONTROL UNIT (ECU)

No ramo automotivo uma ECU é um sistema embarcado usado para controlar um determinado conjunto de funções. A ECU do motor por exemplo, controla todos os parâmetros do mesmo, visando maior aproveitamento do combustível (CARVALHO, 2005). Para esse gerenciamento, as ECUs contam com um conjunto de sensores e atuadores que fazem a aquisição de dados e podem interagir com o meio a fim de cumprir suas funções (ALAM, 2018).

Geralmente seu elemento principal é o microcontrolador, capaz de realizar o processamento dos dados coletados pelos sensores e enviar sinais de resposta para os atuadores. Por esse motivo a ECU pode ser considerada como o cérebro do sistema. Para isso, o microcontrolador conta com protocolos de comunicação, pinos de entrada e saída (I/O) e um *driver* eletrônico. O *driver* deve isolar a ECU eletricamente de linhas que possam oferecer riscos e permitir o envio de sinais para todos os componentes (CARVALHO, 2005).

No *firmware* da ECU é implementado o que deverá acontecer no sistema, ou seja, a sequência de atividades que será desempenhada. O *firmware* contém todas as rotinas de aquisição de dados e inicialização, realização de tarefas em tempo real, tratamento de eventos assíncronos e cálculos de controle. Dado o papel fundamental da ECU, o microcontrolador deve ser criteriosamente escolhido com base na quantidade e variedade de funções, dispositivos multi-core, por exemplo, ajudam a concentrar essas funcionalidades numa ECU (MONOT et al., 2012).

3.5 ELETRÔNICA

O papel da eletrônica é integrar a ECU. Entre suas principais funções está a de realizar o condicionamento de sinais dos sensores. O primeiro passo para atingir esse objetivo é ajustar a tensão de saída à tensão de operação do componente que irá recebê-lo e filtrar ruídos existentes no sinal. Para atenuar sinais de frequências mais elevadas, filtros passa-baixa de primeira ordem com capacitores e resistores podem ser dimensionados utilizando a Equação 3, e para ajuste da tensão um método convencional é utilizando amplificadores operacionais (SEDRA; SMITH, 2004).

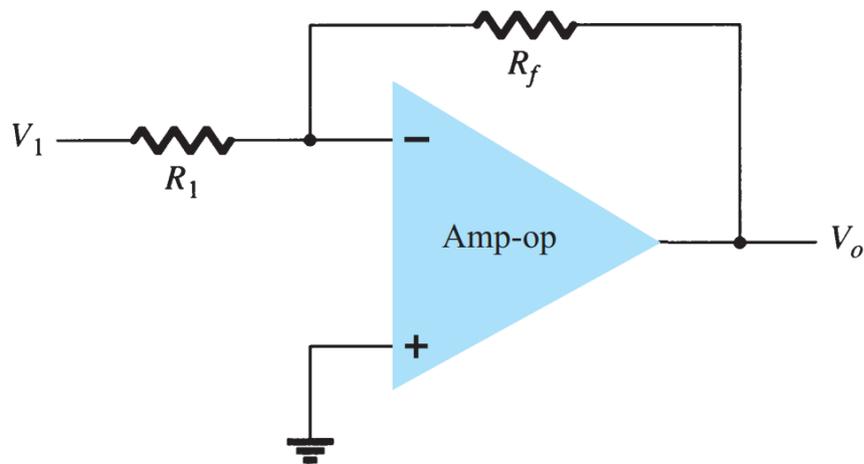
$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (3)$$

Amplificadores operacionais são componentes com diversas características para especificação: ganho em malha aberta, resposta em frequência, nível da alimentação positiva e negativa. Sua característica de terra virtual entre as entradas

inversora e não inversora permite a criação de uma realimentação negativa em que é possível configurar o ganho em malha fechada por meio da Equação 4. O esquemático desse circuito pode ser observado na Figura 4. A vantagem dessa montagem é que o ganho permite alterar a tensão de saída do sensor (SEDRA; SMITH, 2004).

$$\text{Gain (Av)} = V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} \times V_{in} \quad (4)$$

Figura 4 – Circuito amplificador operacional com realimentação negativa.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (1992).

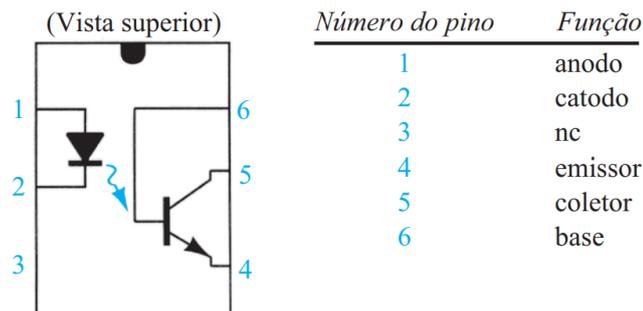
Tornar os sinais analógicos vindos dos sensores em digitais, por meio de conversores ADC, é uma prática muito útil, devido à eficiência de transmissão e armazenamento dos dados digitais (AZIZ; SILVSORENSEN; SPIEGEL, 1996). Isso é feito pelos conversores ADC, componentes eletrônicos que geram um valor digital respectivo à tensão analógica de entrada. Suas principais características de especificação são a quantidade de amostras por segundo, estágios de contagem ou números de bits de resolução e também princípio de funcionamento, como delta-sigma, aproximações sucessivas, entre outras (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1992).

A eletrônica também permite que o microcontrolador gerencie a energia, tornando-o compatível com atuadores de diferentes tensões e potências elétricas. Para sistemas mecatrônicos, onde o método de controle já está projetado, basta gerar o sinal necessário, sem a necessidade de circuitos de potência entre o *Microcontroller Unit* (MCU) e o atuador. Porém, em sistemas com componentes elétricos e mecânicos separados, a ECU precisa controlar diretamente a alimentação do atuador, incluindo o circuito de potência. É importante destacar que a segurança do MCU requer isolamento dos circuitos dos atuadores. (POPOVCHENKO, 2006).

Para abordar o controle por sinal, é possível utilizar optoacopladores, componentes eletrônicos que permitem a conversão de sinais entre diferentes níveis de

tensão, enquanto isolam a entrada da saída. Esses dispositivos são compostos por um *Light-Emitting Diode* (LED) infravermelho e um fototransistor. O LED se ativa quando uma corrente passa pela linha de entrada, o que por sua vez ativa o fototransistor na linha de saída, estabelecendo a conexão entre coletor e emissor. Dessa forma, o sinal da entrada é replicado na saída com a tensão do coletor. O esquemático desse circuito pode ser observado na Figura 5 (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1992).

Figura 5 – Esquemático interno de um optoacoplador.



Fonte: Boylestad e Nashelsky (1992).

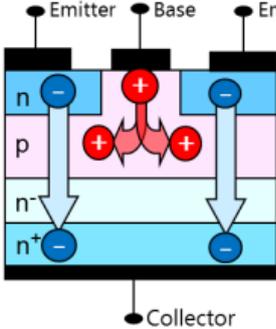
Já no caso do controle de potência, o componente MOSFET, tem grande relevância. Sua alta impedância de entrada e baixa impedância de saída resultam num baixo consumo energético. Além disso, sua estabilidade e isolamento entre o gate e o canal condutor o fazem um dos componentes mais importantes em circuitos integrados de computadores digitais (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1992). MOSFET também possui grande potencial em aplicação de circuitos de comutação de alta potência e uma faixa de frequência maior que os transistores bipolar de junção (TBJ) (TOSHIBA ELECTRONIC DEVICES AND STORAGE CORPORATION, 2022). Uma comparação entre esses componentes é apresentada na Figura 6.

3.6 ESPECIFICAÇÃO DE SENSORES

Para escolher o *hardware* que atenda aos requisitos do sistema, é necessário levar em consideração alguns aspectos de projeto. Os sensores, devem apresentar uma resolução e sensibilidade que atendam os requisitos de coleta de dados. Para isso o fundo de escala deve ser adequado, uma vez que um fundo de escala muito maior que o mensurando pode levar à baixa resolução e um fundo de escala menor à perda de dados (AGUIRRE, 2013).

O princípio de medição do transdutor reflete diretamente na robustez e no custo do sensor, sensores resistivos como o potenciômetro, são geralmente mais baratos e menos precisos que sensores de efeito Hall, devido a sua maior complexidade no processo de fabricação e aos materiais. No envio de dados, o protocolo de comunicação

Figura 6 – Comparação entre transistores TBJ e MOSFET.

Structure of transistors	Bipolar Transistor (BJT)	MOSFET
		 <p>Emitter Base Emitter</p> <p>Collector</p>
Gate (base) driving method	Current driving (Low input impedance)	Voltage driving (High input impedance)
Gate (base) driving circuit	Complicated (High part counts)	Simple
Forward characteristic	Low $V_{CE(sat)}$	High ON voltage (High current region) No threshold voltage
Switching speed	Low speed (with carrier accumulation effect)	Ultra high speed (Unipolar operation)
FWD (Include body diode)	No	Yes (Body diode)
Safe operating area	Narrow	Wide

Fonte: Adaptado de (TOSHIBA ELECTRONIC DEVICES AND STORAGE CORPORATION, 2022).

do sensor deve ser observado, pois é o que torna possível transmiti-los, portanto, caso o sensor apresente protocolo, esse deve ser compatível com o microcontrolador (AGUIRRE, 2013).

Outras considerações importantes são de natureza física, os sensores devem atender às condições de temperatura e pressão às quais serão expostas, assim como serem compatíveis com os reagentes a que estarão em contato, ao mesmo tempo em que não introduzem complicações de integração ao sistema. Dessa maneira é possível garantir que o sistema de aquisição atenda aos requisitos e seja robusto para suportar as exigências de operação (LABORATORIO DE COMBUSTAO E CATALISE APLICADAS, 2023).

3.7 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

O *Inter-Integrated Circuit (I2C)*, é um protocolo de comunicação comum em microcontroladores. Se trata de um protocolo síncrono e *half-duplex*, ou seja, os dados fluem apenas dos escravos para o mestre (HANABUSA, 2007). Sua principal aplicação é em conexões de curta distância em PCBs ou entre PCB e elementos externos, na qual alta taxa de transmissão de dados não seja um requisito de projeto. Uma vantagem desse protocolo é a baixa utilização de pinos, necessitando apenas de dois, SCLK

sendo a linha de *clock* e SDA a de dados, para estabelecer a comunicação de mestres com até 30 escravos (FRENZEL, 2016).

O protocolo *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART), também opera utilizando apenas dois cabos ou pinos, TX para o envio e RX para receber os dados e não faz uso de endereçamento. Desse modo, seu barramento fica restrito a apenas dois dispositivos comunicando entre si. O canal TX de um é conectado ao RX do outro dispositivo, configurando uma comunicação *full-duplex*, na qual ambos enviam e recebem informações. Esse protocolo de comunicação é principalmente empregado para comunicação serial de curta distância entre dois processadores (DHANADRAVYE; THORAT, 2014).

Outro protocolo muito utilizado entre microcontrolador e periféricos como sensores, *Analog to Digital Converters* (ADC), e também entre chips é o *Serial Peripheral Interface* (SPI). O SPI é de um protocolo *full-duplex* com velocidade de transmissão média que necessita de três pinos básicos: *system clock* (SCLK) para a sincronização, *master out slave in* (MOSI) para envio do mestre ao escravo e *master in slave out* (MISO) para envio do escravo ao mestre. Além disso, é necessário um pino a mais por escravo servindo como seletor do escravo que deverá enviar dados. Geralmente sua distância de transmissão fica abaixo de 0.3 m, mas pode atingir até 1 m (FRENZEL, 2016).

O Wi-Fi, é um protocolo presente no cotidiano de muitas pessoas, pois computadores e celulares estão constantemente utilizando essa interface para troca de dados. O Wi-Fi se baseia no uso de endereços únicos conhecidos como Internet Protocol (IP). É uma comunicação *half-duplex* ideal para redes locais, pois tem um alcance de até 100m, e também para aplicações de *Internet of Things* (IOT) uma vez que permite comunicação em alta velocidade e sem a necessidade de cabos. Seu maior desafio se encontra na interferência eletromagnética, um ambiente com altas tensões pode reduzir a velocidade ou até apagar a mensagem sendo transmitida (MAHMOOD; JAVAID; RAZZAQ, 2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão apresentados os requisitos funcionais e não funcionais que o sistema deve compreender, assim como os componentes eletrônicos, atuadores, sensores e microcontroladores que foram especificados para atendê-los.

4.1 REQUISITOS

Os requisitos de maneira geral se baseiam no fluxo de funcionamento apresentado no diagrama da Figura 1, em suas malhas de controle, nos parâmetros de reagente apresentados na Tabela 1 e nas restrições do sistema. Os requisitos foram coletados durante reuniões coletivas com as equipes de mecânica e química do Laboratório de Combustão e Catalise Aplicadas (2023) e um documento contendo essas informações foi gerado e é apresentado a seguir.

4.1.1 Requisitos funcionais da ECU

- RF1: O processamento (coleta de dados, controle, cálculos, fluxo de funcionamento) deve ser realizado na ECU em tempo real;
- RF2: A ECU deve receber sinais analógicos e digitais;
- RF3: A ECU deve controlar os atuadores e também enviar dados;
- RF4: Comunicação com todos os sensores deve ser estabelecida;
- RF5: A ECU deve ser capaz de comunicar com um computador.

4.1.2 Requisitos funcionais de sensores

- RF6: A temperatura deve ser aferida nos pontos indicados no diagrama;
- RF7: A pressão deve ser aferida nos pontos indicados no diagrama;
- RF8: Os sensores devem ser compatíveis com o sistema, não colocando-os em operação que promova a falha.

4.1.3 Requisitos funcionais de atuadores

- RF9: Os atuadores devem fornecer os reagentes e garantir as condições necessárias ao sistema;
- RF10: Os atuadores devem ser controláveis.

4.1.4 Requisitos funcionais eletrônica

- RF11: A ECU deve ser protegida da fonte de alimentação;

- RF12: Deve existir isolamento entre a ECU e os atuadores;
- RF13: A eletrônica deve realizar o condicionamento dos sinais dos sensores.

4.1.5 Requisitos não funcionais da ECU

- RNF1: Um microcontrolador será o dispositivo principal da ECU e este deverá ter suporte à programação em C/C++;
- RNF2: O microcontrolador deve ter suporte aos protocolos de comunicação UART, Controller Area Network (CAN), SPI, I2C e Wi-Fi;
- RNF3: O microcontrolador principal deverá ter pelo menos dois núcleos;
- RNF4: O microcontrolador principal deve apresentar confiabilidade equivalente à em aplicações automotivas;
- RNF5: O microcontrolador deve possuir capacidade de operação em tempo real;
- RNF6: Um microcontrolador auxiliar poderá ser empregado para realizar a comunicação, este deverá comunicar com o principal por meio de UART;
- RNF7: Para realizar o controle, o microcontrolador deverá possuir portas *Pulse-Width Modulation* (PWM) que suportem frequência de 0 a 5 kHz.

4.1.6 Requisitos não funcionais de Sensores

- RNF8: O sensor de pressão de combustível deve operar a 4 bar;
- RNF9: A resolução do sensor de pressão de combustível deve ser de 0.01 bar;
- RNF10: O sensor de pressão de combustível deve ser compatível com água e etanol;
- RNF11: Termopares tipo K devem ser utilizados para aferir temperatura e sua resolução deve ser de 0.1 °C;
- RNF12: Os sensores da linha de combustível devem suportar pelo menos 120 °C;
- RNF13: Um sensor de pressão diferencial para a linha de ar deve operar a 20 kPa e sua resolução deve ser de 10 Pa;
- RNF14: Um sensor de massa de ar para a linha de ar deve operar a 100 kPa e sua resolução deve ser de 4 Pa.

4.1.7 Requisitos não funcionais de atuadores

- RNF15: Bombas de combustível que trabalhem a 4 bar e possam fornecer mais que 3.51 L/h;
- RNF16: As bombas devem ser compatíveis com etanol ou água;
- RNF17: Controle do fluxo de combustível deve ser realizado por bicos injetores automotivos;
- RNF18: Velas de aquecimento automotivas devem ser utilizadas na linha de combustível;

- RNF19: A injeção de ar deve ser realizada por um soprador que exerça 20 kPa de pressão.

4.1.8 Requisitos não funcionais de alimentação

- RNF20: A alimentação elétrica deve ser realizada por baterias automotivas;
- RNF21: Nas fases de teste fontes podem ser empregadas.

4.1.9 Requisitos não funcionais de eletrônica

- RNF22: Possibilidade de controle de equipamentos 12 V por potência;
- RNF23: Possibilidade de controle de equipamentos por sinal, tensões de acordo com os atuadores escolhidos;
- RNF24: Possibilidade de controle de atuadores AC;
- RNF25: Condicionamento modular que possa ser adaptado para diferentes níveis de tensão;
- RNF26: Condicionamento de sinais utilizando amplificadores operacionais e filtros;
- RNF27: Conversor Analógico-Digital externo com pelo menos 12 bit de resolução;
- RNF28: Taxa de aquisição dos sensores de pelo menos 10 amostras por segundo;
- RNF29: Múltiplos reguladores de tensão para alimentar todos os diferentes componentes;
- RNF30: As técnicas de condicionamento e CIs escolhidos devem garantir a resolução indicada para os sensores;
- RNF31: Utilização de LEDs para indicação visual do funcionamento;
- RNF32: Buscar 150% de superdimensionamento em todas as funcionalidades para que o sistema suporte mudanças;
- RNF33: Uso de fusíveis e diodos para a segurança dos componentes.

4.1.10 Features

- F1: Preferência por elementos e dispositivos automotivos sempre que for possível;
- F2: Preferência por atuadores já compatíveis com PWM;
- F3: Preferência por atuadores CC;
- F4: Tamanho dos componentes considerado para que se aproxime de um sistema embarcado.

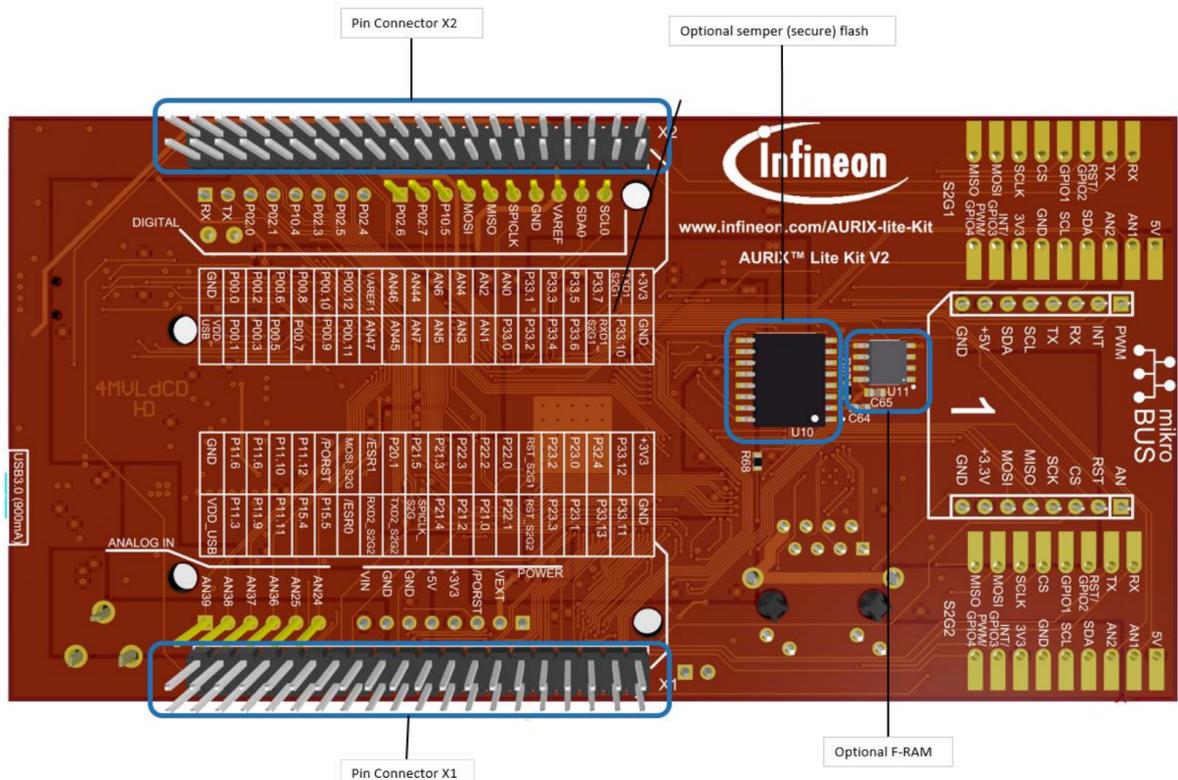
4.2 AURIX TC375

O microcontrolador principal escolhido foi o Aurix TC375 Lite Kit da Infineon Technologies AG (2023). Essa escolha se deu devido ao alinhamento do dispositivo aos requisitos funcionais e às principais aplicações para o qual foi desenvolvido. O TC375

possui três núcleos, tem arquitetura de 32 bit e disponibiliza 80 pinos ao todo, e destes, 57 são para uso geral e 12 para entradas analógicas (INFINEON TECHNOLOGIES AG, 2022). Dentre os protocolos de comunicação requisitados no RNF2 a placa apenas não apresenta a Wi-Fi, por esse motivo um microcontrolador secundário será utilizado.

O dispositivo apresenta três módulos de *timer* principais, que possuem frequência base máxima de 100 MHz. Cada módulo possui sub-módulos com canais, os sub-módulos possuem configuração independente de frequência e essa define as possibilidade de frequência de seus canais. Os canais que externalizam o uso dos *timers*, gerando PWM ou interrupções. Dessa maneira, o Aurix TC375 garante alta flexibilidade de frequência em seus canais (INFINEON TECHNOLOGIES AG, 2022). A placa pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 7 – Ilustração placa desenvolvimento Aurix375.



Fonte: Infineon Technologies AG (2022)

O TC375 pode realizar 300 milhões de operações por segundo e é programado em C ou C++. Os múltiplos núcleos permitem o uso em sistemas embarcados com confiabilidade e segurança, pois lógicas de redundância e verificação de falhas podem ser implementadas. O TC375 foi projetado principalmente para aplicações automotivas de tempo real, incluindo controle de veículos elétricos, híbridos ou à combustão, controle da transmissão, sistema de freios, sistema de direção elétrica, sistemas avançados de assistência ao motorista entre outras aplicações (INFINEON TECHNOLOGIES AG,

2023). As especificações elétricas se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações elétricas do Aurix TC375

Tensão alimentação	12 V
Consumo de corrente	0.5 a 1A
Nível de tensão dos pinos	3.3 V

Fonte: Infineon Technologies AG (2022).

4.3 ESP32-S2-WROVER

Esse microcontrolador de núcleo único foi escolhido como auxiliar e a principal motivação vem de suas tecnologias sem fio: Wi-Fi e Bluetooth. A família de dispositivos ESP32 é muito conhecida por sua capacidade de integrar sistemas de IOT. Isso acontece por ser um microcontrolador de baixo custo, baixo consumo energético e extensa documentação com exemplos. O ESP32 possui muitos recursos embutidos além dos protocolos sem fio, como suporte a UART, SPI, I2C, saídas PWM, entradas analógicas entre outros (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022). Na Tabela 3 são mostradas as especificações elétricas do ESP32.

O ESP32-S2-WROVER possui memória Flash de 4 MB e Pseudo Static RAM (PSRAM) de 8 MB, seu oscilador de cristal opera a 40 MHz. Esse microcontrolador apresenta uma antena integrada para comunicação sem fio, e é importante observar que a região adjacente a essa antena deve ser mantida afastada de correntes elétricas. Com esse dispositivo, é possível estabelecer comunicação serial UART com o Aurix e se comunicar com o computador através do protocolo Wi-Fi, atendendo aos requisitos RF5 e RNF6. Além disso, o ESP também possui a capacidade de ler sensores ou realizar outras funções por meio de suas GPIOs (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022).

Tabela 3 – Especificações elétricas do ESP32-S2-WROVER

Tensão alimentação	3.3 V
Consumo de corrente	mínimo 0.5 A
Nível de tensão dos pinos	3.3 V

Fonte: Espressif Systems (2022).

4.4 SENSOR DE PRESSÃO DO COMBUSTÍVEL

O sensor eletrônico para aplicações automotivas da ODG Instruments (2021) foi o que mais se alinhou aos requisitos, embora a precisão de 0.01 bar tenha sido um desafio durante as buscas e não foi cumprida, pois sua operação em 4 bar e margem de segurança aumentam o fundo de escala necessário. Como nessa aplicação a segurança do dispositivo é mais importante que sua precisão, a escolha desse sensor

foi mantida. A Equação 5 demonstra sua precisão de fábrica de 3% e também a precisão realizando o offset que segundo a ODG Instruments (2021) já leva a precisão para menos de 1% FS.

$$\begin{aligned} \text{Padrão 3\% FS} &= 0.03 \cdot 12 = 0.360 \text{ bar} \\ \text{Com offset <1\% FS} &= 0.01 \cdot 12 = 0.12 \text{ bar} \end{aligned} \quad (5)$$

Apesar de ser uma precisão muito inferior à desejada, técnicas de instrumentação serão utilizadas para aproximar ao máximo o valor especificado de 0.01 bar. Na Tabela 4 são apresentadas todas as suas especificações e os requisitos relacionados cumpridos. Na Figura 8 é possível visualizar o componente.

Figura 8 – Sensor Pressão Combustível.



Fonte: ODG Instruments (2021).

Tabela 4 – Especificações elétricas do sensor de pressão eletrônico

Característica	Especificação	Requisito cumprido
Faixa de operação	0 a 12 bar	RNF8
Tensão alimentação	5 V	-
Tensão de saída	0.5 a 4.5 VDC	-
Consumo de corrente	máximo 10 mA	-
Compatibilidade	Óleo, gasolina, álcool, água	RNF10
Temperatura de operação	-40 a 135 °C	RNF12

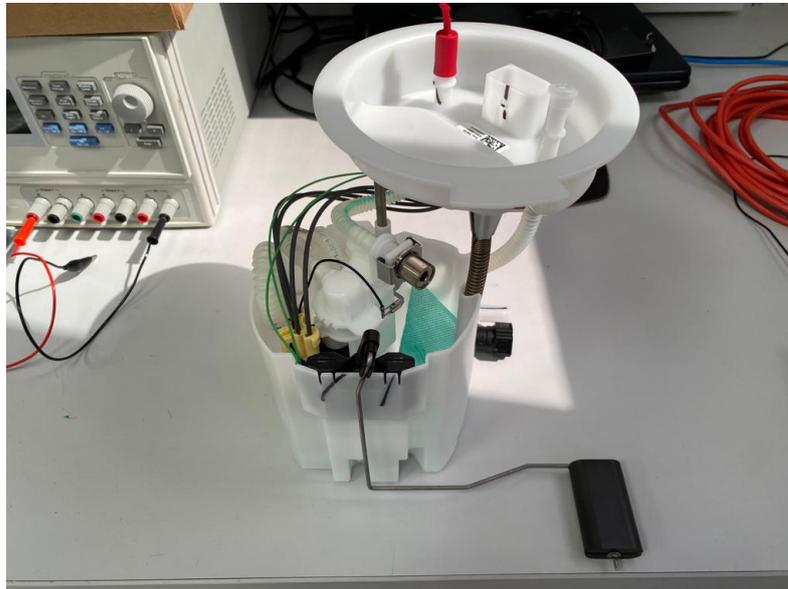
Fonte: ODG Instruments (2021).

4.5 SENSOR DE NÍVEL DO COMBUSTÍVEL

Durante o desenvolvimento do sistema foi percebido que seria importante implementar uma maneira de estimar a quantidade de combustível disponível nos tanques, pois alguns testes podem levar horas e não devem ser interrompidos por falta de etanol ou água. Dessa maneira, apesar de não estar nos requisitos, optou-se

por utilizar o sensor de nível enviado pela BMW (2023). Este consiste de um sistema boia-potenciômetro, para o qual será projetado um condicionamento eletrônico de sinal para realizar a leitura. A foto da Figura 9 apresenta esse sensor em seu copo.

Figura 9 – Sensor de Nível de Combustível.



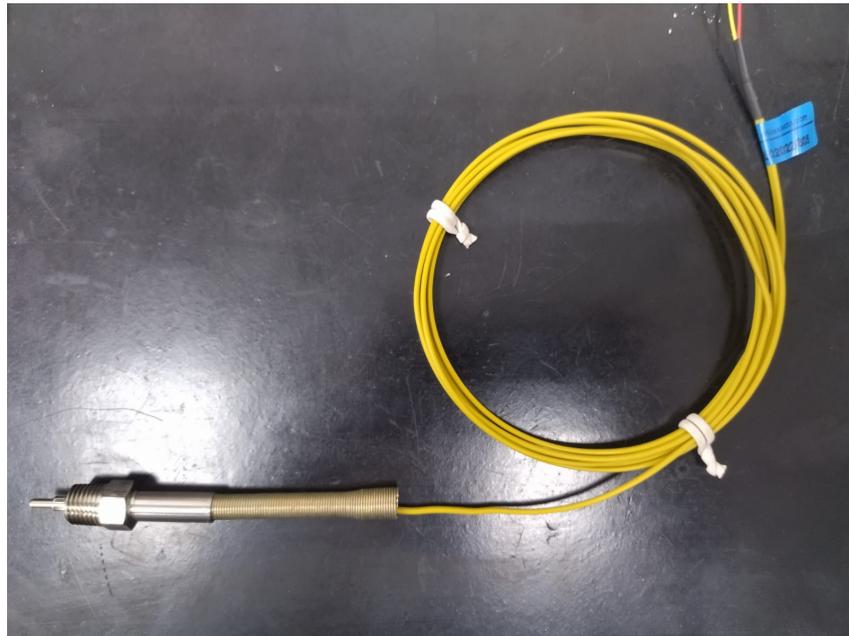
Fonte: Autor (2023).

4.6 SENSORES DE TEMPERATURA

O termopar tipo K surgiu como requisito após várias revisões da literatura apresentá-lo como primeira forma de aferição de temperatura (LI et al., 2015; GAO et al., 2015). Entretanto, sua construção precisa estar em conformidade com os parâmetros específicos desse sistema, como a compatibilidade com os reagentes, pressão e temperatura. Esse sensor será utilizado em oito pontos do sistema como pode ser visto no Diagrama Mecânico Completo da Figura 1, esses pontos estão em contato com reagentes, temperatura e sob pressões diferentes.

Os termopares foram escolhidos em conjunto com o setor de mecânica do Laboratório de Combustão e Catalise Aplicadas (2023), já garantindo que houvesse a compatibilidade com os fatores físicos enquanto entrega a precisão definida nos requisitos. O sensor escolhido pode ser visualizado na Figura 10. Para realizar a aferição de temperatura basta condicionar os valores analógicos vindos de seus terminais, uma vez que são sensores passivos e não necessitam de corrente para operar.

Figura 10 – Termopar tipo K.



Fonte: Autor (2023).

4.7 SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL

É de interesse do projeto verificar a diferença de pressão entre as linhas de entrada de ar e de recirculação, que está vindo do reformador. Para isso o valor esperado de operação é de 20 kPa de diferença e a resolução deve ser de 0.01 bar ou 1000 pascal. O sensor deve operar em temperaturas mais elevadas devido aos gases quentes que saem do reformador, caso seja aferido que a temperatura seja prejudicial ao componente, alguma solução de isolamento deverá ser implementada.

O sensor escolhido para essa função é apresentado na Figura 11. É um sensor com saída digital comunicada por meio de I2C. Sua alimentação é realizada em 5 V com consumo máximo 5 mA. Pode aferir até 25 kPa entre suas entradas e possui precisão de 0.25 % do fundo de escala, o que resulta em 62.5 pascal. Esse valor não cumpre o requisito de 10 pascal de resolução, mas a escolha foi mantida devido à indisponibilidade de alternativas mais adequadas.

4.8 SENSOR DE MASSA DE AR

Em sistemas automotivos a aferição da massa de ar que entra no motor é realizada pelo sensor MAF, este pode ter seu princípio medindo diretamente a massa de ar ou indiretamente medindo o volume por exemplo (MTE-THOMSON, 2023). Durante a busca por este sensor, foi percebido que o seu fundo de escala é muito maior do que o valor a ser medido, tornando impossível alcançar a resolução desejada. Diante dessa

Figura 11 – Sensor de pressão diferencial (aferição entre linhas de entrada).



Fonte: Autor (2023).

limitação, optou-se por medir a massa de ar indiretamente, por meio da medição da pressão, que requer 4 Pa de precisão.

Dessa maneira também foi encontrado na mesma família do sensor de pressão diferencial um sensor que atendesse esse propósito. Esse sensor pode ser visto na Figura 12. Tem as mesmas características de alimentação e comunicação do sensor de pressão diferencial. Suas diferenças estão no fundo de escala que é de 5 kPa e sua precisão é de 0.05 % do fundo de escala, resultando em aproximadamente 2.5 pascal de resolução, o que atende ao requisito RF14 de 4 pascal.

Figura 12 – Sensor de pressão diferencial (aferição da vazão mássica).



Fonte: Autor (2023).

4.9 ATUADORES DA LINHA DE COMBUSTÍVEL

Os principais atuadores da linha de combustível são a bomba de combustível e o bico injetor. O primeiro cria o fluxo de reagentes e o segundo controla sua injeção. As bombas inicialmente selecionadas para o projeto foram bombas automotivas

convencionais que operam em 12 V e são apenas ligadas ou desligadas, não havendo controle elétrico sobre sua operação.

Por questões de compatibilidade mecânica entre bombas, sensores e tanque, foi requisitado que a ECU deveria ser também capaz de controlar bombas brushless que foram enviadas pela BMW (2023). Essas bombas têm algumas vantagens em relação às bombas DC tradicionais, como maior eficiência e durabilidade, tamanho reduzido, além da possibilidade de controle de sua velocidade (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

Bombas automotivas, tais como aquelas fabricadas pela Bosch (2019), tem vazão cerca de 20 vezes superior às vazões de etanol e água especificadas na Tabela 1. Para realizar a injeção de combustível foi utilizado um bico injetor automotivo convencional de 12 V. E por fim, foram escolhidas velas de aquecimento automotivas para realizar o aquecimento do combustível antes de ser injetado. Na linha de combustível esse atuador se encontra logo antes do bico injetor. As velas e o bico injetor são controladas diretamente pela sua alimentação, fazendo necessário o projeto eletrônico que permita realizar esse controle de potência.

Caso a bomba convencional seja utilizada, poderá ser controlada com o mesmo circuito eletrônico para controle de potência. Por outro lado a bomba brushless necessita de um controlador externo que converta um sinal PWM em um sinal trifásico e sincronizado com a bomba. Para isso o sistema conta com um controlador comercial também da BMW (2023). Este necessita de um sinal PWM de 12 V em sua entrada e automaticamente faz a conversão do duty cycle para o sinal trifásico, portanto a ECU deve somente ser capaz de produzir o sinal PWM. As especificações de todos os atuadores da linha de combustível podem ser encontrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações elétricas dos atuadores da linha de combustível

Elemento	Alimentação (V)	Potência (W)	Tipo de controle	Requisito cumprido
Bomba convencional	12	a partir de 72	On-Off	RNF15
Bomba brushless	12	108	PWM 12 V	RNF15
Bico injetor	12	48	PWM alimentação	RNF17
Vela aquecimento	12	144	PWM alimentação	RNF18

Fonte: Autor (2023).

4.10 ATUADORES DA LINHA DE AR

Para a linha de ar é necessário um atuador que possa fornecer ar ao sistema, porém algumas limitações devem ser levadas em consideração no momento da escolha desse elemento, como temperatura, pressão e compatibilidade com os gases. No início do funcionamento somente ar irá passar pelo soprador, porém assim que a conversão no reformador iniciar, os gases começarão a recircular. O soprador deve então gerar pressão o suficiente para manter o fluxo e ter uma construção apropriada para lidar

com a temperatura. Levando esses aspectos em consideração e também o RNF20, foi encontrado o dispositivo da Domel (2023).

Esse atuador foi especialmente difícil de encontrar, pois não há muitos sopradores que atendam a especificação de vazão na pressão de segurança requisitada. A vantagem do equipamento escolhido é o controle de velocidade integrado, necessitando apenas de um PWM com nível de tensão em 10 V. Por outro lado, o consumo de energia e tamanho do equipamento o fazem inviável para sistemas embarcados. Como o intuito do projeto é também a compreensão do sistema, foi decidido por manter a escolha do equipamento e avaliar um substituto em projetos futuros. As especificações do soprador podem ser vistas na Tabela 6.

Um outro atuador da linha de ar é a válvula controlável para recirculação. Como a recirculação não é necessária para a etapa inicial do projeto, as especificações elétricas da válvula puderam ser desconsideradas, é importante apenas garantir que a ECU seja capaz de controlá-la. O dispositivo que demonstrou grande compatibilidade com o sistema foi a válvula EGR, componente comum em veículos e controlável por PWM de 12 V, além disso, suas especificações atendem à temperatura e gases que estará em contato.

Tabela 6 – Especificações do soprador

Característica	Especificação	Requisito cumprido
Tensão de alimentação	24 V	-
Potência máxima	790 W	-
Tipo de controle	PWM de 10 V e 1.5 kHz	F2
Vazão máxima	2172 L/min	-
Pressão máxima	20100 Pa	RNF19
Temperatura de operação	70 °C	-

Fonte: Domel (2023).

4.11 FONTES

A utilização de atuadores que operam em diferentes níveis de tensão causa uma complicação ao sistema: a bateria. A bateria precisaria operar em pelo menos 24 V e técnicas de eletrônica de potência seriam necessária para alimentar os dispositivos em outras tensões. Isso seria caro e traria complexidade ao projeto, portanto optou-se por fazer utilização de fontes DC de diferentes níveis de tensão para a fase de testes. Essa prática simplifica a realização de testes, pois facilita o manuseio dos cabos além de eliminar a preocupação com a carga da bateria.

Os únicos componentes que terão conexão direta com as fontes serão os atuadores e a ECU, sendo o blower em 24 V e o restante em 12 V. Dessa maneira serão necessárias duas fontes, a de 24 V deve atender à demanda do blower de 790 W

indicado na Tabela 6, portanto 800 W são suficientes. E para dimensionar a fonte de 12 V, basta somar as potências de todos os outros elementos da Tabela 5, considerando bombas convencionais, a utilização de duas unidades de cada elemento, e consumo de 1.5 A em 12 V pelo Aurix, chega-se em 544 W.

Conclui-se que uma fonte de 12 V e 600 W seria suficiente para suprir o sistema, pois ainda existe uma margem de mais de 50 W para toda a placa. Na Figura 13 são apresentados os valores utilizados no dimensionamento, procurou-se utilizar os valores máximos dos elementos que operam em 12 V ou 24 V, o que não foi possível somente para a bomba.

Figura 13 – Dimensionamento das fontes.

Elemento	Subsistema	Quantidade	Controle	Tensão elétrica (V)	Potência (W)
Injetor	Fuel Line	2	PWM (12V)	12	48
Bomba*	Fuel Line	2	On-Off	12	72
Vela de aquecimento	Fuel Line	2	PWM (12V)	12	144
Soprador	Air Supplier	1	PWM (10V)	24	790,5
AURIX	ECU	1	-	12	18
Consumo em 24 V		790,5			
Consumo em 12 V		546			

Fonte: Autor (2023).

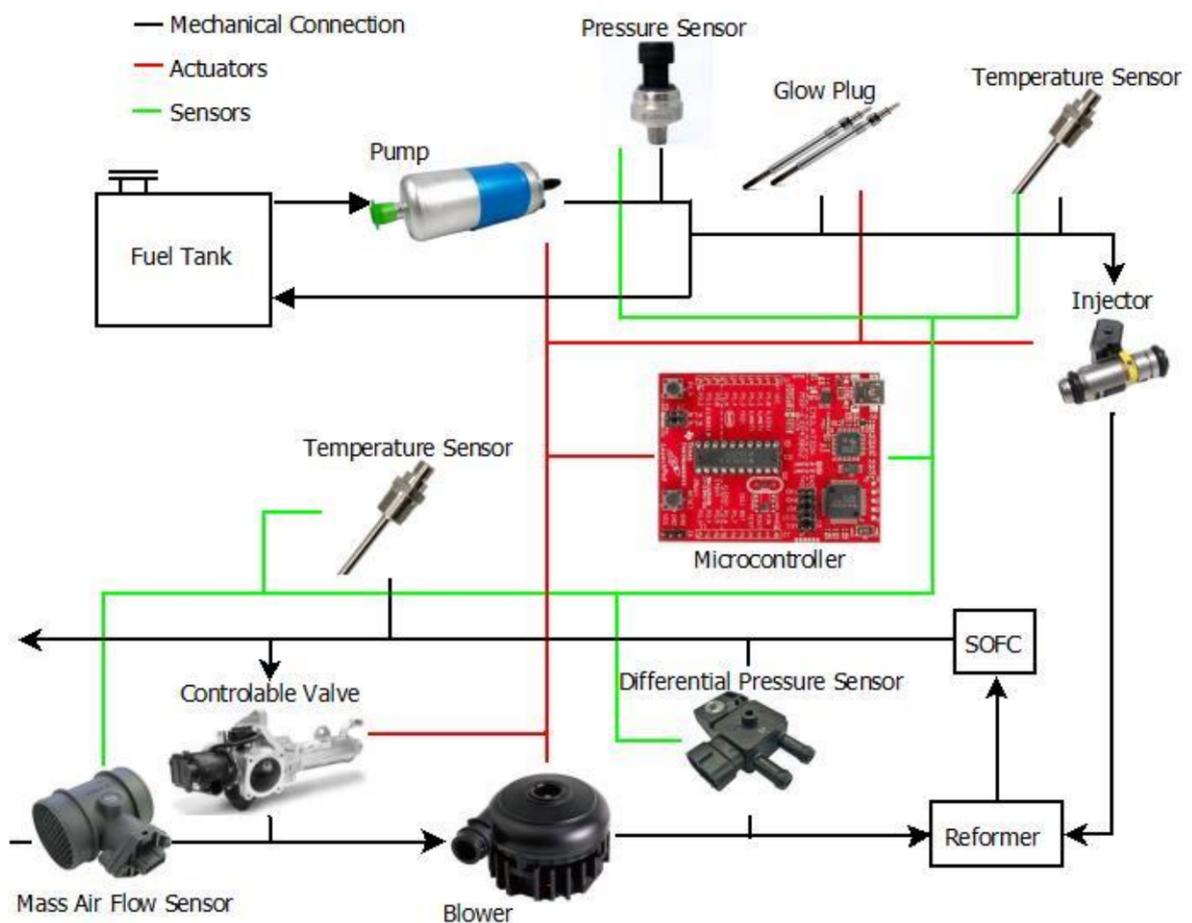
5 DESENVOLVIMENTO

Nesse capítulo serão apresentados os passos executados para o desenvolvimento de *hardware* que cumpram os requisitos do sistema.

5.1 DIAGRAMA ADAPTADO

O diagrama mecânico geral apresentado na Figura 1, juntamente com os requisitos, serve como guia principal para o desenvolvimento do *hardware*. No entanto, vários elementos podem ser simplificados, uma vez que se referem exclusivamente a aspectos mecânicos do sistema ou são redundantes, como as posições dos sensores de temperatura. Para o desenvolvimento do *hardware*, não é relevante saber exatamente a localização desses sensores, mas sim quantos são e se suas especificações estão adequadas ao sistema e à ECU. Portanto, foi criado um diagrama abstraído que melhor se alinha aos objetivos deste trabalho, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama simplificado.

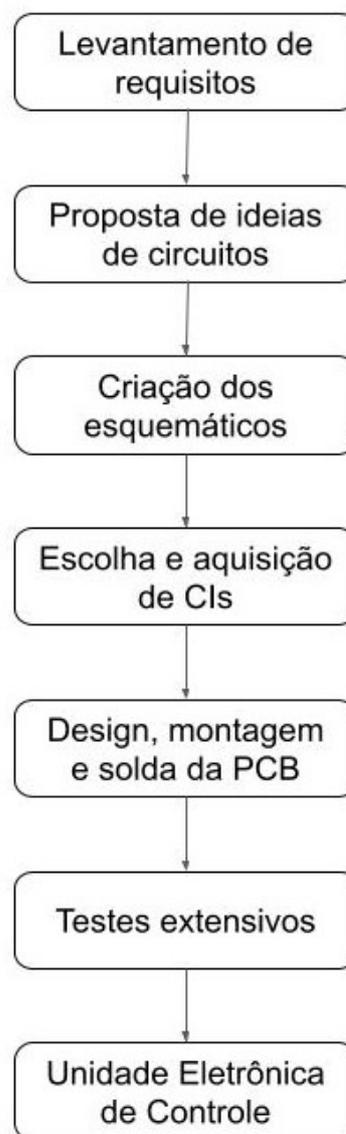


Fonte: Slovinski et al. (2022).

5.2 PROJETO ELETRÔNICO

Os passos para o desenvolvimento da eletrônica são apresentados na Figura 15. A coleta de requisitos já foi realizada e o passo atual é o de desenvolvimento de ideias e geração dos esquemáticos. Para todo o desenvolvimento dos circuitos foi utilizado o *software* Kicad (2023), pois se trata de um *software open source* com funcionalidades completas de design de placas, como geração de esquemáticos, integração com SPICE para simulações, geração automática de lista de compra, associação do esquemático ao *layout* e geração de arquivos para a impressão da placa.

Figura 15 – Passos desenvolvimento do hardware.



Fonte: Autor (2023).

Em praticamente todos os esquemáticos será possível perceber a presença

de capacitores de 100 nF e 10 μ F na alimentação dos componentes. Eles são utilizados para entregar uma alimentação limpa ao dispositivo, com a mínima presença de componentes AC. O capacitor de 10 μ F é responsável por desacoplar frequências mais baixas, enquanto o capacitor de 100 nF desacopla frequências mais altas.

5.2.1 Esquemático termopares tipo K

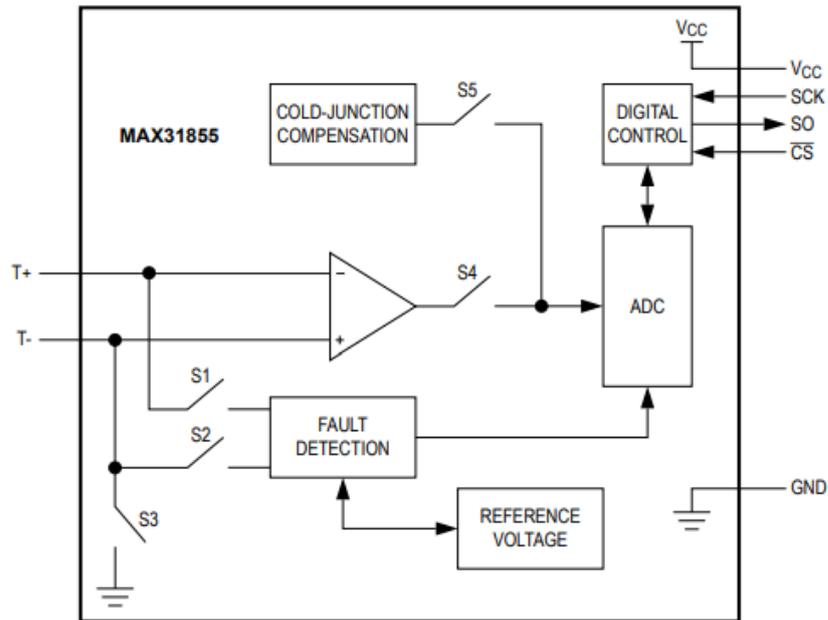
Os termopares são sensores que retornam um sinal analógico baixo, na ordem de milivolts, esse sinal deve ser carregado o mínimo possível, pois qualquer interferência eletromagnética pode ter grande influência (LATHI, 1998). A ideia então seria realizar o condicionamento assim que o sinal chega à placa, isso seria: amplificar, compensar, discretizar e comunicar. Ao invés de montar esse circuito com componentes individuais, é mais seguro escolher um componente comercial para condicionamento de termopar tipo K e que atenda aos requisitos.

A escolha de um componente comercial facilita principalmente na compensação, pois o elemento que realiza os cálculos de temperatura deve possuir um referencial, entretanto, a temperatura do componente pode variar, isso influenciaria diretamente na medição caso a compensação não fosse efetuada. O CI que melhor atende aos requisitos e é especialmente projetado para condicionamento de termopares tipo K é o MAX31856 (MAXIM INTEGRATED, 2015b), porém não havia disponibilidade, optou-se então pelo CI MAX31855 da mesma família, cujo diagrama de blocos pode ser visualizado na Figura 16.

O principal impacto troca de CIs é o não cumprimento do RNF11, no qual a resolução deveria ser de 0.1 $^{\circ}$ C, o que seria obtido com sucesso no primeiro componente especificado, devido ao seu ADC de 19 bit. O CI adquirido possui um ADC de 14 bit e consegue entregar 0.25 $^{\circ}$ C de resolução. No diagrama de blocos da Figura 16 é possível perceber exatamente cada etapa do condicionamento de sinal. Inicialmente um ganho é aplicado e então é realizada a compensação de temperatura. Por fim, o sinal é digitalizado e transmitido por uma interface que utiliza o protocolo SPI.

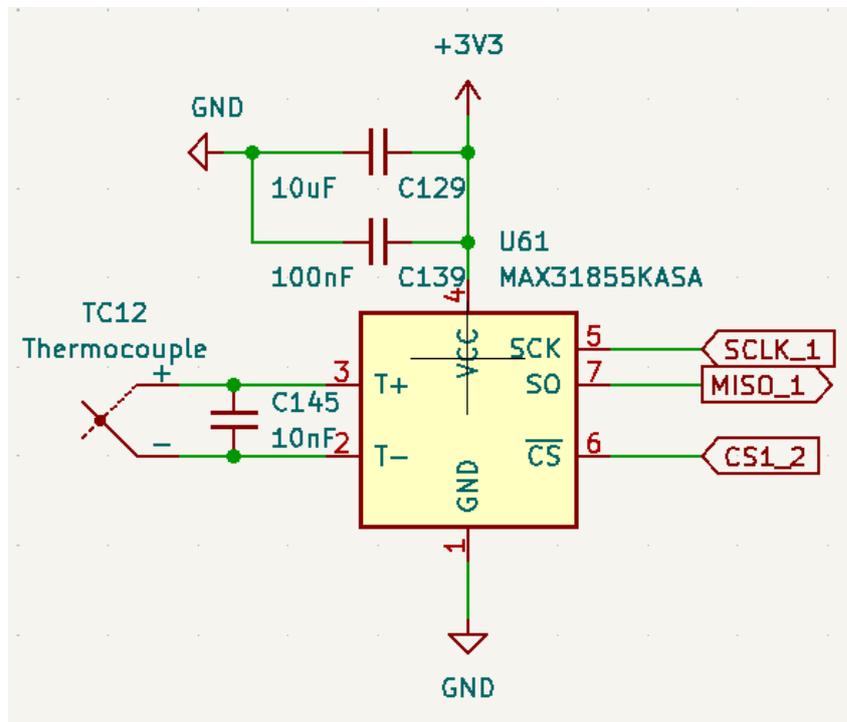
Seguindo as recomendações do *datasheet* da Maxim Integrated (2015a), foi montado o esquemático da Figura 17. Um capacitor cerâmico de 10 nF foi adicionado entre os fios do termopar, com o objetivo de filtrar os ruídos, pois é após esse ponto que o sinal será amplificado. Na alimentação do CI, foram adicionados os capacitores de desacoplamento de alta e baixa frequência, que também foram recomendados pelo fabricante, pois baixos níveis de tensão podem ter interferência do próprio ruído da alimentação. Vale ressaltar que não se deve posicionar esse CI próximo a possíveis fontes de calor. São necessários 8 sensores, mas seguindo o RNF32 a placa contará com 12 circuitos ao todo.

Figura 16 – Diagrama de blocos interno do MAX31855.



Fonte: Maxim Integrated (2015a).

Figura 17 – Esquemático do condicionamento de sinal dos termopares.



Fonte: Autor (2023).

5.2.2 Esquemático do condicionamento de sensores analógicos

Considerando os sensores analógicos, pressão de combustível e sensor de nível, o interesse do trabalho é projetar um circuito que possa ter ganho configurável e seja genérico o suficiente para possibilitar a utilização do mesmo circuito para sensores diferentes. Para o ganho ser configurável basta utilizar amplificadores operacionais com realimentação negativa, dessa maneira basta substituir os resistores e o ganho será ajustado. Como a realimentação negativa inverte o sinal, serão necessários dois amplificadores, um para realizar o ganho e outro para inverter novamente o sinal.

Para calcular o ganho que deverá ser aplicado, deve-se ter conhecimento sobre qual o nível de tensão desejado na saída, o qual depende da especificação do ADC escolhido. Considerando que são 4 sensores, para atingir o RNF32 deve-se implementar 6 circuitos de sensores analógicos. Os parâmetros de escolha do ADC portanto foram: 6 entradas, 24 bit de resolução, interface SPI e baixa potência. O CI adquirido foi o ADS131M06 (TEXAS INSTRUMENTS, 2020).

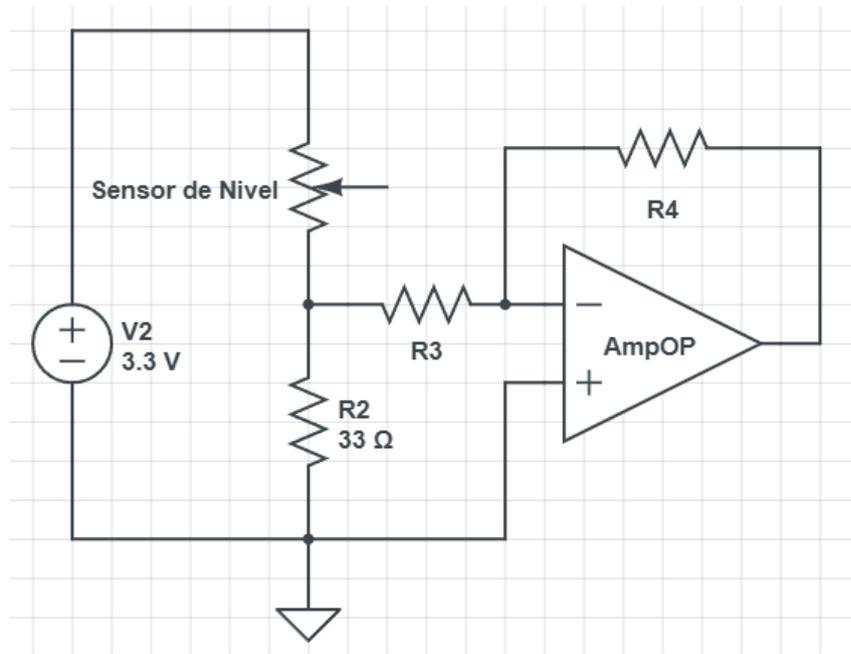
As entradas diferenciais serão conectadas à saída do segundo amplificador operacional e ao *ground*, e suportam uma diferença de tensão de até 1.2 V. Utilizando como exemplo o sensor de pressão de combustível, sua saída máxima é de 4.5 V. O que significa que para ajustá-la ao ADC com total segurança, uma redução de aproximadamente 4 vezes seria suficiente. A lógica utilizada funciona um pouco diferente para o circuito do sensor de nível, como é um potenciômetro, sua variação na verdade é na resistência e não na tensão.

A ECU não possui capacidade de medir variações de resistência elétrica e por isso esta deve ser medida indiretamente. Um solução simples é projetar um circuito divisor de tensão com o sensor, que tem como saída uma tensão que é inversamente proporcional à resistência do potenciômetro, como na Figura 18. A tensão escolhida para alimentação é 3.3 V e o resistor R2 33 Ω, já no sensor, em sua posição mais alta foi medido 48 Ω e na mais baixa 932 Ω. Como para o cálculo de segurança do ganho apenas é necessário o valor de tensão máximo e esse é inversamente proporcional, a Equação 6 utiliza o valor de resistência mínimo.

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= V_{in} \cdot \frac{R2}{R2 + R1} \\
 V_{max} &= 3.3V \cdot \frac{33}{33 + 48} \\
 V_{max} &= 2.04V
 \end{aligned} \tag{6}$$

Esse valor deve ser limitado em 1.2 V, ou seja, o que seria possível com uma redução pela metade. A Figura 19 apresenta o esquemático resultante para esse

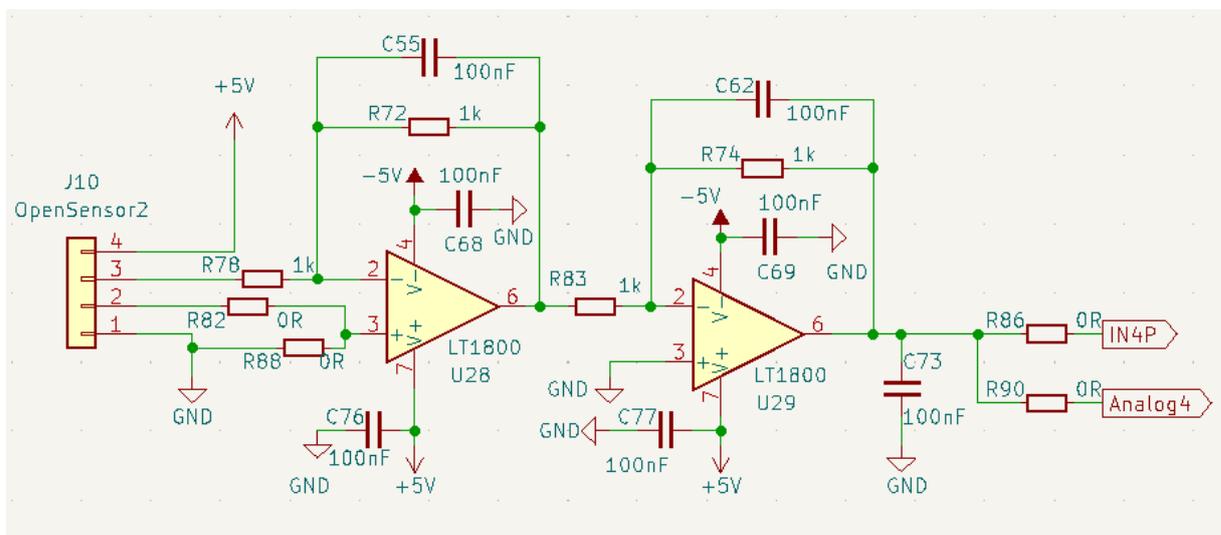
Figura 18 – Planejamento do circuito divisor de tensão.



Fonte: Autor (2023).

circuito, que será o mesmo para todos os sensores analógicos, sendo a única diferença nos resistores de ganho. O CI escolhido como amplificador operacional foi o LT1800 (LINEAR TECHNOLOGY, 2009), que possui saturação superior em 5 V e inferior em -5 V, onde foram adicionados capacitores de bypass de 100 nF. Em paralelo com os resistores da realimentação negativa, foi adicionado também um capacitor de 100 nF para desacoplamento do sinal.

Figura 19 – Esquemático do circuito de ajuste de ganho e filtro.



Fonte: Autor (2023).

A escolha desse amplificador operacional requer que fontes de tensão de ± 5 V estejam presentes na placa, o *datasheet* especifica que podem ser consumidos ± 10 mA por CI. Um detalhe para tornar esse circuito mais genérico pode ser visualizado na entrada do sinal, onde resistores de 0Ω foram empregados para tornar o circuito adaptável. Além disso, a saída do segundo amplificador operacional, ou amplificador operacional inversor, tem dois destinos, um canal do ADC e um pino analógico do microcontrolador principal, também adaptáveis por resistores de 0Ω . Caso seja necessário o sinal pode ser condicionado então pelo próprio Aurix.

O esquemático do ADC pode ser visualizado na Figura 20. Entre as recomendações descritas no *datasheet* e as adições próprias estão:

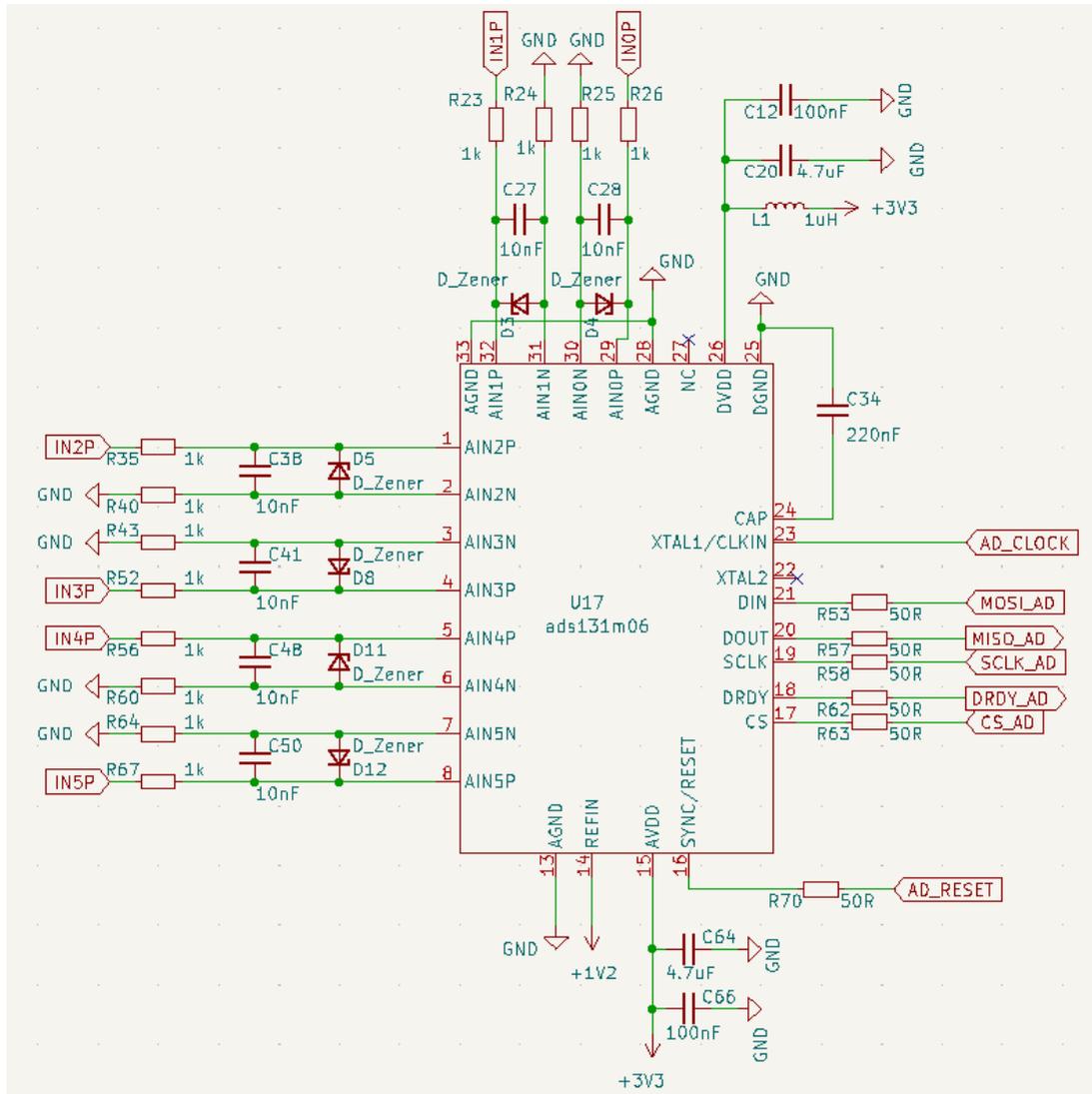
- Um circuito *antialiasing* composto por um filtro RC de primeira ordem, utilizando resistores de 1000Ω e capacitores de 10 nF para as estradas positiva e negativa de sinal;
- Um capacitor de 220 nF entre o pino 24 e o *ground* digital;
- Pino 14 conectado a uma referência externa de 1.2 V;
- Capacitores de *bypass* nas entradas analógicas e digitais;
- Resistores de 50Ω entre os pinos do CI que vão até o microcontrolador para limitar a corrente;
- Possibilidade de soldar diodos Zenner entre as entradas diferenciais, para controlar o diferencial de tensão caso seja necessário;
- Um indutor de 1 uH na alimentação digital para filtrar ruídos.

5.2.3 Esquemáticos dos circuitos de controle DC

O primeiro circuito a ser discutido nessa seção é o circuito para os atuadores que são controlados por sinal. Eles devem reproduzir sinais PWM vindo do microcontrolador na tensão de operação do atuador enquanto isola as duas linhas. Para essa função serão empregados optoacopladores. Ao todo são necessários 4 circuitos: válvula EGR, soprador e duas bombas, portanto serão projetados 6 canais para cumprir o RNF32. O esquemático pode ser visualizado na Figura 21, onde pode ser observado que LEDs foram adicionados em paralelo à entrada de PWM do optoacoplador, indicando visualmente quando o atuador estiver em funcionamento.

Além disso, o pino 5 recebe a alimentação na tensão de operação do atuador, no circuito do soprador por exemplo, 10 V serão aplicados nesse pino. Vale ressaltar também da importância do resistor de *pull-down* na saída do optoacoplador, ou pino 4, para definir o nível de tensão quando o circuito interno do componente está aberto, diminuindo o risco de falsas ativações do atuador. Os sinais de saídas dos optoacopladores irão para um conector na placa que poderá ser facilmente conectada à entrada de sinal do atuador.

Figura 20 – Esquemático do conversor Analógico/Digital.

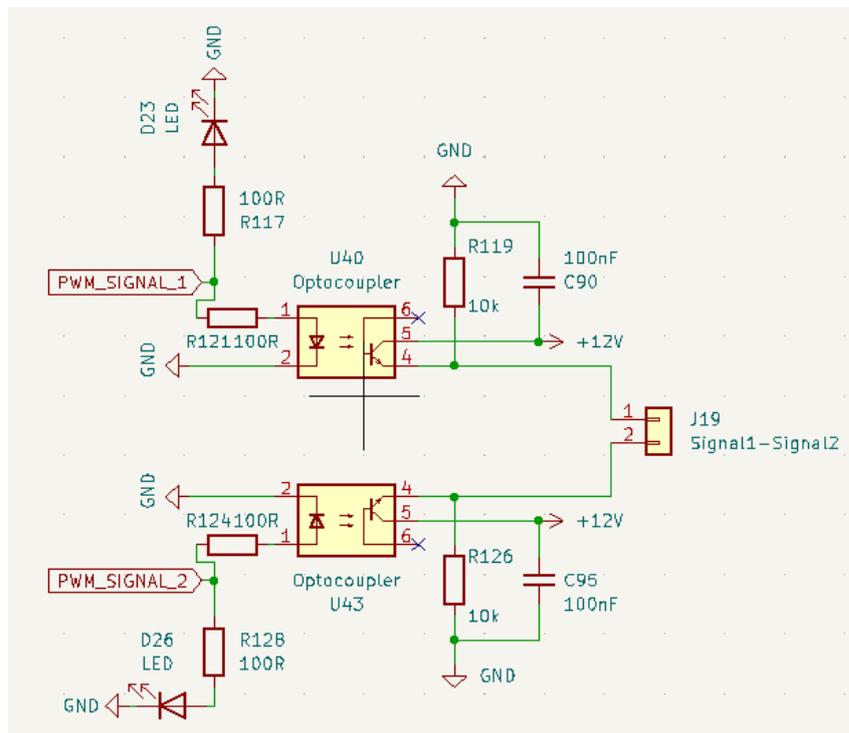


Fonte: Autor (2023).

O circuito descrito é a base do circuito de controle de potência, basicamente o circuito de controle de sinal é estendido para ativar um MOSFET, que é o dispositivo escolhido para chavear a alimentação dos atuadores. O MOSFET escolhido foi o IRFZ44NPbF (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2010), esse componente pode entregar 35 A contínuos e necessita um sinal de controle de até 20 V em seu pino gate. Com o intuito de chavear o MOSFET eficientemente, foi adicionado um CI que funciona como *driver*, o TC4427CPA (MICROCHIP, 2010). O esquemático é apresentado na Figura 22.

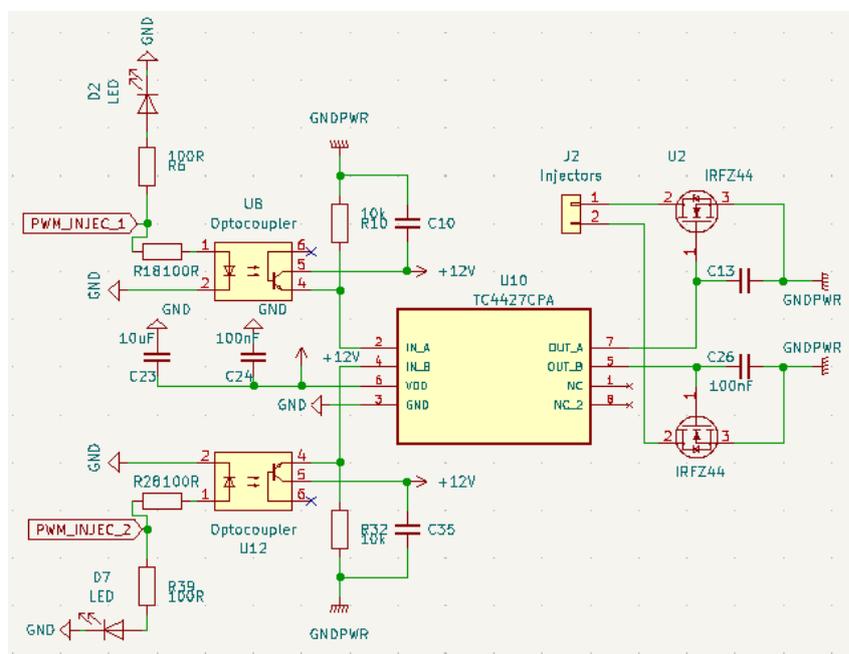
As principais funções do TC4427CPA são: garantir que o MOSFET seja acionado na tensão correta evitando falsos disparo e controlar a corrente que vai para o gate. A capacitância do gate precisa de tempo para carregar e descarregar, dependendo da frequência necessária esse tempo pode atrapalhar o chaveamento, nesses casos o *driver* permite que mais corrente elétrica flua, possibilitando tempos

Figura 21 – Esquemático do circuito de controle por sinal.



Fonte: Autor (2023).

Figura 22 – Esquemático do circuito de controle por potência.



Fonte: Autor (2023).

menores de chaveamento (CORDING, 2022). O MOSFET é canal tipo N, o que significa que o pino 3, ou fonte, é conectado ao *ground* e o pino 2, ou dreno, ao pino de *ground* do atuador. Portanto, a alimentação é conectada diretamente ao atuador e o que de

fato é chaveado é o seu *ground*.

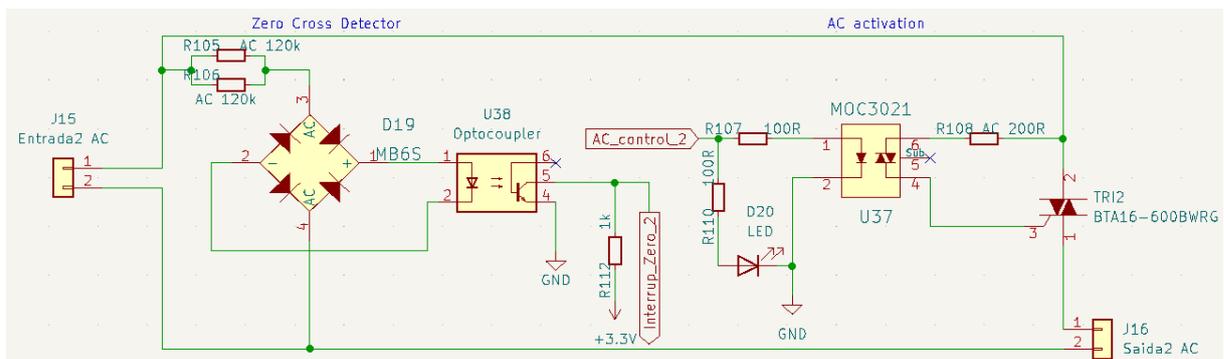
5.2.4 Esquemático do circuito de controle AC

O circuito de corrente alternada (AC) pode ser utilizado para controle do atuador que realiza a vaporização dos reagentes. Tal dispositivo é conectado a rede elétrica e funciona em três níveis de potência definidos. Pode ser necessário um controle mais preciso da potência, e por isso foi criado o RNF24. Controlar um circuito AC consiste em definir o quanto da senoide da rede irá de fato alimentar o atuador (HART, 2011), sabendo que a rede elétrica no Brasil opera em 60 Hz (CUNHA, 2010), o período de um seno completo é calculado na Equação 7.

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{60} \approx 0.0167s \quad (7)$$

Sendo assim, meio ciclo da senoide dura aproximadamente 0.0083 s. É possível controlar a potência do atuador pelo tempo que o circuito AC permanece fechado, entretanto para isso, é necessário que os sinais do microcontrolador estejam em sincronia com a rede. Baseado nesses levantamentos de ideias, apresenta-se o esquemático de detecção de zero e ativação da alimentação AC na Figura 23.

Figura 23 – Esquemático do circuito de controle AC.



Fonte: Autor (2023).

O circuito de detecção de zero que sincroniza o microcontrolador com a rede, uma ponte retificadora e um optoacoplador são utilizados. A ponte retificadora completa gera um sinal DC, que ativa um optoacoplador. O optoacoplador quando ativado conecta o microcontrolador ao *ground*. Porém no momento exato que em que a tensão da rede muda de sinal, a ponte retificadora tem nível de tensão baixo em sua saída, desativando o optoacoplador e fazendo com que o MCU receba a tensão do pull-up, acionando a interrupção.

A interrupção ocorre na inversão de tensão de positivo pra negativo ou negativo para positivo, por isso o controle é realizado sobre meio ciclo e não sobre o ciclo completo do seno. O MCU então converte a potência desejada em um período de acionamento T_A , e após $0.0083 - T_A$ segundos o sinal de ativação é enviado ao CI MOC3021 (FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, 2000), este possui um tiristor com o gate acionado por luz infravermelha, mesmo princípio de ativação do optoacoplador.

5.2.5 Esquemático dos reguladores, inversores e referência de tensão

Foram identificadas as necessidades de tensões específicas para o funcionamento de alguns componentes, a partir das quais determinou-se que serão necessários reguladores de tensão de 10 V, 5 V e 3.3 V. As correntes necessárias em cada tensão foram estimadas, considerando dispositivos com consumos acima de 1 mA. A Tabela 7, apresenta as correntes necessárias em cada tensão, levando em conta os valores máximos de cada componente. Com exceção do ESP32, pois apenas o seu valor base de 500 mA consta no *datasheet*. É importante ressaltar que a fonte de 12 V alimenta toda a placa, por isso recebe a soma de todos os outros reguladores.

Tabela 7 – Consumo de corrente por nível de tensão elétrica

Tensão elétrica (V)	Corrente máxima necessária (mA)
3.3	522
5	188
-5	100
10	15
12	1150
12	Total = 1975

Fonte: Autor (2023).

Para simplificar a busca por componentes foi escolhido o regulador ajustável LT1086-ADJ (LINEAR TECHNOLOGY, 1988), que pode entregar até 1.5 A. Para ajustar, escolhe-se a dupla de resistores que dividirão a tensão, tomando cuidado com R1, pois é quem define a corrente mínima do circuito e esta deve ser maior que 10 mA. O resistor R1 foi então fixado em 100Ω para todos os circuitos, uma vez que atende o requisito de corrente como pode ser visto na Equação 8.

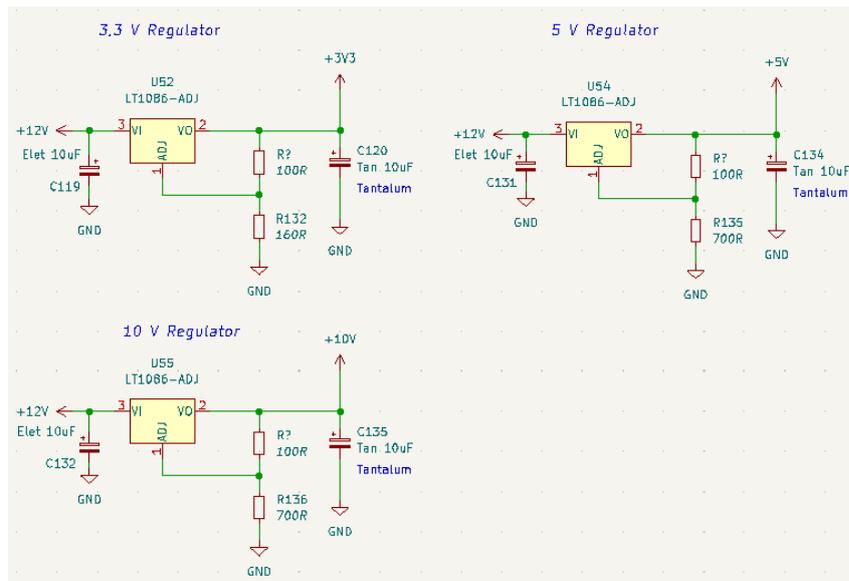
$$I = \frac{V_{ref}}{R_1} = \frac{1.25}{100} = 12.5 \text{ mA} \quad (8)$$

A fórmula para o cálculo da tensão é apresentada na Equação 9, resultando em resistores ideais de 160, 300 e 700 ohm para 3.3, 5 e 10 V respectivamente. A Figura 24 apresenta o esquemático dos reguladores. É possível perceber que em cada

circuito um capacitor eletrolítico de bypass de 10 μF foi adicionado na entrada de 12 V, e na saída um capacitor de tântalo 10 μF foi adicionado, o fabricante Linear Technology (1988) indica que essa adição é necessária para redução da oscilação.

$$V_{out} = V_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (9)$$

Figura 24 – Esquemático dos reguladores de tensão.

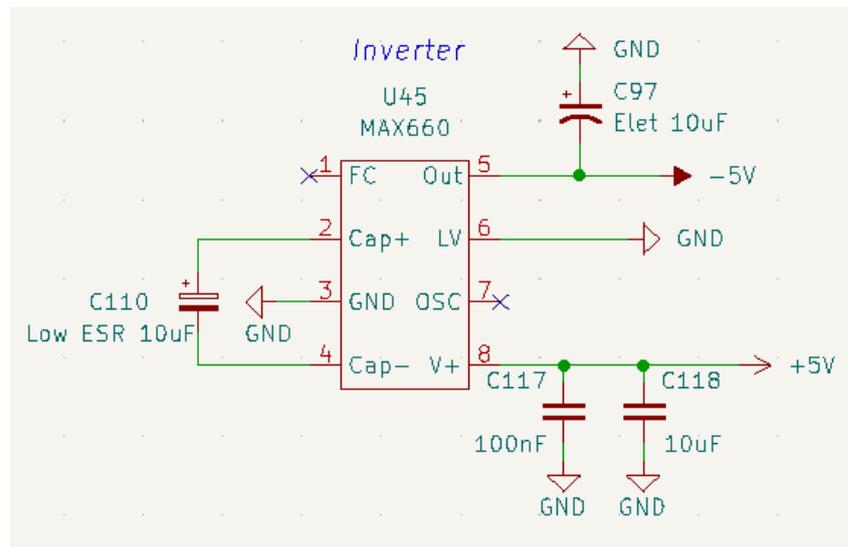


Fonte: Autor (2023).

Um inversor de tensão de -5V é necessário para o funcionamento dos amplificadores operacionais. Sabendo que são 12 amplificadores ao todo e que cada um pode consumir até 10 mA, uma corrente de 120 mA poderá ser requisitada do inversor. Os CIs que entregam essa corrente não estavam disponíveis, portanto foi escolhido o componente que ficou mais próximo, entregando 100 mA, o MAX660 (MAXIM INTEGRATED, 1996). As recomendações do *datasheet* foram seguidas: um capacitor eletrolítico de 10 μF na saída do CI para aumentar a estabilidade e um capacitor com baixo ESR entre os pinos 2 e 4 para realizar a inversão. O esquemático se encontra na Figura 25

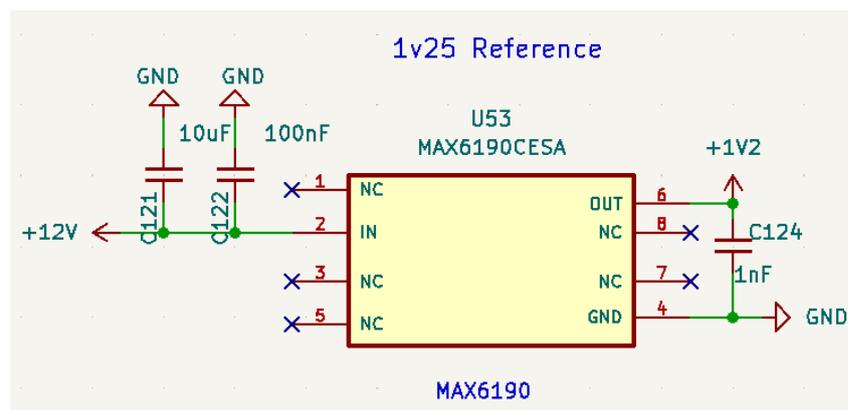
Durante a especificação do conversor analógico-digital, percebeu-se a necessidade de uma referência externa de 1.2V. O componente escolhido foi o MAX6190CESA (MAXIM INTEGRATED, 2010), um CI de referência de precisão que entrega 1.25 V, o CI pode ser visualizado na Figura 26. Em seu esquemático foram adicionados os capacitores padrões de 10 μF e 100 nF na alimentação e na saída um capacitor de 1 nF, mantendo a consistência de desenvolvimento entre os circuitos.

Figura 25 – Esquemático do circuito inversor de tensão.



Fonte: Autor (2023).

Figura 26 – Esquemático do circuito de referência de 1.2 V.



Fonte: Autor (2023).

5.2.6 Esquemático Aurix

O AurixTC375 Lite Kit é uma placa de desenvolvimento pronta para uso, não necessitando de nenhuma configuração adicional. Esse microcontrolador vem no formato de conexão com pinos do tipo macho e portanto deve ser encaixado em conectores do tipo fêmea projetados na placa. Para projetar esse conector, as funcionalidades dos pinos devem ser avaliadas e cuidadosamente distribuídas, pois uma vez feita a conexão na placa não há como utilizar outro pino. O esquemático gerado nessa etapa será importante para a equipe de programação do microcontrolador, que deve saber a conexão de cada pino e ter a funcionalidade correta associada.

Nessa etapa de atribuição de pinos inicialmente priorizou-se os protocolos de comunicação, como TX, RX, SDA, SCLK, MOSI e MISO, pois pinos que expõe essas funcionalidades são mais escassos. Na sequência foram atribuídos pinos aos circuitos

de PWM. Como existem PWMs em diferentes frequências, os PWMs de frequências iguais foram agrupados para que uma atribuição de pinos pertencentes ao mesmo módulo de *timer* pudesse ser realizada. Como haviam muitas possibilidades, dedicou-se um tempo maior a essa etapa em comparação às outras, para que a atribuição fizesse melhor uso do Aurix.

Por fim, foram atribuídos pinos para interrupções, entradas analógicas e para CIs que funcionam com I/O de uso geral, como os chip selects (CS), tudo isso nos pinos restantes do Aurix. Durante todo o processo, algumas realocações de comunicação foram realizadas buscando agrupar os PWMs de frequência igual. Ao finalizar toda a atribuição, foi decidido por implementar uma possibilidade de conexão extra com o Aurix, evitando que seus pinos não utilizados não possam ser aproveitados em caso de necessidade.

5.2.7 Esquemático ESP32

Diferentemente do microcontrolador principal que é uma placa de desenvolvimento pronta para uso, o ESP32-S2 escolhido requer algumas configurações adicionais de circuitos. A primeira e mais importante é uma interface para sua programação, uma vez que é um componente soldado na PCB e não possui conexões para programação.

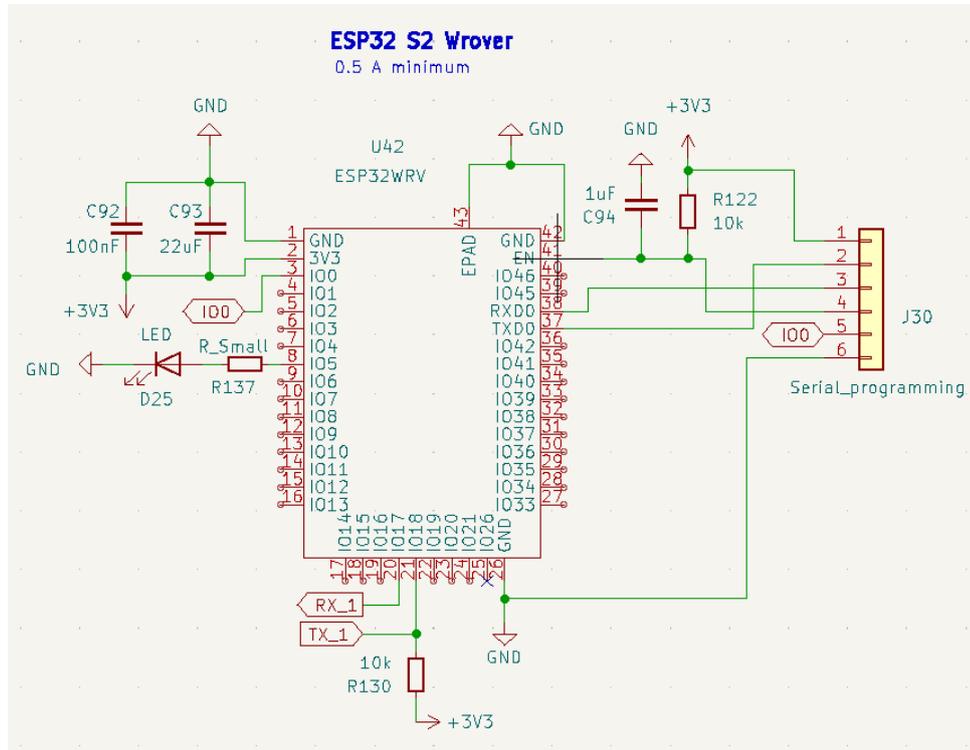
As instruções do *datasheet* (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022) foram seguidas, basta expor os pinos RXD0, TXD0, EN e IO0, além de colocar o EN em *pull-up*. Fora isso, foi realizada a conexão do TX1 e RX1 com o microcontrolador principal, a presença de capacitores na alimentação, e a utilização de um LED para indicar seu funcionamento. O esquemático resultante pode ser visto na Figura 27.

5.2.8 Esquemático de proteção da placa

Como descrito no RNF33, é necessário que a ECU seja protegida contra corrente acima do esperado por meio de um fusível, e que também garanta a segurança dos componentes contra a conexão invertida da alimentação, por meio de um diodo. Portanto no circuito de conexão da alimentação foram adicionados esses dois dispositivos.

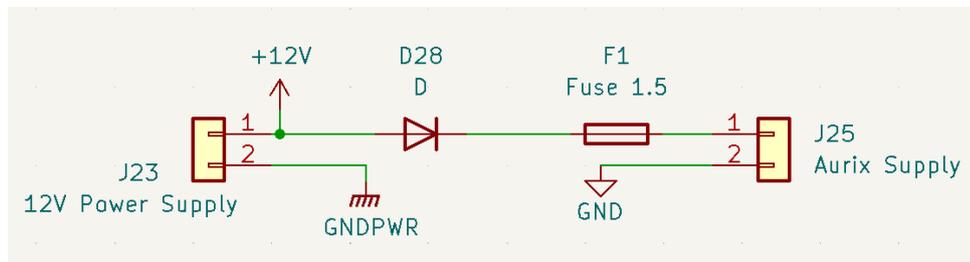
A partir dos valores da Tabela 7, foi escolhido iniciar o uso da ECU com um fusível de 1.5 A e utilizar um maior caso seja necessário. O diodo por sua vez, basta suportar à inversão de 12 V. Esse circuito é apresentado na Figura 28. A conclusão dos esquemáticos de proteção denotam a finalização da etapa de concepção de circuitos, o documento contendo os esquemáticos completo se encontra no Apêndice A.

Figura 27 – Esquemático do ESP32.



Fonte: Autor (2023).

Figura 28 – Esquemático do circuito de proteção.



Fonte: Autor (2023).

5.3 DESENVOLVIMENTO DA PLACA

Nessa seção será descrito como foi realizada a etapa de implementação da placa. O *layout* se caracteriza por traduzir os esquemáticos projetados em um planejamento físico dos componentes e suas conexões na placa. Envolve posicionar os componentes considerando requisitos elétricos, mecânicos e de integridade do sinal, e também propriedades de operação térmicas. Esses requisitos já foram identificados na escolha dos componentes, alguns deles são: ESP32 sem qualquer tipo de corrente elétrica próxima à sua antena e condicionadores de termopar MAX31855 afastados de fontes de calor.

5.3.1 Layout da PCB

O *layout* da placa foi pensado para se adequar ao ambiente de operação no laboratório. A bancada estará em contato direto com duas paredes perpendiculares uma à outra, de modo que a região dedicada ao sistema se encontra à esquerda e que qualquer computador que precise se comunicar com a placa deve estar à sua esquerda também.

A bancada possui dois níveis de altura, no inferior ficarão os tanques e os componentes relacionado ao subsistema de combustível. Já o nível superior comporta o reformador e o subsistema de ar. Os subsistemas possuem divisões claras em termos de posicionamento, o que permite criar um *layout* que leve em consideração a distância e o cruzamento dos cabos.

Com base no posicionamento da bancada, do computador e na disposição dos circuitos, foi gerado o esboço da Figura 29. Uma melhoria logo aplicada ao esboço foi a utilização dos circuitos de controle DC de sinal para aumentar ainda mais a distância entre os microcontroladores e sensores dos circuitos que operam com potência mais elevada.

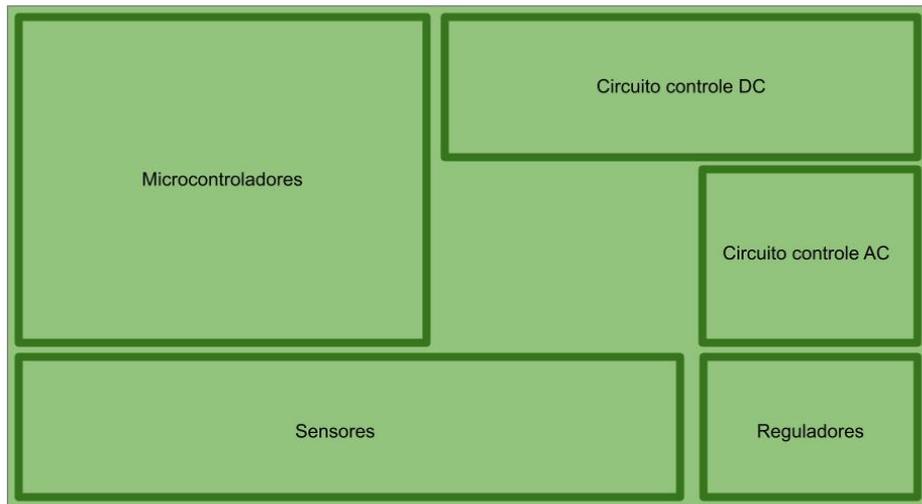
Além disso, os sensores não foram concentrados apenas na parte inferior esquerda, mas realocados de modo a reduzir a área total da placa. O circuito de controle DC foi dividido em dois, posicionadas acima e abaixo do campo de controle AC para o subsistema de ar e combustível, respectivamente. Como resultado, os reguladores tiveram que ser deslocados para o centro da PCB.

Entrando em mais detalhes da disposição de circuitos da placa. Os microcontroladores foram posicionados à esquerda para simplificar a conexão com o computador e aumentar a distância à dispositivos que geram maior interferência eletromagnética, como os atuadores e circuitos de potência. A mesma lógica foi utilizada para a maior parte dos circuitos que realizam a leitura dos sensores. Por conta disso, pôde ser realizada uma malha de *ground* no lado esquerdo da placa, onde estão localizados apenas dispositivos que trabalham com corrente baixa.

Considerando a vista frontal da placa, os circuitos de controle de atuadores foram posicionados no lado direito, priorizando o subsistema de combustível na parte inferior e o subsistema de ar na parte superior. Evitando ao máximo o encontro de cabos que venham da parte inferior e superior da bancada. Uma malha de *ground* de potência foi gerada para esse componentes, é chamada assim devido à sua conexão direta com a fonte de alimentação e é importante para facilitar a conexão de *ground* entre todos os componentes e aumentar a dissipação de calor gerado, já que nessa região passará mais corrente.

Na face oposta da placa, uma segunda malha de *ground* comum foi gerada, permitindo que os componentes de sinal no lado de potência possam ter uma conexão

Figura 29 – Desenho inicial da disposição de circuitos na placa.



Fonte: Autor (2023).

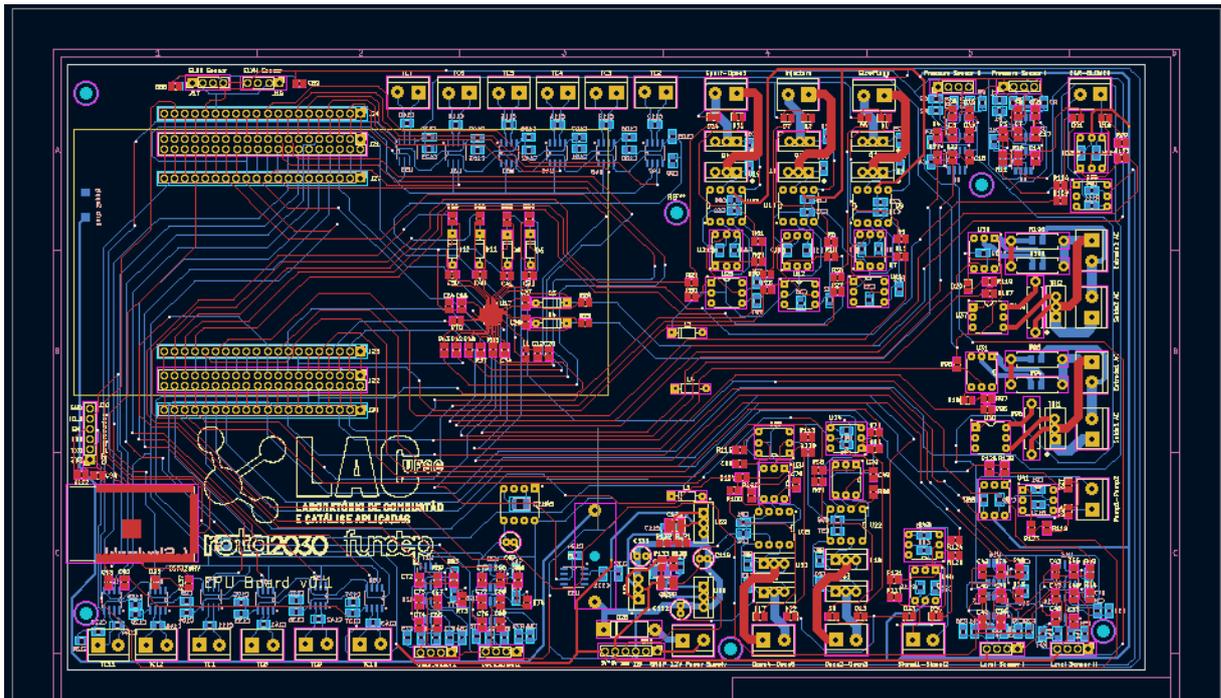
ao *ground* sem trilhas. O *ground* comum e o *ground* de potência foram acoplados por meio de indutores, dessa maneira obtém-se uma mesma referência para todos componentes e que minimize a interferência entre malhas. Os circuitos de regulação de tensão e controle AC foram posicionados de maneira a reduzir as dimensões da placa, minimizando o seu custo.

Após o posicionamento de todos os componentes de todos os circuitos. Foi realizada a criação de trilhas que conectem os locais indicados no esquemático. Por se tratar de muitas conexões entre vários componentes, que vão de posições diferentes até o microcontrolador ou até sua alimentação, foi necessário a utilização de vias para gerenciar o cruzamento das trilhas.

As trilhas foram projetadas considerando a passagem de corrente esperada, indicada pelos *datasheets* dos componentes. Para isso foi utilizado a calculadora da Advanced Circuits (2018), o que resultou num valor mínimo de espessura de trilha de 0.2 mm para alguns sensores, e máximo de 2.3 mm para alguns atuadores. Ao todo foram criados 148 vias, 3746 segmentos de trilha e 1390 *pads*. O resultado final pode ser conferido na Figura 30. A placa foi finalizada com as dimensões de 265 × 150 mm, e furos para sua fixação foram adicionados.

Orçamentos foram realizados com diferentes empresas para avaliar o melhor custo-benefício, principalmente dando ênfase ao tempo de entrega. Após a seleção da empresa, algumas configurações foram adicionados à sessão de *layout* do KiCAD para garantir que as restrições mínimas de impressão da empresa fossem atendidas, como por exemplo espessura de trilhas, distância entre trilhas e entre trilhas e furos, tamanho de vias, entre outros. Só então, os arquivos gerber, que são utilizados na impressão da placa, foram gerados e enviados para a empresa dar início à produção da placa.

Figura 30 – Layout ECU com zonas de ground invisíveis.



Fonte: Autor (2023).

5.3.2 Montagem e solda dos componentes

Com a PCB em mãos, inicia-se o processo de solda dos componentes. Esta será modular para que seja possível testar os circuitos garantindo que a solda foi realizada corretamente. Isso não é possível para os circuitos que dependem de comunicação, pois o microcontrolador será montado na placa por último. Os primeiros a serem montados e testados foram os circuitos de controle, vale ressaltar que a solda se inicia por componentes *Surface Mount Device* (SMD) e depois *through hole* por ordem de tamanho para facilitar o manuseio.

Na sequência foram montados os reguladores de tensão e circuitos de condicionamento de sinais analógicos. Nessa etapa foram identificados erros de projeto com os amplificadores operacionais, as entradas inversora e não inversora estavam invertidas, o que impossibilitaria o correto funcionamento. Isso ocorreu devido à alteração do componente especificado, pois um novo esquemático foi gerado e nesse, os pinos estavam associados de maneira invertida, esse detalhe passou despercebido, e as trilhas que chegam aos pinos 2 e 3 do amplificador operacional comprado foram impressas erradas.

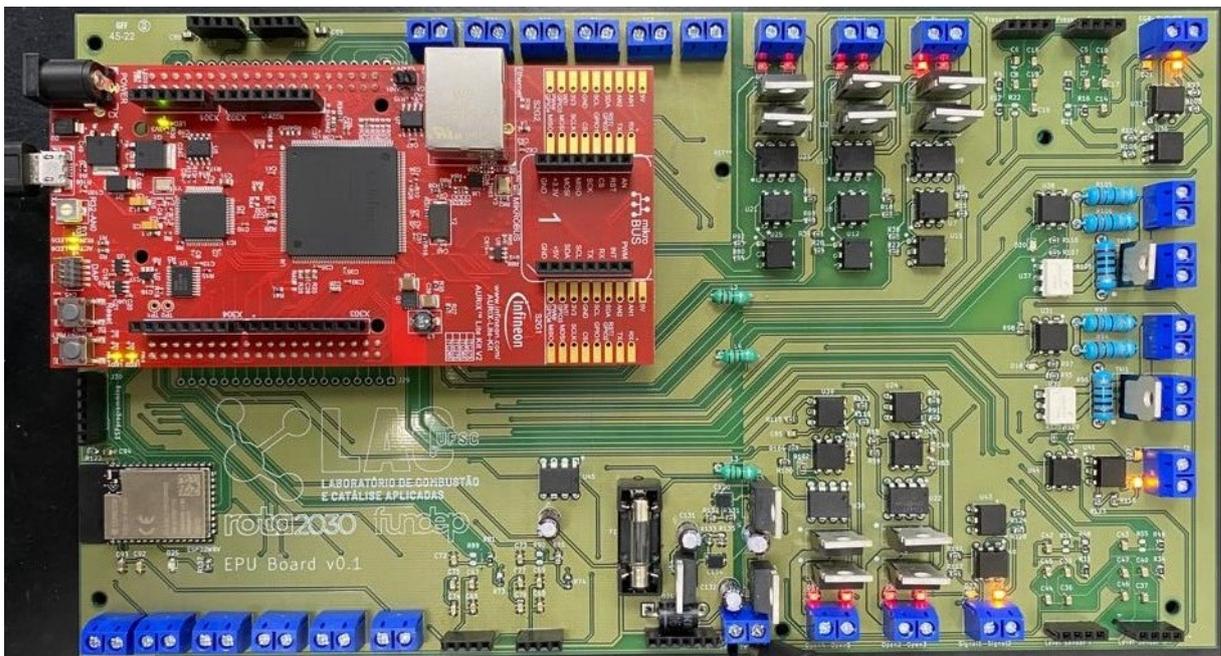
Existem algumas soluções para consertar esse erro, a primeira seria corrigir o erro no esquemático e aplicar as mudanças no *layout*, enviar o novo projeto da placa e imprimir a versão correta, o que seria caro e levaria muito tempo. Uma outra solução seria encontrar componentes com o mesmo encapsulamento e pinos com a mesma

disposição da impressão na placa. Foi decidido por recorrer a uma solução manual temporária e criação de nova versão da placa uma vez que o funcionamento completo esteja comprovado, garantindo que a nova versão esteja 100% funcional e atendendo ao sistema.

A correção manual emprega o uso de *jumpers* externos, que levam o *pad* do pino 2 ao pino 3 e o *pad* do pino 3 ao pino 2. Dessa maneira as conexões do circuito estão de acordo com o esquemático. No entanto, mais um erro foi encontrado nesse circuito que precisou de solução manual. Os sensores de nível foram adicionados aos requisitos posteriormente à criação dos esquemáticos, como foi discutido sobre esses sensores, eles devem atuar num circuito divisor de tensão, entretanto o resistor de divisão necessário não foi atualizado no circuito, necessitando que um resistor externo fosse soldado entre o pino da entrada inversora e o *ground*.

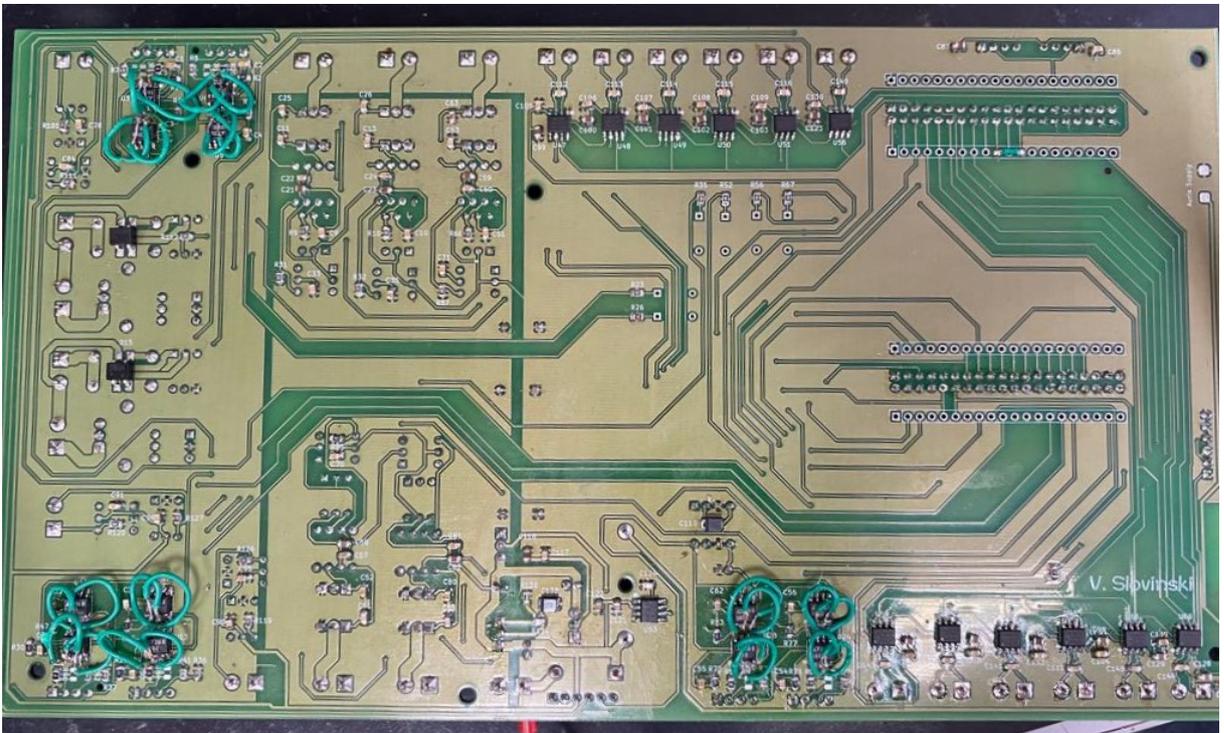
Como o restante dos circuitos é dependente de comunicação, eles foram soldados por último e também seguindo ordem de tamanho. Um cuidado especial precisou ser tomado com o ADS131E06, pois é um componente SMD que possui 4×4 mm e 32 pinos, o que o torna difícil de manipular, soldar e até mesmo testar todas as suas conexões. O encaixe do Aurix determinou a finalização da montagem da placa, que agora está pronta para a realização extensiva de testes e comprovação dos requisitos que foram entregados. O resultado da ECU é mostrado na Figura 31 e Figura 32.

Figura 31 – ECU vista frontal.



Fonte: Autor (2023).

Figura 32 – ECU vista traseira.



Fonte: Autor (2023).

6 RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os testes realizados e seus resultados. Os testes se dividem em inspeção visual, testes de continuidade, verificação de tensão e testes funcionais. Ao final dessa sessão será possível concluir se a placa atende aos requisitos e pode ser utilizada como ECU do sistema. A inspeção visual não se caracteriza por um teste em si, mas é importante para identificar falhas óbvias, como soldas mal realizadas e erros no projeto do esquemático. Além dos dois erros já corrigidos durante a montagem da placa, não foi observado nenhuma outra anomalia.

6.1 TESTES DE CONTINUIDADE

Os testes de continuidade ocorrem ainda com a placa não alimentada. São úteis para verificar se as conexões estão corretas e também não há curtos-circuitos com a alimentação ou com o *ground*. Ele foi aplicado em todos os pinos de todos os componentes enquanto tabelas foram utilizadas para registrar a conexão com sucesso ou falha. Ao fim, foi possível comprovar que todas as soldas estavam bem feitas e que o sistema poderia ser alimentado.

6.2 VERIFICAÇÃO DE TENSÃO

Para esse teste a placa precisou ser alimentada, uma vez que a fonte de 12 V pode entregar até 50 A de corrente, não é uma boa prática conectar direto a placa na fonte do sistema sem a validação prévia. Portanto, uma fonte de bancada foi utilizada limitando a corrente em 1 A, a corrente consumida de início foi em torno de 700 mA, o que está dentro do valor esperado da Tabela 7, vale ressaltar que o Aurix TC375 ainda não está conectado nessa fase.

Com exceção da tensão de saída do inversor MAX660, todas as outras estão dentro do valor esperado, com uma variação máxima de -6% na alimentação de 12 V devido à queda de tensão do diodo. O inversor deveria inverter o valor alimentado em sua entrada, na teoria 5 V e na prática 4.95 V, portanto algo próximo a -5 V era previsto, no entanto, o valor aferido foi de -3.53 V, o que difere em quase 30%.

Essa redução ocorre devido à demanda de corrente na alimentação de -5 V ser maior do que o inversor pode entregar, o que já foi constatado no momento da compra do inversor de tensão. Porém mesmo com a tensão de saturação abaixo do ideal, não há interferências práticas no condicionamento do sinal dos sensores, uma vez que a tensão máxima do sensor de nível fique próxima aos 2.1 V e o sensor de pressão esteja sob uma pressão constante de 4 bar, que resultaria na tensão da Equação 10.

$$\frac{12 \text{ bar}}{4 \text{ bar}} = \frac{4.5 \text{ V}}{x \text{ V}} = 12 \cdot x = 4 \cdot 4.5 \rightarrow x = 1.5 \text{ V} \quad (10)$$

6.3 TESTES FUNCIONAIS

Com todas as conexões e tensões validadas, é possível prosseguir com os testes integrados para verificar se a ECU é capaz de executar as funções para as quais foi projetada.

6.3.1 Condicionamento de sinais analógicos

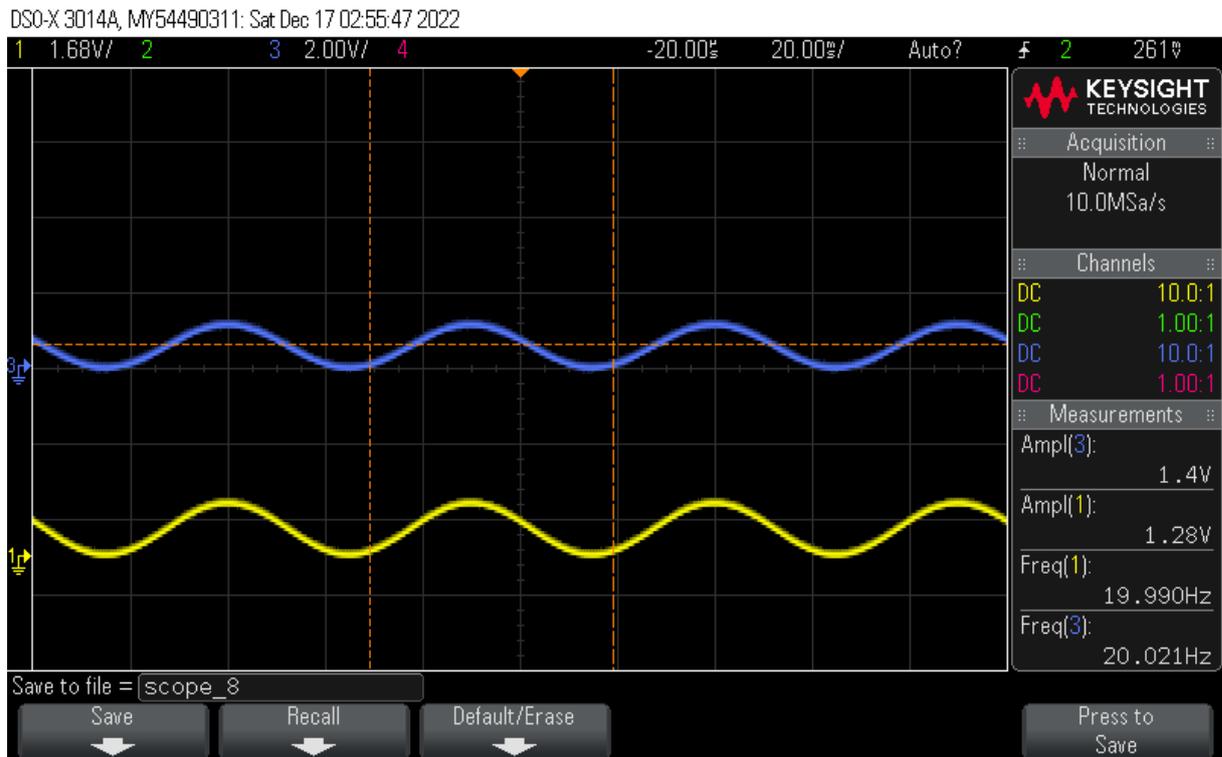
O primeiro teste é o de amplificação de sinais analógicos, pois esse teste não necessita de nenhum sinal do microcontrolador, basta avaliar a resposta dos sensores. Ao invés de utilizar o sensor de pressão, que não entregaria sinais interessantes por não estar com todo o sistema em funcionamento, foi utilizado um gerador de sinais para criar uma senoide e permitir visualizar o comportamento do sinal na prática, e o circuito utilizado foi com ganho de 0.5 vezes.

Para isso, os sinais foram comparados com a saída original do gerador de sinais, ou seja, um ponto de medição do osciloscópio permaneceu sempre conectado diretamente ao gerador. A segunda ponteira foi posicionada nos pontos: entrada de sinal da placa, após primeiro amplificador operacional e após segundo amplificador operacional. O sinal gerado foi uma senoide de 20 Hz e 1.3 V de amplitude, e pode ser sempre identificado pela cor amarela.

A Figura 33 compara o sinal quando chega à placa, seu valor de amplitude difere em 120 mV do original e a frequência permanece aproximadamente a mesma. Após a aplicação do ganho no primeiro amplificador operacional o sinal aparece defasado em 180° na Figura 34. Além disso é possível perceber que a amplitude difere da esperada, a qual deveria reduzir pela metade, ou seja, como entram 1.4 V, 0.7 V eram esperados, entretanto o osciloscópio registra 0.8 V. Isso não afeta o funcionamento do sistema, mas deve ser investigado para versões futuras da ECU.

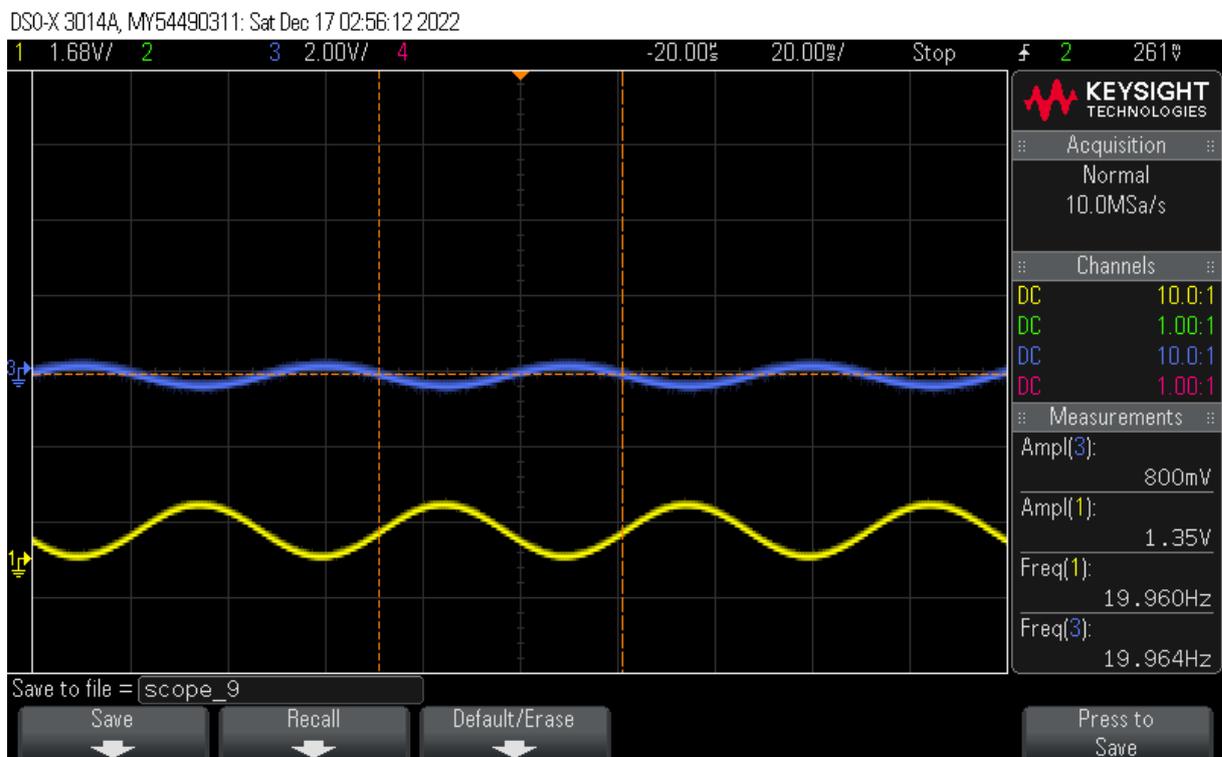
Após a nova inversão de fase introduzida pelo segundo amplificador operacional, o sinal se encontra em fase novamente com o sinal original, sua amplitude se manteve em 0.8 V com frequência também sem alterações significativas. Como mencionado, o circuito onde os testes foram aplicados a princípio não possuem sensor associado, o mesmo teste foi feito então para o canal do sensor de pressão com ganho de 0.25 e resultado na Figura 35. Por último o próprio sensor de nível foi utilizado para o seu teste, onde seu circuito tem ganho de 0.5, seu resultado se encontra na Figura 36.

Figura 33 – Sinal antes do amplificador operacional.



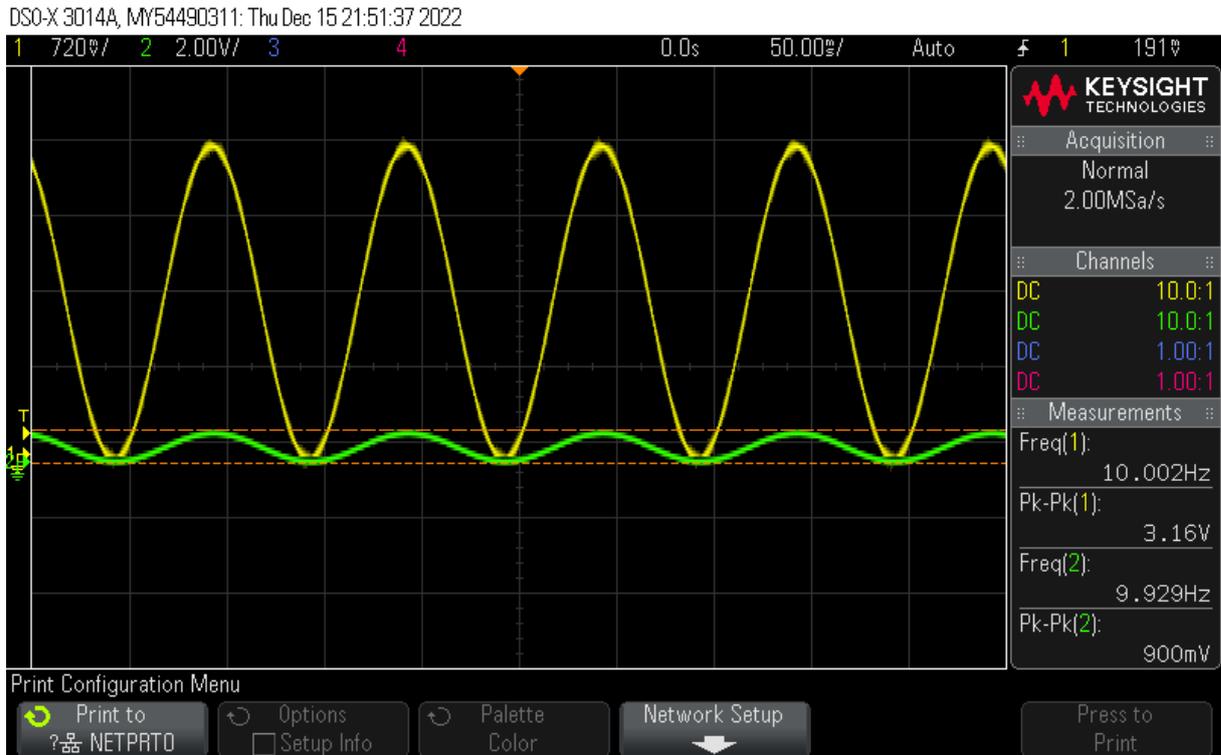
Fonte: Autor (2023).

Figura 34 – Sinal após o primeiro amplificador operacional.



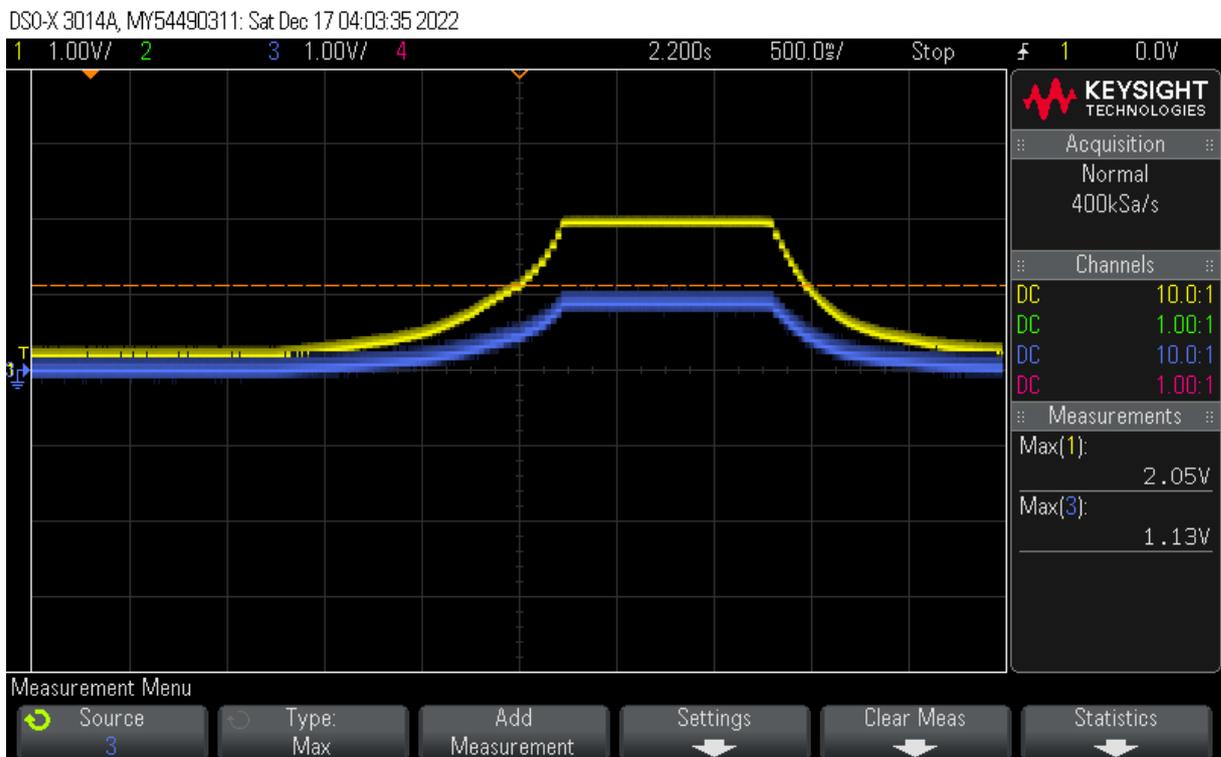
Fonte: Autor (2023).

Figura 35 – Sinal condicionado no circuito do sensor de pressão.



Fonte: Autor (2023).

Figura 36 – Sinal condicionado do sensor de nível.



Fonte: Autor (2023).

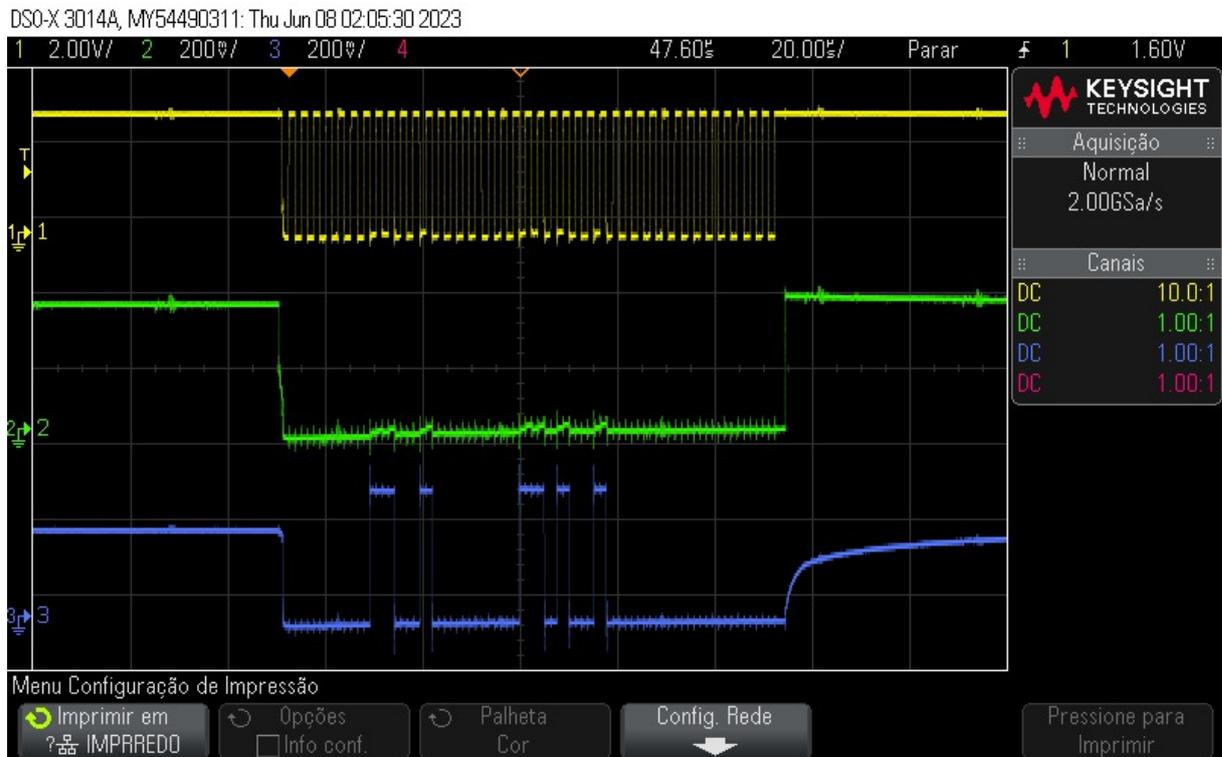
O sensor de nível teve sua boia levantada e abaixada durante a realização do teste. Em todas as respostas registradas com o osciloscópio é possível perceber que o sinal na saída do circuito sempre está 100 mV acima do que deveria. Apesar desse fato e dos erros de projeto, o circuito demonstra que é capaz de condicionar os sinais de sensores analógicos quaisquer, o que cumpre os requisitos RF13 e RNF26 com sucesso.

6.3.2 Circuito de condicionamento dos termopares

Para que os termopares sejam condicionados, eles necessitam da comunicação com o microcontrolador. O CI responsável deve receber sinais de *clock* e de *chip select* para então entrar em operação. O microcontrolador foi programado pelo Laboratório de Combustão e Catalise Aplicadas (2023) gerando os sinais da Figura 37.

Nessa figura é possível perceber que alguns instantes após o *clock* se iniciar, sinal em amarelo, e o nível do *chip select* cair, sinal em verde, o sinal de saída do escravo se inicia, gerando uma sequência de bits que devem ser interpretados pelo microcontrolador e traduzidos para temperatura, exatamente como descrito no *datasheet* (MAXIM INTEGRATED, 2015a).

Figura 37 – Sinais da comunicação SPI entre microcontrolador e MAX31855.

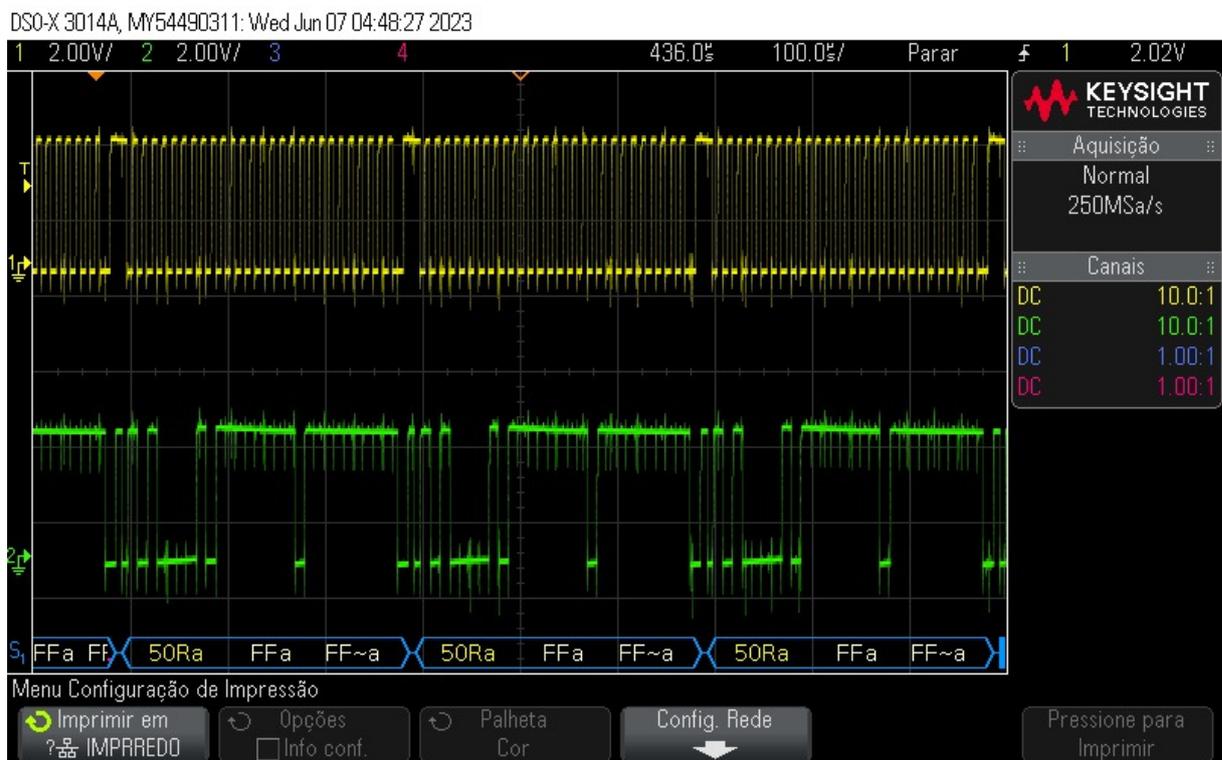


Fonte: Laboratório de Combustão e Catalise Aplicadas (2023).

6.3.3 Leitura de sensores de pressão diferencial

Esses sensores estão localizados em placas de circuito impresso próprias e possuem conexões que fazem sua alimentação e comunicação com o microcontrolador principal. Como o protocolo utilizado é o I2C, a ECU foi programada para gerar o sinal de clock e fazer a leitura dos dados (LABORATORIO DE COMBUSTAO E CATALISE APLICADAS, 2023). Esses sinais são apresentados na Figura 38.

Figura 38 – Sinais da comunicação I2C entre microcontrolador e sensores de pressão diferencial.



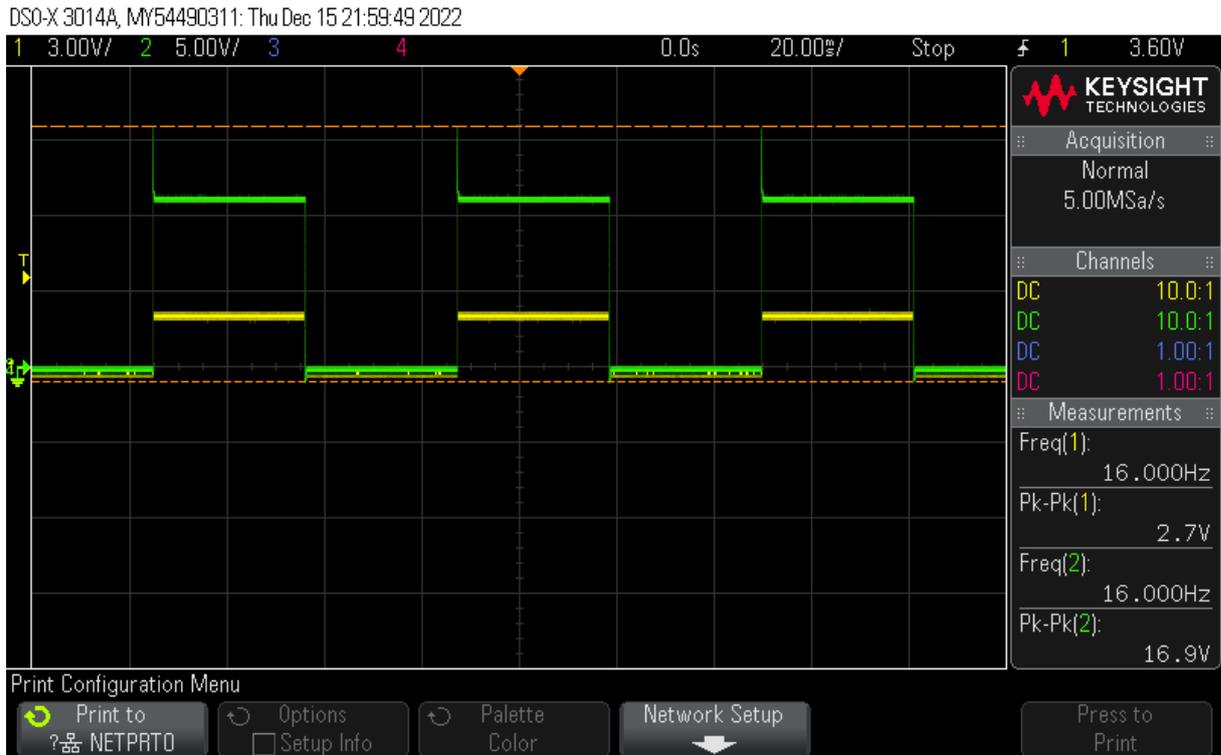
Fonte: Laboratorio de Combustao e Catalise Aplicadas (2023).

6.3.4 Circuitos de controle de atuadores DC

Começando pelos atuadores que são controlados por potência, foi utilizado o bico injetor por se tratar de um atuador menor e mais fácil de manipular. Um terminal desse atuador foi conectado diretamente à fonte de 12V e o outro no conector de controle da placa, este que tem conexão direta com a fonte do MOSFET. Um sinal PWM com frequência de 16 Hz foi gerado, e a primeira conferência foi entre o sinal gerado e o sinal que sai do optoacoplador, podendo ser conferidos na Figura 39.

Dando continuidade ao teste, uma abordagem que permite obter mais informações sobre o funcionamento do bico injetor é analisar o comportamento da corrente quando ele é ativado. Isso pode ser realizado ao criar um divisor de tensão com resistores de potência, medir a queda de tensão e essa vai ser proporcional à

Figura 39 – Sinal de controle dos atuadores DC.



Fonte: Autor (2023).

corrente. Uma combinação de resistores em paralelo foi utilizada, que gerou 0.831Ω , a queda de tensão pode ser observada na Figura 40 em rosa.

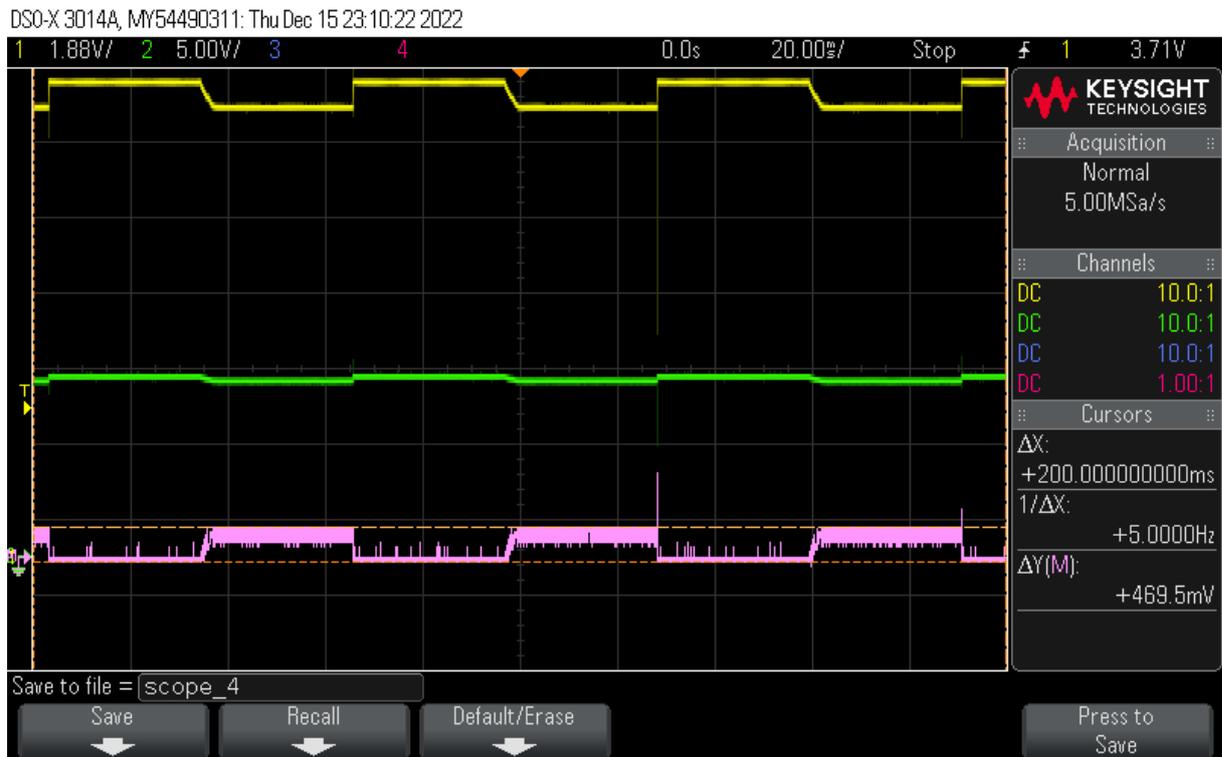
A resposta do sinal apresentado representa o consumo de corrente, a amplitude é calculada na Equação 11. É possível perceber um estado transitório de alguns milissegundos que representa a abertura da válvula, após isso a válvula é mantida aberta consumindo corrente. Esse comportamento está completamente dentro do esperado e apresentado por Więclawski et al. (2022). O que comprova o funcionamento desse circuito e cumprimento dos requisitos RNF17 e RNF22.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0.4695}{0.831} = 0.565 \text{ A} \quad (11)$$

Para analisar o circuito de controle por sinal o soprador foi utilizado. A fonte de alimentação de 24 V e o circuito de controle do atuador foram conectados ao pino de alimentação e controle do soprador respectivamente. As pontes do osciloscópio foram dispostas para verificar o sinal de controle e o sinal de resposta do atuador. A Figura 41 demonstra o início de operação do soprador que acontece em aproximadamente 23% de duty cycle. O sinal de controle está em azul e o sinal de resposta em verde, nota-se que a frequência da resposta é de 275.03 Hz.

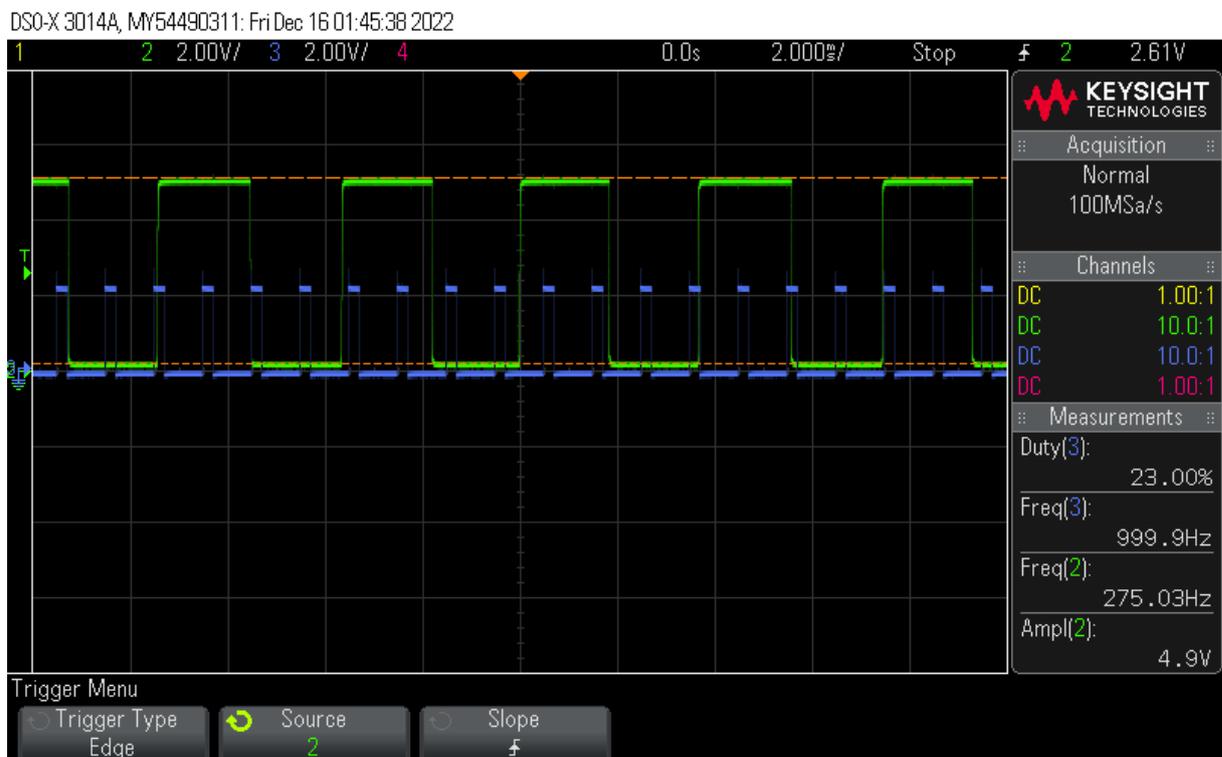
Na Figura 42 o *duty cycle* é aumentado para 30% e o aumento de ruído sonoro

Figura 40 – Sinal de controle do bico injetor.



Fonte: Autor (2023).

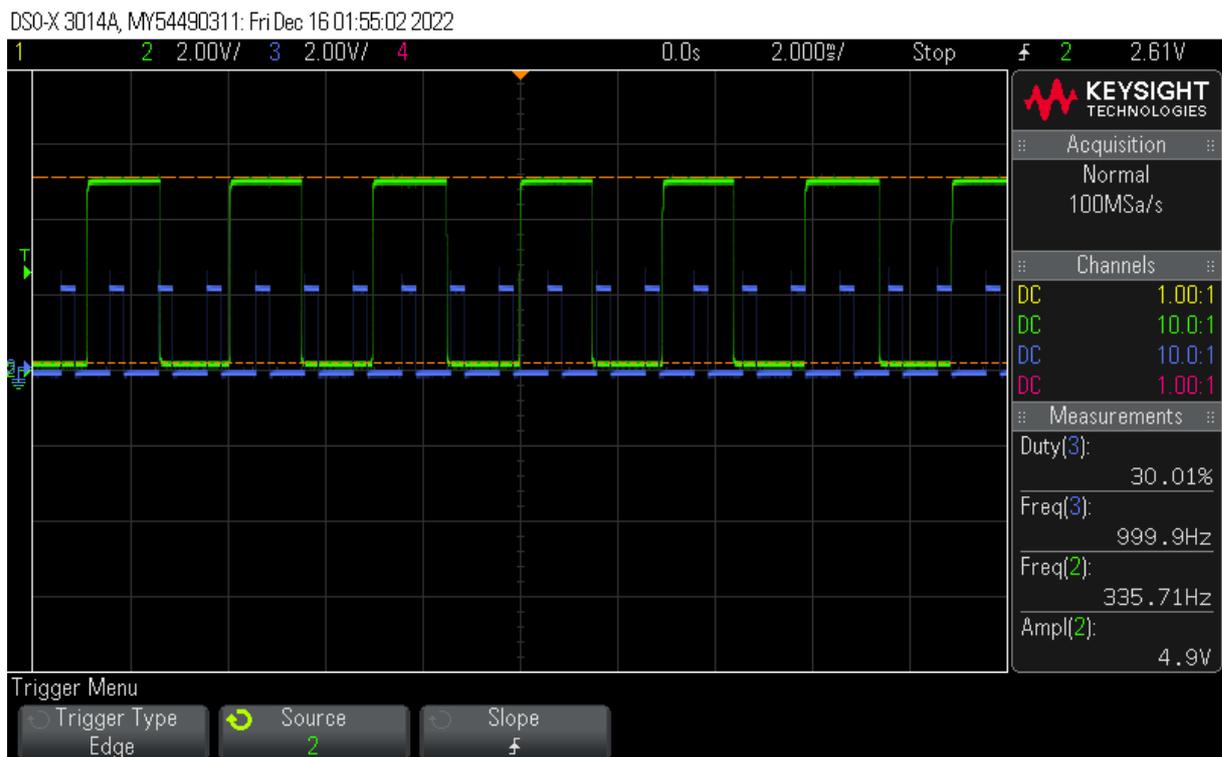
Figura 41 – Sinal de controle e resposta do soprador.



Fonte: Autor (2023).

do soprador indica que a velocidade está maior. Por meio do *datasheet* do soprador (DOMEL, 2023), nota-se que a velocidade pode ser calculada diretamente a partir da frequência, o que corrobora também com o aumento da frequência de resposta para 375.71 Hz. Portanto, conclui-se que o circuito para controle de atuadores por sinal é funcional e atende ao requisito RNF23.

Figura 42 – Sinal de controle e resposta do soprador.



Fonte: Autor (2023).

6.3.5 Circuitos de controle de atuadores AC

Devido às limitações de tempo, não foi possível registrar os sinais gerados durante o controle de dispositivos AC. O circuito projetado foi testado e colocado em funcionamento com sucesso para controlar a intensidade de uma lâmpada pelo Laboratório de Combustão e Catalise Aplicadas (2023).

6.4 REVISÃO DO CUMPRIMENTO DOS REQUISITOS

Nas seções anteriores, alguns requisitos já foram indicados como atendidos ou não. Retomar os requisitos facilita a compreensão do desenvolvimento do sistema e do alinhamento ao que era esperado. Com esse intuito, decidiu-se por listar os requisitos que não foram cumpridos. Dessa maneira, os requisitos não citados nessa seção são considerados como atendidos.

6.4.1 Requisitos não funcionais de Sensores

- RNF9: A resolução do sensor de pressão de combustível deve ser de 0.01 bar; [NÃO ATENDIDO]
- RNF13: Um sensor de pressão diferencial para a linha de ar deve operar a 20 kPa e sua resolução deve ser de 10 Pa; [NÃO ATENDIDO]

6.4.2 Requisitos não funcionais de atuadores

- RNF16: As bombas devem ser compatíveis com etanol ou água; [NÃO ATENDIDO]

6.4.3 Requisitos não funcionais de alimentação

- RF20: A alimentação elétrica deve ser realizada por baterias automotivas; [FASE FINAL DO PROJETO]

6.4.4 Requisitos não funcionais de eletrônica

- RNF30: As técnicas de condicionamento e CIs escolhidos devem garantir a resolução indicada para os sensores; [NÃO ATENDIDO]

7 CONCLUSÕES

Automatizar um sistema de reforma de etanol para produção de hidrogênio, onde existem muitas variáveis a serem controladas, requer a criteriosa especificação de um grande número de elementos que atendam exatamente o que é esperado, bem como o projeto eletrônico de uma ECU responsável por integrar e permitir a comunicação entre todos esses componentes.

Diante disso, o levantamento de requisitos foi essencial para organização dos passos e alinhamento entre usuário e desenvolvedor. Durante todas as etapas do projeto eles foram revisados para que a execução não se distanciasse do planejado. Ao final dos testes, a verificação dos requisitos foi realizada, onde constatou-se que todos requisitos funcionais foram cumpridos e apenas quatro requisitos não funcionais não foram atendidos.

A realização de testes abrangentes foi fundamental para a confirmação de funcionamento da placa e identificação de possíveis falhas. Todos os sinais ficaram muito próximos do que é documentado nos *datasheets* dos fabricantes. E todos os elementos especificados responderam perfeitamente aos comandos da ECU, demonstrando também sucesso no projeto dos circuitos eletrônicos.

Os requisitos que não foram cumpridos se deram na etapa de especificação, onde a disponibilidade de componentes que fossem totalmente alinhados ao que era solicitado foi o fator de maior impacto. As escolhas do CI de condicionamento dos termopares, o sensor de pressão e pressão diferencial, fizeram com que as resoluções de temperatura e pressão não fossem atendidas e a bomba de combustível automotiva não é compatível com água, e portanto está mais sujeita à oxidação.

Apesar de não entregar os requisitos RNF9, RNF13, RNF16 E RNF30, os RF foram todos cumpridos e a ECU se mostrou capaz de controlar todos os atuadores necessários e coletar os dados solicitados, além disso permite flexibilidade para que novos sensores e atuadores sejam adicionados ao sistema. Tudo isso enquanto a maior parte de seus componentes são de uso automotivo e a eletrônica garante a proteção e isolamento entre os circuitos.

Com base nisso, conclui-se que o projeto foi bem sucedido e poderá ser colocado em uso para automatizar o sistema proposto. A abordagem apresentada inicialmente para o desenvolvimento foi seguida criteriosamente e garantiu que o trabalho permanecesse dentro de seu planejamento. O usuário final pode utilizar a ECU e os elementos sensores e atuadores para sensorear e controlar o sistema.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

As melhorias triviais são em relação aos trabalhos extras realizados para adaptar a placa nos locais onde houve erro de projeto, isso ocorre no circuito de condicionamento de sinais analógicos. Estes devem ser projetados novamente e uma nova placa contendo as correções deve ser impressa.

Buscando aprimorar a ECU, os conectores projetados não são fáceis de usar e poderiam ser melhorados, principalmente porque cada sensor ou atuador possui um tipo de conexão específica e os conectores foram utilizados de maneira genérica, isso requer adaptações extras, portanto conectores específicos ou algum conector genérico mais otimizado poderia ser utilizado em uma nova versão da ECU.

Na placa, algumas descrições de componentes não foram impressas, o que dificultou no momento da soldagem. Além disso, como possível melhora, a ECU poderia ser modularizada em ECUs menores com funções mais específicas, se aproximando mais de um sistema automotivo real.

Uma abordagem com múltiplas ECUs poderia trazer muitos benefícios como a facilitação da fase de layout, identificação simplificada de erros, monitoramento do consumo energético, separação de sensores e fontes de ruído e robustez devido ao maior isolamento entre os circuitos.

Por último, caso os elementos que não cumpriram seus requisitos não funcionais sejam avaliados pelo usuário como insatisfatórios, uma nova busca por elementos que se adequem melhor ao sistema deve ser efetuada, para então garantir que todos os requisitos originais sejam de fato cumpridos.

REFERÊNCIAS

ADVANCED CIRCUITS. **PCB Trace Width Calculator**. 2018. Disponível em: <https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>. Acesso em: 10 mai. 2014.

AGUIRRE, L. A. **Fundamentos de Instrumentação**. 1. ed. Minas Gerais: Pearson, 2013.

ALAM, M. S. U. **Securing vehicle Electronic Control Unit (ECU) communications and stored data**. Tese (Doutorado) — Queen's University, Canada, 2018.

ARAS, V. P. Design of electronic control unit (ecu) for automobiles-electronic engine management system. In: INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY BOMBAY. Mumbai, 2005.

ARDUINO. Itália, 2023. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 25 mai. 2023.

AVL LIST GMBH. **AVL Home**. Áustria, 2023. Disponível em: <https://www.avl.com/en>. Acesso em: 27 abr. 2023.

AZIZ, P. M.; SILVSORENSEN, H. V.; SPIEGEL, J. V. d. An overview of sigma-delta converters: How a 1-bit adc achieves more than 16-bit resolution. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 13, n. 1, p. 61–84, 1996.

BALAT, M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 15, p. 4013–4029, 2008. ISSN 0360-3199. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908005272>.

BMW. **The Internation BMW Website**. Munique, 2023. Disponível em: <https://www.bmw.com/en/index.html>. Acesso em: 07 mai. 2023.

BOSCH. **Bombas de combustível**. Campinas, 2019. Disponível em: https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country_specific/br/downloads_19/pdf_9/catlogo_bombas_combustvel_2019.pdf. Acesso em: 09 mai. 2023.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Electornic Devices and Circuit Theory**. 5. ed. United States: Prentice-Hall, 1992.

CARNEIRO, F. S. P. **Projeto e desenvolvimento de um sistema de controle eletrônico de injeção direta de GNV em veículos movidos a gasolina/álcool**. Brasília, 2011. 123 p.

CARVALHO, T. C. O. **Desenvolvimento de uma central eletrônica aberta para controle de motores de combustão interna**. Belo Horizonte, 2005. 159 p.

CORDING, S. **Why Do MOSFETs Need Drivers?** 2022. Disponível em: <https://www.elektormagazine.com/articles/why-do-mosfets-need-drivers#:~:text=Using>. Acesso em: 10 mai. 2014.

CUNHA, L. **Padrões Brasileiros**. 2010. Disponível em: https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/memoria_fevereiro_10.pdf. Acesso em: 25 mai. 2023.

DARJAT, D. et al. Experimental set-up design of sofc single cell performance using simple furnace with maximum temperature of 1000 degrees. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 1, n. 2, p. 68–76, 2020.

DELUGA, G. A. et al. Renewable hydrogen from ethanol by autothermal reforming. **Science**, v. 303, n. 5660, p. 993–997, 2004. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1093045>.

DENSO CORPORATION. **DENSO Develops Advanced Driver Assistance Products for New Lexus LS, Toyota Mirai**. Japão, 2021. Disponível em: <https://www.denso.com/global/en/news/newsroom/2021/20210409-g01/>. Acesso em: 27 abr. 2023.

DHANADRAVYE, A. D.; THORAT, S. S. A review on implementation of uart using different techniques. **International Journal of Computer Science and Information Technologies**, v. 5, p. 394–396, 2014.

DOMEL. **Brushless blower/pump**. Eslovênia, 2023. Disponível em: <https://app.domel.com/blowersearch/Home/Details/04054c21-6e1b-4b04-b669-601737759062>. Acesso em: 09 mai. 2023.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U**: Datasheet. Xangai, 2022. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf. Acesso em: 02 out. 2022.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac driver Output**. 2000. Disponível em: <https://www.farnell.com/datasheets/97984.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2014.

FAN, L.; TU, Z.; CHAN, S. H. Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. **Energy Reports**, v. 7, p. 8421–8446, 2021.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. Massachusetts: McGraw-Hill, 2014.

FIUZA, R. d. P. et al. A utilização de etanol em célula a combustível de óxido sólido. **Química Nova**, v. 35, n. 8, p. 1635–1643, 2012.

FRENZEL, L. E. Chapter three - selecting an appropriate interface. In: FRENZEL, L. E. (Ed.). **Handbook of Serial Communications Interfaces**. Oxford: Newnes, 2016. p. 29–31. ISBN 978-0-12-800629-0. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128006290000036>.

GAO, N. et al. Steam reforming of biomass tar for hydrogen production over nio/ceramic foam catalyst. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 25, p. 7983–7990, 2015. ISSN 0360-3199. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915009386>.

GOEBEL, S. et al. Fast starting fuel processor for automotive fuel cell systems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 30, n. 9, p. 953–962, 2005. ISSN 0360-3199. Fuel Cells. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319905000200>.

HANABUSA, R. **Comparing JTAG, SPI, and I2C**. Munique, 2007. Disponível em: https://www.unife.it/ing/Im.infoauto/sistemi-elaborazione/dispense/comparing_serial_interfaces_an_01_e.pdf. Acesso em: 23 abr. 2022.

HART, D. W. **Power electronics**. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 9780073380674.

HARYANTO, A. et al. Current status of hydrogen production techniques by steam reforming of ethanol: A review. **Energy and Fuels**, v. 19, n. 6, p. 2098–2106, 2005.

HIRSCH, R. L.; BEZDEK, R.; WENDLING, R. Chapter 2 - peaking of world oil production and its mitigation. In: SPERLING, D.; CANNON, J. S. (Ed.). **Driving Climate Change**. Burlington: Academic Press, 2007. p. 9–27. ISBN 978-0-12-369495-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123694959500038>.

HOU, T. et al. Hydrogen production from ethanol reforming: Catalysts and reaction mechanism. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 132–148, 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010752>.

HYUNDAI MOTOR COMPANY. **Hyundai NEXO: how does Fuel Cell work?** Japan, 2018. Disponível em: <https://www.hyundai.news/eu/articles/stories/hyundai-nexo-how-does-fuel-cell-work.html>. Acesso em: 27 abr. 2023.

INFINEON TECHNOLOGIES AG. **User Manual AURIX lite kit V2**: Datasheet. Munich, 2022. Disponível em: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AURIX_TC375_lite_Kit-UserManual-v02_20-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7cdc391c017ce5193b575bd6. Acesso em: 5 out. 2023.

INFINEON TECHNOLOGIES AG. **AURIX Microcontroller Boards**. Alemanha, 2023. Disponível em: <https://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/AURIX-microcontroller-boards/low-cost-arduino-kits/aurix-tc375-lite-kit/>. Acesso em: 5 main. 2023.

INTERNATIONAL RECTIFIER. **IRFZ44NPbF**. 2010. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon_IRFZ44N_DataSheet_v01_01_EN-3166504.pdf. Acesso em: 10 mai. 2023.

KICAD. **A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite**. 2023. Disponível em: <https://www.kicad.org/>. Acesso em: 09 mai. 2023.

KOHONEN, A. **Further development of a fuel cell - electrolyser test bed and developing a microcontroller-based control system for it**. 98 p. Dissertação (Master's thesis) — Aalto University, 2011.

LABORATORIO DE COMBUSTAO E CATALISE APLICADAS. **Laboratório de Combustão e Catálise Aplicadas**. Joinville-Brasil, 2023. Disponível em: <https://lacpdi.ufsc.br/>. Acesso em: 24 mai. 2023.

LATHI, B. P. **Modern Digital and Analog Communication Systems 3e Osece**. 3rd. ed. USA: Oxford University Press, Inc., 1998. ISBN 0195110099.

LI, T. et al. Montmorillonite-supported ni nanoparticles for efficient hydrogen production from ethanol steam reforming. **Fuel**, v. 143, p. 55–62, 2015. ISSN 0016-2361. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236114011296>.

LINEAR TECHNOLOGY. **1.5A Low Dropout Positive Regulators Adjustable and Fixed 2.85V, 3.3V, 3.6V, 5V, 12V**. 1988. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1086ffs.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2014.

LINEAR TECHNOLOGY. **80MHz, 25V/ μ s Low Power Rail-to-Rail Input and Output Precision Op Amp**. 2009. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1800fa.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2023.

MAGUIRE, M. **RESPECT: User centred requirements handbook**. Reino Unido, 1998. Disponível em: <https://hdl.handle.net/2134/2651>. Acesso em: 15 mai. 2022.

MAHMOOD, A.; JAVAID, N.; RAZZAQ, S. A review of wireless communications for smart grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 248–260, 2015.

MARTIN, S.; WORNER, A. On-board reforming of biodiesel and bioethanol for high temperature pem fuel cells: Comparison of autothermal reforming and steam reforming. **Journal of Power Sources**, v. 196, n. 6, p. 3163–3171, 2011. ISSN 0378-7753. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775310020914>.

MAXIM INTEGRATED. **CMOS Monolithic Voltage Converter**. 1996. Disponível em: <https://br.mouser.com/datasheet/2/609/MAX660-3130665.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2014.

MAXIM INTEGRATED. **Precision, Micropower, Low-Dropout Voltage References**. 2010. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/609/MAX6190_MAX6198-3130658.pdf. Acesso em: 15 mai. 2014.

MAXIM INTEGRATED. **Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter**. 2015. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max31855.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2023.

MAXIM INTEGRATED. **Precision Thermocouple to Digital Converter with Linearization**. 2015. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX31856.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2023.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. Comparative study of different fuel cell technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 981–989, 2012.

MICROCHIP. **1.5A Dual High-Speed Power MOSFET Drivers**. 2010. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/268/MCHPS05667_1-2520852.pdf. Acesso em: 10 mai. 2014.

MONOT, A. et al. Multisource software on multicore automotive ecus—combining runnable sequencing with task scheduling. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 10, p. 3934–3942, 2012.

MTE-THOMSON. **Sensor MAF**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.mte-thomson.com.br/produtosmte/sensor-maf/>. Acesso em: 05 mai. 2023.

NATIONAL INSTRUMENTS CORP. EUA, 2023. Disponível em: <https://www.ni.com/de-de.html>. Acesso em: 25 mai. 2023.

NISSAN MOTOR CO. **A fuel cell system that generates electricity from bioethanol to power a vehicle**. 2016. Disponível em: https://www.nissan-global.com/EN/INNOVATION/TECHNOLOGY/ARCHIVE/E_BIO_FUEL_CELL/. Acesso em: 27 abr. 2023.

ODG INSTRUMENTS. **Sensor Eletrônico de Pressão**: Manual de instruções. Minas Gerais, 2021. Disponível em: https://www.odg.ind.br/manuais/man_sensor_pressao_inox_12BAR.pdf. Acesso em: 5 out. 2023.

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 5th. ed. USA: Prentice Hall, 2010.

POPOVCHENKO, M. **Introduction to Mechatronics and Mechatronics in Real Life**. St Petersburg, 2006. Disponível em: <https://wwwmayr.in.tum.de/konferenzen/Jass06/courses/5/Papers/Popovchenko.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2023.

RABENSTEIN, G.; HACKER, V. Hydrogen for fuel cells from ethanol by steam-reforming, partial-oxidation and combined auto-thermal reforming: A thermodynamic analysis. **Journal of Power Sources**, v. 185, n. 2, p. 1293–1304, 2008.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic Circuits**. 5. ed. New York: Oxford University Press, 2004.

SLOVINSKI, V. et al. Análise de requisitos e modelagem de hw/sw para um sistema sofc com base em etanol. **Anais do XXIX Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva**, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 191–200, 2022. ISSN 2357-7592.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS131M06 6-Channel, Simultaneously-Sampling, 24-Bit, Delta-Sigma ADC**. 2020. Disponível em: <https://www.ti.com/general/docs/suppproductinfo.tsp?distId=26&gotoUrl=https://www.ti.com/lit/gpn/ads131m06>. Acesso em: 10 mai. 2023.

TOSHIBA ELECTRONIC DEVICES AND STORAGE CORPORATION. **Basic Knowledge of Discrete Semiconductor Device**. Singapura, 2022. Disponível em: https://toshiba.semicon-storage.com/content/dam/toshiba-ss-v3/master/en/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/discrete-basic-chap3_en.pdf. Acesso em: 23 abr. 2023.

TOYOTA. **Mirai**. USA, 2023. Disponível em: https://www.toyota.com/mirai/2023/features/mpg_other_price/3002/3003. Acesso em: 27 abr. 2023.

URNS, S. T. **An Introduction to combustion**. 3th. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

VOELCKER, J. **Hydrogen Fuel-Cell Vehicles: Everything You Need to Know**. Joinville-Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.caranddriver.com/features/a41103863/hydrogen-cars-fcev/>. Acesso em: 24 mai. 2023.

WALLER, M. G. **Development of an Integrated Reformer and Fuel Cell System for Portable Power Applications**. Nova York, 2016. 195 p.

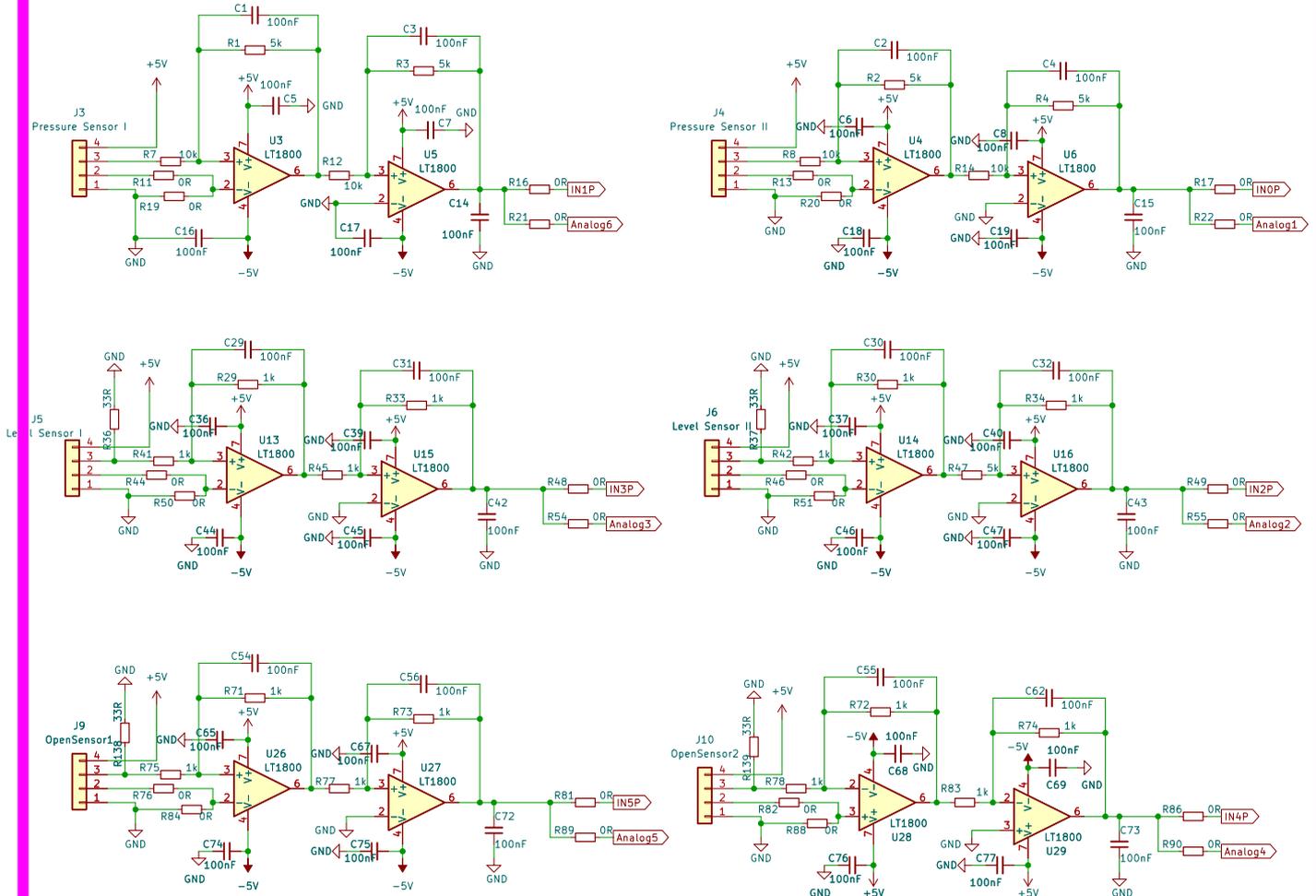
WANG, J. feng et al. Boiling temperature measurement for water, methanol, ethanol and their binary mixtures in the presence of a hydrochloric or acetic salt of mono-, di- or tri-ethanolamine at 101.3 kpa. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, v. 41, n. 2, p. 167–170, 2009. ISSN 0021-9614. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021961408002450>.

WlęCłAWSKI, K. et al. Method of fuel injector diagnosis based on analysis of current quantities. **Sensors**, v. 22, n. 18, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/6735>.

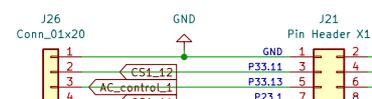
YU, X. et al. Suitability of energy sources for automotive application – a review. **Applied Energy**, v. 271, p. 115169, 2020.

APÊNDICE A - ESQUEMÁTICO COMPLETO

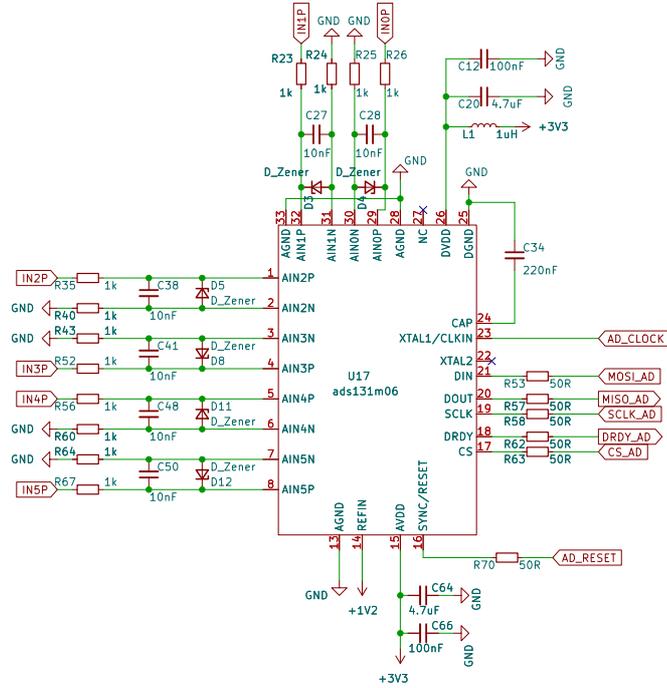
Amp Ops



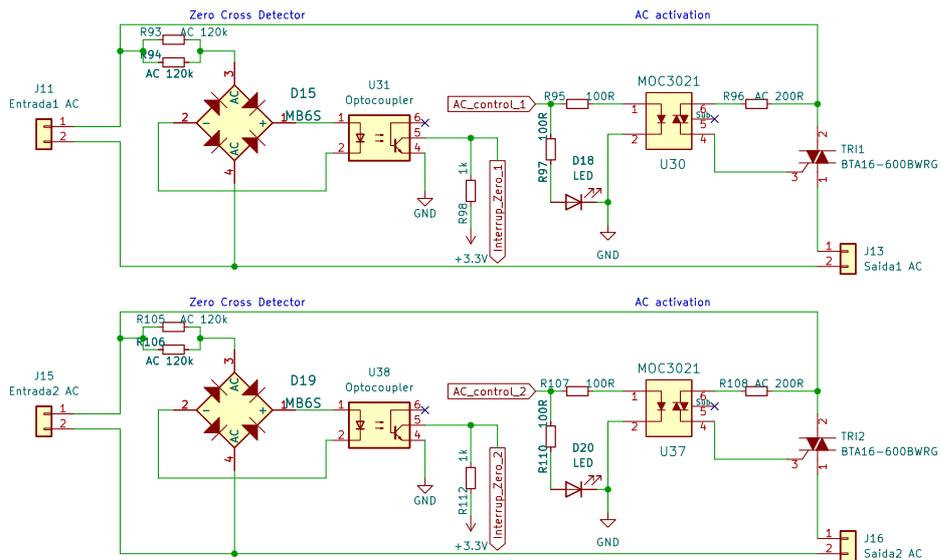
Sensores



AD Externo

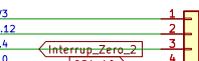


Controle AC



Microcontroladores

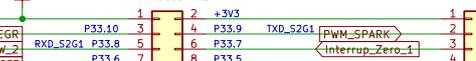
AURIX TC375



J28
Conn_01x20



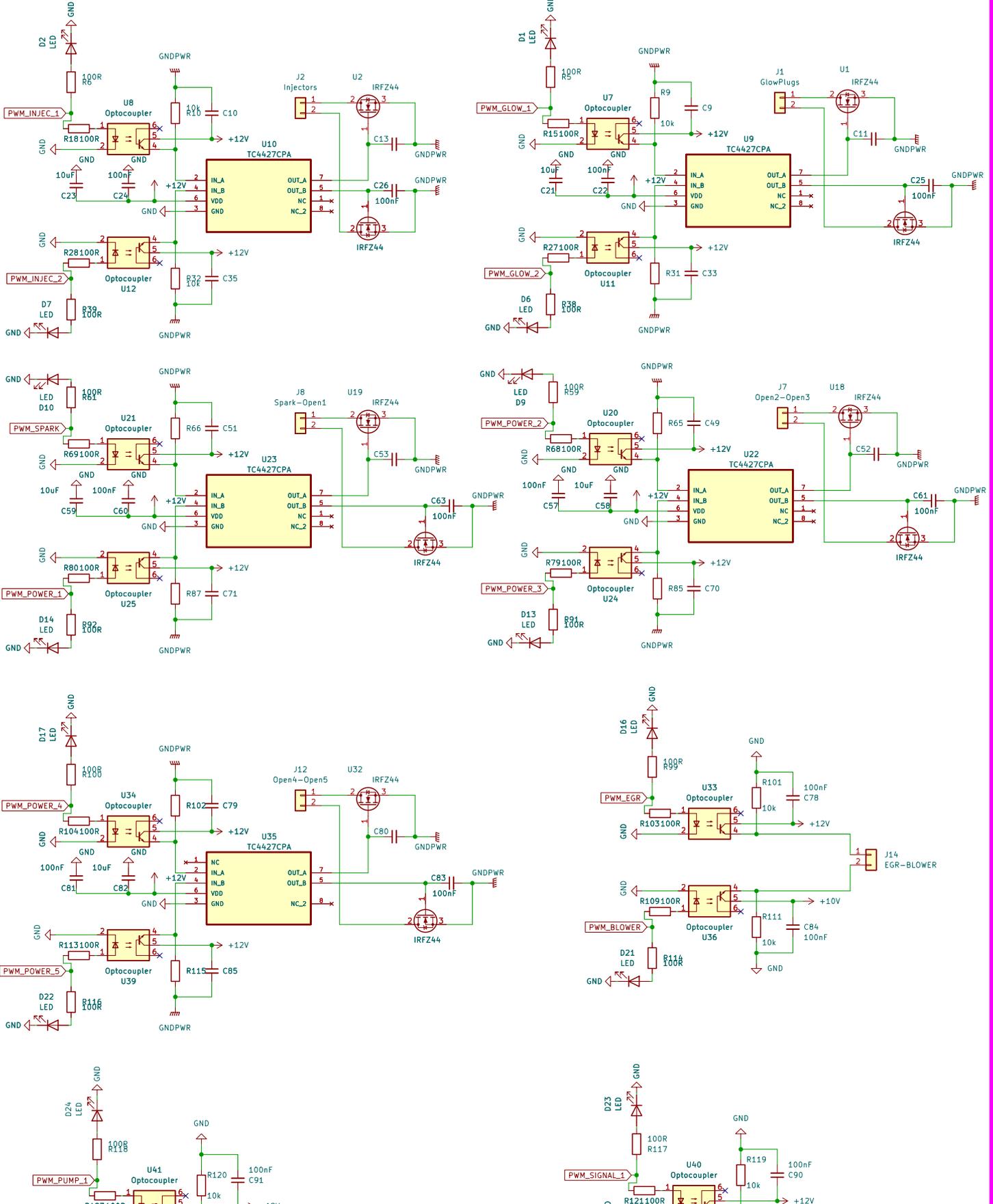
J22
Pin Header X2

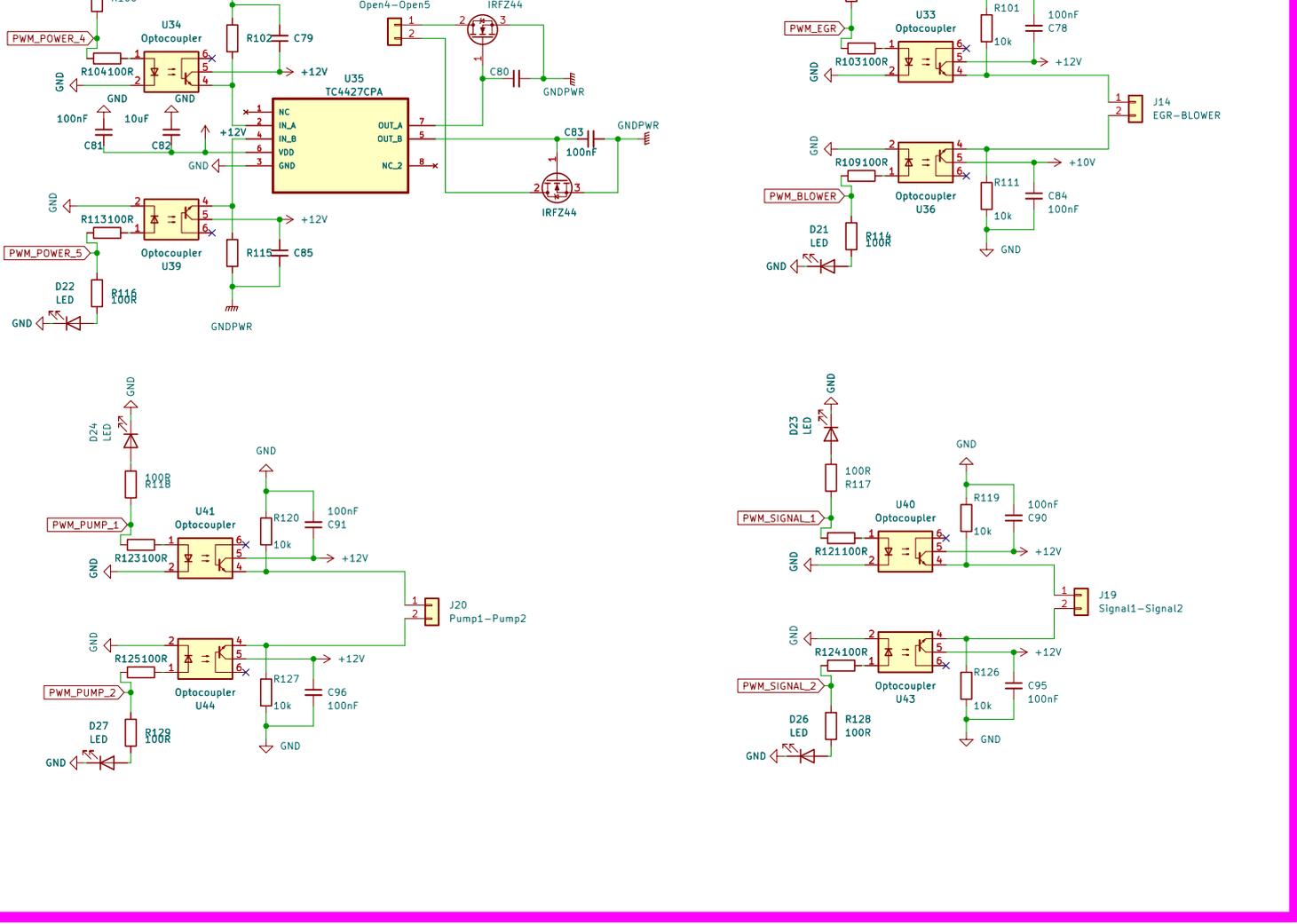


ESP32 S2 Wrover
0.5 A minimum



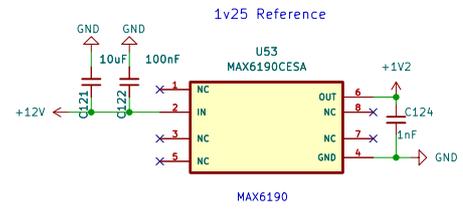
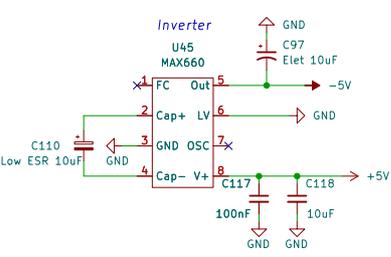
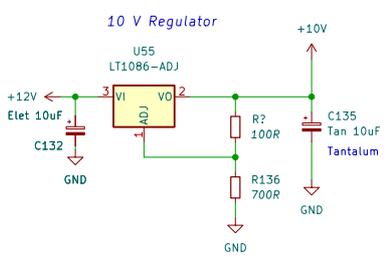
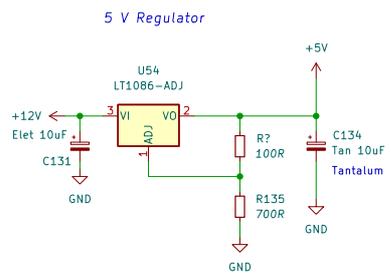
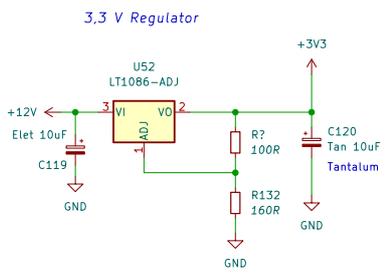
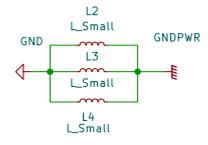
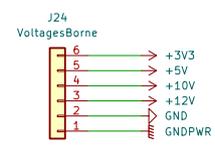
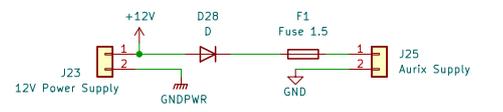
Drivers PWM DC



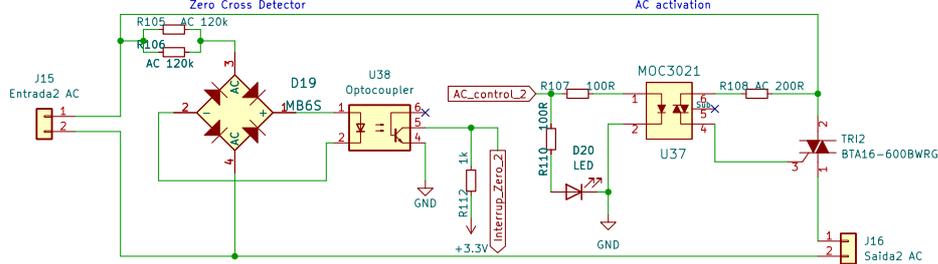


Reguladores de Tensão

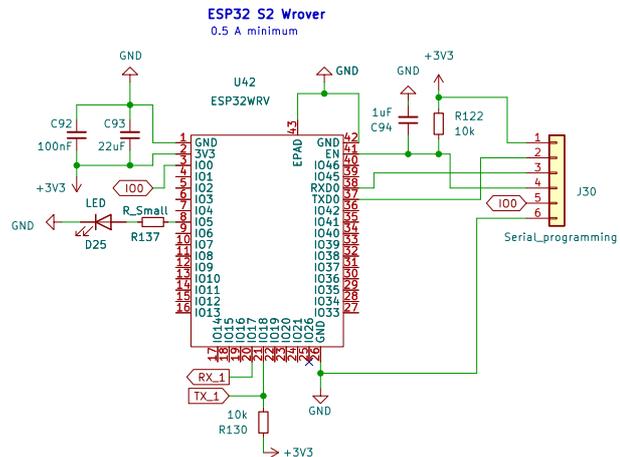
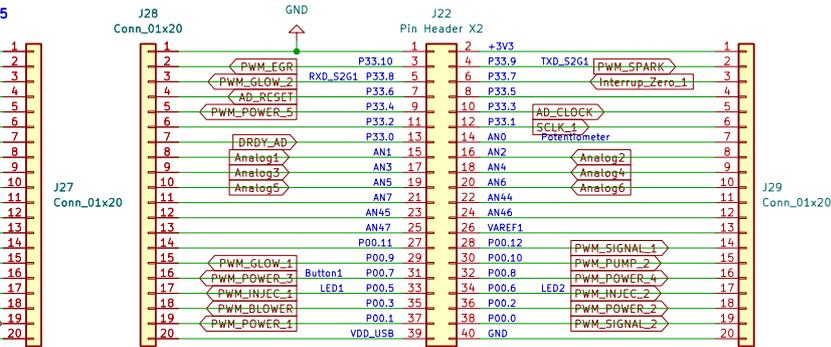
Ok



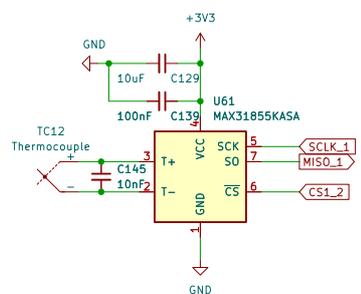
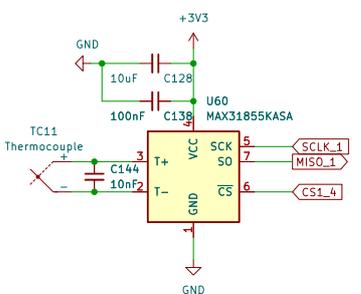
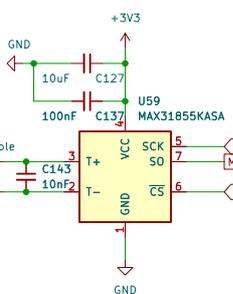
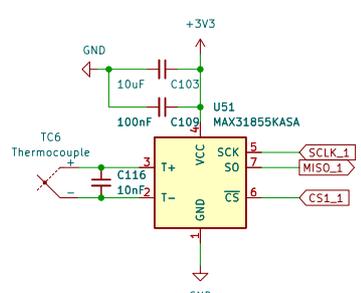
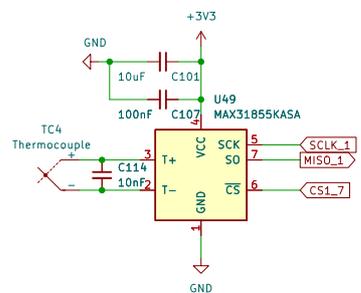
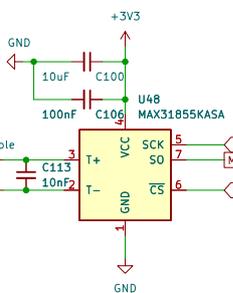
Sheet: /	File: inteiroFinal_6.kicad_sch	
Title: Esquemático Circuito Reformador		
Size: A1	Date:	Rev:
KiCad E.D.A. eeschema 6.0.11-2627ca5db0-126-ubuntu20.04.1		Id: 1/1



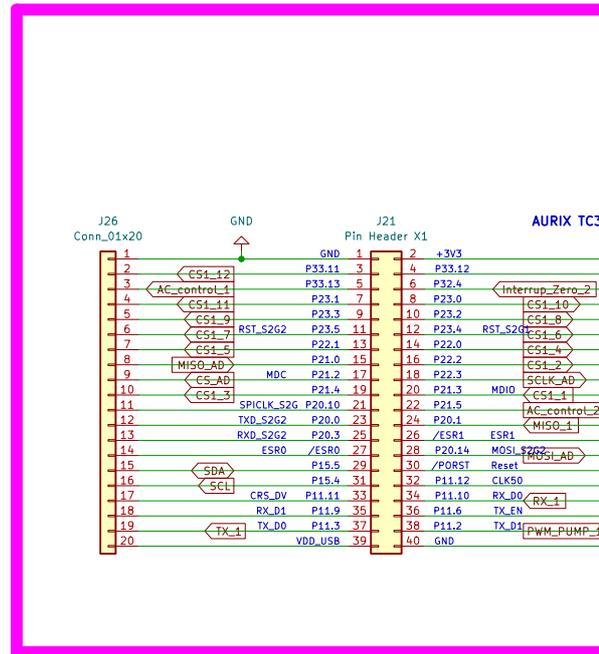
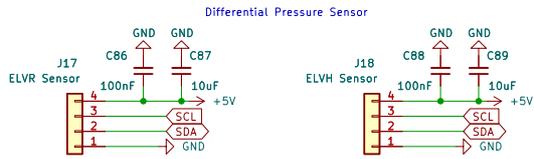
Microcontroladores



S



Sensores



Termopares

