

RELATÓRIO FINAL: MEDIDOR DE TENSÃO E CORRENTE POR MICROCONTROLADOR ESP32

Gabriel Silva Meneghin – gabrielmeneghin@gmail.com
THIAGO HENRIQUE SOARES SANTOS - thiago.s.soares99@gmail.com
VICTOR DANIEL OLIVEIRA GAETE - vdgaete@gmail.com

Resumo: A execução de medidas precisas de vários parâmetros é essencial para o controle de processos nas equipes de competição. No protótipo de carro à combustão da equipe ECOFET-NEAC devem-se manter estáveis os níveis de tensão e corrente de uma bateria para o acionamento correto de um motor de partida. Portanto, o presente trabalho pretende promover uma solução simples para o monitoramento de tais níveis. Por meio de testes de bancada foi possível verificar a validação dos circuitos propostos. Os resultados obtidos provaram ser viável a construção dos módulos.

Palavras-chave: calibração, incerteza, medição, sensores.

1. INTRODUÇÃO

Nas equipes de competição, é imprescindível a existência de medidas precisas de vários parâmetros para controle de processos. Com objetivo de otimizar os protótipos projetados, é necessário que as medições tenham uma taxa de erro mínima, pois pequenas alterações nas medidas devem ser levadas em conta para o melhor desempenho. Visto que são muitos parâmetros medidos, a medição torna-se um trabalho oneroso, já que é necessário o monitoramento de diversos equipamentos. Dessa forma, a construção de um módulo que consiga medir diferentes variáveis de forma simultânea e rápida favorece bastante o desenvolvimento e melhoria dos projetos das equipes.

Portanto, duas variáveis importantes de serem medidas no protótipo de carro à combustão da equipe ECOFET-NEAC são a corrente e a tensão da bateria. Tal bateria alimenta o motor de partida que aciona o motor principal por consequência. Logo, é fundamental que os níveis de tensão da bateria e a corrente drenada pelo motor sejam estáveis para a partida, necessitando sensoramento constante, o qual será provido por dois sensores: um de corrente e outro de tensão, e supervisionado por um microcontrolador que servirá de *hardware* de comunicação e interface entre os sensores e o *dashboard* de visualização do usuário.

O funcionamento do sensor de corrente é dado por meio da geração de uma tensão proporcional à corrente que passa através dele. Ao aplicar-se esta tensão gerada a um amplificador e mais circuitos adicionais que sejam necessários, é possível medir a intensidade de corrente que atravessa um circuito. Os sensores de corrente são usados nas aplicações onde existe uma ênfase na precisão e taxa de repetição sob todas as condições e menos na capacidade de trabalhar com altas correntes [1][2].

Já um sensor de tensão pode ser criado apenas ajustando os níveis de tensão, através de um divisor de tensão em um *buffer* com um amplificador operacional, para o

sistema que servirá para supervisionar a tensão de circuito. Este trabalho visa prover uma solução simples e barata para o monitoramento dos níveis de tensão e corrente de uma bateria.

2. MOTIVAÇÃO

A motivação para esse projeto vem da equipe de competição ECOFET e sua necessidade de medir parâmetros da bateria utilizada em seu protótipo. Níveis de tensão e de corrente da bateria, principalmente durante o uso do motor de partida, são necessidades da equipe para o desenvolvimento de circuitos de acionamento e proteção da parte elétrica do carro.

Além das variáveis elétricas, a leitura constante da temperatura do motor também é foco de estudo já que influencia diretamente no rendimento do motor. A partir da medição desta grandeza física, motivaria a expansão do projeto dentro da equipe para observação e controle de outras grandezas como, por exemplo, a medição de ângulo de giro do volante que entraria no desenvolvimento de estratégias de melhor rendimento do carro de acordo com a pista.

3. APLICAÇÕES

Devido a natureza diversa das aplicações onde os sensores produzidos podem atuar, uma lista geral de ampla abrangência foi descrita abaixo:

- Sensor de corrente
 - Proteção de circuitos elétricos/eletrônicos como placas de acionamento de motores onde grandes correntes são envolvidas no processo;
 - Medição direta de correntes AC em circuitos de rede;
 - Detecção de sobrecorrentes em circuitos de acionamento industrial;
 - Medição de correntes CC independente do sentido;
 - Proteção de circuitos elétricos/eletrônicos como placas de acionamento de motores onde grandes correntes são envolvidas no processo;
 - Sensor de tensão
 - Medição de tensão AC indireta, após processo de retificação;

- Medição de tensões CC em reguladores de tensão de diversos portes;
- Detecção de sobretensões em circuitos de acionamento industrial;

4. OBJETIVO

Construir, calibrar e caracterizar sensores de corrente e de tensão aplicados à medição dos níveis elétricos de uma bateria de corrente contínua utilizada para alimentação do circuito elétrico do carro protótipo do ECOFET.

Desenvolver um *firmware* capaz de ler em tempo real os sinais elétricos condicionados nas entradas A/D e transmitir via *wi-fi* para um *broker* MQTT as informações coletadas.

5. METODOLOGIA

5.1. Sensor de Corrente

A montagem foi feita levando em conta o circuito integrado (CI) denominado ACS712ELC-5A. Tal circuito é um sensor de corrente com base em Efeito Hall, em que o sensor pega a entrada em corrente e a converte em uma saída em tensão, de forma linear, como visto na figura 1 abaixo.

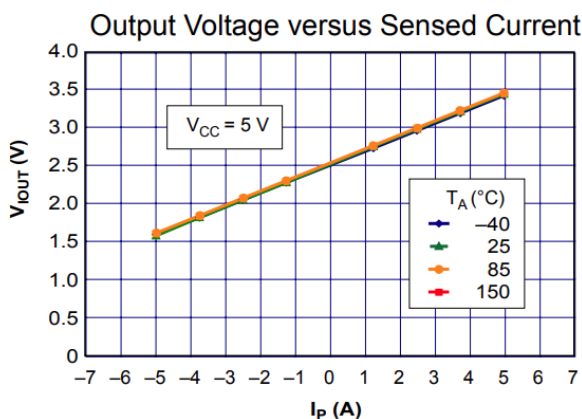


Figura 1 - Relação entre saída em tensão pela entrada em corrente. [3]

Considerando o sensor descrito anteriormente, foi prototipado o circuito eletrônico para medição de corrente, de forma que sua faixa de tensão respeitasse os limites definidos pela entrada analógica/digital do microcontrolador (ESP32).

Na figura 2, em que há o diagrama eletrônico do sensor de tensão, é perceptível a entrada de corrente, a saída em tensão e os terminais de alimentação e de referência para o funcionamento apropriado do sensor construído. É possível observar também a adição de um filtro passa-baixa na saída do circuito para a mitigação de eventuais ruídos e surtos de corrente que poderiam prejudicar a medição ou danificar o controlador. Uma observação deve ser feita no esquemático

abaixo, em que uma representação de amplificador operacional foi utilizada para exprimir o sensor de corrente ASC712ELC-5A.

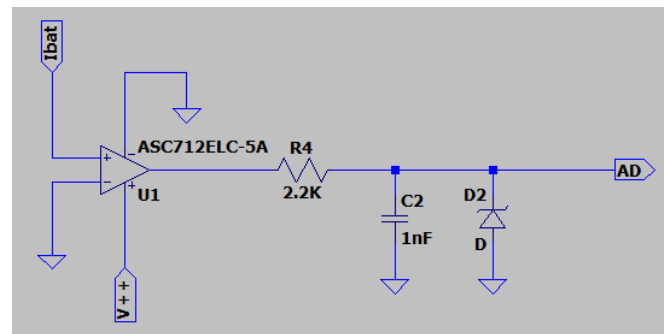


Figura 2 - Desenho do circuito eletrônico

As especificações do sensor escolhido são:

- Trabalha com o CI ACS712 da Allegro;
- Medição: -5A a 5A;
- Tensão de Alimentação: 5V;
- Sensibilidade da saída: 150mV/A;
- Pode ser utilizado com cargas AC ou DC;
- Offset: 2,3V.

Os componentes utilizados são listados abaixo:

- 1 resistor de 2kΩ;
- Módulo CI ACS712-5A da Allegro;
- 1 capacitor de 1nF;
- 1 diodo Zener de 5V;

5.2. Sensor de Tensão

A medição de tensão é feita tendo em consideração um divisor resistivo, que foi projetado para converter a tensão de uma bateria CC com tensão máxima de 60V em um nível de tensão aceitável para o conversor analógico/digital (A/D) do ESP32. Para evitar o efeito de carga, que pode ser gerado por um circuito puramente resistivo, foi utilizado um amplificador operacional (AmpOp) na configuração buffer para o isolamento entre circuito resistivo e a entrada A/D do microcontrolador pela adição de uma impedância de entrada extremamente alta.

Ademais, pode-se verificar a adição de um filtro passa-baixa na saída do circuito para a mitigação de eventuais ruídos e surtos de corrente que poderiam prejudicar a medição ou danificar o controlador.

O AmpOp utilizado foi o TL084CN, figura 3, da Texas Instruments, e suas características podem ser visualizadas abaixo, na figura 4.

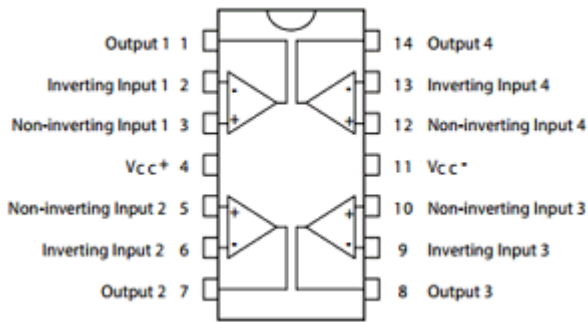


Figura 3 - Pinout do TL084CN.

Features for the TL084

- High slew rate: 20 V/ μ s (TL08xH, typ)
- Low offset voltage: 1 mV (TL08xH, typ)
- Low offset voltage drift: 2 μ V/ $^{\circ}$ C
- Low power consumption: 940 μ A/ch (TL08xH, typ)
- Wide common-mode and differential voltage ranges
 - Common-mode input voltage range includes V_{CC+}
- Low input bias and offset currents
- Low noise: $V_n = 18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (typ) at $f = 1 \text{ kHz}$
- Output short-circuit protection
- Low total harmonic distortion: 0.003% (typ)
- Wide supply voltage: $\pm 2.25 \text{ V}$ to $\pm 20 \text{ V}$, 4.5 V to 40 V

Figura 4 - Características construtivas do TL084CN. [4]

O diagrama eletrônico do sensor de tensão pode ser identificado abaixo:

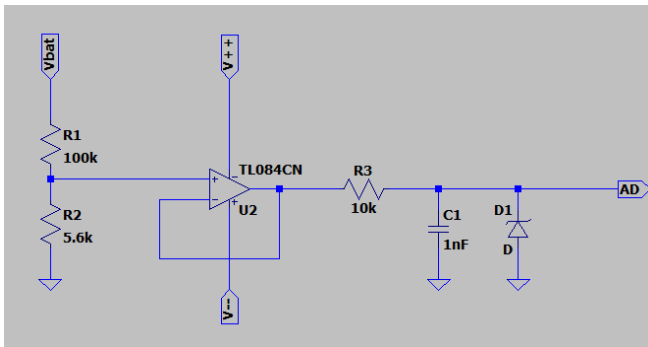


Figura 5 - Diagrama esquemático do sensor de tensão.

A equação que rege a divisão de tensão pode ser vista abaixo:

$$V_{A/D} = V_{bat} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$\text{Em que: } \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,055$$

Os componentes utilizados são listados abaixo:

- 1 resistor de 100k Ω ;
- 1 resistor de 10k Ω ;
- 1 resistor de 5,6k Ω ;
- AmpOp (TL084CN);
- 1 capacitor de 1nF;
- 1 diodo Zener de 5V.

5.3. Microcontrolador ESP32 e firmware

Para o display das informações em um *dashboard*, será utilizado o microcontrolador (MCU) ESP32 para conversão dos dados analógicos para digitais através das suas entradas A/D. Já a transmissão destas informações será feita por meio do seu módulo Wi-Fi usando o protocolo de comunicação MQTT. As funcionalidades de cada pino do MCU podem ser resumidas na figura 6.

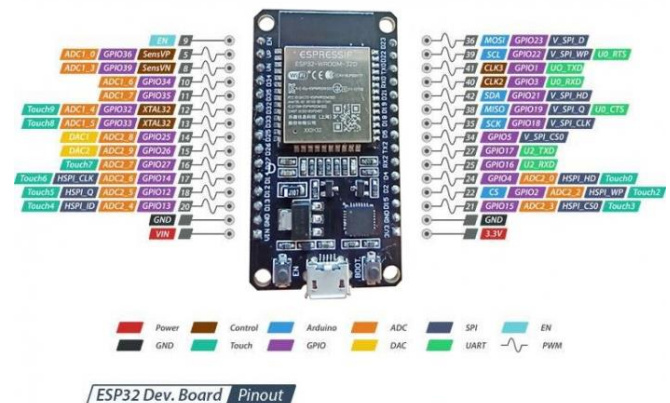


Figura 6 - Pinout do ESP32. [5]

Como *dashboard* foi criado um servidor em [6] que é uma plataforma aberta de Cloud MQTT onde, com o uso do aplicativo de celular “EasyMQTT” foi criada uma conexão entre a nuvem e o ESP32 que usa o esquema *Publish/Subscribe*, como exemplificado pela Figura 14, de forma simples que permite a comunicação constante entre o MCU e o usuário usando um *smartphone*.

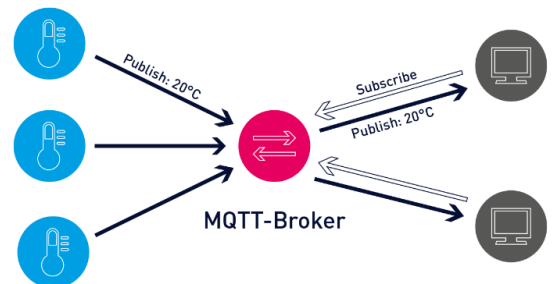


Figura 14 - Exemplo de uma comunicação MQTT.

Foram escolhidos os pinos ADC1_6, como entrada de dados do sensor de tensão, ADC2_0 como entrada dos dados do sensor de corrente. O seu monitoramento se dá de maneira constante durante um *loop* infinito (`while(1)`) criado no código que fornece informações a todo momento para que sempre que o usuário exija a leitura do sensor, ele consiga obtê-la.

O *firmware* usa conceitos de sistema operacional (OS) que permite um controle via *kernel* muito mais preciso de tempo de execução e tornando o acesso à memória muito mais robusto, com mudanças de *loops* de execução dinâmicas usando filas, ou *Queues*, interrupções e *tasks*.

A lógica de funcionamento foi pensada de forma que o usuário sempre obtenha uma leitura do A/D quando for solicitado por ele. Com os sensores sendo sempre monitorados pelo módulo ADC no *loop* principal, uma atualização na leitura no *dashboard* sempre pode ser requisitada via interrupção externa gerada por um *push button*. Caso haja algum problema de *hardware* na geração desta interrupção externa, um módulo de TIMER foi configurado com um tempo pré-determinado que também gera uma atualização do *dashboard*.

Destrinchando um pouco mais a fundo o *firmware* temos o *loop* principal da main atualizando as leituras de A/D, uma fila foi criada para atender a *task* da interrupção externa do módulo de GPIO e outra para a *task* do TIMER, uma vez que, o acesso às *tasks* se dão quando há um sinal de interrupção gerado pelos seus respectivos módulos.

6. RESULTADOS

Todos os resultados foram obtidos utilizando o multímetro digital da Minipa, modelo ET-2082C, visto na figura 7 e as medidas realizadas foram consideradas como referência de calibração.



Figura 7 - Multímetro digital da Minipa, modelo ET-2082C.

Os valores dos componentes passivos dos sensores foram medidos utilizando o ET-2082C e seus valores encontram-se na tabela 1.

Tabela 1 - Medição dos componentes.

Componentes	Valor de referência	Valor medido
resistor de 100k	100k Ω	98,3k Ω
resistor de 5,6k	5,6k Ω	5,3k Ω
resistor de 2,2k	2,2k Ω	2,15k Ω
resistor de 10k	10k Ω	9,9k Ω

A curva estática do conversor A/D foi traçada e pode ser vista na figura 8, e foi comparada com as mesmas medições do multímetro, que foi utilizado como referência de calibração para os experimentos.

Nota-se que as medições retiradas do conversor A/D (calibrado) de 13 bits de resolução aproximam-se muito da curva utilizada como calibração recolhidas do multímetro, com exceção de pontos abaixo de 100mV e acima de 3,15V, onde existe uma saturação dos valores.

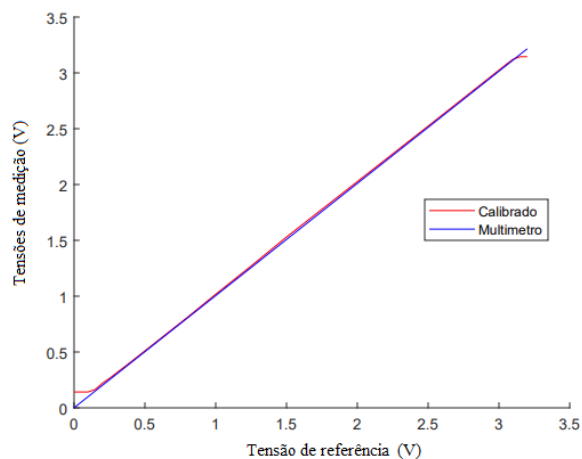


Figura 8 - Curva estática da conversão A/D.

Tabela 2 - Valores retirados para plotar a curva estática.

Tensão de referência	Tensão A/D	Valor binário referente à tensão em decimal	Valor do multímetro
0	142mV	0	0.5mV
100mV	142mV	0	100.7mV
150mV	165mV	25	151.2mV
200mV	220mV	95	201.2mV
250mV	264mV	155	251.6mV
400mV	410mV	332	402.3mV
800mV	810mV	819	804mV
1V	1.017V	1072	1.005V
1.25V	1.270V	1392	1.256V
1.5V	1.53V	1708	1.508V
2V	2.026V	2309	2.010V
2.5V	2.523V	2932	2.512V
2.9V	2.924V	3610	2.914V
3V	3.024V	3818	3.015V
3.05V	3.075V	3922	3.065V
3.1V	3.122V	4035	3.115V
3.15V	3.145V	4095	3.166V
3.2V	3.145V	4095	3.216V

Os resultados obtidos do sensor de corrente podem ser vistos na tabela 3 e ilustrados nas figuras abaixo, em que uma fonte de corrente contínua foi utilizada para variar a corrente que percorre o sensor de 0A a 5A com o passo de 1A.

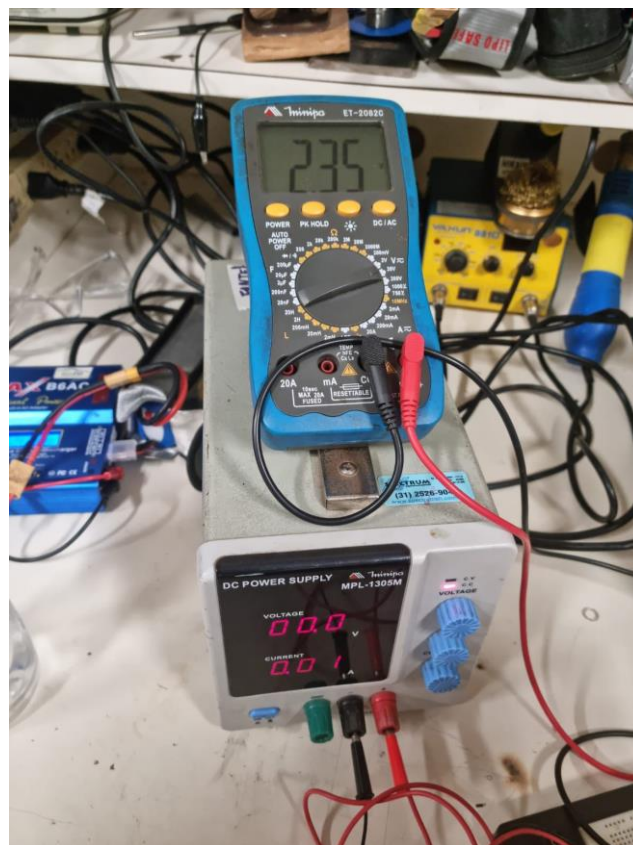


Figura 9 - Tensão de saída para corrente de 0A.

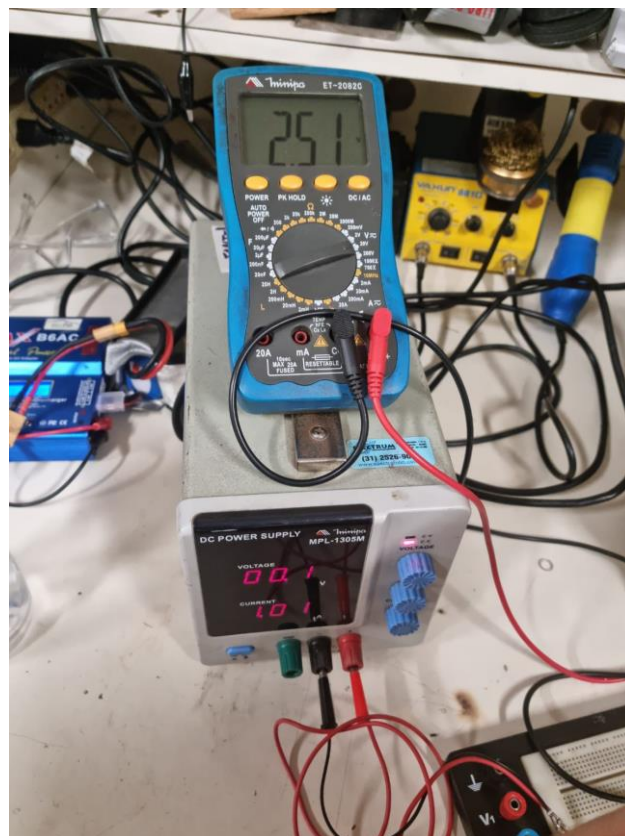


Figura 10 - Tensão de saída para corrente de 1A.

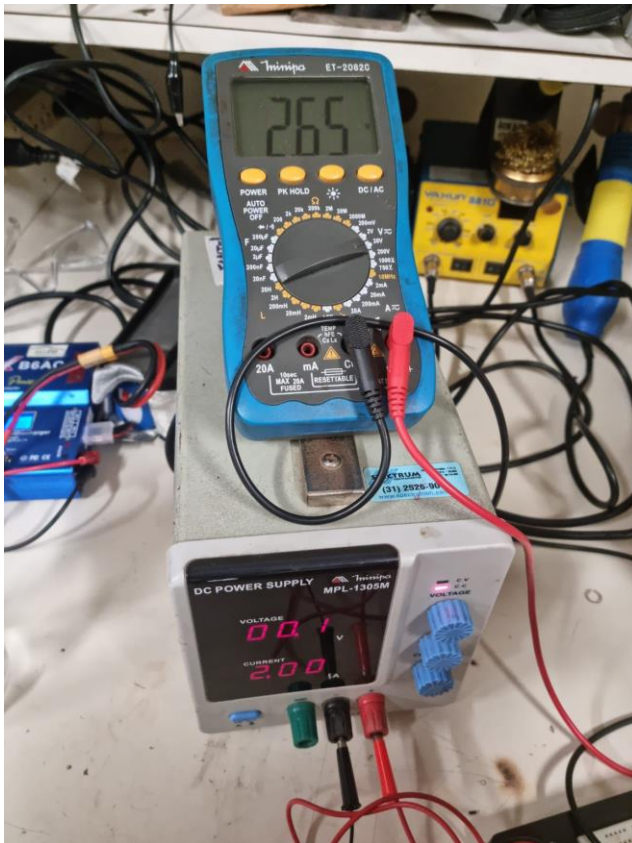


Figura 11 - Tensão de saída para corrente de 2A.

Tabela 3 - Resultados obtidos do sensor de corrente.

Corrente de entrada (A)	Tensão de saída (V)
0	$2,3 \pm 0,01$
1	$2,45 \pm 0,01$
2	$2,6 \pm 0,01$
3	$2,75 \pm 0,01$
4	$2,9 \pm 0,01$
5	$3,05 \pm 0,01$

O resultado obtido para o sensor de tensão foi o esperado a partir da equação (1) e pode ser ilustrada na figura 12 abaixo, e as medições vistas na tabela 4.



Figura 12 - Tensão de saída do sensor de tensão para uma entrada de 10V.

Tabela 4 - Medições do sensor de tensão.

Tensão de entrada (V)	Tensão de saída (V)
$0 \pm 1\%$	$0 \pm 1\%$
$5 \pm 1\%$	$0,275 \pm 1\%$
$10 \pm 1\%$	$0,550 \pm 1\%$
$15 \pm 1\%$	$0,825 \pm 1\%$
$20 \pm 1\%$	$1,100 \pm 1\%$
$25 \pm 1\%$	$1,375 \pm 1\%$
$30 \pm 1\%$	$1,650 \pm 1\%$

A montagem completa está exposta na figura 13.

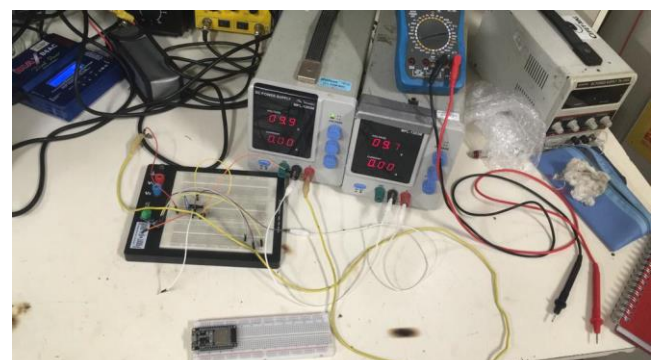


Figura 13 - Montagem completa.

7. CONCLUSÃO

A construção do sensor de corrente e de tensão foram bem sucedidas, uma vez que o resultado foi conforme o esperado pelos níveis de tensão calculados pela equação (1), e dentro do limite linear de conversão analógico/digital do ESP32, definido pela figura 8. Além disso, a calibração feita pelo multímetro apresentou resultados dentro da faixa de precisão aceitável.

O desenvolvimento do *firmware* foi bem-sucedido, já que foi possível a comunicação com o broker MQTT criado e houve o acesso pelo ESP32 para a atualização das informações obtidas pelo ADC. Também foi com sucesso o acesso às tasks criadas devido a cada uma das interrupções geradas, dando controle ao usuário do acesso às leituras dos sensores desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

- [1] "Sensores de corrente Vishay Dale". Embarcados - Sua fonte de informações sobre Sistemas Embarcados. <https://embarcados.com.br/sensores-de-corrente-vishay-dale/> (consult. 2022-11-25).
- [2] "Current Sensing | Analog Devices". Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices. <https://www.analog.com/en/applications/technology/precision-sensor-interface/current-sensing.html> (consult. 2022-11-25).
- [3] Allegro MicroSystems., "Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor," Datasheet, Allegro MicroSystems, 2022.
- [4] Texas Instruments., "L08xx FET-Input Operational Amplifiers (Rev. M)," Datasheet, Texas Instruments, 2021.
- [5] "API Reference - ESP32 - — ESP-IDF Programming Guide latest documentation". Technical Documents | Espressif Systems. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/index.html> (consult. 2022-11-25).
- [6] <https://myqthub.com/>