

**Disciplina: Instrumentação Eletrônica**

**Prof: Dra. Letícia Vieira Guimarães**

**Aluno (a): Filipe Tormes Mengue**

**Curso: Engenharia de Computação (Guaíba)**

## **Anemômetro com Sensor Óptico ITR8102 e Arduino Nano**

### **INTRODUÇÃO**

Um anemômetro é um instrumento meteorológico cuja função é medir a velocidade do vento. O objetivo deste trabalho foi projetar e construir um protótipo de anemômetro de baixo custo, com materiais reciclados, aplicando conhecimentos acumulados no decorrer do curso até a presente disciplina de Instrumentação para fins didáticos.

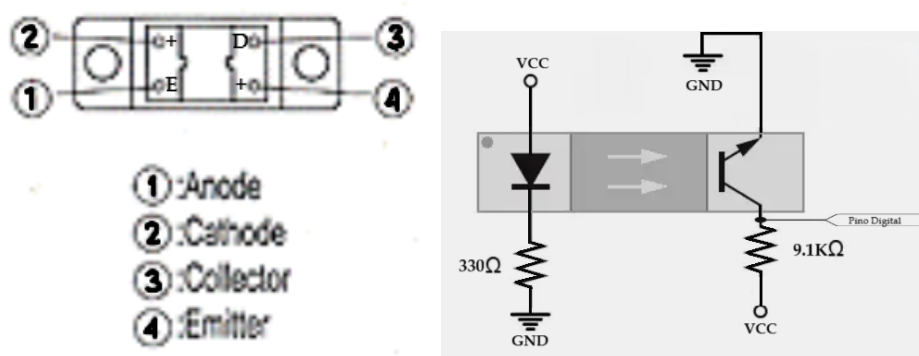
### **METODOLOGIA**

#### *Estrutura e construção mecânica*

O protótipo do anemômetro foi desenvolvido com foco em baixo custo e reaproveitamento de materiais, sem comprometer a funcionalidade. A parte mecânica consiste em um conjunto giratório formado por quatro pás (ou copos), em uma disposição simétrica em cruz, fixadas ao eixo central. Esse eixo foi montado sobre dois rolamentos posicionados em

extremidades opostas de uma base plástica, permitindo rotação suave e com baixa fricção, fator essencial para que o sistema reaja mesmo a ventos de baixa intensidade.

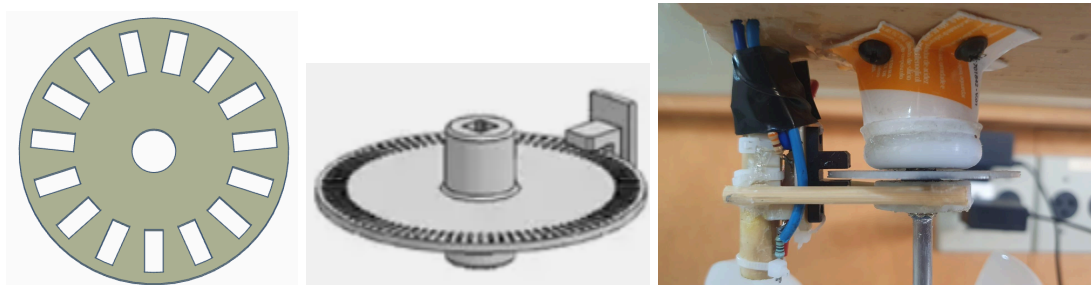
Acoplado ao mesmo eixo encontra-se um disco perfurado impresso em 3D, que atua como encoder óptico. Esse disco possui furos equidistantes e é posicionado de forma precisa entre o emissor e o receptor de um sensor óptico do tipo fenda, modelo ITR8102. Em seguida, exemplifico a conexão necessária para o funcionamento do sensor:



**Figura 1: Sensor óptico de fenda ITR8102 e seu esquemático de ligação fundamental.**

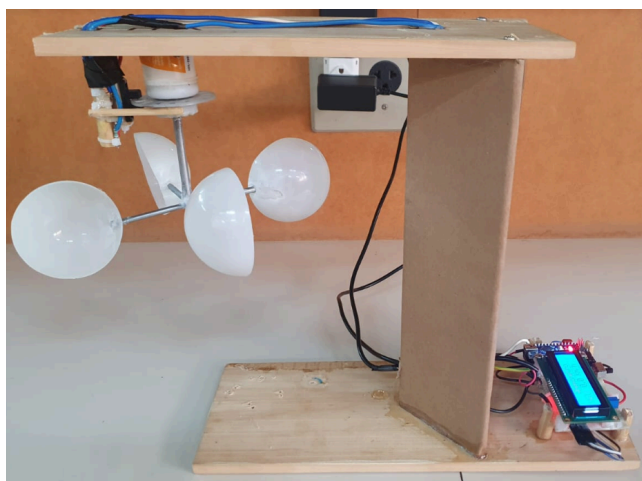
Esse sensor funciona com base na interrupção do feixe de luz infravermelha: sempre que um furo no disco passa pela fenda, o feixe não é interrompido, gerando uma variação detectável. Cada interrupção corresponde a um pulso, que pode ser interpretado como parte de uma rotação.

O disco encoder foi fixado rigidamente ao eixo central de forma que mantenha o alinhamento entre os furos e a abertura do sensor ITR8102 durante toda a rotação. O conjunto foi montado com cuidado para manter alinhamento axial e simetria, minimizando vibrações e evitando leituras falsas ou instabilidade na contagem dos pulsos. A seguir se encontram o design do disco, assim como a disposição do sensor com o disco perfurado:



**Figura 2: Design do disco encoder impresso em 3D (esquerda), posicionamento do disco em relação ao sensor (centro) e foto do conjunto real montado no eixo (direita).**

Para maximizar a sensibilidade e permitir resposta rápida ao vento, tanto o eixo quanto os copos foram construídos com materiais de baixa massa, como plástico e estruturas metálicas ocas. Isso em busca de reduzir a inércia do sistema e permitir que o conjunto alcance maiores velocidades com menor esforço, melhorando a resposta do anemômetro em condições reais de vento.

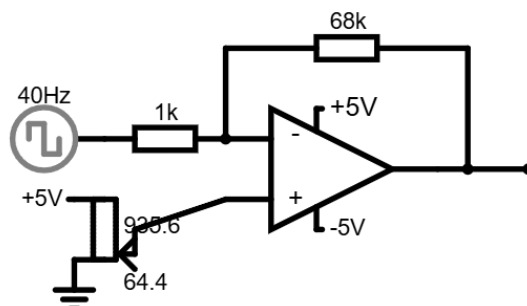


**Figura 3: Visão geral do protótipo final do anemômetro, destacando a estrutura de suporte, o conjunto giratório e o circuito de controle e exibição na base.**

### *Interpretação e apresentação do sinal*

O microcontrolador escolhido foi o Arduino Nano, principalmente devido ao seu tamanho compacto. Para que o sinal gerado pelo sensor pudesse ser corretamente interpretado pelo microcontrolador, foi necessário projetar uma etapa de condicionamento do sinal. Inicialmente, verificou-se, por meio de um osciloscópio, que a saída do sensor apresentava variações de tensão muito pequenas (na ordem de 150 a 200 milivolts), o que não é suficiente para ser detectado pela entrada digital do Arduino.

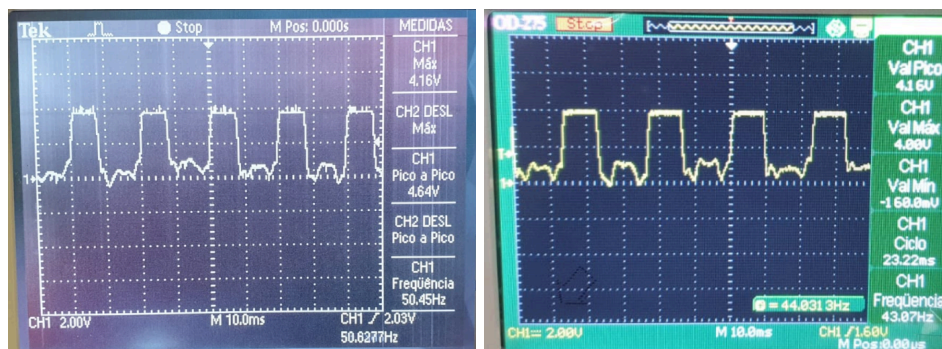
Dessa forma, foi implementado um amplificador de sinal utilizando um amplificador operacional (LM741), na sua configuração inversora com offset ajustável, como pode ser visto na imagem a seguir:



**Figura 4: Esquemático do circuito do amplificador**

Esse circuito teve como função elevar os pulsos analógicos vindos do sensor para a faixa próxima de 0 a 5V (no qual se obteve uma variação pico a pico de aproximadamente 4 V), garantindo que o Arduino detectasse corretamente as transições que representam a passagem dos furos do disco encoder. O sinal de saída apresentava muitos ruídos, então foi incluído um

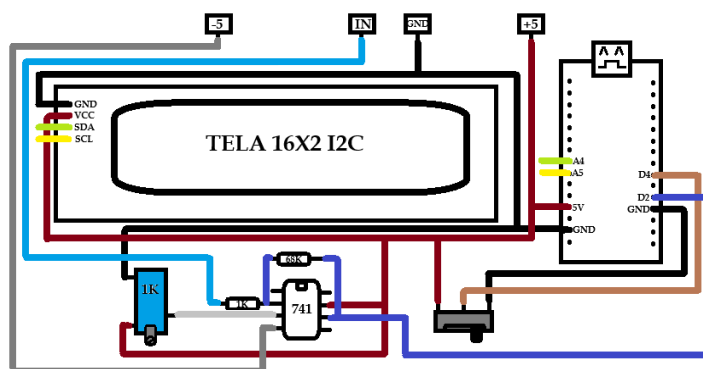
capacitor de desacoplamento à saída do amplificador, funcionando como filtro passa-baixas para atenuar ruídos de alta frequência.



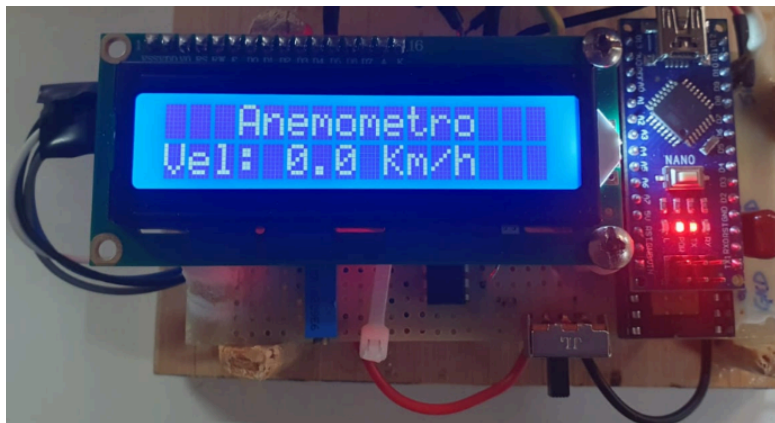
**Figura 5: Comparativo do sinal no osciloscópio antes e depois da inclusão do capacitor. O sinal original possuía ruídos de alta frequência no seu pico, que podem afetar o cálculo da frequência.**

Com o sinal amplificado, ele foi conectado ao pino digital 2 do Arduino Nano, configurado para detectar cada transição de borda de subida (RISING), onde um contador de pulsos era incrementado, acumulando os eventos de rotação para posterior cálculo da frequência.

Além da leitura e interpretação do sinal, foi desenvolvido um circuito dedicado para a apresentação dos dados medidos, com um display LCD 16x2 com interface I2C, para exibição da velocidade do vento em tempo real.



**Figura 6: Diagrama completo do circuito do anemômetro.**



**Figura 7: Display LCD em funcionamento, exibindo a velocidade do vento medida pelo protótipo em tempo real.**

## CALIBRAÇÃO E TESTES

Para determinar a velocidade do vento, o sistema inicialmente realiza a leitura da frequência dos pulsos gerados pelo sensor óptico. Cada furo no disco encoder representa um evento detectado como uma transição de sinal digital. Esses pulsos são contados ao longo de janelas de tempo fixas (70 ms), e a frequência média é calculada com base em um buffer de amostras (140 amostras), conforme demonstrado no código abaixo:

```
const int NUM_AMOSTRAS = 140;
const unsigned long INTERVALO_MS = 70;
unsigned long contagensPulsos[NUM_AMOSTRAS];
// Função da Interrupção com Debounce para desconsiderar frequências de ripple
void contadorPulso() {
    unsigned long agora_us = micros();
    // Se o tempo desde o último pulso válido for maior que o nosso intervalo de debounce...
    if (agora_us - ultimoPulso > INTERVALO_DEBOUNCE_US) {
        pulsoCount++; // ...então contamos como um pulso válido.
        ultimoPulso = agora_us; // E atualizamos o tempo do último pulso.
    }
}
```

**Figura 8: Implementação da rotina de contagem dos pulsos. A função utiliza um debounce por software para evitar o ripple da transição.**

```

noInterrupts();
contagemAtual = pulsoCount;
pulsoCount = 0;
interrupts();
contagensPulsos[indiceAmostra] = contagemAtual;
indiceAmostra++;
if (indiceAmostra >= NUM_AMOSTRAS) {
    indiceAmostra = 0; // Volta para o início se chegar ao fim
}
for (int i = 0; i < NUM_AMOSTRAS; i++) {
    somaPulsos += contagensPulsos[i];
}
float mediaPulsos = (float)somaPulsos / NUM_AMOSTRAS;
frequenciaMedia = mediaPulsos / (INTERVALO_MS / 1000.0);

```

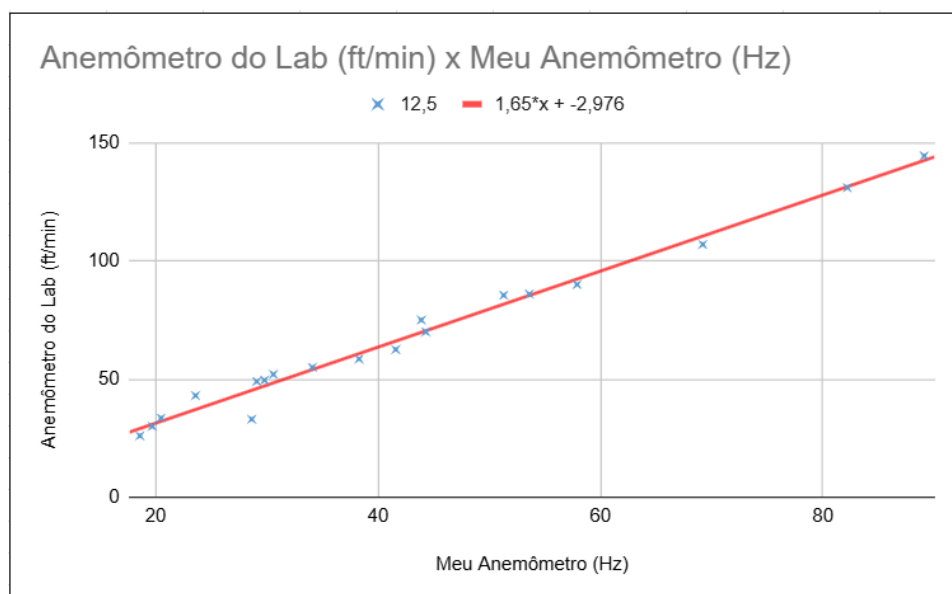
**Figura 9: Lógica para o cálculo da frequência média.**

Para a calibração, foi utilizado um anemômetro de laboratório confiável como instrumento de referência. As medições foram realizadas sob diferentes velocidades de vento, geradas por um secador de cabelo com duas intensidades (velocidade 1 e velocidade 2). Para cada intensidade e distância, foram anotadas a frequência registrada pelo protótipo e a velocidade medida pelo anemômetro do laboratório. Optou-se por expressar a velocidade em pés por minuto (ft/min), pois essa unidade apresentou maior dispersão numérica entre os dados, favorecendo a análise e o ajuste da curva de calibração.

	Secador de cabelo (Duas velocidades)		
N	Meu Anemômetro (Hz)	Anemômetro do Lab (ft/min)	Distância (cm)
1	53,6	86	0
2	43,9	75	5
3	41,6	62,5	10
4	34,1	55	15
5	29,1	49	20
6	23,6	43	25
7	20,5	33,5	30
8	19,7	30	35
9	18,6	26	40
10	16,4	12,5	45
11	89,1	144,5	0
12	82,2	131	5
13	69,2	107	10
14	57,9	90	15
15	51,3	85,5	20
16	44,3	70	25
17	38,3	58,5	30
18	30,6	52	35
19	29,8	49,5	40
20	28,65	33	45

**Tabela 1: Coleta de dados da calibração, relacionando a frequência medida com a velocidade de referência em diferentes condições de vento.**

Com os dados obtidos, foi elaborado um gráfico de dispersão relacionando frequência e velocidade. Utilizando regressão linear simples, chegou-se à equação da reta que melhor representa o comportamento do sistema:



**Gráfico 1: Gráfico de dispersão e regressão linear dos dados de calibração. A reta vermelha ( $y=1,65x-2,976$ ) representa a equação encontrada para converter a frequência do protótipo em velocidade do vento.**

A equação obtida permite estimar a velocidade do vento em ft/min. Para conversão a m/s ou km/h, multiplicou-se o resultado por fatores de conversão apropriados, que foram extraídos do anemômetro já funcional:



```

const float a = 1.65; // Coeficientes da equação de velocidade
const float b = -2.976;
Velocidade = (a*frequenciaMedia) + b;
if ( Velocidade <= 0)
{
    Velocidade = 0;
}
velocidade_ms = Velocidade * 0.05065;
velocidade_kmh = velocidade_ms * 3.6;

```

**Figura 11: Implementação da equação de calibração. O código converte a frequência média em velocidade, utilizando os coeficientes obtidos, e depois realiza a conversão para as unidades de m/s e km/h.**

Com base nos testes, observou-se que a equação obtida apresentou um erro médio de aproximadamente 3,6 ft/min. Esse erro corresponde a 2,49% do fundo de escala, considerado aceitável dentro do propósito didático do projeto. A linearidade do gráfico e a repetibilidade dos testes indicam que o sistema é confiável dentro da faixa de operação testada.

	Y calculado	Y medido	Módulo erro	Erro
1	24,084	12,5	11,584	92,67%
2	27,714	26	1,714	6,59%
3	29,529	30	0,471	1,57%
4	30,849	33,5	2,651	7,91%
5	35,964	43	7,036	16,36%
6	44,2965	33	11,2965	34,23%
7	45,039	49	3,961	8,08%
8	46,194	49,5	3,306	6,68%
9	47,514	52	4,486	8,63%
10	53,289	55	1,711	3,11%
11	60,219	58,5	1,719	2,94%
12	65,664	62,5	3,164	5,06%
13	69,459	75	5,541	7,39%
14	70,119	70	0,119	0,17%
15	81,669	85,5	3,831	4,48%
16	85,464	86	0,536	0,62%
17	92,559	90	2,559	2,84%
18	111,204	107	4,204	3,93%
19	132,654	131	1,654	1,26%
20	144,039	144,5	0,461	0,32%
Erro médio			3,600225	10,74%
Percentual do erro (Erro médio/Fundo de escala)			2,49%	

**Tabela 2: Análise de erro da calibração, comparando os valores de velocidade medidos com os valores calculados pela equação de regressão e o respectivo erro para cada ponto da medição.**

## PROBLEMAS ENFRENTADOS

Durante o desenvolvimento do protótipo, dois grandes desafios se destacaram, tanto na parte mecânica quanto na etapa de calibração.

O principal problema enfrentado foi a construção da estrutura física do anemômetro. Como a confiabilidade das medições depende diretamente da estabilidade e eficiência do conjunto giratório, era fundamental que o eixo estivesse perfeitamente centralizado, que os componentes fossem leves para minimizar a inércia e que todo o sistema pudesse girar livremente, com o mínimo de atrito possível. Alcançar essas condições exigiu diversas iterações no projeto físico. Várias versões foram montadas e testadas até que se chegasse à configuração atual. Pequenos desalinhamentos, excesso de massa ou imperfeições no encaixe do disco comprometiam a sensibilidade do sistema, aumentando sua inércia e o atrito estático.

Outro problema importante surgiu na etapa de calibração do sistema, que exigia a comparação das frequências medidas pelo protótipo com os valores indicados por um anemômetro funcional de referência. Como ambos os dispositivos dependem da incidência direta do vento para operar corretamente, tornou-se um desafio garantir que os dois estivessem expostos exatamente à mesma intensidade de vento durante os testes. Mesmo com o uso de uma fonte de vento contínua (o secador de cabelo), pequenas variações no posicionamento dos dispositivos ou na turbulência do fluxo podiam causar diferenças significativas nas leituras. Essa limitação introduz uma margem de incerteza nas medições, que pode ter influenciado a precisão da equação de calibração obtida.

## CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpriu com sucesso o seu objetivo de projetar e construir um anemômetro funcional de baixo custo, utilizando materiais reciclados e componentes eletrônicos acessíveis para fins didáticos. Através da integração de uma estrutura mecânica leve com um sensor óptico, foi possível traduzir a rotação do eixo em uma frequência de pulsos, a qual foi calibrada por comparação com um instrumento de referência. O resultado foi uma equação de conversão confiável, que permitiu aferir a velocidade do vento com elevada precisão para o contexto experimental, apresentando um erro médio inferior a 3%.

Apesar dos desafios enfrentados, especialmente na estabilização da estrutura mecânica e na garantia de um fluxo de ar uniforme durante os testes, os resultados obtidos reafirmam a eficácia do protótipo. Desta forma, o projeto valida-se como uma ferramenta prática e eficaz para o ensino de conceitos fundamentais de instrumentação, sensores e sistemas embarcados, concluindo com êxito a sua proposta.

Como possível melhoria futura, destaca-se a adoção de uma versão mais compacta do conjunto mecânico, o que poderia reduzir ainda mais a inércia do sistema, facilitar a montagem e permitir medições mais sensíveis em ambientes com pouco espaço ou vento de baixa intensidade.