



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO EM ENGENHARIA FÍSICA



# Desenvolvimento de um Dispositivo para Monitoramento Doméstico de Gás GLP

*Autor: Augusto Gilmar Antunes Althoff*

*Orientador: Milton Andre Tumelero*

Porto Alegre, 23 de fevereiro de 2024



## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela oportunidade de cursar Engenharia Física em uma universidade tão renomada e de altíssimo nível como a UFRGS.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Gilmar e Verônica, por todo o apoio que tive ao longo da vida, me educando para ser uma boa pessoa, e sempre me incentivando a estudar e a me dedicar com a promessa que os frutos seriam colhidos. Além disso, gostaria de agradecer o companherismo e apoio dos meus irmãos, Joyce e Gustavo, que me mantiveram no foco e serviram de forma fundamental para que as etapas mais difíceis pudessem ser superadas.

Também gostaria de agradecer ao meu professor-orientador Milton Tumelero de quem tive o prazer de ser aluno em duas oportunidades. Neste projeto, foi uma satisfação de ser orientado por um profissional tão qualificado e um ser humano incrível.

Adicionalmente, desejo expressar meu agradecimento aos colegas que acompanharam-me ao longo desta jornada universitária, especialmente aos meus amigos Andreia Molling, Eduardo Godoy, Filipe Barros, Francisco Trindade, Lianna Zagonel e Mario Kist. Essas pessoas foram fundamentais para aprimorar meus conhecimentos e compartilhar as adversidades enfrentadas durante o curso.

Por fim, gostaria de desejar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma para a elaboração deste trabalho e para todo o meu percurso na graduação.

## **Resumo**

A crescente busca por mecanismo de segurança residencial e a gestão eficiente do consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP), popularmente conhecido como "gás de cozinha", mostra-se uma grande oportunidade para a elaboração de dispositivos inovadores. A falta de sistemas eficazes de monitoramento e controle desse insumo é notada pelo mercado atual. Diante desse cenário, o presente trabalho pretende surgir como uma resposta proativa a suprir parte dessa necessidade de garantir a segurança e otimizar a utilização do uso do GLP nas residências. Para isso, foi desenvolvido um dispositivo que se destaca pela capacidade de monitorar em tempo real a quantidade disponível de combustível, além de alertar quando ela estiver próxima do seu fim. A implementação prática envolveu a escolha de uma célula de carga adequada, projeção de estruturas e a integração com um microprocessador que, com a devida programação, é capaz de fornecer informações detalhadas sobre o estado do botijão. Além de oferecer um monitoramento eficaz, o dispositivo proposto foi idealizado com o objetivo de oferecer fácil adaptação para diferentes modelos de botijões de GLP utilizados em residências. Portanto, este trabalho contribui para aumentar o nível de segurança dos moradores em relação ao uso e ao monitoramento do nível de gás em botijões. Com isso, construiu-se um dispositivo para preencher uma lacuna no mercado e proporcionar maior tranquilidade aos usuários em relação ao consumo seguro de gás GLP evitando possíveis vazamentos e interrupções indesejadas.

## Lista de Figuras

1	Composição química do gás GLP . . . . .	6
2	Estrutura de um botijão P-13 . . . . .	7
3	Modelo de transdutor . . . . .	8
4	Interação de domínios de energia . . . . .	9
5	Strain gauge . . . . .	9
6	Ponte de Wheatstone . . . . .	11
7	Força aplicada nos strain gauges . . . . .	12
8	Disco externo projetado no <i>software</i> Solid Edge . . . . .	13
9	Disco interno projetado no <i>software</i> Solid Edge . . . . .	13
10	Projeto montado . . . . .	14
11	Vista frontal do projeto . . . . .	14
12	Jetgauge . . . . .	15
13	Usuário utilizando o Jetgauge . . . . .	15
14	Indicador de quantidade de gás por temperatura. . . . .	16
15	Indicador de quantidade de gás por ondas eletromagnéticas - marca Thincke . . . . .	16
16	Indicador de quantidade de gás por ondas eletromagnéticas - marca Truma (2024). . . . .	17
17	Disco Interno . . . . .	18
18	Verso do Disco Interno . . . . .	19
19	Disco Externo . . . . .	19
20	Célula de carga . . . . .	21
21	Dimensões da célula de carga . . . . .	21
22	HX711 . . . . .	22
23	ESP32 . . . . .	23
24	Ligação em Paralelo das Células de Carga . . . . .	24
25	Simulação . . . . .	25
26	Montagem . . . . .	26
27	Teste Célula de Carga . . . . .	27
28	Teste com uma Garrafa com 2,0 kg . . . . .	28
29	Calibração com os corpos de prova . . . . .	28
30	Gráfico da Tara definida pelo Peso Medido . . . . .	29
31	Botijão Vazio . . . . .	30
32	Teste do dispositivo sem massa . . . . .	30
33	Teste do dispositivo com uma massa levemente inferior a 5 kg . . . . .	31
34	Teste do dispositivo com uma massa superior a 5 kg . . . . .	31
35	Teste de variação . . . . .	32
36	Gráfico da medições durante o teste 3 . . . . .	32

## **Lista de Tabelas**

1	Tipos de embalagens para GLP . . . . .	8
2	Especificações técnicas do sensor. . . . .	20
3	Correspondência entre cores dos fios, ligações e pinos do módulo HX711 . . . . .	24
4	Correspondência entre pinos do módulo HX711, cores dos fios e pinos do ESP32 . . . . .	25
5	Precificação do projeto . . . . .	33

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

CEPAL	Comissão Econômica para América Latina e Caribe. 2
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão. 5
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo. 2
IoT	Internet das Coisas. 2

## **Lista de Símbolos**

$\Delta L$	Deformação. 9
$\Delta R$	Varição da Resistência. 10
$\epsilon$	Deformação Relativa. 10
$\rho$	Constante de Proporcionalidade. 10
$A$	Área. 10
$F$	Força. 9
$L$	Comprimento. 10
$R$	Resistência. 10
$k$	Fator de Transdução. 10

## Sumário

<b>Agradecimentos</b>	<b>i</b>
<b>Resumo</b>	<b>ii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>vi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2 Problema</b>	<b>4</b>
2.1 Objetivo geral . . . . .	4
2.2 Objetivos específicos . . . . .	4
<b>3 Metodologia</b>	<b>5</b>
3.1 Gás liquefeito de petróleo . . . . .	5
3.2 Solução Proposta . . . . .	8
3.3 Estrutura física proposta . . . . .	12
3.4 Pesquisa de mercado . . . . .	14
<b>4 Resultados</b>	<b>18</b>
4.1 Componentes . . . . .	18
4.1.1 Discos . . . . .	18
4.1.2 Célula de carga . . . . .	19
4.1.3 HX771 . . . . .	22
4.1.4 ESP32 . . . . .	22
4.2 Montagem . . . . .	24
4.3 Aquisição . . . . .	26
4.4 Calibração . . . . .	27
4.5 Testes . . . . .	29
4.6 Precificação . . . . .	33
<b>5 Análise e conclusão</b>	<b>34</b>
<b>6 Perspectivas de melhorias para estudos posteriores</b>	<b>35</b>

---

<b>7</b>	<b>Apêndice</b>	<b>36</b>
7.1	Código para calibração da tara . . . . .	36
7.2	Código para fazer as medições . . . . .	38
7.3	Código para Aquisição e Calibração . . . . .	40
<b>8</b>	<b>Referências</b>	<b>42</b>

# 1 Introdução

A segurança residencial é um tema de extrema importância na sociedade moderna e que vem ganhando cada vez mais destaque nas feiras de tecnologia e inovação ao redor do mundo, além de ter se tornado um mercado com um altíssimo potencial de receita. Um dos aspectos cruciais para garantir o bem-estar dos usuários em geral é o uso seguro do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), popularmente chamado de "gás de cozinha" ou simplesmente "gás".

O gás de cozinha, desempenhando um papel central na vida doméstica, surge como elemento de suma importância em meio à evolução tecnológica constante e à crescente procura por dispositivos que aumentem a segurança de residências. Segundo dados da Comissão Econômica para América Latina e Caribe (CEPAL), 95,9% da população brasileira tem acesso ao gás para uso doméstico, e em outros países da América Latina como Argentina, Chile e Uruguai já há acesso universal a essa fonte energética. Por isso, em feiras de tecnologia e inovação - seja no Brasil ou ao redor do mundo - esse tema tem atraído diversas empresas em busca de soluções, visto que a demanda por parte das pessoas aumenta e o número de dispositivos interconectados também com o avanço de sistemas baseados na Internet das Coisas (IoT). Nesse sentido, a possibilidade de se obter altos ganhos financeiros com esses equipamentos que visam garantir a segurança dos usuários torna-os atrativos para as grandes empresas com o avanço da demanda tanto de pessoas quanto do número de dispositivos interconectados.

No dia a dia, a presença do GLP não se limita ao uso exclusivo nas cozinhas, para a preparação de alimentos. Ele também encontra aplicação em diversos outros contextos, como em sistemas de aquecimento, incluindo calefação e para aquecimento de água, desempenhando um papel essencial para o conforto térmico humano. No entanto, é importante reconhecer que a gestão segura desse recurso é tão essencial quanto sua praticidade. Assim, o estudo e a implementação de práticas seguras relacionadas ao uso do GLP se revelam medidas cruciais para garantir a tranquilidade e a segurança nas residências.

Apesar de toda a importância atribuída aos lares em todo o Brasil e ao redor do mundo, é notável a falta de mecanismos eficazes para monitorar o nível de gás em botijões. Essa ausência se manifesta devido a diversos fatores, entre os quais se destaca a dificuldade de mensurar as variações de pressão do gás contido no recipiente. No interior do botijão, apresenta-se um equilíbrio entre as fases líquida e gasosa, resultando em uma pressão que se mantém relativamente constante nesse sistema. Esse equilíbrio dificulta a identificação das oscilações na pressão do gás.

Diante desse cenário, medir de forma direta a variação de pressão do gás se demonstra como uma alternativa inviável para a avaliação da quantidade de combustível disponível. A constância na pressão interna do botijão impede que sejam detectados de forma eficaz as flutuações, tornando inacessível o desenvolvimento de métodos diretos de medição. Dessa maneira, a busca por alguma alternativa para a criação de um mecanismo eficaz para monitorar o nível de gás em botijões torna-se uma necessidade, exigindo soluções inovadoras e adaptadas à complexidade do sistema para garantir o fornecimento seguro e adequado de combustível aos lares.

---

Portanto, a ausência de um sistema de monitoramento eficaz pode resultar em situações potencialmente perigosas, tais como vazamentos não detectados ou interrupções inesperadas no fornecimento. Diante dessa preocupação, foi motivada a pesquisa e desenvolvimento deste projeto, cujo objetivo primário consiste em apresentar um dispositivo inovador capaz de informar o usuário quando o nível de combustível contido no botijão estiver próximo ao fim. Essa iniciativa surge como resposta à necessidade de mitigar riscos e aprimorar a segurança das residências, refletindo o comprometimento com a inovação e a prevenção em benefício do bem-estar e da tranquilidade dos usuários. No próximo capítulo, será discutido sobre o problema, no qual será descrito o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho. Já no terceiro capítulo, será apresentado a metodologia proposta para este estudo, detalhando informações sobre o gás GLP, como será executada a solução proposta assim como a montagem da estrutura e a pesquisa de mercado feita. O quarto capítulo apresentará os resultados, comentando sobre cada um dos componentes utilizados, a estrutura de montagem do sistema, como foi feita a aquisição e calibração, assim como os testes e a precificação do projeto. No quinto parágrafo, será apresentada uma breve análise e a conclusão do trabalho. Por fim, no sexto e último capítulo serão incluídas as perspectivas de melhoria para próximos trabalhos.

## **2 Problema**

### **2.1 Objetivo geral**

O propósito deste projeto consiste em desenvolver um dispositivo inovador e eficiente, cuja finalidade será informar ao usuário quando o nível de gás liquefeito de petróleo armazenado em um botijão de aço estiver em um nível próximo ao vazio. Dessa maneira é possível aprimorar significativamente a segurança, eficácia e praticidade no manuseio deste recipiente, o que, por consequência, contribuirá para a prevenção de possíveis riscos e promoverá tranquilidade no cotidiano dos usuários desse recurso.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os seguintes objetivos específicos serão cumpridos para se alcançar a meta geral:

- Escolher um sensor capaz de medir o peso do recipiente de GLP e calcular a massa do produto;
- Criar um sistema integrado com os sensores escolhidos, realizando testes de sensibilidade e linearidade individualmente e do sistema como um todo;
- Amplificar o sinal para melhorar a relação sinal-ruído e a precisão do instrumento;
- Conectar o sensor escolhido a um microcontrolador apto a adquirir os dados e fornecer energia ao sistema;
- Desenvolver um programa capaz de interpretar os sinais fornecidos pelos sensores;
- Calibrar os sensores e realizar os ajustes necessários para garantir respostas consistentes;
- Configurar três LEDs nas cores verde, amarelo e vermelho para informar ao usuário se o nível de combustível disponível está próximo ao vazio;
- Projetar uma estrutura capaz de suportar o peso de um botijão do tipo P13, proporcionando espaço adequado para os componentes eletrônicos e permitindo que o sensor realize suas medições.

### 3 Metodologia

Para concretizar este projeto, que tem como propósito criar um dispositivo capaz de monitorar a quantidade de combustível existente em um recipiente contendo gás GLP, faz-se necessário adotar a massa do combustível como o parâmetro central neste processo. Como mencionado anteriormente, a medição da pressão do gás torna-se inviável devido à complexidade de mensurar esse parâmetro.

Assim, criar um dispositivo que empregue a massa do combustível como base apresenta-se como a alternativa de maior viabilidade, tanto para monitorar tanto o consumo do gás quanto para alertar o usuário sobre a iminência de esgotamento do gás. Para propósito deste trabalho, o botijão de gás P-13, amplamente utilizado nas residências brasileiras, será adotado como referência. Todavia, o dispositivo concebido terá a flexibilidade de operar em qualquer outro recipiente de gás GLP, mantendo-se as premissas fundamentais e adaptando-se alguns parâmetros no código, nos componentes e na estrutura física do dispositivo.

#### 3.1 Gás liquefeito de petróleo

O gás liquefeito de petróleo (GLP) é um combustível fóssil obtido tanto durante a extração de petróleo e gás natural, como também pelo processo de refino do petróleo (Synák; Čulík; Rievaj; Gaňa, 2019). Trata-se de uma matriz energética amplamente empregada, por constituir uma solução versátil e eficaz, destacando-se pela sua utilidade como fonte de energia em residências, indústrias e em estabelecimentos comerciais, além de ser usada como combustível em alguns tipos específicos de veículos como, por exemplo, empilhadeiras. Atualmente, no Brasil, é proibido o uso de GLP em veículos no geral; porém, há estudos sendo realizados para encontrar uma forma segura de aplicar o gás nesse contexto.

A denominação GLP é atribuída ao combustível devido ao fato de que a substância, em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTTP), assume um estado gasoso. No entanto, por estar submetida a uma alta pressão, ela apresenta-se no estado líquido (MOREIRA, 2015). Essa transformação de fase é essencial para a eficiência do armazenamento do combustível, uma vez que, ao manter o composto em estado líquido, é possível guardar uma quantidade significativamente maior de massa, e consequentemente de energia. A explicação para isso é o fato de que a densidade média dos gases presentes no GLP é aproximadamente 260 vezes menor em comparação com a mesma substância no estado líquido. Portanto, ao manter o GLP em estado líquido, cria-se um armazenamento mais compacto e eficiente, contribuindo para a praticidade e a segurança na utilização desse recurso energético.

Segundo a Petrobrás, que é a principal produtora de GLP no Brasil, o gás de cozinha é composto majoritariamente pela mistura de hidrocarbonetos. Eles contêm de três a quatro átomos de carbono e que podem ser liquefeitos por resfriamento ou compressão. São eles: propano ( $C_3H_8$ ), propeno ( $C_3H_6$ ), butano ( $C_4H_{10}$ ) e buteno ( $C_4H_8$ ), que são gases derivados do petróleo. Porém, a própria

Petrobrás salienta que pequenas quantidades de outros hidrocarbonetos também podem estar presentes na mistura, como o etano e o pentano.

Os componentes fundamentais possuem elevado poder calorífico e juntos geram um composto com alta facilidade de queima no estado gasoso e com baixa geração de subprodutos indesejados como resíduos e fuligens, além de ser um combustível pouco poluente em relação ao carvão, por exemplo. Em sua forma natural, esse gás é incolor e inodoro (Kapusta; Kalašová, 2015). Entretanto, por questões de segurança, a Petrobrás adiciona um composto à base de enxofre - omercaptano, que é uma família de compostos orgânicos que contém um grupo sulfídrico SH - para odorizar a mistura e, assim, servir como um mecanismo de segurança. Por conseguinte, o usuário tem a possibilidade de detectar possíveis vazamentos de gás e, dessa maneira, evitar acidentes.

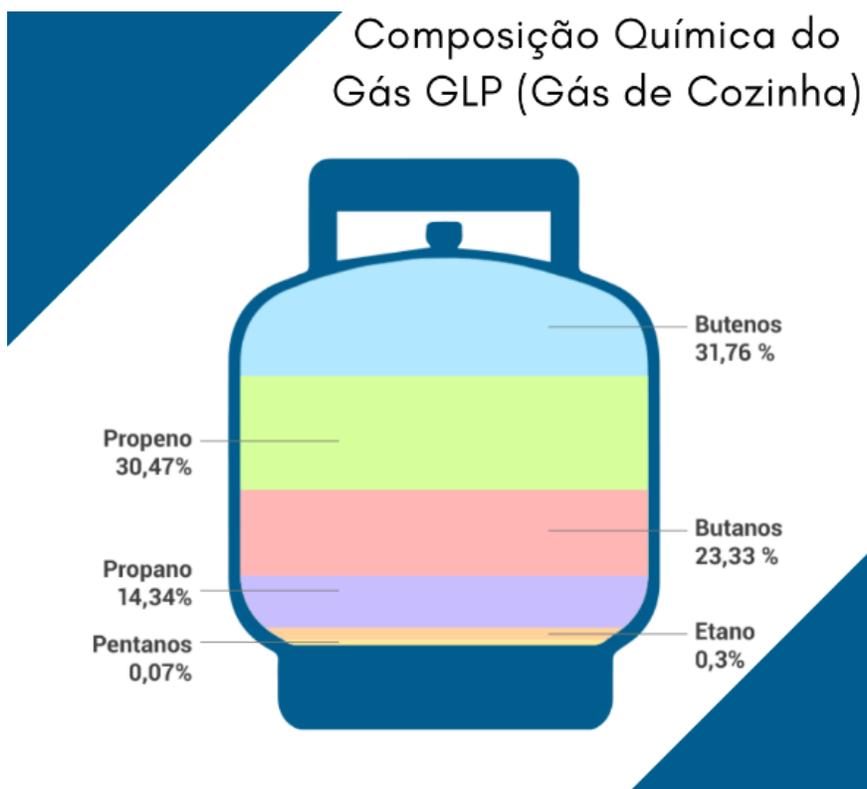


Figura 1: Composição química do gás GLP

Fonte: Adaptado de Rede Top Gás (2018)

O processo de fabricação do GLP começa com a obtenção dos gases. Eles podem ser oriundos tanto diretamente da extração do petróleo e do gás natural, ou também do processo de refino do petróleo (SYNÁK; Čulík; Rievaj; Gaňa, 2019). Após a obtenção, todos os gases são misturados e passam para etapa de dessulfurização. Essa etapa consiste em retirar da mistura compostos a base de enxofre, como o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) ou o gás sulfídrico ( $H_2S$ ) (Souza, 2002). Assim é possível efetuar a liquefação, processo este que pode ser executado tanto por resfriamento a baixas temperaturas como por compressão (SYNÁK; Čulík; Rievaj; Gaňa, 2019). É nessa etapa que seu volume diminui, e o que antes era gás agora torna-se líquido.

Após ser liquefeito, o líquido é armazenado em tanques de aço, como os populares botijões, em uma pressão de vapor de cerca de seis a oito atmosferas. No caso dos botijões, somente 85% de sua capacidade é preenchida pelo líquido, enquanto que o restante é resguardado para sua vaporização (GAS, 2013). Isso significa que à medida que o combustível é utilizado, a quantidade de volume ocupado pelo líquido diminui ao passo que o volume de gás aumenta, e assim o recipiente se mantém a uma pressão relativamente constante.

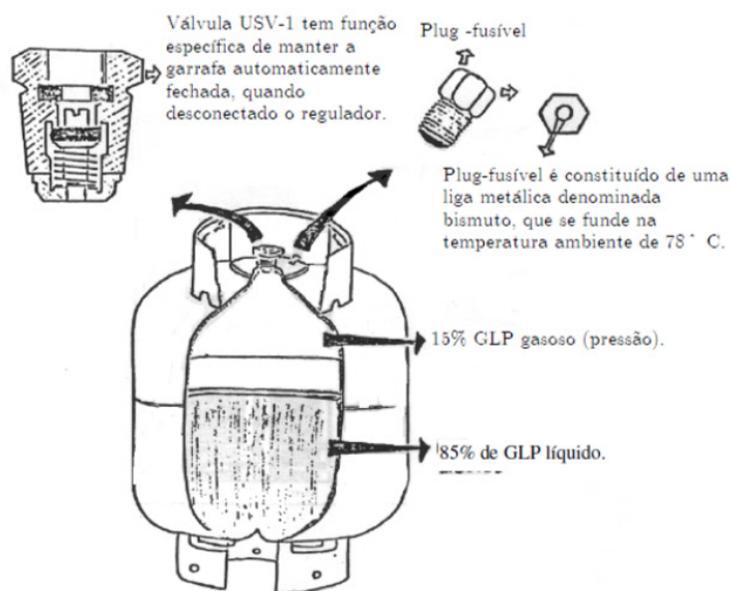


Figura 2: Estrutura de um botijão P-13

Fonte: Adaptado de Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (2019)

Os tanques que armazenam o gás são comercializados em diferentes tamanhos, conforme a sua aplicação, e variam entre 2 kg e 90 kg, segundo o manual de informações técnicas da Petrobrás. O nome do botijão é dado conforme a massa de GLP para a qual ele foi projetado para operar. Por exemplo, o botijão que suporta 7 kg é chamado de P-7. É importante destacar que a pressão interna dos botijões não varia conforme seu tamanho.

Tabela 1: Tipos de embalagens para GLP

Embalagem	Capacidade [kg]	Pressão interna [ $\text{kg}/\text{cm}^3$ ]	Aplicação
P-2	2	2 a 7	Camping e ambulantes
P-5	5	2 a 7	Camping e ambulantes
P-7	7	2 a 7	Uso residencial
P-8	8	2 a 7	Uso residencial
P-13	13	2 a 7	Uso Residencial
P-20	20	2 a 7	Empilhadeiras
P-45	45	2 a 7	Condomínios
P-90	90	2 a 7	Restaurantes

Fonte: Adaptado de Petrobrás (2022)

### 3.2 Solução Proposta

Para desenvolver um dispositivo capaz de calcular a massa de objetos, serão utilizados transdutores de força, chamados de célula de carga. Assim, realizaremos a medida de massa de forma indireta, mensurando o peso do objeto, para, então, conseguirmos calcular a sua massa. O transdutor deverá ter seu sinal amplificado e interpretado para detectar as variações de massa no objeto. Tudo isso organizado em uma estrutura física que comporte as medições e também garanta estabilidade e segurança para o sistema.

Fazendo uso da definição de Ilene Busch-Vishniac em seu livro *Electromechanical Sensors and Actuators* (1998): "We define a transducer as a multiport device in which the input impedance(s) is (are) not equal to the output impedance(s)". Portanto, a ideia que a autora apresenta é do transdutor como um dispositivo de múltiplas portas, cuja impedância sofre variação ao receber um estímulo.

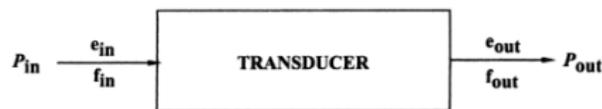


Figura 3: Modelo de transdutor

Fonte: *Electromechanical Sensors and Actuators* (1999)

A variação de transmitância estabeleceu o transdutor como um dispositivo internacionalmente reconhecido, sendo um excelente transformador de energia. Ele possui a capacidade de converter uma forma de energia de um domínio para outro domínio, além de realizar transformações dentro do mesmo domínio (Stefanescu, 2011). Um exemplo prático dessa versatilidade é a capacidade do transdutor de transformar energia mecânica em energia elétrica, tornando-o útil para medições e para sua aplicação como sensor.

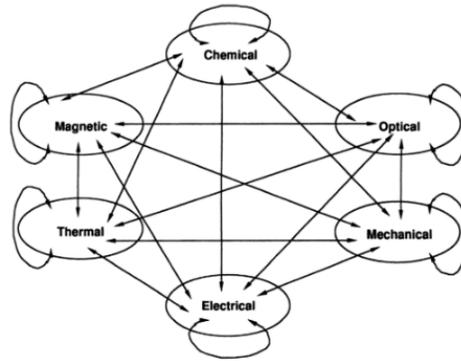


Figura 4: Interação de domínios de energia

Fonte: Electromechanical Sensors and Actuators (1999)

Para o escopo deste trabalho, será utilizado um equipamento que consegue receber um estímulo mecânico e entregar uma resposta elétrica proporcional àquele estímulo. Portanto, ao aplicarmos uma força, a tensão do dispositivo sofrerá variação. No caso das células de carga disponíveis no mercado, o tipo de medidor mais utilizado é o strain gauge (ou extensômetro).

O strain gauge é um dispositivo medidor de tensão mecânica que, ao sofrer uma variação na sua dimensão, varia a sua resistência elétrica (Andolfato; Camacho; Brito, 2004). Logo, ele consegue converter a força aplicada em um sinal elétrico que pode ser medido. Esses dispositivos são reconhecidos por apresentarem uma alta precisão, comportamento muito próximo ao linear, pequenas dimensões e pouca sensibilidade à temperatura.

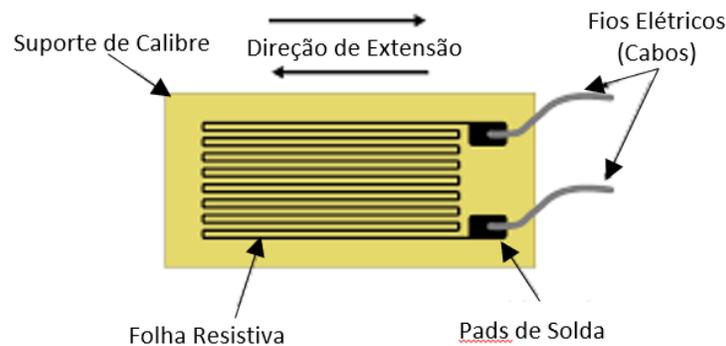


Figura 5: Strain gauge

Fonte: Adaptado de Michigan Scientific Corporation (2020).

Os strain gauges têm como fundamento a lei de Hooke, que estabelece que, quando um certo material é submetido à tração, a força  $F$  aplicada no material é diretamente proporcional à deformação  $\Delta L$  provocada na região afetada (Andolfato; Camacho; Brito, 2004). Essa afirmação

é válida até o momento que a tensão aplicada chega ao limite elástico, chamado de limite de proporcionalidade. Quando a tensão aplicada ultrapassa esse limite de proporcionalidade, o material pode começar a apresentar comportamento plástico, ou seja, deformações permanentes podem ocorrer.

$$F = k \cdot \Delta L, \quad (1)$$

A explicação de por que a resistência elétrica de um material se modifica com a sua deformação é apresentada na aplicação da segunda lei de Ohm. Essa lei postula que a resistência elétrica  $R$  de um material é diretamente proporcional à uma constante  $\rho$  e ao seu comprimento  $L$  e inversamente proporcional à sua área  $A$ . Dessa forma, podemos chegar à conclusão de que, ao sofrer deformação, os parâmetros espaciais do material também sofrem alterações, acarretando, portanto, em mudanças na sua resistência elétrica. A relação entre a tensão aplicada e a alteração relativa da resistência  $\Delta R$  é conhecida, e descrita pela equação 3, sendo  $k$  o fator de transdução e  $\epsilon$  a deformação relativa.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \epsilon, \quad \text{onde} \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

É importante ressaltar, porém, que utilizar somente um strain gauge de forma isolada pode ser uma tarefa complicada, visto que as variações de resistência elétrica são pequenas, e, sozinhas, são de difícil utilização. Para resolver esse problema são utilizados em geral quatro transdutores em um circuito chamado de Ponte de Wheatstone.

Assim como na Figura 7, a maioria das células de carga é configurada como a união de extensômetros em uma ponte de Wheatstone, incorporadas em um material metálico. A escolha desse metal desempenha um papel importantíssimo na determinação da escala de operação do sensor. O módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, é a grandeza que quantifica a capacidade do metal de se deformar elasticamente; portanto, a partir desse parâmetro, é possível estabelecer a capacidade da célula de carga de suportar uma determinada massa.

No contexto deste projeto, para o qual planeja-se empregar quatro transdutores, a escolha do metal e do módulo de elasticidade é importantíssima. A capacidade de carga da célula deve ser suficiente para resistir a 1/4 do peso total do botijão cheio de GLP, levando em consideração a distribuição igualitária da carga entre os quatro transdutores.

Utilizamos como exemplo a situação da Figura 7 retirada do artigo de Nachazel (2020) para a página da Michigan Scientific Corporation: no momento em que uma força vertical para baixo é

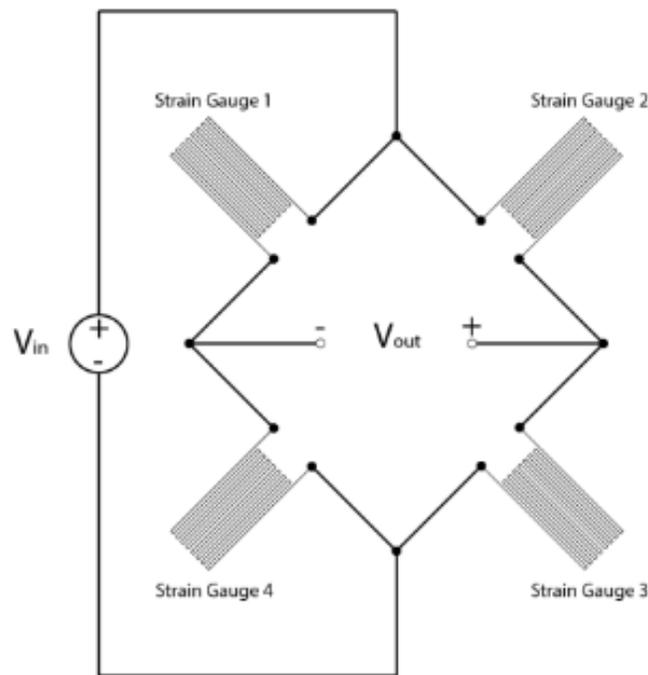


Figura 6: Ponte de Wheatstone

Fonte: Adaptado de Michigan Scientific Corporation (2020).

aplicada, os strain gauges superiores são tracionados, enquanto que os inferiores sofrem compressão. Essa situação causaria desequilíbrio nas resistências na ponte de Wheatstone, fazendo com que se criasse uma diferença de potencial elétrico entre os polos da ponte fosse criada.

No entanto, mesmo com a implementação da ponte de Wheatstone, o sinal transmitido de retorno ainda é muito baixo. Para contornar essa limitação, torna-se necessário integrar um amplificador ao circuito. Dessa forma, é possível captar esse sinal com eficácia e encaminhá-lo para processamento em um microprocessador. A função desse componente consiste em receber, processar e devolver o sinal, possibilitando, assim, fornecer ao usuário informações precisas sobre a quantidade de combustível disponível.

No processo de programação do microprocessador, um código será desenvolvido para delimitar os pontos de referência do gás, definindo o ponto mínimo (botijão vazio) e o ponto máximo (botijão cheio) para permitir a medição da quantidade de combustível disponível. Nessa fase, são necessárias etapas de calibração e a implementação de mecanismos para reduzir a influência de ruídos no sistema, como filtros. É relevante ressaltar que a alimentação do sistema será a base de baterias, mantendo assim o caráter portátil do dispositivo.

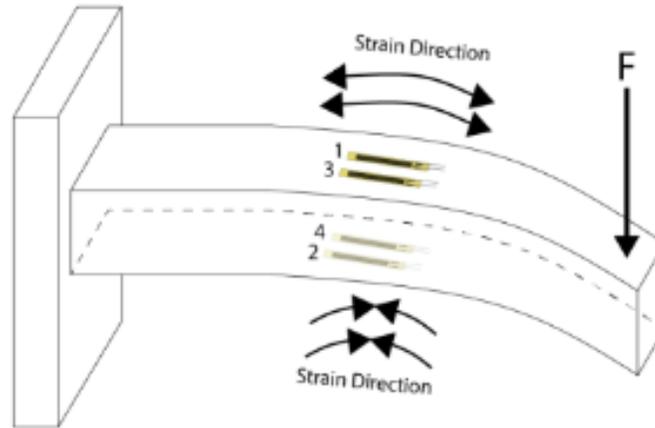


Figura 7: Força aplicada nos strain gauges

Fonte: Adaptado de Michigan Scientific Corporation (2020).

### 3.3 Estrutura física proposta

Para a estrutura física do dispositivo, planeja-se é desenvolver uma configuração que possa acomodar todos os recursos necessários e proporcionar suas respectivas funcionalidades de modo adequado. A proposta é utilizar dois discos de plástico, sendo o maior e mais externo denominado Disco\_ext e o menor e mais interno denominado Disco\_int utilizando-se do *software* Solid Edge, uma ferramenta consolidada de modelagem 3D.

O Disco\_ext, que tem como função suportar e estabilizar o botijão P-13, apresenta raio externo de 15 cm e raio interno de 11 cm, com espessura de 1 cm. Essas medidas foram selecionadas, porque o botijão de gás possui, em sua base, um raio de 14 cm. Adicionalmente, incorporemos quatro furos de 0,25 cm de raio, dispostos de maneira equidistante entre as bordas interna e externa, portanto centralizados a 2 cm das extremidades. O projeto contempla, ainda, uma proteção nas bordas, erguendo-se a 1 cm de altura com uma espessura de 0,2 cm. É importante ressaltar que a proteção está nas duas extremidades do disco, e tem como propósito evitar quedas acidentais do botijão.

O Disco\_int, por sua vez, será menor e totalmente sólido. Ele possui um raio de 8 cm, uma espessura de 1 cm e também contém os quatro furos distribuídos equitativamente. Os centros desses furos se localizam a 2 cm da extremidade externa do disco. Ademais, a peça possui uma estrutura central com 4 cm de raio e uma espessura de 0,5 cm, destinada a acomodar os componentes eletrônicos como o microprocessador e o amplificador. Logo, temos um desnível de 0,5 cm entre a parte externa do disco e sua região interna.

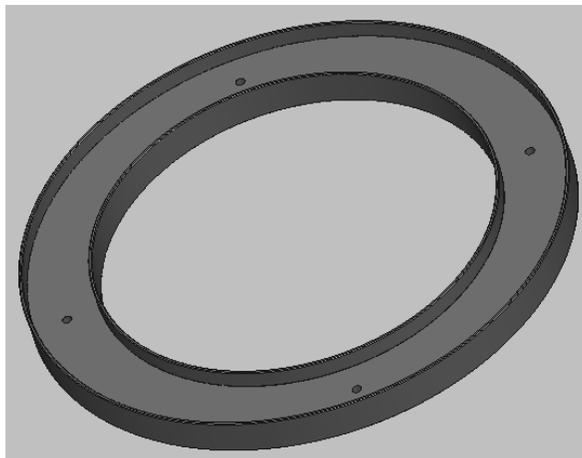


Figura 8: Disco externo projetado no *software* Solid Edge

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

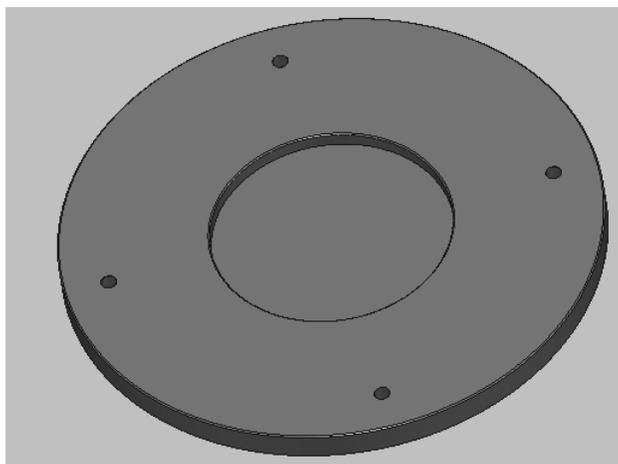
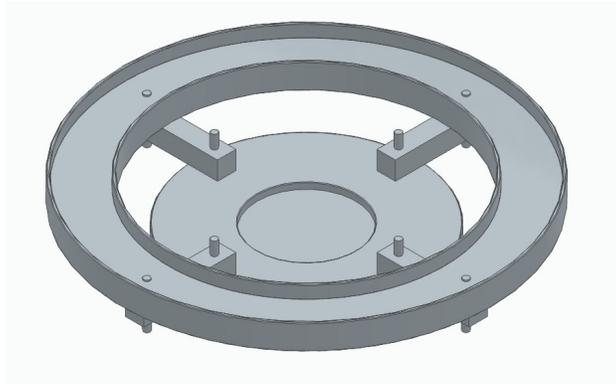


Figura 9: Disco interno projetado no *software* Solid Edge

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A interconexão entre os dois discos é realizada por meio das células de carga, conforme esquematizado nas figuras 10 e 11. Essa configuração garante a utilização segura das células de carga, mantendo a sua eficácia no monitoramento do nível de gás no botijão. Assim, o design do conjunto constitui um elemento-chave que garante o desempenho confiável e estável do dispositivo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 10: Projeto montado

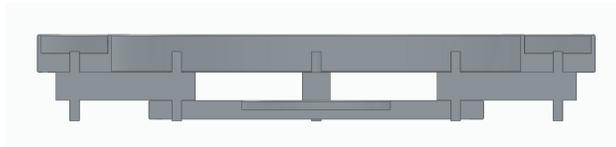


Figura 11: Vista frontal do projeto

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.4 Pesquisa de mercado

A análise do mercado pode ser dividida em duas óticas: o produto pela processo que desempenha para executar sua função principal que é agir como um medidor de quantidade de combustível disponível por peso, ou qualquer outro método para conseguir mensurar a quantidade de gás.

Procurando produtos pensando na primeira ótica, foi encontrado somente um produto que utilize o peso do botijão como parâmetro para definir a quantidade de produto disponível. Essa afirmação se deu após extensa procura pela internet, com os termos: medidor de gás GLP, medidor de gás de cozinha, dispositivo para mensurar gás de cozinha, cooking gas meter, LPG gas meter, LPG meter, device for measuring cooking gas, Gas Cylinder Level Sensor.

O dispositivo encontrado pertence à empresa Jetboil e se chama Jetgauge. Ele serve para medir a quantidade de combustível em recipientes da marca utilizados para acender fogareiros. Para utilizá-lo, basta conectá-lo ao recipiente da mesma marca, configurá-lo para medir o recipiente de 100 g, 230 g ou 450 g e ele já trará a porcentagem disponível de GLP. A grande diferença do produto da Jetboil em relação ao desse projeto é o seu contexto de uso. O produto deste projeto planeja ser utilizado em um botijão P-13 e é facilmente adaptável para outros contextos. Já o produto encontrado é para medir recipientes de GLP muito leves, ao passo que o usuário deve ser capaz de segurar o dispositivo e o gás, pois o gás fica pendurado no dispositivo. Seu valor é de US\$21.99.



Fonte: Material publicitário da empresa Jetgauge (2023).

Figura 12: Jetgauge



Figura 13: Usuário utilizando o Jetgauge

Fonte: Material publicitário da empresa Jetgauge (2023).

Em relação a outros dispositivos que controlem a quantidade de gás disponível, foram encontrados diversos dispositivos que medem o fluxo de gás que sai do botijão, sem informar, porém, o quanto há disponível para uso ou se ele está próximo do fim. Além disso, há papéis que medem a quantidade de combustível pela temperatura. Essa medição tem uma precisão baixa, visto que a temperatura é fortemente afetada pelo ambiente externo e não há como fazer uma ligação desses dados para um software. Na figura 14 há um exemplo de produto, que tem um baixíssimo custo (em torno de US\$1,00 dólar) e se apresenta como magnético pois ele se adere ao botijão de forma magnética, e sem nenhuma relação a sua forma de detectar o nível de gás.

Como principais concorrentes destacam-se dois produtos: o primeiro da marca Thincke que é o *Gas Cylinder Level Sensor* e o segundo da marca Truma que é o *Truma LevelControl*. Ambos se utilizam de ondas eletromagnéticas para fazer a medição de quanto há de líquido em comparação com a quantidade de gás dentro do botijão. As informações coletadas são processadas e enviadas para o aplicativo da marca, assim o cliente tem a informação da quantidade de gás disponível em torno de 5s depois do dispositivo ser ligado. Como alimentação, ambos utilizam 2 pilhas AAA, e segundo a



Figura 14: Indicador de quantidade de gás por temperatura.

Fonte: Walmart (2024).

fabricante Thincke isso resulta em uma autonomia de 120 dias. A conexão com o smartphone é via bluetooth e pelo aplicativo da respectiva marca. Em relação a preços, ambas as fabricantes não informam seus valores pela internet. Porém, o produto da Truma é facilmente encontrado em lojas de varejo com custo em torno de 180,00 € (mais de R\$ 950,00 na conversão direta sem impostos).

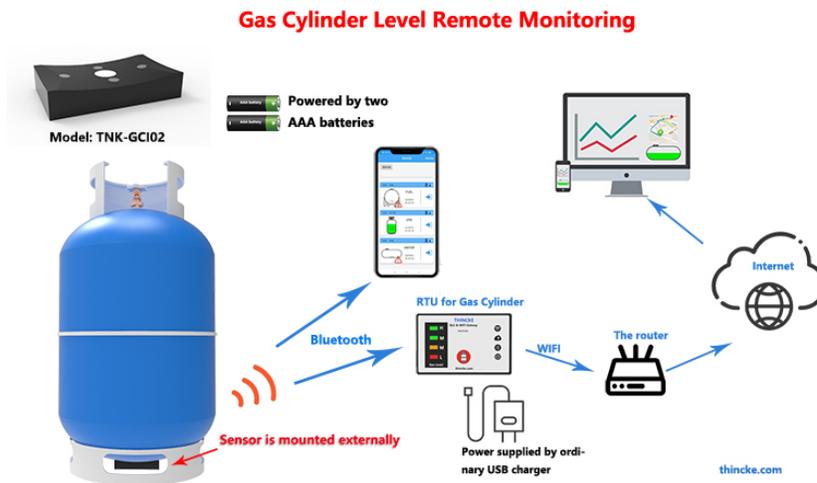


Figura 15: Indicador de quantidade de gás por ondas eletromagnéticas - marca Thincke

Fonte: Material publicitário da Thincke (2024).



Figura 16: Indicador de quantidade de gás por ondas eletromagnéticas - marca Truma (2024).

Também foram feitas buscas em lojas, tanto especializadas quanto de varejo, na região metropolitana de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, e não se obteve êxito em conseguir informações a respeito de produtos similares pelos vendedores. Houve sugestões de se utilizar um manômetro para medir a pressão de gás, o que no caso do GLP não atende ao desejado.

Portanto, os produtos mais similares ao proposto neste projeto são os medidores por ondas eletromagnéticas, que apresentam um controle preciso e eficiente além da funcionalidade de ambos possuírem um aplicativo para comunicação com o usuário. O grande problema está no valor desses produtos, que chega perto de mil reais. Para o dispositivo apresentado neste trabalho, a estimativa é que o valor desse dispositivo não ultrapasse os R\$ 200,00, já com a margem de lucro.

## 4 Resultados

### 4.1 Componentes

Os componentes eletrônicos escolhidos para o projeto foram quatro células de carga de 10 kg cada, um módulo conversor 24bit Hx711, um microcontrolador ESP32 e LEDs. Ademais, foram projetados dois discos para alocar esses componentes. Para fazer a conexão entre os componentes, foram utilizados jumpers e barras de pinos, além de tubos retráteis para manter a fixação.

#### 4.1.1 Discos

O disco interno foi impresso em 3D pela Enfitec Júnior (Empresa Júnior da Engenharia Física). Suas especificações se mantiveram fiéis ao projeto, e foi produzido utilizando PLA (poli ácido láctico), um dos principais biopolímeros e com alta resistência à tração (Silva; Oliveira; Araújo, 2014).

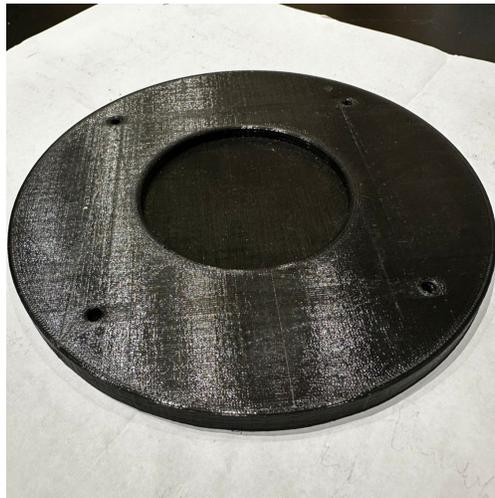


Figura 17: Disco Interno

Fonte: Arquivo do autor (2024).

O disco externo, no entanto, não pôde ser impresso em 3D, visto que seu tamanho exigiria uma impressora maior, o que aumentaria consideravelmente o custo de produção. Como solução, utilizou-se um suporte de plástico adquirido no varejo com as dimensões adequadas para um botijão P-13.

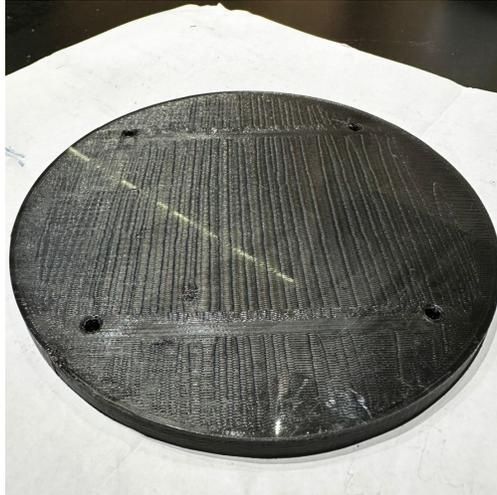


Figura 18: Verso do Disco Interno

Fonte: Arquivo do autor (2024).



Figura 19: Disco Externo

Fonte: Arquivo do autor (2024).

#### 4.1.2 Célula de carga

Para a medição da massa do botijão, optou-se por utilizar quatro células de carga, cada uma individualmente capaz de suportar até 10 kg e com 4 fios de saída. A escolha desse dispositivo baseou-se em alguns fatores. O principal foi a sua sensibilidade, que conforme especificado pelo fabricante é de  $1,0 \text{ mV/v} \pm 0,15 \text{ mV/v}$ , característica essa que está de acordo com os objetivos do projeto. Essas células de carga estão equipadas, cada uma, com 4 strain gauges, semelhantes ao modelo apresentado anteriormente na Figura 7, tornando-as ideais para o projeto. Portanto, em cada

um dos sensores, quando uma massa é colocada sobre ele, dois extensômetros são comprimidos e dois são estendidos.

Adicionalmente, cada um dos sensores têm implantado uma ponte de Wheatstone pré-configurada internamente, facilitando sua implementação. Outra característica importante é o custo unitário deste sensor, em torno de R\$ 20,00. Essa opção se mostra mais econômica em relação a compra individual de strain gauges, que têm um custo entre R\$ 5,00 a R\$ 10,00 cada, somados aos custos associados à sua instalação em uma barra de alumínio. Por consequência, o custo total de cada célula de carga montada individualmente excederia facilmente os R\$ 25,00.

Outro ponto a se esclarecer é a opção da geometria do sensor, em formato de barra. Essa escolha é justificada pela estabilidade fornecida por esse modelo. A montagem da estrutura projetada com esse formato assegura que o botijão permaneça estável, sem deslizamentos ou riscos de queda. Além disso, a decisão de utilizar 4 sensores, em detrimento de 3, é respaldada pela busca de uma margem de segurança adicional. Mesmo que a construção do dispositivo com 3 sensores esteja dentro dos limites tolerados nominalmente, que seria de 30 kg para 28 kg do botijão cheio. Essa escolha visa reforçar ainda mais a estabilidade e segurança do sistema como um todo, além de garantir o funcionamento correto de todos os dispositivos. Portanto, ao todos teremos 4 células de carga e 16 strain gauges.

<b>Especificações técnicas</b>	<b>Valores</b>
Carga nominal	10 kg
Potência nominal de saída	1.0 mV/V $\pm$ 0.15 mV/V
Tensão de funcionamento recomendada	3 - 12 VDC
Tensão máxima de operação	15 VDC
Impedância de entrada	410 $\pm$ 30 $\Omega$
Impedância de saída	350 $\pm$ 3 $\Omega$
Isolamento	> 2000 megaohm/50 VDC
Faixa de compensação de temperatura	-10°C 40°C
Faixa de temperatura de operação	-20°C 60°C
Sobrecarga permitida	< 120% da carga nominal
Carga de ruptura	> 150% da carga nominal
Material	Liga de alumínio
Peso	31g
Ligação dos fios	Vermelho(+), Preto(-), Verde(Sinal +), Branco(Sinal -)

Tabela 2: Especificações técnicas do sensor.

Fonte: Arquivo do autor (2024).

É importante destacar que as características da Tabela 2 são para uma única célula de carga. Ao operar com quatro em paralelo, como no projeto, sua potência nominal de saída se torna a soma das potências nominais de saída das células. Ou seja, esse parâmetro se modifica de 1,0mV/V para 4,0mV/V. Ainda assim, a precisão do sistema não diminui, visto que ao utilizar células de carga

idênticas acrescenta-se redundância ao sistema de medição. Ou seja, se alguma célula apresentar uma leitura imprecisa, essa variação pode ser compensada pelas outras, resultando em uma medição mais precisa.

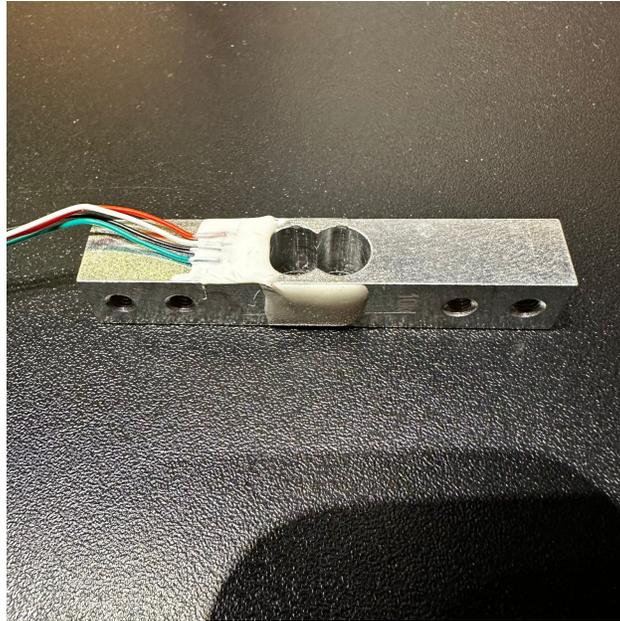


Figura 20: Célula de carga

Fonte: Arquivo do autor (2024).

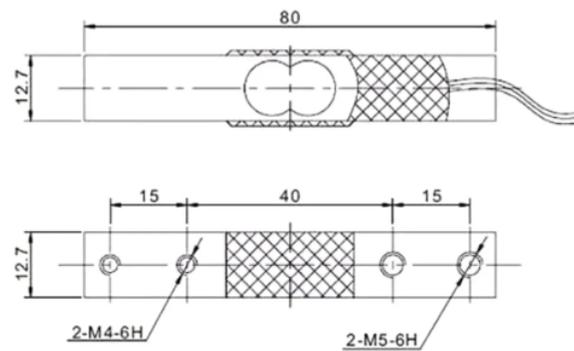


Figura 21: Dimensões da célula de carga

Fonte: Casa da Robótica (2024)

### 4.1.3 HX771

O dispositivo HX771 foi escolhido para amplificar o sinal das células de carga. Ele é, em essência, um conversor analógico-digital (ADC) com 24 bits de precisão, que - segundo a própria fabricante Avia Semiconductor's - foi projetado para ser operado em balanças que utilizam células de carga. Portanto, a escolha se deu por ter um escopo tão bem definido para o uso do projeto, além de seu baixo custo, em torno de 10 reais.

O HX771 converte as mudanças no valor de tensão através de um circuito interno de conversão de potência elétrica para amplificar o sinal vindo das células de carga. Sua tensão de funcionamento recomendada é de 5V (DC) com uma corrente de funcionamento até 10mA. Sua frequência de atualização é de 80 Hz.

Em relação ao seu diferencial de tensão de entrada, ele pode amplificar diferenças de potenciais entre seus dois terminais de entrada de até  $\pm 40\text{mV}$ . Essa característica está de acordo com o sistema montado. Como o ganho é de  $4,0\text{mV/V}$ , em um sistema que opere em 5V, sua saída será de  $20\text{mV}$ , que está dentro dos limites de  $\pm 40\text{mV}$ .

Seu protocolo de comunicação é o RS232, similar ao TTL232, sendo referido em algumas lojas como “protocolo TTL serial” ou “protocolo quase TTL” (TTL é uma sigla para Transistor-Transistor Logic). Essa interface serial é assíncrona e apresenta dois fios, um para transmitir os dados (DTA – Data Input) e outro para receber dados (DOUT – Data Output). Portanto, não há nenhum clock compartilhado entre os dispositivos.

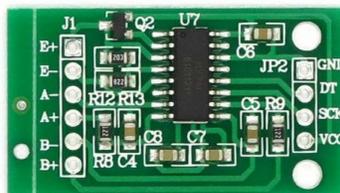


Figura 22: HX711

Fonte: Loja Alexnld (2024).

### 4.1.4 ESP32

Este trabalho exige um microprocessador com entradas digitais, que é a estrutura de retorno pelo HX771. A escolha de um microprocessador com conexão wi-fi e bluetooth em detrimento de um modelo mais simples foi feita pensando em uma possibilidade de ampliação do projeto para que seja possível fazer o monitoramento a distância.

Em relação às características do microcontrolador, o modelo escolhido foi o ESP32 DevKitV1 dual core, fabricado pela empresa Espressif Systems. Sua memória tem capacidade de operar em velocidades de até 240MHz - valor superior aos 80MHz do HX711 - e possui uma memória RAM de 512 kB, ambos valores que satisfazem as necessidades da atividade. Possui conexão wi-fi de 150,0 Mbps e bluetooth de baixa energia (BLE), conectividade que permite que o dispositivo se comunique com outros conectados à rede local ou também pela internet. É importante mencionar que a leitura dos sinais será limitada para uma leitura por segundo, para fim de evitar ruídos.

Uma das interfaces de comunicação do ESP32 é a UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*). Esse tipo de interface é amplamente utilizado em sistemas embarcados e permite a comunicação de dados entre dispositivos através de dois fios, um para transmitir dados (TX) e outro para receber dados (RX). Essa comunicação não depende de um sinal de *clock* separado para sincronização, e por isso é chamado de comunicação assíncrona.

O ESP32 também possui hardware para comunicação em I2C (Inter-Integrated Circuit), que ao contrário da interface anterior, é um método síncrono. Ele permite a comunicação de dados utilizando apenas dois fios, um para dados (SDA - Serial Data Line) e um fio de clock (SCL - Serial Clock Line). Nesse protocolo os dispositivos são conectados em um barramento comum, com cada um possuindo um endereço único e subordinados ao item mestre (ESP32). Assim, o ESP32 consegue controlar uma série de dispositivos periféricos como acelerômetros e displays LCDs.

Por conseguinte, neste projeto o ESP32 servirá para processar as informações vindas das células de carga, que serão previamente digitalizadas e amplificadas pelo HX711 e também para transmitir um retorno sobre a quantidade de gás disponível e enviar as informações aos LEDs.



Figura 23: ESP32

Fonte: Eletronic Pro (2024).

## 4.2 Montagem

Como a célula de carga escolhida já possui uma ponte de Wheatstone internamente, a união entre os quatro dispositivos é feita conectando-os em paralelo, conforme explicitado na figura 24. A opção de conectá-los de forma paralela faz com que seja coletada a informação média dos sensores. Caso tivesse sido optado pela conexão em série, o retorno seria maior, porém com mais ruído também.

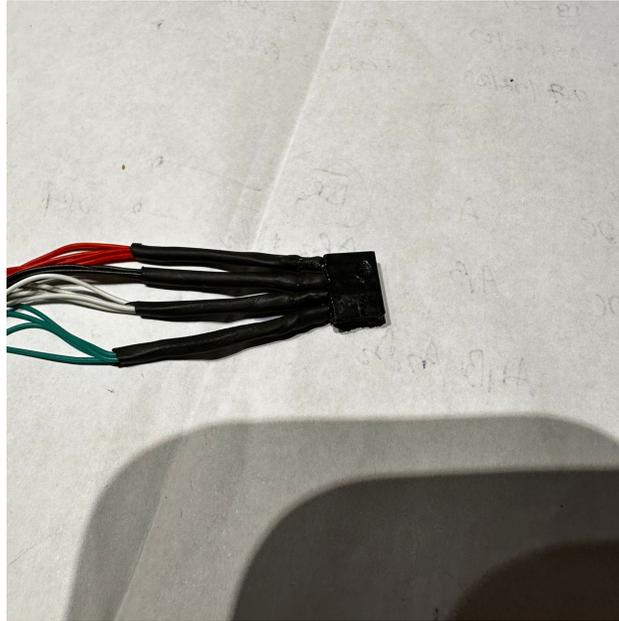


Figura 24: Ligação em Paralelo das Células de Carga

Fonte: Arquivo do autor (2024).

A barra com os cabos em paralelo das quatro células de carga foram conectadas ao HX711 seguindo a tabela 3:

Células de carga	Cor	HX711
Positivo	Vermelho	Pino E+
Negativo	Preto	Pino E-
Sinal Positivo	Verde	Pino A-
Sinal Negativo	Branco	Pino A+

Tabela 3: Correspondência entre cores dos fios, ligações e pinos do módulo HX711

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A conexão entre o HX711 e o microcontrolador segue a tabela 4. Importante ressaltar que o ESP32 foi conectado via um cabo microusb com o computador para o envio e leitura de informações.

Os LEDs verde, amarelo e vermelho foram configurados nas portas 26, 25 e 12 e todos eles conectados ao GND do ESP32, e no código foram configurados para o LED vermelho ativar quando estiver abaixo de 2 kg, o LED amarelo ativar quando estiver abaixo de 5 kg e o LED verde ativar nos outros casos.

HX711	Cor	ESP32
Pino GND	Laranja	Pino GND
Pino DT	Branco	Pino D4
Pino SCK	Cinza	Pino D5
Pino VCC	Amarelo	Pino VIN

Tabela 4: Correspondência entre pinos do módulo HX711, cores dos fios e pinos do ESP32

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

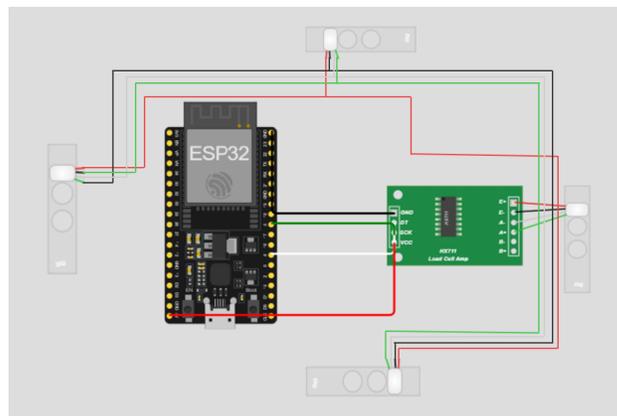


Figura 25: Simulação

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A estrutura física seguiu conforme o planejado, com as células de carga servindo como ligação entre os discos e todos fixados utilizando parafusos, polcas e arruelas.



Figura 26: Montagem

Fonte: Arquivo pelo autor (2024).

### 4.3 Aquisição

Utilizando o código presente no apêndice (5.3) todas as células de carga foram testadas tanto individualmente como no circuito. Três delas apresentaram o comportamento esperado de variar a medição conforme um peso era aplicado. Porém, uma célula apresentou comportamento inverso, variando sua medição de forma negativa conforme a força era aplicada. Portanto, foi necessário inverter os sinais positivos e negativos e assim o sensor operou normalmente.

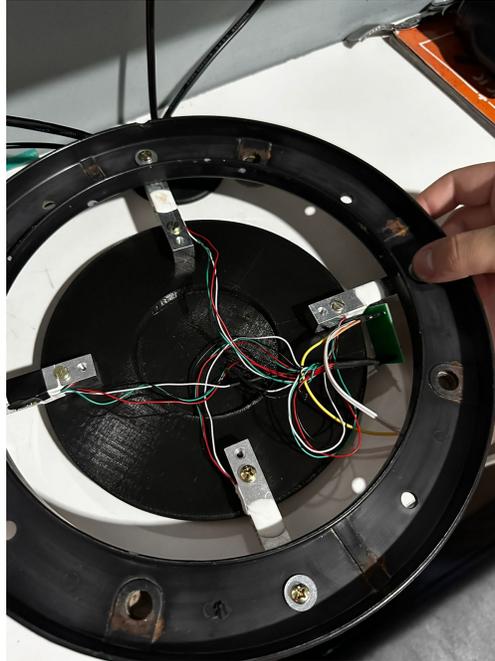


Figura 27: Teste Célula de Carga

Fonte: Arquivo do autor (2024).

#### 4.4 Calibração

A calibração ocorreu em duas etapas: a primeira foi correlacionar a mudança do valor medido com a mudança de massa aplicada e a segunda foi definir um valor de retorno equivalente ao peso do botijão vazio e subtrair da medição.

Para a primeira etapa foram feitos testes utilizando objetos com massa conhecida. Foi aplicado um objetos com massa de 0,5 kg, 1,5 kg, 2 kg, 5 kg, 10 kg, 20 kg. Foram medidos o valor de retorno para os objetos e ajustando o parâmetro `fator_calibração` do código, que está disponível no apêndice seção 5.3. Ao final dos testes, chegou-se a conclusão que o valor adequado para essa variável é -55000, pois apresentou baixa diferença entre a massa do corpo de prova com a massa medida.

É importante destacar que para efetuar as medições foi utilizado um suporte de cerâmica com o objetivo de diluir a tensão aplicada em todos os sensores. O código utilizado possui uma função de tara automática, ou seja, ele define considera no seu valor 0 a massa do suporte de cerâmica.



Figura 28: Teste com uma Garrafa com 2,0 kg

Fonte: Arquivo do autor (2024).

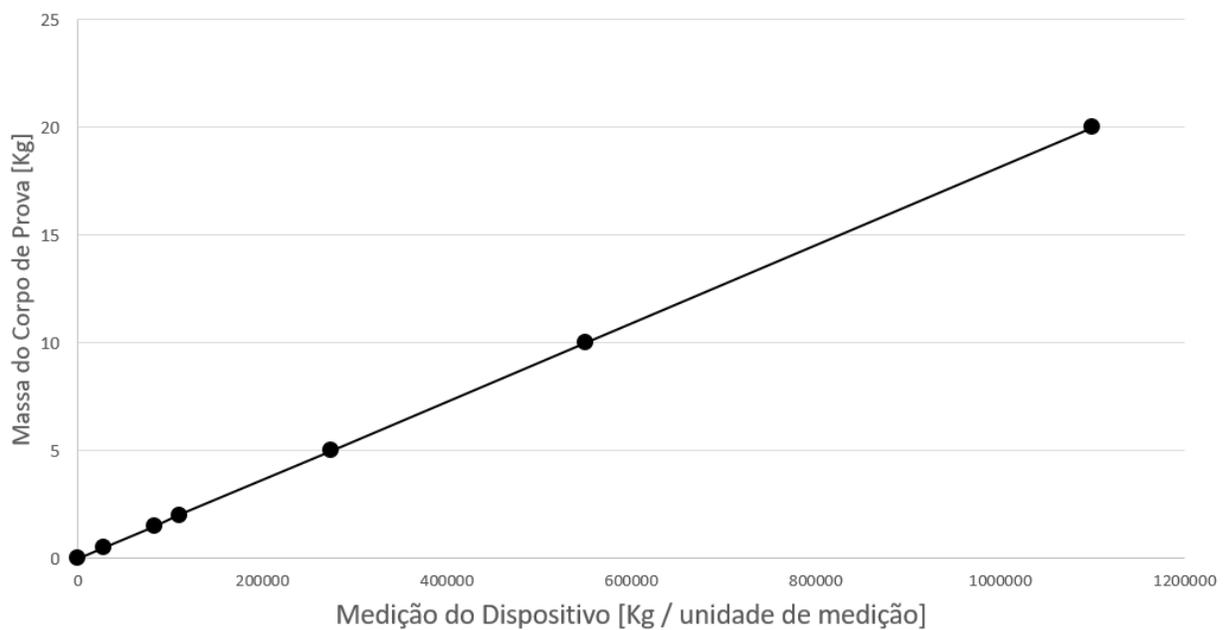


Figura 29: Calibração com os corpos de prova

Fonte: Arquivo do autor (2024).

Já em relação ao teste do valor que será utilizado como tara para o botijão foi feita uma série de

medições testando valores que variam de 0 kg a 20 kg. Com os resultados coletados foi plotado um gráfico, que explicitou o comportamento linear do sensor. O valor utilizado como tara foi definido como 14,0 kg.

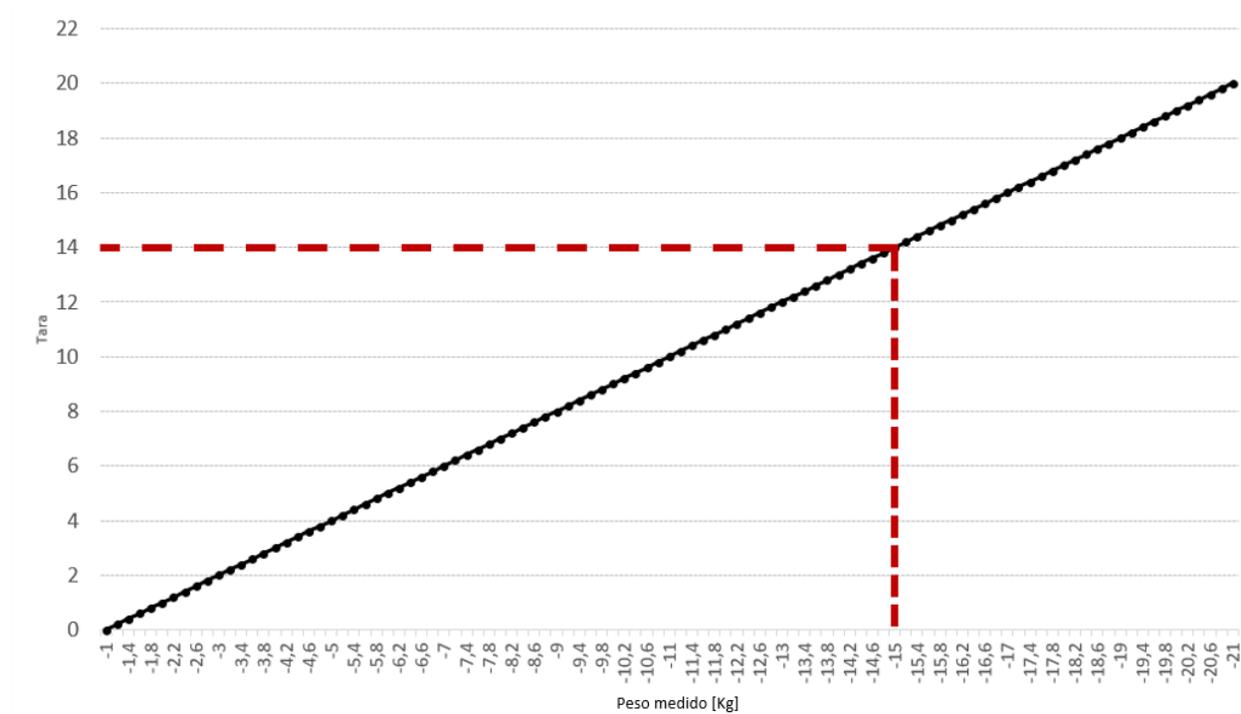


Figura 30: Gráfico da Tara definida pelo Peso Medido

Fonte: Arquivo do autor (2024).

## 4.5 Testes

Os testes foram realizados em três etapas. Primeiro, utilizou-se um botijão vazio para verificar se as premissas anteriores estavam corretas. O resultado foi incoerente, e o motivo foi o valor de tara para o botijão. Medindo sua massa em uma balança, constatou-se que o modelo apresentava 13kg, ao contrário dos 14 kg informado pelo fabricante. Portanto, o problema foi sanado alterando o valor de tara para 13 kg. Com essa alteração, o sistema funcionou corretamente, e o valor mostrado no output era 0 kg. Assim foi possível alterar a linha de print do código, para ao invés de mostrar a massa, ele apresentar a % de combustível disponível.



Figura 31: Botijão Vazio

Fonte: Arquivo do autor (2024).

O segundo teste foi relacionado aos LEDs. Conectou-se o dispositivo sem um computador, somente com uma alimentação de 5V, e os LEDs corresponderam conforme o esperado. O método de não informar ao usuário a porcentagem de combustível disponível, e sim se está próximo de acabar se demonstrou mais eficiente visto que minimiza os erros relacionados aos diferentes botijões.

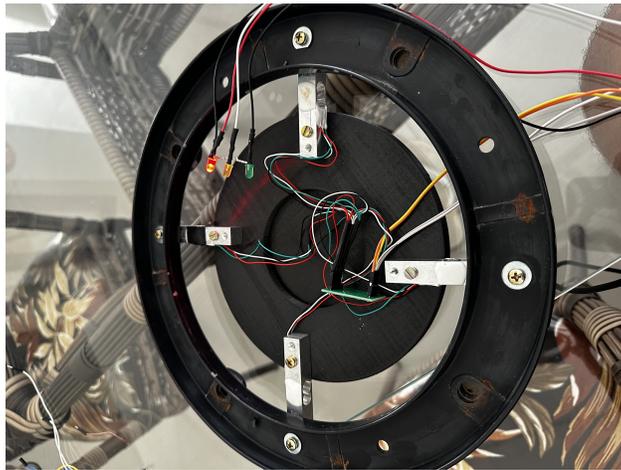


Figura 32: Teste do dispositivo sem massa

Fonte: Arquivo do autor (2024).



Figura 33: Teste do dispositivo com uma massa levemente inferior a 5 kg

Fonte: Arquivo do autor (2024).



Figura 34: Teste do dispositivo com uma massa superior a 5 kg

Fonte: Arquivo do autor (2024).

Após, foi realizado o terceiro conjunto de testes, este com um botijão não vazio. Os resultados foram positivos com o programa apresentando 100% de combustível disponível. Para testar o consumo, foi conectado o botijão a um fogão a gás em pleno funcionamento. O dispositivo coletou informações de massa a cada 30 segundos durante um período total de 3 horas. O retorno que o sistema mostrou foi a massa de combustível reduzindo lentamente, o que demonstra pleno funcionamento do dispositivo. Outro ponto a se destacar foi que não houve qualquer outlier nos dados, ou seja, não houve algum pico de ruído nas medições. Ela só não foi linear em toda parte porque em uma das transições de massa, de 6,7 kg para 6,6 kg, houve uma oscilação no valor medido, conforme gráfico da figura 39. Eliminando a primeira mudança de massa, devido a esta amostra não conter um informação do seu início, a média das mudanças foi de 100 gramas a cada 54 minutos.



Figura 35: Teste de variação  
Fonte: Arquivo do autor (2024).

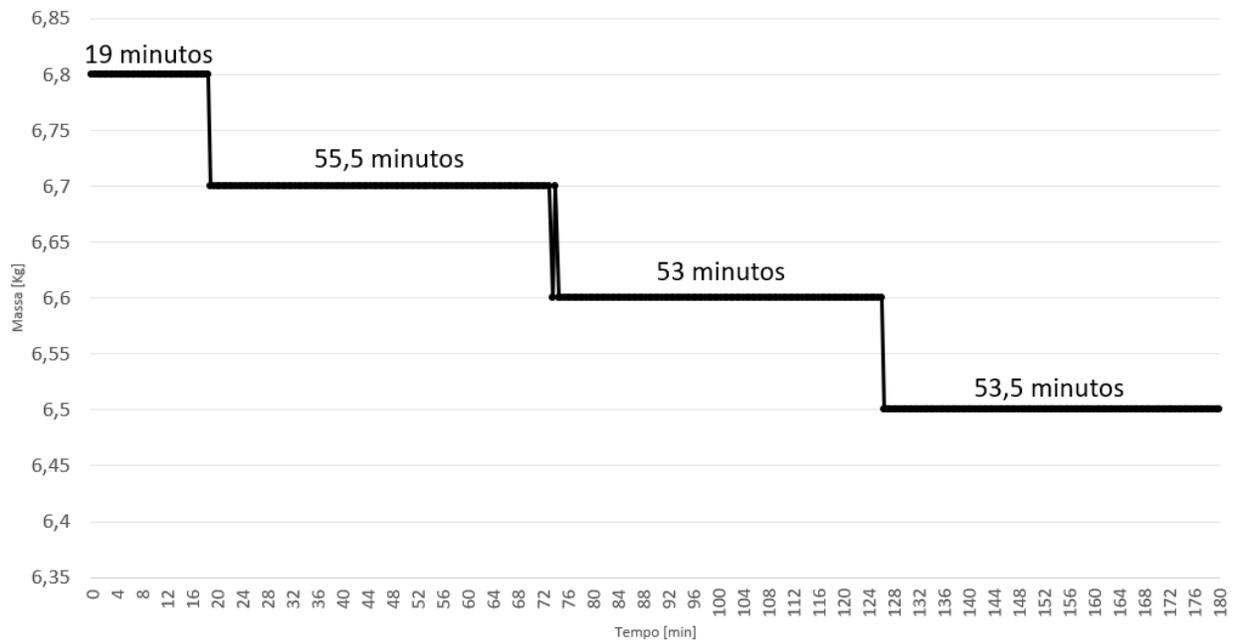


Figura 36: Gráfico da medições durante o teste 3  
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 4.6 Precificação

O projeto foi desenvolvido pensando em minimizar os gastos sem perder as características necessárias para os requisitos do mesmo. Com isso, a principal adaptação do esboço inicial para o protótipo foi a mudança do disco externo impresso em 3D para um comprado pronto em loja. Os orçamentos para essa peça variaram de R\$ 200,00 a R\$ 1.050,00 o que tornaria inviável a sua elaboração. A tabela 5 apresenta os custos relacionados ao projeto.

<b>Produto</b>	<b>Loja</b>	<b>Custo unitário [ R\$ ]</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo total [ R\$ ]</b>
Célula de carga 10 kg	Eletrogate	19,90	4	79,60
ESP32	Aliexpress	17,16	1	17,16
HX711	Eletrogate	9,90	1	9,90
Jumpers	Eletrogate	5,90	20	0,29
Tube Termo Retrátil	Ferragem Niteroi	0,50	1	0,50
Estanho para Solda	Ferragem Niteroi	1,99	1	1,99
Barra de Pinos	Eletrogate	0,95	1	0,95
LEDs	Eletrogate	0,38	3	1,14
Disco Interno	Enfitec	45,00	1	45
Disco Externo	Magazine Luiza	7,10	1	7,10
Frete				13,25
<b>Custo do Projeto</b>				<b>176,88</b>

Tabela 5: Precificação do projeto

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Analisando os componentes e seus valores nota-se que os dois componentes de maior valor são as células de carga e a impressão 3D do disco interno. É importante destacar que as células de carga podem ser adquiridas em outras fontes, como lojas importadoras, nas quais foram encontradas células de mesma especificação por R\$ 6,00. Já o disco interno pode ser substituído por outra estrutura plástica pronta e maciça, o que acarretaria em uma grande redução de custo.

## **5 Análise e conclusão**

Os resultados demonstraram relativo sucesso do dispositivo. O fato da estrutura dos botijões não possuir uma rígida padronização dificultou a determinação do peso mínimo e máximo do botijão, o que prejudicou a precisão da porcentagem de combustível disponível. Portanto, é recomendado utilizar como a massa do botijão sempre o máximo possível, assim evitando que acabe o gás antes que o sistema informe isto. Logo, a solução pensada foi informar a faixa de combustível disponível, de 10 % em 10 %. Exemplificando, ao invés do programa mostrar que há 48% de gás, ele mostrará que tem menos de 50 %.

Todavia, o método de informar somente via LEDs se demonstrou uma alternativa satisfatória e que não causa grandes perdas. O usuário precisa saber que o gás está acabando, e não a porcentagem exata de gás disponível, e a informação via LEDs coloridos é de fácil interpretação e evita parte do problema da precisão.

O planejamento e o protótipo se diferenciaram em relação ao disco externo, no qual houve a necessidade de fazer a mudança de uma estrutura impressa em 3D para um objeto plástico pronto do varejo. Essa mudança não ocasionou qualquer perda de qualidade. Outro desafio encontrado foi a célula de carga com sinais invertidos, que demandou a alteração a posteriori e de forma externa dos fios.

Como pontos de melhoria, o projeto poderia incluir uma conexão via aplicativo para informar ao usuário que seu gás está por acabar. A compra de uma placa ESP32 facilita nessa questão visto que ela já possui conexão via bluetooth e wifi, portanto evitando a compra de dispositivos intermediários para essa aplicação. Outra alternativa mais simples seria a inclusão de um sinal visual ou sonoro para informar o usuário que o nível do gás está baixo.

## **6 Perspectivas de melhorias para estudos posteriores**

Pensando em melhorar o projeto, seria interessante buscar métodos mais precisos de conseguir a leitura que o combustível está próximo do seu fim. Uma forma seria utilizar como parâmetro central as derivadas da massa, em detrimento da utilização simples da medida de massa. Consequentemente, seria possível calcular a taxa de evaporação, que é um fenômeno físico de alta complexidade que depende de uma gama alta de fatores ambientais a ser considerado. Utilizando esse método, seria necessário fazer um monitoramento contínuo e de longa duração para entender em detalhes como é o comportamento da variação de massa com o seu uso. Com isso, é possível criar uma correlação entre a taxa de variação de massa com a quantidade de gás contida no botijão, determinando uma constante de proporção que relaciona a variação da massa com a quantidade de gás. Também, é possível ter um monitoramento preciso de quando o gás está sendo utilizado, e assim conseguir detectar possíveis vazamentos com precisão.

Um segundo método que poderia ser utilizado seria a variação do centro de massa dentro do botijão. A ideia seria inclinar o botijão, em um ângulo de 45 graus, e monitorar o local do seu centro de massa. Com o consumo do combustível, a quantidade de líquido diminui e, por consequência, o centro de massa se desloca. Assim, é possível fazer uma relação do local do centro de massa com a quantidade de combustível disponível para uso.

## 7 Apêndice

### 7.1 Código para calibração da tara

```
#include <HX711.h>

// Configuração dos pinos para o módulo HX711 no ESP32
const int PINO_DT = 4; // Pino D4
const int PINO_SCK = 5; // Pino D5

const int TEMPO_ESPERA = 1000;

HX711 escala;

float fator_calibracao = -55000;
float tara = 0.0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Célula de Carga - Calibração de Peso");
  Serial.println("Pressione Enter para iniciar a calibração");

  while (!Serial.available()) {
    // Aguarde até que o usuário pressione Enter
  }
  Serial.read(); // Limpe o buffer do serial

  escala.begin(PINO_DT, PINO_SCK);

  float media_leitura = escala.read_average();
  Serial.print("Média de leituras com célula sem carga: ");
  Serial.println(media_leitura);
}

void loop()
{
  escala.set_scale(fator_calibracao);
```

```
if (escala.is_ready())
{
  // Mostra a leitura de peso ajustada pela tara
  Serial.print("Leitura com tara: ");
  Serial.print(escala.get_units() - tara, 1);
  Serial.print(" kg\tTara: ");
  Serial.print(tara);
  Serial.print(" kg\tFator de Calibração = ");
  Serial.println(fator_calibracao);

  if (tara < 20) {
    tara += 0.2; // Aumenta a tara em 0,2
    delay(TEMPO_ESPERA);
  }
}
else
{
  Serial.println("HX-711 ocupado");
}
}
```

## 7.2 Código para fazer as medições

```
#include <HX711.h>

// Configuração dos pinos para o módulo HX711 no ESP32
const int PINO_DT = 4; // Pino D4
const int PINO_SCK = 5; // Pino D5

const int TEMPO_ESPERA = 1000;

HX711 escala;

float fator_calibracao = -55000;
float tara_manual = 2; // Defina a tara manualmente

// Defina os pinos dos LEDs
const int LED_VERDE = 25;
const int LED_AMARELO = 26;
const int LED_VERMELHO = 12;

char comando;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Célula de Carga - Calibração de Peso");
  Serial.println("Defina o valor da tara manualmente e pressione Enter");

  // Defina a tara manualmente
  Serial.print("Tara manual: ");
  Serial.print("Tara manual definida como: ");
  Serial.println(tara_manual);

  // Inicialize os LEDs como saídas
  pinMode(LED_VERDE, OUTPUT);
  pinMode(LED_AMARELO, OUTPUT);
  pinMode(LED_VERMELHO, OUTPUT);

  escala.begin(PINO_DT, PINO_SCK);

  float media_leitura = escala.read_average();
```

```
Serial.print("Média de leituras com célula sem carga: ");
Serial.println(media_leitura);
}

void loop()
{
  escala.set_scale(fator_calibracao);

  if (escala.is_ready())
  {
    float leitura = escala.get_units() - tara_manual;
    Serial.print("Leitura: ");
    Serial.print(leitura, 1); // Subtraia a tara manual da leitura do peso
    Serial.print(" kg\tFator de Calibração = ");
    Serial.println(fator_calibracao);

    // Verifique a leitura e acenda os LEDs apropriados
    if (leitura < 2.0) {
      digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
      digitalWrite(LED_AMARELO, LOW);
      digitalWrite(LED_VERMELHO, HIGH);
    } else if (leitura < 5.0) {
      digitalWrite(LED_VERDE, LOW);
      digitalWrite(LED_AMARELO, HIGH);
      digitalWrite(LED_VERMELHO, LOW);
    } else {
      digitalWrite(LED_VERDE, HIGH);
      digitalWrite(LED_AMARELO, LOW);
      digitalWrite(LED_VERMELHO, LOW);
    }
  }

  if (Serial.available())
  {
    comando = Serial.read();
    switch (comando)
    {
  }
}
else
{
  Serial.println("HX-711 ocupado");
}
```

```
    delay(TEMPO_ESPERA);  
}
```

### 7.3 Código para Aquisição e Calibração

```
#include <HX711.h>  
  
// Configuração dos pinos para o módulo HX711 no ESP32  
const int PINO_DT = 4; // Pino D4  
const int PINO_SCK = 5; // Pino D5  
  
const int TEMPO_ESPERA = 1000;  
  
HX711 escala;  
  
float fator_calibracao = -55000;  
char comando;  
  
void setup()  
{  
    Serial.begin(9600);  
    Serial.println("Célula de Carga - Calibração de Peso");  
    Serial.println("Posicione um peso conhecido sobre a célula ao começar as leituras");  
  
    escala.begin(PINO_DT, PINO_SCK);  
  
    float media_leitura = escala.read_average();  
    Serial.print("Média de leituras com célula sem carga: ");  
    Serial.println(media_leitura);  
  
    escala.tare();  
}  
  
void loop()  
{  
    escala.set_scale(fator_calibracao);  
  
    if (escala.is_ready())  
    {
```

```
Serial.print("Leitura: ");
Serial.print(escala.get_units(), 1);
Serial.print(" kg\tFator de Calibração = ");
Serial.println(fator_calibracao);

if (Serial.available())
{
  comando = Serial.read();
  switch (comando)
  {
    case 'x':
      fator_calibracao -= 100;
      break;
    case 'c':
      fator_calibracao += 100;
      break;
    case 'v':
      fator_calibracao -= 10;
      break;
    case 'b':
      fator_calibracao += 10;
      break;
    case 'n':
      fator_calibracao--;
      break;
    case 'm':
      fator_calibracao++;
      break;
  }
}
else
{
  Serial.println("HX-711 ocupado");
}

delay(TEMPO_ESPERA);
}
```

## 8 Referências

Pinheiro, André & Lourenço, Fabio. (2020). Modelo de um Dispositivo de Segurança para Detecção de Vazamento do Gás de Cozinha com Bloqueio do Circuito Elétrico. *Projectus*. 3. 15-35. 10.15202/25254146.2018v3n1p15.

Moreira, Alessandro. (2015). Segurança na Utilização do Gás Liquefeito de Petróleo.

Silveira, Fernando. (2014). A pressão é diferente em um botijão de gás de 13 kg e 45 kg?. Disponível em: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=a-pressao-e-diferente-em-um-botijao-de-gas-de-13-kg-e-45-kg#:~:text=Enquanto%20diminui%20a%20quantidade%20de,da%20Lei%20de%20Clausius%20Clapeyron>.

František Synák, Kristián Čulík, Vladimír Rievaj, Ján Gaňa, Liquefied petroleum gas as an alternative fuel, *Transportation Research Procedia*, Volume 40, 2019, Pages 527-534, ISSN 2352-1465, url<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.076>

Kapusta, J. and Kalašová, A. (2015). Motor Vehicle Safety Technologies in Relation to the Accident Rates. *Communications in Computer and Information Science*, pp.172-179.

Souza, José Roberto de. (2002). Dessulfurização de Gás Natural Usando Peneiras Moleculares.

Stefanescu, D. M. (2011). *Handbook of force transducers: principles and components*. Springer Science Business Media.

Busch-Vishniac, I. J. (1998). *Electromechanical sensors and actuators*. Springer Science Business Media.

Nachazel, Ted. (2020). What is a Strain Gauge and How Does it Work?. Michigan Scientific Corporation. Disponível em: <https://www.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/?cn-reloaded=1>

Oluwole, O. O., Olanipekun, A. T., Ajide, O. O. (2015). Design, construction and Testing of a strain gauge Instrument. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 6, 1825-1829.

Andolfato, R. P., Camacho, J. S., Brito, G. D. (2004). *Extensometria básica*. Ilha.

Hoffmann, K. (1974). *Applying the wheatstone bridge circuit*. Darmstadt, Germany: HBM.

Costa, M. C., Oliveira, S. V., Araújo, E. M. (2014). Propriedades mecânicas e térmicas de sistemas de PLA e PBAT/PLA. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 9(2), 112-117.