

MEDIDOR DE FLUXO DE AR – INTRODUÇÃO A MEDIÇÃO DE SISTEMAS DE VÁCUO

Daniel Giardini Lorang⁺¹, Victor Hugo Martins de Souza⁺²

⁺Instrumentação em Física Contemporânea - Instituto de Física,
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

O objetivo final do projeto consiste na montagem de um medidor de vácuo. Como base estabelecida nesse projeto atual, foi realizada a construção de um medidor de fluxo de ar como primeiro passo para a criação de um medidor de vácuo do tipo Pirani. O experimento consiste numa ponte de Wheatstone com resistores de valores próximos à resistência do filamento utilizado. A resistência do filamento varia com sua temperatura, que por sua vez será reduzida pelo fluxo de ar. Utilizamos um circuito de amplificação para conexão com o Arduino Uno que faria a aquisição visual dos dados.

Palavras chaves: Medidor de Fluxo de Ar; Anemômetro de fio quente.

¹ Email: daniellg.lorang@gmail.com

² Email: victormartins.souza@gmail.com

Abstract

The ultimate goal of the project is to assemble a vacuum gauge. As a basis for this current project, the construction of an air flow meter was carried out as a first step in the creation of a Pirani type vacuum meter. The experiment consists of a Wheatstone bridge with resistors close to the resistance of the filament used. The resistance of the filament varies with its temperature, which in turn will be reduced by the air flow. We used an amplifier circuit to connect to the Arduino Uno that would do the visual acquisition of the data.

Keywords: Air Flow Meter; Hot Wire;

1. INTRODUÇÃO

Primeiramente, é de extrema importância explicar como o projeto de construção de um medidor de vácuo se tornou em um projeto de medição de fluxo de ar. O projeto do medidor de vácuo foi, inicialmente, idealizado a ser construído como um medidor do tipo Pirani, será descrito melhor na subseção de Metodologia. Para evitar somente a reprodução dos trabalhos que utilizamos como referências 1 e 2, decidimos incorporar o Arduino Uno para a aquisição de dados. O Arduino possui um limite de tensão e corrente que pode suportar para as suas portas analógicas e digitais, o que nos motivou a encontrar um circuito de amplificação da ponte de Wheatstone que fosse ideal para o nosso objetivo. Os circuitos simulados e testados constam na subseção de Metodologia.

As dificuldades encontradas com os circuitos de amplificação fizeram com que o projeto se tornasse a construção de um medidor de fluxo de ar, como um primeiro passo para o desenvolvimento de um medidor de vácuo do tipo Pirani. O funcionamento de ambos ocorre utilizando uma ponte de Wheatstone, onde observamos o desequilíbrio provocado na ponte com a variação da resistência do filamento que depende de sua temperatura. Entretanto, apesar das causas de variação de temperatura no filamento serem com base na mesma explicação física, são de longe provocadas de forma parecida. A variedade de aplicação para as pontes de Wheatstone permite a compreensão de diversos comportamentos de aparelhos que tem o mesmo efeito físico por trás. As correlações entre os medidores de vácuo e de fluxo de ar serão abordadas de maneira mais formal, na seção de Referencial Teórico, para validar a sua equivalência.

Os medidores de fluxo de ar são instrumentos usados para realizar medições de velocidade de ar e de outros fluidos. Esses medidores são bastante utilizados na indústria

automotiva para medir a qualidade do ar que entra no motor de combustão interna, bem como em diversas áreas da indústria para medição e controle de fluxo de ar em resfriamento, sopro e secagem, aeração, ventilação, filtragem e mistura de ingredientes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O medidor de fluxo de ar de fio quente, também chamado de anemômetro de fio quente, funciona com base no equilíbrio e desequilíbrio de uma ponte de Wheatstone, provocada pela variação de temperatura no sensor / filamento, que altera sua resistência. A ponte de Wheatstone é um circuito elétrico, como mostra a Figura 1, que utiliza quatro resistências e um voltmímetro, sendo três delas conhecidas e a quarta a ser determinada. Os resistores R_2 e R_X são, respectivamente, um potenciômetro e um resistor de resistência desconhecida a qual será determinada quando a ponte estiver em equilíbrio. A situação de equilíbrio é obtida quando ambos os trechos apresentam a mesma resistência equivalente e, conseqüentemente, o voltmímetro medirá zero volts. O potenciômetro serve para equilibrar a ponte para determinação do valor de R_X , como mostra a Equação (1). A ponte de Wheatstone pode ser usada em sensores de pressão e peso utilizando um resistor sensível à compressão, assim como sensores de temperatura, utilizando a relação entre a resistência e a temperatura, Equação (3). O artigo descreve o uso desse circuito na montagem de um sensor de fluxo de ar aplicando como resistência variável um filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente tipo vela de 60W / 127V, onde segundo a Figura 1 seria R_X .

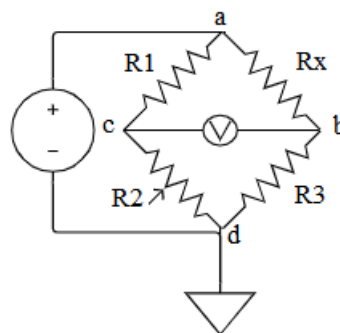


Figura 1 - Circuito da ponte de Wheatstone.

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \quad (1)$$

A resistência elétrica de um resistor pode ser determinada pela primeira de Lei de Ohm, ao se aplicar uma tensão sobre ele e medir a corrente ou vice-versa, Equação (2). Para condutores de metal a resistividade do material varia devido à temperatura, a qual permite definir a resistência em função da temperatura pela Equação (3).

$$R_x = \frac{V_{ab}}{I} \quad (2)$$

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

Onde R_0 é a resistência a 0°C ; T e T_0 são as temperaturas absolutas; e α é um coeficiente de temperatura que depende do material, $\alpha = 4,82 \times 10^{-3} \text{C}^{-1}$ para o tungstênio, porém esse coeficiente é aproximadamente constante para a maioria dos metais no intervalo de temperatura 0°C a 50°C para resistores encapsulados.

Lâmpadas incandescentes possuem um filamento de tungstênio como condutor no interior de um bulbo com gases inertes, para que não haja reação química com o filamento, estendendo sua vida útil. Quando exposto à atmosfera, o filamento deve ser mantido a baixas temperaturas para não entrar em combustão e romper, portanto, deve ser submetido a correntes da ordem de miliampères. A passagem de uma massa de ar pelo filamento provoca seu resfriamento através da transferência de calor entre o condutor e as moléculas do ar.

O medidor de vácuo utiliza do princípio de troca térmica entre um filamento aquecido e as paredes de um recipiente, troca essa mediada pela atmosfera gasosa na faixa de pressão de $0,998 \text{ atm}$ a $1 \times 10^{-3} \text{ atm}$ no ambiente em que o filamento aquecido está localizado. A condutibilidade térmica do gás é uma função complexa da sua pressão. Mantendo-se constante a diferença de temperatura entre o filamento e as paredes do recipiente, a quantidade de calor transferida por unidade de tempo do filamento para o recipiente é uma medida indireta da pressão do gás. De forma parecida funciona o medidor de fluxo de ar, onde a troca de calor é mediada pelo ar à pressão atmosférica e o

fluxo de ar altera a temperatura do filamento e, portanto, sua resistência. Por isso, o experimento de fluxo de ar é um experimento análogo ao de medição de vácuo.

3. METODOLOGIA

3.1 METODOLOGIA PARA O MEDIDOR DE VÁCUO DO TIPO PIRANI

O projeto inicialmente idealizado com o objetivo de construir um medidor de vácuo do tipo Pirani foi fundamentado nas referências [1] e [2]. O medidor do tipo Pirani utiliza de uma ponte de Wheatstone para observar o desequilíbrio entre as resistências, sendo uma o filamento de uma lâmpada e outra um potenciômetro para ajustar a calibração a ponte.

Realizamos simulações e montagens de circuitos que poderiam amplificar pequenas variações de tensão, nos pontos B e C da Figura 1, para conectar ao Arduino. O Arduino Uno R3 tem 6 entradas analógicas, que realizam medidas de tensão no intervalo de 0V – 5V. As pequenas variações de tensão na ponte de Wheatstone, da ordem de poucos mV, deveriam ser amplificadas, pois mesmo estando dentro da faixa de 0V a 5V o Arduino provavelmente não faria a leitura por conta de sua precisão de poucos mV.

Foram testados por volta de 6 tipos de circuitos para possível amplificação. Contudo, irei listar e descrever somente os 3 circuitos que foram mais promissores levando em conta a finalidade de sua criação e as simulações realizadas no LTSpice. Os demais eram circuitos para a qual a finalidade não eram exatamente o que cabia as nossas necessidades de amplificação.

O primeiro circuito a ser testado, Figura 2, construído propriamente para medição de vácuo seria ideal para o projeto de medição de vácuo, porém tivemos que adaptar diversos componentes do circuito, como o amplificador operacional LM324 por um LM741 e o MOSFET IRF520 por um transistor 2N2222. A simulação realizada no software LTSpice com a adaptação para os componentes que tínhamos no laboratório resultou numa tensão de saída muito próxima ao da referência [3]. Entretanto, a montagem não resultou numa amplificação satisfatória.

O terceiro circuito a ser testado foi a utilização de um módulo conversor e amplificador HX711, específico para Arduino e células de carga. O interessante desse componente é, que balanças com células de carga funcionam utilizando ponte de Wheatstone. A princípio, pensamos em adaptá-la para o nosso uso, o que se provou extremamente difícil e cansativo. Utilizamos circuitos básicos de ponte de Wheatstone, com resistores e potenciômetro, para observar o comportamento do HX711 quando utilizamos um código de calibração no Arduino para balanças. Não ficou claro como os fatores de calibração são postos e se as variações que acontecem nas células de cargas são muito maiores que o intervalo necessário para os medidores de vácuo e fluxo de ar.

O HX711 usa o circuito integrado conversor analógico digital para amplificação de tensão de células de carga (ponte de Wheatstone), possui um canal que alimenta a ponte (E+ e E-) e mais dois canais para amplificação de sinal (A+ e A- ; B+ e B-). No canal A de amplificação é possível programar o ganho de 64 ou 128, correspondendo a uma entrada diferencial em escala total de tensão de $\pm 20\text{mV}$ ou $\pm 40\text{mV}$, respectivamente, enquanto o canal B possui somente ganho de 32. Por apresentarem um ganho relativamente alto, achamos que seria possível modificar o HX711 para funcionar como microvoltímetro. Contudo, há somente uma fonte sobre o assunto que não é bem detalhada, como consta na referência [4].

Os testes de diversos circuitos de amplificação tomaram bastante tempo, e como resultado decidimos realizar o medidor de fluxo de ar, que apresenta funcionamento análogo ao medidor de vácuo do tipo Pirani.

3.2 METODOLOGIA PARA O MEDIDOR DE FLUXO DE AR

O medidor de fluxo de ar descrito neste artigo utiliza da variação da queda de potencial elétrico em um filamento de tungstênio devido à passagem de uma massa de ar causando uma oscilação na temperatura do filamento, e consequentemente, na sua resistência. Abaixo temos o esquema do circuito construído do medidor de fluxo de ar, Figura 4.

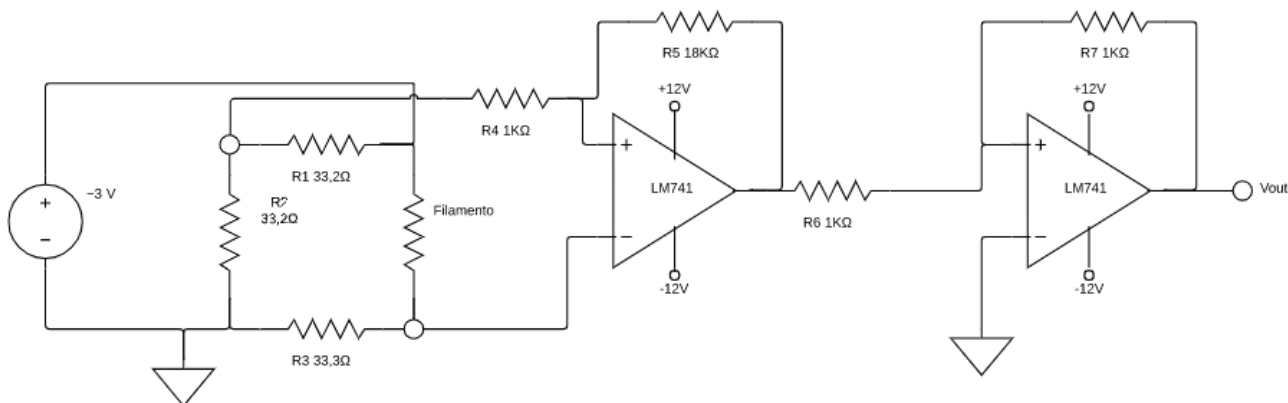


Figura 4 - Circuito atual do medidor de fluxo de ar.

O circuito basicamente é composto de uma ponte de Wheatstone, que temos resistores na ponte de valores muito próximo ao do filamento em temperatura ambiente da sala. Optamos por uma fonte de tensão constante, pois a fonte de corrente constante ocasionava em correntes muito baixas para o filamento. Para determinação dos resistores que iriam compor a ponte de Wheatstone realizamos uma calibração dos valores da resistência da lâmpada antes de retirarmos o vidro e depois de retirarmos o vidro, segundo o circuito abaixo, Figura 5.

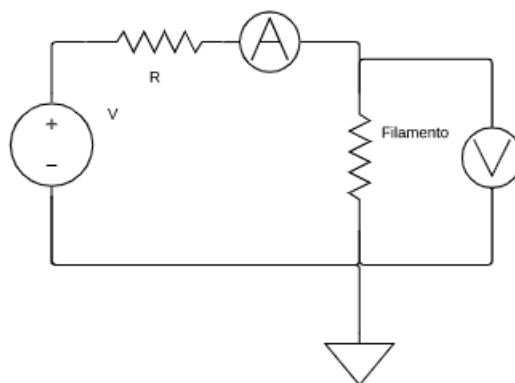


Figura 5 - Circuito de calibração da resistência do filamento.

Medimos a queda de tensão em cima do filamento para ambas as situações citadas acima e a corrente total do circuito. Calculamos a resistência do filamento para diversas tensões de entrada do circuito para observar o comportamento da sua resistência conforme crescia a corrente do circuito, e consequentemente sua temperatura.

Para o filamento dentro da atmosfera controlada do vidro da lâmpada utilizamos um resistor de 220 Ω em série para calibrar sua resistência. Segue abaixo os valores obtidos da calibração.

U (V)	δ_U (V)	I (mA)	δ_I (mA)	R_f (Ω)
0,11	0,01	4,90	0,10	22,45
0,17	0,01	7,50	0,10	22,67
0,19	0,01	8,50	0,10	22,35
0,27	0,01	11,90	0,10	22,69
0,42	0,01	18,50	0,10	22,70
0,34	0,01	15,20	0,10	22,37
0,45	0,01	19,80	0,10	22,73
0,52	0,01	22,50	0,10	23,11
0,59	0,01	25,30	0,10	23,32
0,66	0,01	28,00	0,10	23,57
0,72	0,01	30,40	0,10	23,68
0,78	0,01	32,70	0,10	23,85
0,82	0,01	34,30	0,10	23,91
0,88	0,01	36,30	0,10	24,24
0,92	0,01	37,90	0,10	24,27
0,98	0,01	39,90	0,10	24,56
1,07	0,01	42,90	0,10	24,94
1,14	0,01	44,90	0,10	25,39
1,21	0,01	47,20	0,10	25,64

Tabela 1 - Calibração da resistência do filamento com a atmosfera controlada do bulbo da lâmpada.

Onde U é a queda de tensão no filamento, I é a corrente total em mA no circuito e R_f a resistência variável do filamento.

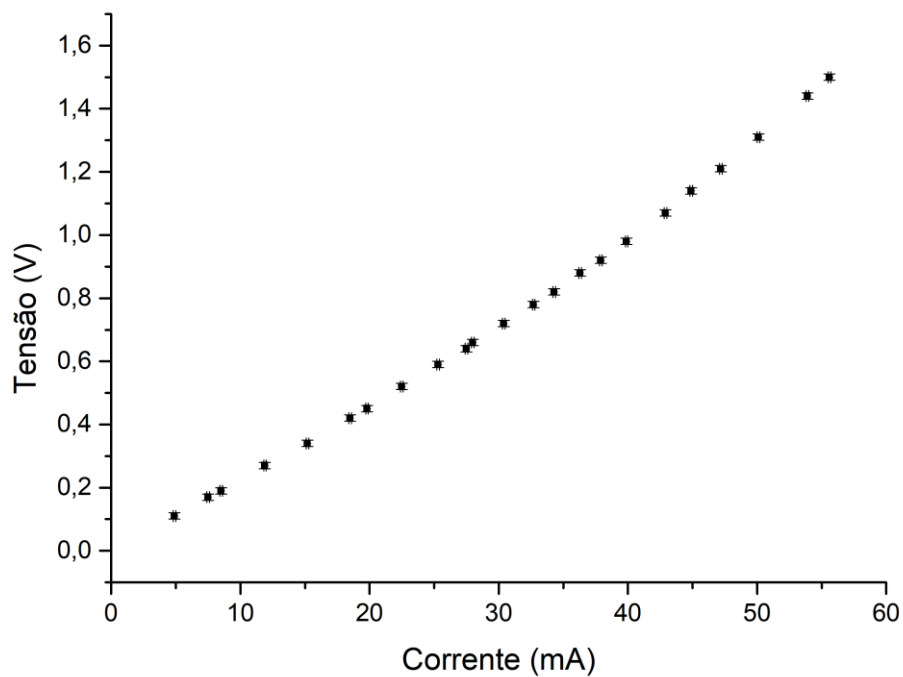


Gráfico 1 - Calibração da resistência do filamento com a atmosfera controlada do bulbo da lâmpada.

Vemos um comportamento quase linear, por conta do intervalo de pequenas correntes e tensões. O filamento nunca chega ao ponto de ficar incandescente.

Para o filamento dentro da atmosfera controlada do vidro da lâmpada utilizamos um resistor de $330\ \Omega$ em série para calibrar sua resistência. Segue abaixo os valores obtidos da calibração.

U (V)	δ_U (V)	I (mA)	δ_I (mA)	R_f (Ω)
0,08	0,01	2,80	0,10	28,57
0,10	0,01	3,30	0,10	30,30
0,12	0,01	4,00	0,10	30,00
0,18	0,01	5,90	0,10	30,51
0,20	0,01	6,70	0,10	29,85
0,25	0,01	8,20	0,10	30,49
0,30	0,01	8,50	0,10	35,29
0,35	0,01	9,70	0,10	36,08
0,40	0,01	11,10	0,10	36,04
0,45	0,01	13,30	0,10	33,83
0,50	0,01	14,70	0,10	34,01
0,56	0,01	16,30	0,10	34,36
0,61	0,01	17,40	0,10	35,06
0,65	0,01	18,50	0,10	35,14
0,70	0,01	19,70	0,10	35,53
0,75	0,01	21,40	0,10	35,05
0,82	0,01	22,60	0,10	36,28
0,84	0,01	23,70	0,10	35,44
0,89	0,01	25,90	0,10	34,36
0,94	0,01	28,20	0,10	33,33
1,00	0,01	29,90	0,10	33,44
1,07	0,01	34,30	0,10	31,20
1,20	0,01	38,40	0,10	31,25
1,27	0,01	41,60	0,10	30,53
1,39	0,01	46,70	0,10	29,76
1,53	0,01	50,10	0,10	30,54

Tabela 2 - Calibração da resistência do filamento sem a atmosfera controlada do bulbo da lâmpada.

Podemos perceber que o comportamento fora da atmosfera controlada do bulbo da lâmpada tem valores que vão depender muito da atmosfera do ambiente ao entorno. Mesmo submetida a uma corrente alta, sua temperatura obviamente está sendo reduzida. Uma possível explicação é o ar condicionado da sala ter diminuído a temperatura da sala, ocasionando a queda de temperatura do filamento, e com isso a sua resistência. Também vale ressaltar que houve um aumento da resistência em comparação com a atmosfera controlada do bulbo da lâmpada.

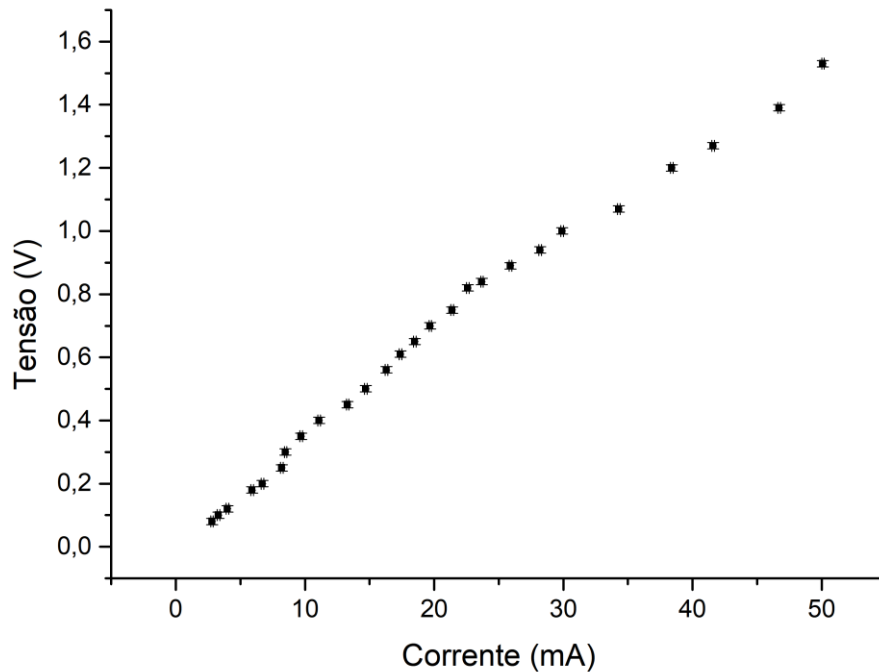


Gráfico 2 - Calibração da resistência do filamento sem a atmosfera controlada do bulbo da lâmpada.

Contudo, há intervalos onde o crescimento é razoável para as nossas exigências de limitação de corrente impostas para o bom funcionamento dos amplificadores operacionais LM741, que segundo o datasheet, é no máximo de 30 mA. A corrente total do circuito do medidor de fluxo de ar, na Figura 4, é de 45 mA, o que resulta em 20 mA para cada braço da ponte aproximadamente, devido à variação da resistência do filamento.

O circuito de amplificação utilizamos uma montagem inversora com realimentação, ajustando os resistores para obter o ganho. Um detalhe interessante é que não há terra conectado ao primeiro amplificador operacional, o que faz dele uma montagem em modo diferencial. A amplificação ocorre porque a variação da ponte é da ordem de mV. Os valores dos resistores são $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ e $R_5 = 18 \text{ k}\Omega$.

$$\mu_{CL} = -\frac{R_5}{R_4} \quad (4)$$

Com o ganho negativo não podíamos ainda conectar ao Arduino. Por isso, utilizamos novamente um amplificador operacional com ganho 1 para inverter o sinal do primeiro amplificador operacional.

Por fim, conectamos ao Arduino para processar os dados analógicos e julgar por comparação de valores sem fluxo de ar e com fluxo de ar se acende ou não um LED. O programa utilizado para o Arduino está em anexo.

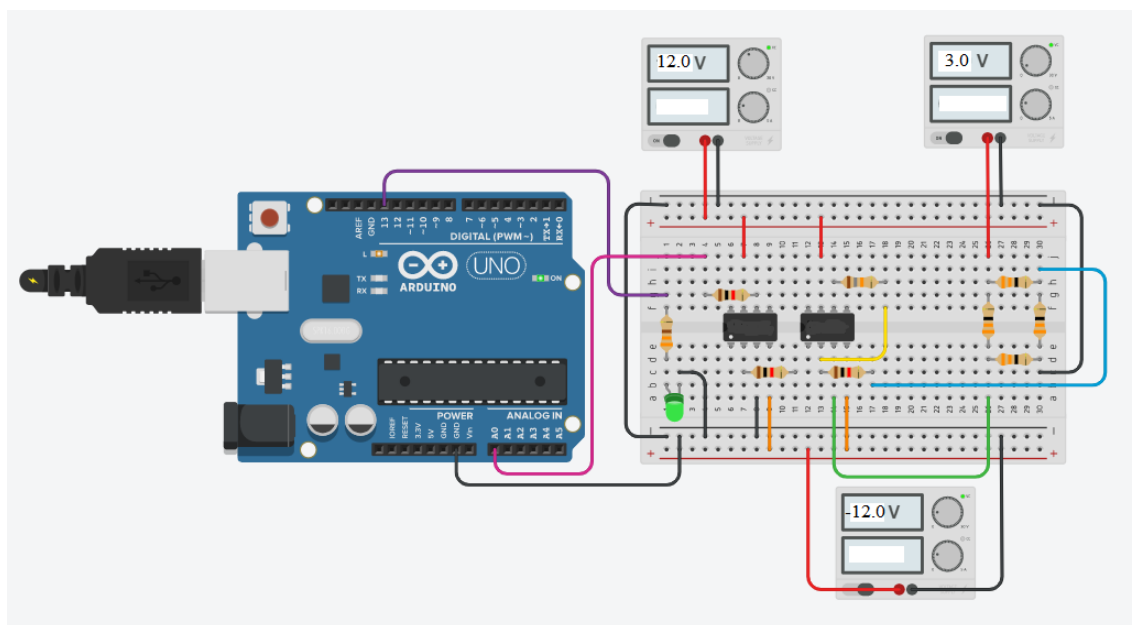


Figura 6 - Circuito do medidor de fluxo de ar com o Arduino Uno R3.

4 CONCLUSÃO

O projeto exposto neste artigo, apesar de não ter alcançado o seu objetivo inicial, resultou em um medidor de fluxo de ar funcional que detecta a presença de deslocamento de massas de ar pelo filamento. Apesar de bem sensível, não tem boa precisão, pois os valores de resistência variam demais com a temperatura do ambiente. A sua calibração deve ser feita no local em que será utilizado após sua resistência se tornar, aproximadamente, estável com a passagem de corrente e a exposição a temperatura do ambiente.

Para fluxos de ar de curta duração sua calibração é rapidamente restabelecida devido a pequena queda de sua temperatura, porém para fluxos contínuos ou de longa duração o filamento sofre um resfriamento que atrasa a calibração, devendo esperar que o filamento entre novamente em equilíbrio térmico com o ambiente para que a corrente e a resistência do filamento fiquem estáveis.

Outro detalhe interessante é a relação entre a corrente do circuito e a resistência do filamento dada pela primeira Lei de Ohm. Ao ter um fluxo de ar prolongado temos a redução da temperatura e resistência do filamento, isso altera a resistência equivalente do circuito que modifica a corrente, já que a fonte de tensão é constante.

Uma proposta para o aprimoramento deste medidor seria introduzir ao código da programação do Arduino a tomada de medidas de referência visando gerar uma média de valores obtidos do sensor analógico do Arduino para realizar a calibração automática e estabelecer como contra medida para falsos positivos que o LED só deve ser acionado caso o valor medido seja 5 unidades acima da média.

REFERÊNCIAS

- [1] DA SILVA, D. M.; *F 530 Relatório Final Sensor de Vácuo tipo Pirani e Indicador de Vácuo Analógico*, Campinas. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F530_F590_F690_F895/F530_F590_F690_F895_2012_sem1/DouglasM-Richard_RF1_F530.pdf>.
Acesso em: junho, 2019.
- [2] CESAR, F. L.; *F 609 Relatório Final Pirani*, Campinas. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F609_2010_sem2/FabioL-Abner_RF2.pdf>. Acesso em: junho, 2019.
- [3] SCHMAUS, R.; *Thermistor Vacuum Gauge*. Disponível em: <<http://www3.telus.net/schmaus2/vacf/thermis.html>>. Acesso em: junho, 2019.
- [4] SEBASTIAN, C.; *HX711 - ADC 24Bit - MicroVoltmeter con Arduino*. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Fi8nvj8OQaU>>. Acesso em: junho, 2019.
- [5] ÖNOL, A.; *A simple constant-resistance thermistor Pirani gauge*. J. Phys. E: Sci. Instrum. **11** 294, 1978.
- [6] MCKAY, E. M.; *The output and sensitivity of the vacuum gauges using a heated elemento in a Wheatstone bridge*. J. Phys. E: Sci. Instrum. **2** 305, 1969.
- [7] ENGLISH, J.; *A wide range constant-resistance Pirani gauge with ambiente temperature compensation*. J. Sci. Instrum. **42** 77, 1965.