

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO LUCCA PEREIRA

NICO IANCOSKI

CONTROLE DA INCLINAÇÃO DE UMA PLATAFORMA: AQUISIÇÃO E
CONDICIONAMENTO DE SINAIS

CURITIBA

2024

PEDRO LUCCA PEREIRA

NICO IANCOSKI

CONTROLE DA INCLINAÇÃO DE UMA PLATAFORMA: AQUISIÇÃO E
CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Projeto realizado sob a orientação do professor Marlio José do Couto Bonfim, como requisito para obtenção da nota parcial da disciplina TE331 – Instrumentação Eletrônica – do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA

2024

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 SENSORES DIGITAIS.....	16
1.2 PROJETO.....	16
2 FUNCIONAMENTO DO SENSOR HC-SR04.....	17
2.1 FORMAS DE ONDA DAS SAÍDAS E ENTRADAS.....	17
2.2 CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL.....	17
2.3 AQUISIÇÃO DA DISTÂNCIA POR MEIO DA LARGURA DE PULSO.....	18
3 ESTRUTURA FÍSICA.....	19
4 MEDIÇÕES E CALIBRAÇÃO DO SENSOR.....	21
4.1 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DO MICROCONTROLADOR.....	21
4.2 TRANSFORMAÇÃO DA DISTÂNCIA EM ÂNGULO.....	21
4.3 VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO SENSOR.....	23
5 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO E ELEMENTO ATUADOR.....	24
5.1 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO.....	24
6 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS.....	25
6.1 CÁLCULO DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO.....	25
6.1.1 CÁLCULO DO VALOR PROVÁVEL.....	25
6.1.2 CÁLCULO DO DESVIO PADRÃO.....	28
6.2 FILTRO DIGITAL.....	28

6.3 RESOLUÇÃO.....	29
7 SISTEMA DE CONTROLE.....	29
7.1 IDENTIFICAÇÃO DA PLANTA.....	29
7.2 PROJETO DO CONTROLADOR.....	30
7.2.1 O CONTROLADOR PID.....	30
7.3 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES DO CONTROLADOR.....	31
7.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA COM CONTROLADOR.....	32
7.5 FUNCIONAMENTO REAL DO SISTEMA.....	33
8 CONCLUSÃO.....	33
9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	34
REFERÊNCIAS.....	35
APÊNDICE 1 – CÓDIGO ARDUÍNO.....	36
APÊNDICE 2 – CÓDIGO MATLAB.....	39
ANEXO 1 – DATASHEET IRF-640N.....	40

EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 2.1.....	18
EQUAÇÃO 4.1.....	21
EQUAÇÃO 4.2.....	21
EQUAÇÃO 4.3.....	22
EQUAÇÃO 6.1.....	25
EQUAÇÃO 6.2.....	28
EQUAÇÃO 6.3:.....	28
EQUAÇÃO 6.4:.....	28
EQUAÇÃO 6.5:.....	29
EQUAÇÃO 7.1.....	30
EQUAÇÃO 7.2.....	30
EQUAÇÃO 7.3.....	30
EQUAÇÃO 7.4.....	31
EQUAÇÃO 7.5.....	31
EQUAÇÃO 7.6.....	31
EQUAÇÃO 7.7.....	32

TABELAS

TABELA 1.....	23
TABELA 2.....	26
TABELA 3.....	27

GRÁFICOS

GRÁFICO 1.....	21
-----------------------	-----------

INDEX OF TABLES

FIGURA 1.....	19
FIGURA 2.....	20
FIGURA 3.....	20
FIGURA 4.....	22
FIGURA 5.....	24
FIGURA 6.....	29
FIGURA 7.....	32
FIGURA 8.....	33
FIGURA 9.....	34
FIGURA 10.....	35

1 INTRODUÇÃO

A utilização de sensores para o monitoramento de grandezas físicas, aliados com um sistema de controle, possibilita o processo de automação das mais diversas atividades, como o movimento coordenado de peças de diferentes máquinas e a navegação de robôs. Através de um sistema de aquisição de sinais, com técnicas de tratamento e correção de medidas, pode-se controlar de maneira estável e segura dispositivos autônomos.

Para sistemas como a navegação de robôs, que dependem de medições de distâncias, um dos sensores mais comuns é o módulo HC-SR04: um sensor de resposta digital que fornece o tempo de deslocamento de ondas ultrassônicas entre o sensor e algum objeto. Com os sinais adquiridos, o microcontrolador consegue calcular a distância dos obstáculos e evitar colisões.

1.1 SENSORES DIGITAIS

Sensores digitais utilizam diversas técnicas para interpretar sinais do ambiente como grandezas elétricas. A grande maioria desses componentes possuem conversores analógico-digital para interpretar os níveis de tensão modulados por determinada característica do ambiente e, a partir disso, representá-los digitalmente na forma de bits.

As medições obtidas através destes sensores podem ser expressas de diversas formas, como valores analógicos (obtidos através do conversor digital analógico do sensor), larguras de pulsos, etc. O sensor de distância HC-SR04 é um destes sensores, detectando distâncias e inserindo essa informação na largura do pulso lido por um de seus “canais”. Com essas leituras, pode-se calcular diversas grandezas relacionadas com o movimento mecânico, como velocidade, posição e ângulo.

1.2 PROJETO

Este projeto tem como objetivo desenvolver um sistema de controle da inclinação de uma plataforma, utilizando um motor acoplado a uma hélice e o sensor de distância HC-SR04.

O ângulo de inclinação da plataforma pode ser computado através das medições do sensor em um microcontrolador e, a inclinação da plataforma, ocorre pelo movimento de rotação do motor e, por sua vez, da hélice. Combinando as leituras do sensor e o acionamento do motor, é possível inclinar a plataforma para o ângulo desejado e mantê-la estável e responsiva a mudanças externas.

Este trabalho detalha o desenvolvimento da estrutura física, do hardware, a aquisição e tratamento dos sinais, o sistema de controle implementado, os resultados obtidos e possíveis melhorias futuras.

2 FUNCIONAMENTO DO SENSOR HC-SR04

O sensor HC-SR04 é um módulo composto de materiais piezoelétricos que geram sinais ultrassônicos que, ao refletirem de determinada superfície, são percebidos novamente no segundo piezoelétrico embutido. As ondas produzidas no sensor possuem uma frequência maior que a audível pelo ser humano (aproximadamente 20kHz) e, por isso, são denominadas ultrassônicas.

2.1 FORMAS DE ONDA DAS SAÍDAS E ENTRADAS

O módulo transmite pulsos de ondas ultrassônicas por um dos materiais piezoelétricos após receber um pulso de pelo menos 10 μ s no pino de *trigger*. O transmissor, então, envia 8 pulsos de 40kHz, que, ao encontrarem com um objeto ou superfície, são refletidos.

A partir do momento que o transmissor termina de enviar os sinais, o pino *echo* do HC-SR04 entrega ao microcontrolador valor lógico alto até receber as reflexões dos pulsos. Com isso, a largura do pulso lido no pino *echo* é proporcional ao tempo que as ondas levaram para atravessar o meio (tanto o tempo de ida como o de volta).

2.2 CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL

O circuito interno do módulo HC-SR04 apresenta um microcontrolador RCWL-9300, muito similar ao Attiny24 (da empresa Microchip), que conta com seu próprio conversor analógico-digital de 10 bits. Este ADC é responsável pela recepção dos sinais, agindo na conclusão do pulso do pino *echo* (sinal referente à distância).

2.3 AQUISIÇÃO DA DISTÂNCIA POR MEIO DA LARGURA DE PULSO

A largura de pulso do HC-SR04 é o que é utilizado para obter-se a distância do sensor à superfície. Sabe-se que a velocidade das ondas de som, no ar, é de aproximadamente 343m/s, e que a distância percorrida pela onda compreende a ida (do sensor à superfície) e a reflexão (da superfície ao sensor).

Assumindo que a superfície se encontra estacionária durante o período de medições, é possível concluir que a distância, em centímetros, medida entre o sensor e a superfície é dada pela EQUAÇÃO 2.1, na qual Δt_{pulso} é a largura do pulso em segundos.

$$d_{med} = 0.01715 \times \Delta t_{pulso}$$

EQUAÇÃO 2.1

Contudo, o sinal lido no sensor é contaminado com ruído e, pela natureza de ondas (que propagam-se pelo espaço), há o problema de reflexões parasitas - ocasionadas por pulsos antigos, cujas reflexões vêm de direções diferentes das da superfície observada e são demasiado atrasadas ao chegar ao receptor do sensor. Não apenas isso, mas existem também os erros de quantização relacionados à conversão analógica-digital presentes no microcontrolador do módulo HC-SR04.

Outros ruídos presentes no ambiente, como ruídos da rede elétrica e ruído térmico (proveniente das características inerentes dos componentes reais utilizados na construção do módulo) contribuem para uma medição menos precisa. Como estas fontes produzem ruídos aleatórios (que não podem ser modelados de maneira simples), pouco pode-se fazer para impedi-los de impactar na qualidade dos sinais obtidos (principalmente em um sensor com resposta já digital).

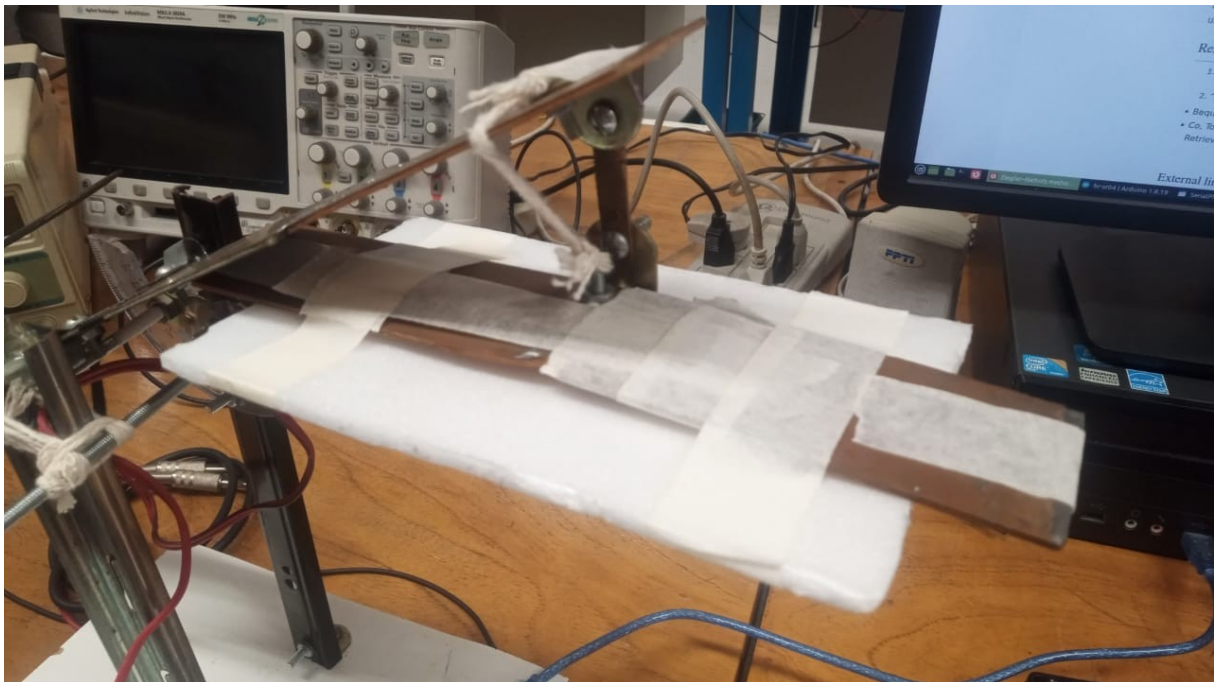
É importante notar, também, que para que haja as reflexões totais das ondas de ultrassom, as mesmas devem possuir um ângulo de incidência (em relação ao vetor normal da superfície em questão) extremamente baixo, idealmente nulo. Por isso foram necessários suportes na estrutura física que garantissem essa condição (ortogonalidade ininterrupta entre a direção do deslocamento das ondas e um suporte) que, então, levaram a uma medição mais confiável da distância.

3 ESTRUTURA FÍSICA

A estrutura física do projeto consiste em quatro partes principais: a plataforma inclinável, um suporte para a leitura, os eixos de fixação da plataforma inclinável e a base de suporte.

A plataforma inclinável possui em uma de suas extremidades um motor acoplado a uma hélice e, na outra, um suporte para a leitura que, independentemente da inclinação da plataforma, mantém-se com a mesma inclinação. Este suporte é preso por parafusos não apertados completamente, que o seguram em um espaço livre o suficiente para poder rotacionar sem nenhuma resistência, como está indicado na FIGURA 1.

FIGURA 1



Fonte: Pedro Lucca Pereira (2024).

Os eixos são fixados um ao outro com duas hastes de metal, uma em cada lado, que também servem para limitar a inclinação máxima da plataforma, e a suportam com dois parafusos de movimento livre presos a um encaixe em forma de pinça fixado nela. A configuração é robusta e impede a barra de se inclinar no eixo

horizontal, ainda permitindo o movimento rotacional da mesma, como mostra a FIGURA 2.

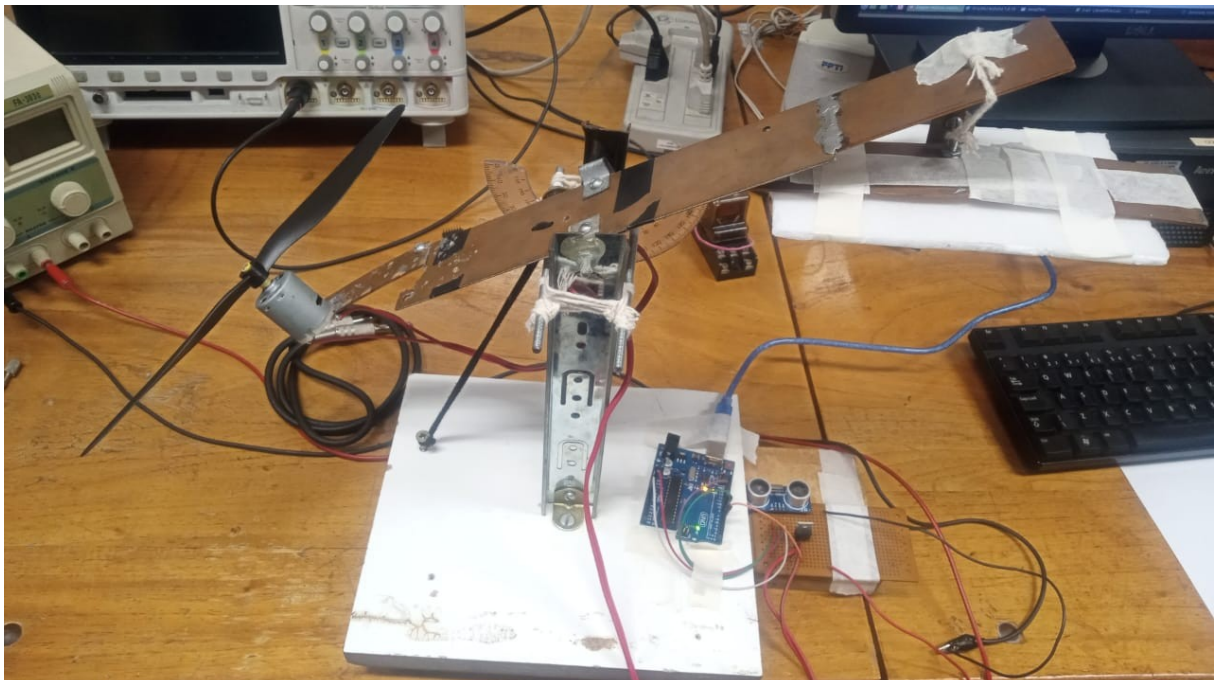
FIGURA 2



Fonte: Pedro Lucca Pereira (2024).

Por fim, os eixos de suporte foram fixos em uma base de madeira que também comporta o microcontrolador e o sensor, além de um elástico também fixo a extremidade da plataforma com o motor. A FIGURA 3 mostra a estrutura final.

FIGURA 3



Fonte: Pedro Lucca Pereira (2024).

Com essa montagem, a plataforma inclinável gira em torno de um eixo conhecido, possibilitando o correto cálculo da inclinação, o suporte de leitura fornece uma superfície em 90° para a reflexão do sinal do sensor, e existe uma força contrária ao movimento das hélices, que permite a inclinação no sentido oposto ao movimento gerado pelo motor. Para verificar se o ângulo calculado está correto, um transferidor foi preso a um dos eixos de suporte.

4 MEDIÇÕES E CALIBRAÇÃO DO SENSOR

O sistema de medição foi implementado no microcontrolador Arduino UNO. O Arduino foi responsável por processar os dados obtidos e transformá-los de largura de pulso para ângulo.

4.1 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DO MICROCONTROLADOR

O microcontrolador é construído em cima do microprocessador Atmega328, da empresa Microchip. Possui uma frequência de *clock* de 16 MHz, 14 pinos digitais (possíveis de configurar tanto como entrada e saída) e 6 pinos analógicos.

O conversor analógico-digital do Arduino UNO é um conversor de aproximações sucessivas de 10 bits, operando de 125 kHz a 8 MHz. A modulação PWM é a forma do microcontrolador de entregar sinais analógicos em suas saídas.

4.2 TRANSFORMAÇÃO DA DISTÂNCIA EM ÂNGULO

Para converter a medida da distância em ângulo, foi calculado o seno do ângulo formado pelo triângulo retângulo com hipotenusa na plataforma, com tamanho conhecido, e cateto oposto na distância computada acrescida do tamanho do eixo de fixação do suporte.

Observando a FIGURA 4, temos que:

$$\sin(\alpha) = (d_{lido} + d_{eixo} - h_{suporte}) \div t_{plataforma}$$

EQUAÇÃO 4.1

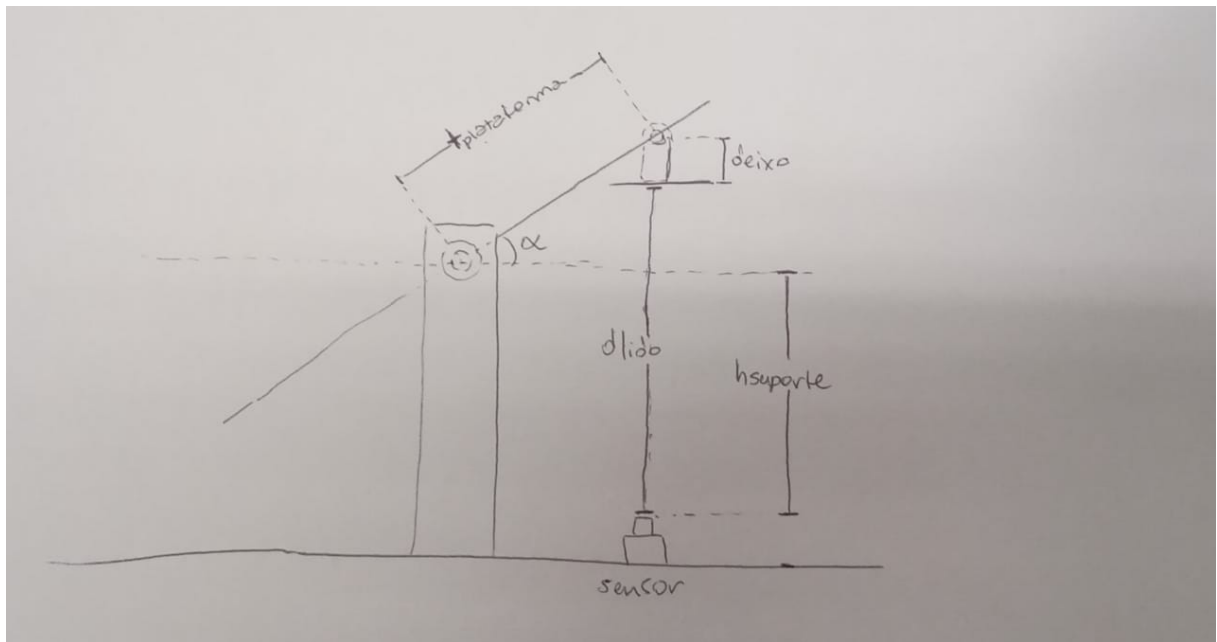
$$\alpha = \arcsin(\alpha)$$

EQUAÇÃO 4.2

Para que o ângulo fique dentro da faixa desejada, foi necessário somar um *offset* de 20 graus e inverter o sinal. Com isso, a EQUAÇÃO 4.3 mostra a equação final de calibração para o ângulo em graus.

$$\alpha = -\arcsin(\alpha) * 180 \div \pi + 20$$

EQUAÇÃO 4.3

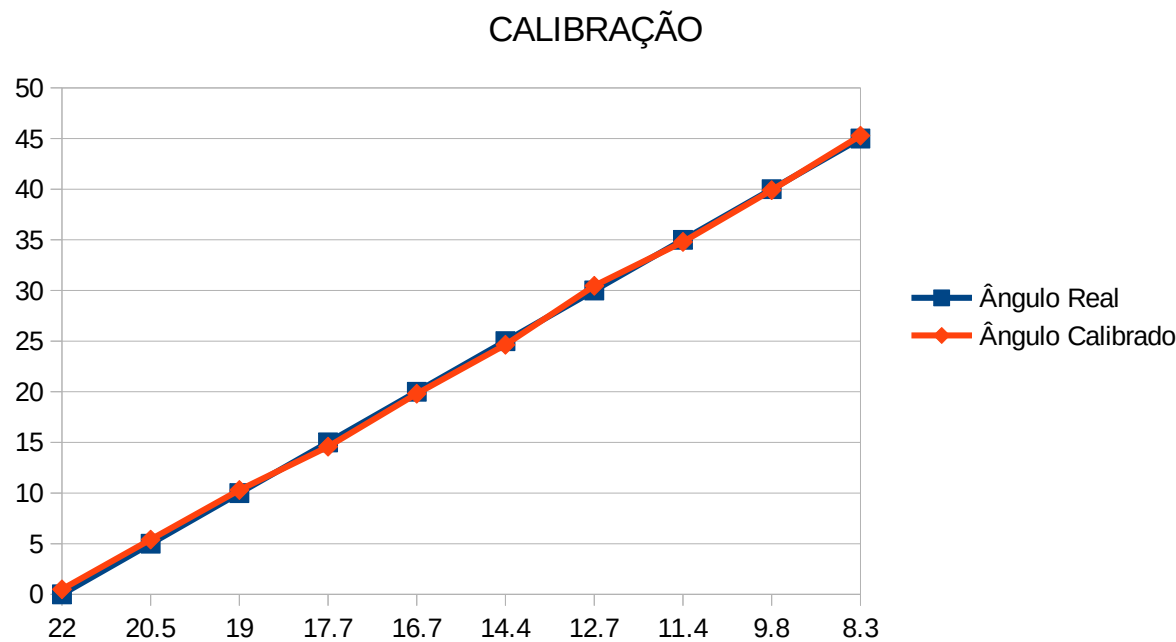


Fonte: Pedro Lucca Pereira (2024).

4.3 VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO SENSOR

Para verificar a corretude da calibração, foi comparado o ângulo esperado para determinada distância com o ângulo calculado pela equação de calibração. Os valores obtidos podem ser observados na TABELA 1 e no GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1



Fonte: Nico Iancoski (2024).

TABELA 1

Distância	Ângulo Real	Ângulo Calibrado
22	0	0.5
20.5	5	5.41
19	10	10.3
17.7	15	14.58
16.7	20	19.8
14.4	25	24.64
12.7	30	30.46
11.4	35	34.79
9.8	40	39.9
8.3	45	45.28

Fonte: Nico Iancoski (2024).

5 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO E ELEMENTO ATUADOR

O atuador necessário para o projeto será um motor acoplado a uma hélice. Ao ser acionado, o motor empurra o ar para baixo e, a partir disso, desloca a plataforma para um ângulo qualquer.

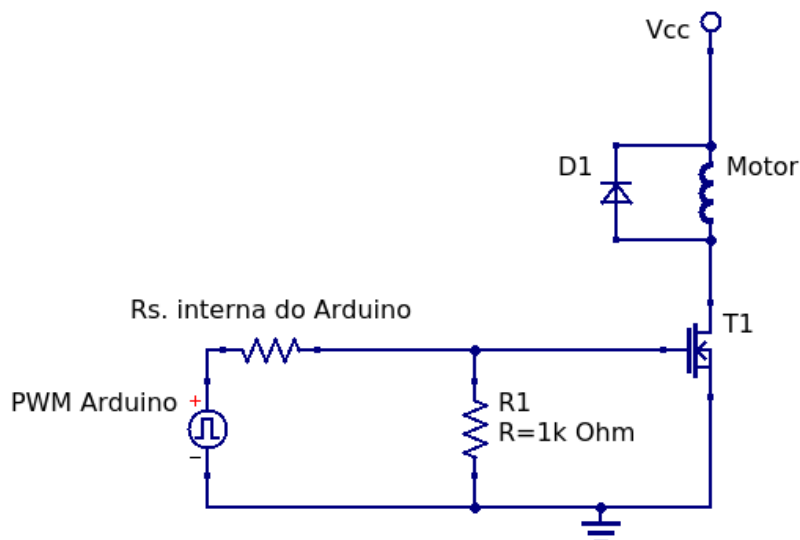
É possível controlar o ângulo da plataforma a partir do controle da velocidade do motor e, para isso, é necessário um sistema denominado circuito de condicionamento.

5.1 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO

O circuito de condicionamento utilizado deve possibilitar a passagem de uma alta corrente, necessária para o funcionamento do motor, vinda de uma fonte externa de energia (o microcontrolador não é capaz de fornecer a corrente necessária para o atuador). É então utilizado um transistor NMOS, o IRF-640N, para possibilitar essa passagem de corrente, que será controlado por um sinal PWM vindo do Arduino.

O esquemático do circuito pode ser visto na FIGURA 1 abaixo.

FIGURA 5



Fonte: Pedro Lucca Pereira (2024).

É necessário utilizar um diodo, reversamente polarizado em relação ao motor, para proteger o circuito posterior da corrente produzida pelo motor ao ser desacionado. É também utilizado um resistor de *pull-down* para garantir que o terminal de porta do transistor NMOS esteja ligado à referência quando o sinal PWM do Arduino apresentar valor lógico 0.

O valor da resistência foi escolhido de acordo com o funcionamento do microcontrolador, possibilitando a passagem de uma corrente baixa (por isso um valor da ordem de kOhms) e entregando pouco ruído (proporcional com o tamanho da resistência) à porta do transistor.

6 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

O sinal obtido sofre com o ruído proveniente do acionamento do motor: o chaveamento do transistor gera ruído que pode impactar as leituras do sensor, e o próprio funcionamento do sensor pode impactar a estabilidade da estrutura física, de modo que o aparato utilizado para possibilitar as leituras do sensor não funciona de maneira completamente confiável.

A partir disso, considera-se a utilização de filtros digitais, implementados no controlador, para reduzir a relação sinal-ruído apresentada na análise dos dados. Para isso, é necessário calcular dita relação sinal-ruído, através de técnicas estatísticas.

6.1 CÁLCULO DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO

A relação sinal-ruído (ou SNR) pode ser calculada através da divisão entre o valor provável e do desvio padrão, como mostra a EQUAÇÃO 6.1.

$$SNR = \chi_p / \sigma$$

EQUAÇÃO 6.1

6.1.1 CÁLCULO DO VALOR PROVÁVEL

O valor provável corresponde ao valor da média aritmética de um conjunto de dados. Conforme o tamanho do conjunto de dados cresce, a relação entre o valor provável e da média aritmética é de igualdade.

Para calcular essas grandezas, é necessário realizar várias medidas de um único ponto de operação.

Foram obtidos dois conjuntos de amostras com 30 pontos, um para 0° e outro para 45° , que podem ser observados na TABELA 2 e na TABELA 3. A partir da análise dos dados e do cálculo da média, o valor esperado obtido foi de 0.69° para 0° e de 44.92° para 45° .

TABELA 2

Ângulo Real	Ângulo Calibrado
0	2.5
0	1.35
0	2.61
0	2.61
0	2.61
0	2.77
0	2.77
0	2.61
0	2.61
0	2.44
0	2.44
0	2.44
0	1.13
0	0.8
0	0.69
0	0.69
0	0.69
0	0.69
0	0.69
0	0.69
0	0.64
0	0.69
0	0.53
0	0.69
0	0.48
0	0.64
0	0.69
0	0.53

0	0.53
0	0.53

Fonte: Nico Iancoski (2024).

TABELA 3

Ângulo Real	Ângulo Calibrado
45	45.12
45	42.62
45	42.77
45	42.62
45	42.55
45	42.4
45	42.62
45	42.4
45	44.2
45	44.2
45	45.74
45	45.74
45	45.74
45	45.74
45	45.74
45	45.74
45	45.74
45	45.82
45	45.74
45	45.51
45	45.51
45	45.82
45	45.59
45	45.51
45	45.59
45	45.28
45	45.59
45	45.51
45	45.59
45	45.59
45	45.28
45	45.28

Fonte: Nico Iancoski (2024).

6.1.2 CÁLCULO DO DESVIO PADRÃO

O desvio padrão é dado pelo somatório descrito na EQUAÇÃO 6.2, na qual n é o número de amostras e r são os resíduos.

$$\sigma = \sqrt{(\sum(r^2)/(n-1))}$$

EQUAÇÃO 6.2

Os resíduos são dados pela diferença entre os valores das medidas e a média aritmética. Para os valores das tabelas, os desvios padrões obtidos foram de 1.17° para 0° e 0.06° para 45°.

A partir dos valores de valor esperado e desvio padrão, o SNR obtido foi de 59.31 a 0° e 131.91 a 45°.

6.2 FILTRO DIGITAL

O filtro digital escolhido foi o de média móvel exponencial, pelo tempo de resposta que o filtro apresenta e pela facilidade de implementação. O ganho de SNR obtido através do filtro é dado pela EQUAÇÃO 6.3, na qual N_m é o número de médias.

$$SNR' = SNR \sqrt{N_m}$$

EQUAÇÃO 6.3:

Para um SNR maior que 100, N_m deve possuir valor maior que 2,84. Como são aceitos valores inteiros para o número de médias, aceita-se um valor de número de médias igual a 3. Contudo, analisou-se que, ao utilizar-se 10 médias, as medidas apresentaram ruído muito menor, garantindo maior exatidão na medida.

Com este valor ajustado de N_m , a frequência de corte, que pode ser calculada através da EQUAÇÃO 6.4, é de 6,667.

$$f_{cs} = f_s \div (2 * N_m)$$

EQUAÇÃO 6.4:

6.3 RESOLUÇÃO

O ganho na resolução após o filtro digital, descrita pela EQUAÇÃO 6.5, na qual n_{bits} é o ganho em número de bits, é de 0,792 bits.

$$n_{bits} = \log_4(N_m)$$

EQUAÇÃO 6.5:

7 SISTEMA DE CONTROLE

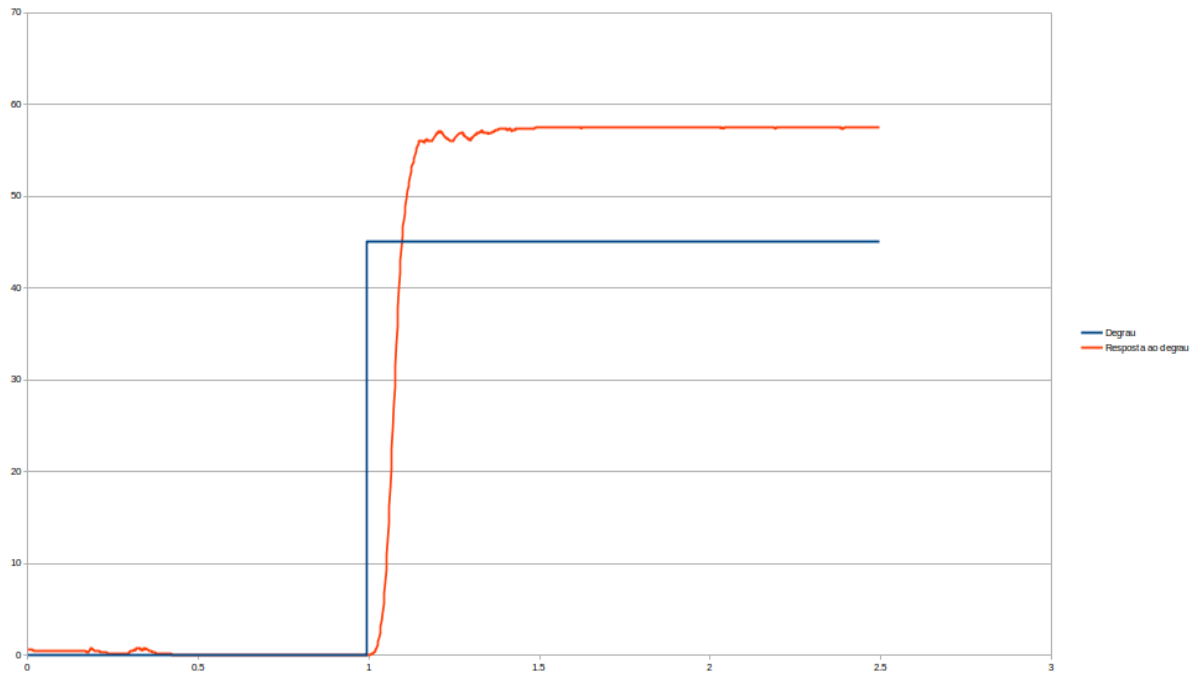
Para projetar o controlador PID a ser utilizado no projeto, é necessária a identificação da planta, ou seja, resposta ao degrau apresentada pelo sistema.

7.1 IDENTIFICAÇÃO DA PLANTA

Para a aproximação do comportamento do sistema, é necessário aplicar um sinal que apresente uma variação brusca de valores. Comumente é utilizado um sinal na forma de degrau, ou seja, um sinal que se mantém constante até determinado tempo e passa para outro valor constante rapidamente.

A FIGURA 6, apresenta o sinal de entrada e a resposta ao degrau do sistema.

FIGURA 6



Fonte: Pedro Lucca Pereira (2024)

A partir deste gráfico, é possível identificar a planta do sistema: conseguimos calcular o ganho do sistema (ou seja, o quanto que a amplitude da saída, em regime permanente, é proporcional à amplitude da entrada) e a sua constante de tempo (quanto tempo, desde o início da resposta, que o sistema demora para alcançar 63,2% de seu valor final). Ao final, a planta do sistema pode ser caracterizada pela EQUAÇÃO 7.1, na qual s é a unidade de frequência angular complexa.

$$H(s) = \frac{1.27777 e^{-0.0125}}{0.075s + 1}$$

EQUAÇÃO 7.1

7.2 PROJETO DO CONTROLADOR

Considerando um sistema de realimentação unitária, a função de transferência do sistema completo (ou seja, com a realimentação e controlador implementados) pode ser descrita pela função $G(s)$, mostrada na EQUAÇÃO 7.2, na qual $C(s)$ é a função de transferência do controlador PID:

$$G(s) = \frac{C(s)H(s)}{1 + C(s)H(s)}$$

EQUAÇÃO 7.2

A EQUAÇÃO 7.3 mostra a função de transferência do controlador PID:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d$$

EQUAÇÃO 7.3

7.2.1 O CONTROLADOR PID

O controlador PID é amplamente utilizado nas mais diversas aplicações atualmente. Isso se deve ao fato de ser um método eficaz de correção de erros em sistemas dinâmicos e pela facilidade de implementação por meio de circuitos elétricos ou algoritmos para microcontroladores.

A topologia básica do controlador PID é a mostrada anteriormente na EQUAÇÃO 7.3. Nela, constam uma constante proporcional, uma constante que multiplica a integral do erro obtido na realimentação (no domínio do tempo) e outra que o deriva, que irão modular a entrada da planta.

Com isso, o controlador possui meios de melhor adequar a entrada da planta para obter-se o resultado esperado. Contudo, são apresentados diferentes efeitos decorrentes da correção do controlador, como sobressinais, tempos de subida e assentamento, bem como erro em regime permanente.

Esses diferentes fatores, dependendo da aplicação do sistema, podem assumir valores diferentes. Para este projeto, o erro em regime permanente foi considerado aceitável somente se for menor do que 2% do valor final e o sobressinal é aceitável somente se estiver abaixo de 5% do valor estável.

7.3 DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES DO CONTROLADOR

Através da função do sistema $G(s)$, descrita na equação 18, e dos parâmetros desejados do sistema (ganho em regime permanente, sobressinal, tempo de assentamento), é possível encontrar valores de K_p , K_i e K_d do controlador que atendam às especificações do projeto.

Com as fórmulas para obter-se o sobressinal e tempo de assentamento do sistema, é possível encontrar as constantes que formam o $G(s)$ desejado para alcançar tais parâmetros. Abaixo encontram-se as EQUAÇÕES 7.4, 7.5 e 7.6 utilizadas (além das EQUAÇÕES 7.1, 7.2 e 7.3), nas quais M_p é o sobressinal (em porcentagem) e t_s é o tempo de assentamento para o sistema oscilar em torno de 1% da amplitude final.

$$\xi(\text{constante de assentamento}) = \sqrt{\frac{\ln^2(M_p)}{\pi^2 + \ln^2(M_p)}}$$

EQUAÇÃO 7.4

$$\omega_n(\text{frequência natural de oscilação}) = \frac{3}{t_s \xi}$$

EQUAÇÃO 7.5

$$G_{\text{desejado}}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

EQUAÇÃO 7.6

7.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA COM CONTROLADOR

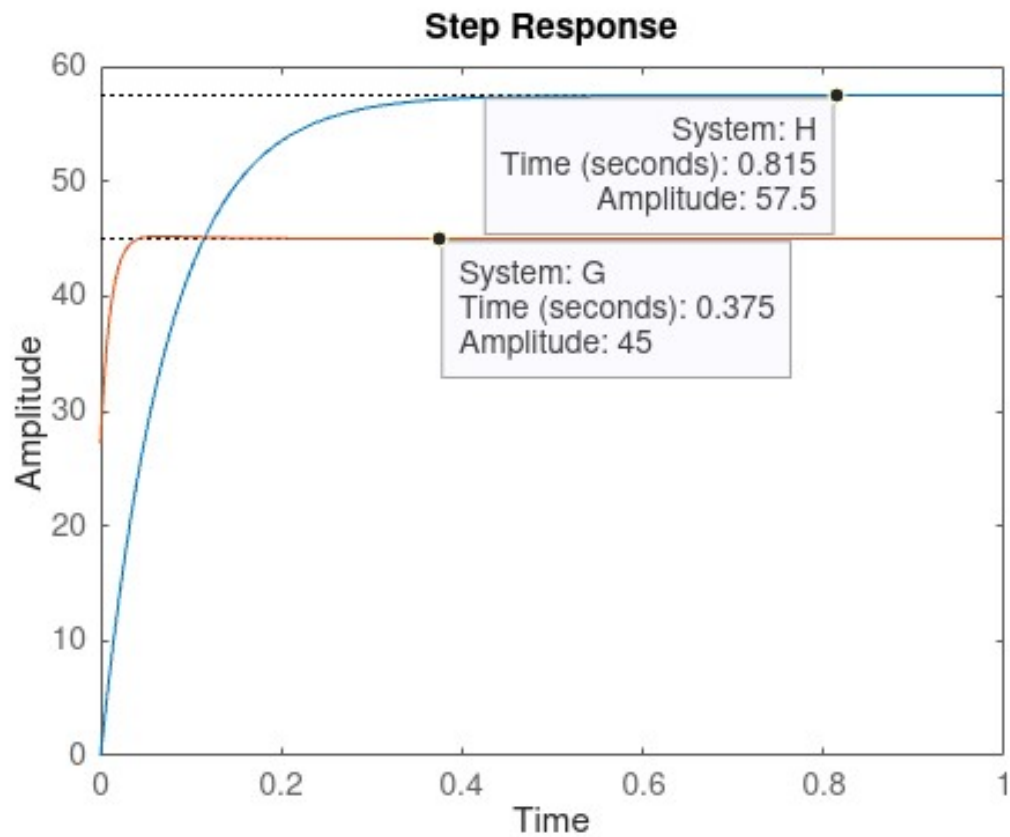
Após os cálculos referentes utilizando as constantes do controlador e encontrado o $G(s)$, compara-se os denominadores de $G(s)$ e $G_{\text{desejado}}(s)$. Com isso e fixando valores para K_d , obtém-se valores para K_p e K_i (que então foram ajustados levando em conta simulações utilizando a linguagem de programação MATLAB). A EQUAÇÃO 7.7 descreve o equacionamento final do controlador.

$$C(s) = 15.1652 + \frac{224.8919}{s} + 0.09s$$

EQUAÇÃO 7.7

A FIGURA 7 mostra a resposta ao degrau do sistema com o controlador.

FIGURA 7

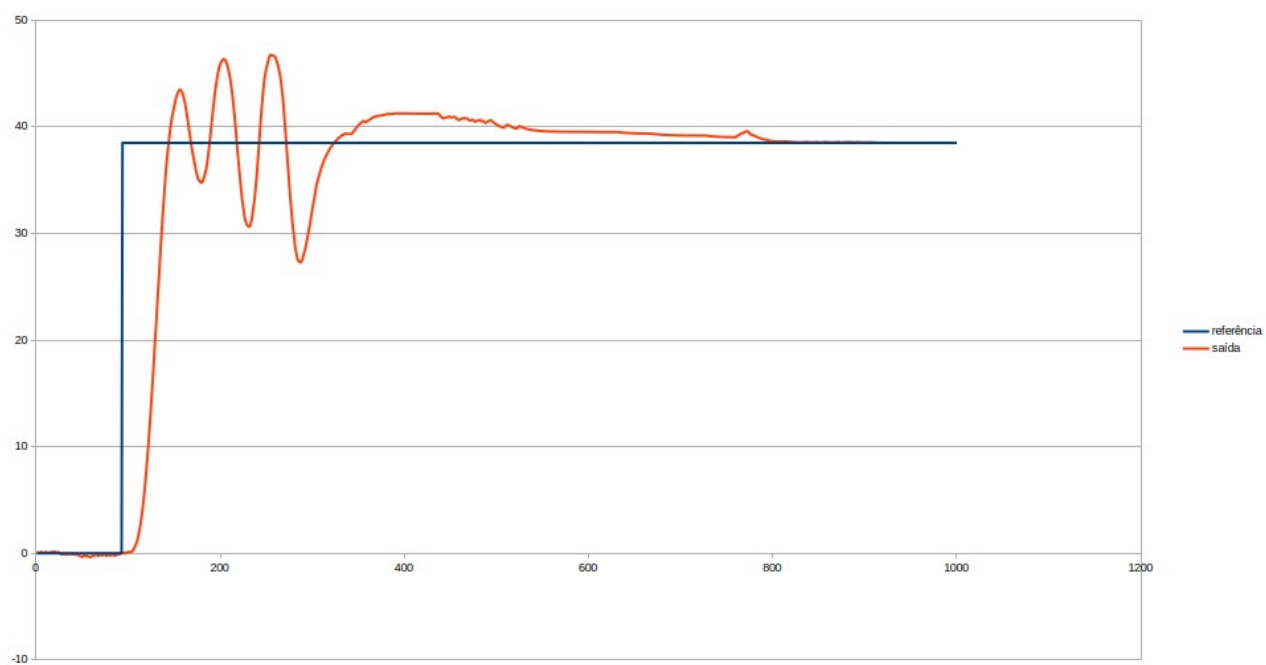


FONTE: Pedro Lucca Pereira (2024)

7.5 FUNCIONAMENTO REAL DO SISTEMA

Após a implementação do controlador PID, foram testados diferentes *SetPoints* (amplitudes de degrau) aplicados ao sistema. Apresenta-se as respostas do sistema nas FIGURAS 8, 9 e 10:

FIGURA 8



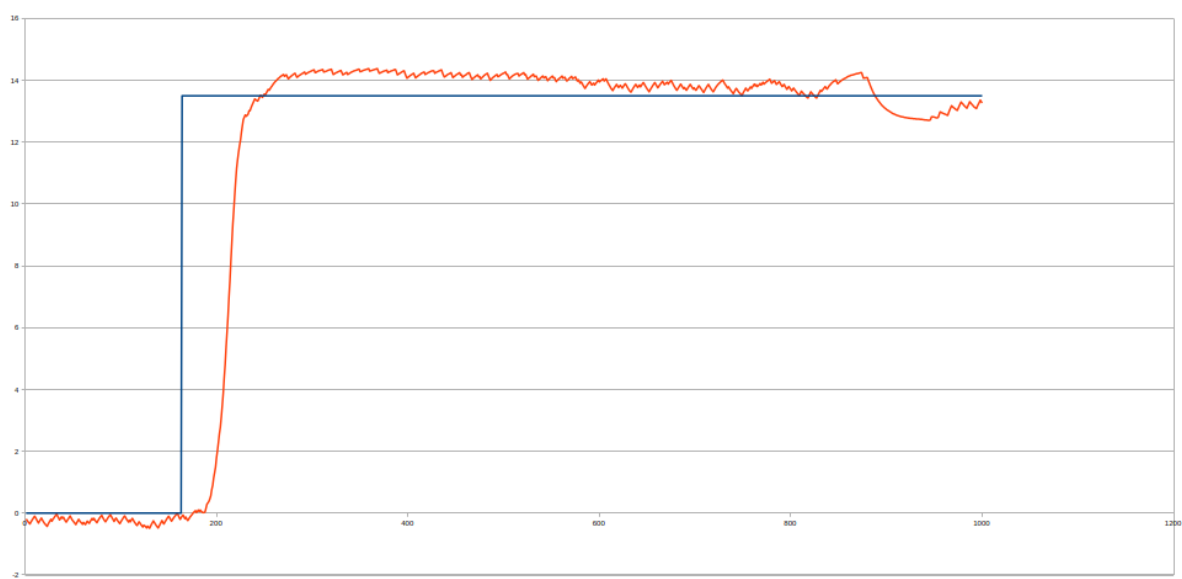
FONTE: Pedro Lucca Pereira (2024)

FIGURA 9



FONTE: Pedro Lucca Pereira (2024)

FIGURA 10



FONTE: Pedro Lucca Pereira (2024)

Como é possível observar pelo novo projeto do controlador, o sistema consegue atingir erro nulo em regime permanente. Contudo, o sistema é suscetível à instabilidade, apresentando sobressinal alto e tempo de assentamento maior do que o calculado.

8 CONCLUSÃO

O sistema possui a capacidade de medir o ângulo de inclinação da plataforma com exatidão, graças à implementação de aparatos físicos de apoio (como a plataforma de suporte) ou de trechos de código de processamento de sinal (filtros digitais e equação de calibração). Além disso, o controle da inclinação se mantém com pouco erro e instabilidade em regime permanente, graças à modelagem do controlador PID digital.

9 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma das grandes dificuldades do projeto foi a implementação da estrutura física que comporta a plataforma. O elástico utilizado para possibilitar o funcionamento do atuador pode ser integrado à estrutura de melhores maneiras (elásticos com comportamento confiável e melhor localizados).

Devido à falta de estabilidade (elástico sempre puxando a plataforma de maneira igual, falta de ruído), a planta retirada do sistema sofreu diversas alterações que impactaram no projeto do controlador PID e a aproximação para um modelo matemático não pôde representar fielmente o projeto físico. O sistema agora apresenta erro em regime permanente nulo, mas tornou-se suscetível a instabilidades em alguns dos valores testados, além de apresentar um tempo de assentamento da ordem de segundos.

REFERÊNCIAS

1. UGLY DUCK. Fazendo um melhor Localizador de Eco HC-SR04. Janeiro de 2014. Disponível em: https://uglyduck.vajn.icu/ep/archive/2014/01/Making_a_better_HC_SR04_Echo_Locator.html. Acesso em: 13 jun. 2024.
2. HANDSON TECHNOLOGY. Sensor Ultrassônico HC-SR04. Disponível em: <https://www.handsontec.com/dataspecs/HC-SR04-Ultrasonic.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2024.
3. ARDUINO. Arduino Uno Rev3. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2024.
4. VISHAY INTERTECHNOLOGY, Inc. *SiHF640 - N-Channel 200 V (D-S) MOSFET*. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/91036/sihf640.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2024.

APÊNDICE 1 – CÓDIGO ARDUÍNO

```
// ===== DEFINES

#define Tms 25
#define MAX_ECHO_TRAVEL_TIME 20000

#define NM 15

#define PWM_LOW 70
#define PWM_HIGH 255
#define PWM_PIN 5

#define ECHO_PIN 11
#define TRIGGER_PIN 7
#define BAUD_RATE 115200
#define TRIGGER_PULSE_DURATION_US 12
#define SERIAL_TIMEOUT_MS 1

float ref = 0;
float erro = 0;
float erro_a = 0;
float i_erro = -17;
float d_erro = 0;

float kp = 15.1652;
float ki = 224.8919;
float kd = 0.09;

// ===== GLOBALS
float _dp = 20;
float _de = 4;
float _hi = 18;
float _d0 = 25;
float _previous_angle = 0;
int _pwm = PWM_LOW;
float filtered_angle = 0;

// ===== SENSOR
int getEchoTravelTime() {
    return pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
}

void sendTriggerPulse() {
    digitalWrite(TRIGGER_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(TRIGGER_PULSE_DURATION_US);
    digitalWrite(TRIGGER_PIN, LOW);
}

float getSensorReading() {
```

```

sendTriggerPulse();
    unsigned int duration = getEchoTravelTime();
    float distance = calcDistance(duration);
    return duration >= MAX_ECHO_TRAVEL_TIME ? -1.0 : distance;
}

// ===== ANGLE
float calcDistance(unsigned int duration) {
    return duration * 0.01715;
}

float getAngle(float distance) {
    float cateto = distance - _dp + _de;
    return -asin(cateto / _hi) * 57.296 + 20;
}

float filter(float angle) {
    float filtered = 1.0/NM * angle + (1 - 1.0/NM) * _previous_angle;
    _previous_angle = filtered;
    return filtered;
}

// ===== MAIN
void initPWM() {
    pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);
    _pwm = PWM_LOW;
    analogWrite(PWM_PIN, _pwm);
}

void initSensor() {
    pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
    pinMode(TRIGGER_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(TRIGGER_PIN, LOW);
}

void initSerial() {
    Serial.begin(BAUD_RATE);
    Serial.setTimeout(SERIAL_TIMEOUT_MS);
}

void setup() {
    initSensor();
    initPWM();
    initSerial();
    ki = ki*(Tms*10e-6); //calcula ki discretizado
    kd = kd/(Tms*10e-6); //calcula kd discretizado
}

void loop() {

```

```

    unsigned long t0 = millis();

    if (Serial.available() > 0) {
        ref = Serial.parseFloat();
    }

    float distance = getSensorReading();
    float angle = getAngle(distance);

    if (isnan(angle)) {
        filtered_angle = filter(_previous_angle);
    } else {
        filtered_angle = filter(angle);
    }

    erro = ref - filtered_angle;

    i_erro += erro;//////////calcula a integral do erro
    d_erro = erro - erro_a;//calcula a derivada do erro

    erro_a = erro;//////////atualiza o erro

    if (abs(erro)<=10){
        _pwm = (1.1*kp*erro)+(kd*d_erro)+1.8*ki*i_erro;
    }
    else{
        _pwm = (0.4*kp*erro)+(ki*i_erro)-(kd*d_erro);
    }

    _pwm = constrain(_pwm, PWM_LOW, PWM_HIGH);
    analogWrite(PWM_PIN, _pwm);
    Serial.print(_pwm);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(ref);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(filtered_angle);

    while ((t0 + Tms) > millis()) {}
}

```


APÊNDICE 2 – CÓDIGO MATLAB

```
numm = 57.5/45;
tau = 0.075;

H = tf([numm], [tau 1]); %configura a planta H(s)
H = minreal(H);

sConfig = RespConfig("Amplitude", 45);

g1 = 2.99998/tau;
g2 = 4.724528/(tau*tau);

kd = 0.09; %parâmetros do controlador
kp = ((g1*((numm*kd)+tau))-1)/numm+10;
ki = (g2*((numm*kd)+tau))/(numm)+100;

C = tf([kd kp ki], [1 0]); %configura a função de transferência de C(s)
C = minreal(C);

G = feedback(C*H, 1); %configura G(s) como realimentação de ganho
unitário com C(s) e H(s)
G = minreal(G);

step(H,G, 1, sConfig); %simula a resposta ao degrau do sistema
```

ANEXO 1 – DATASHEET IRF-640N



www.vishay.com

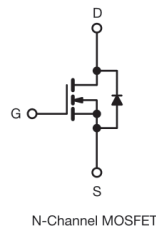
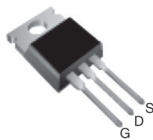
IRF640, SiHF640

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY		
V_{DS} (V)	200	
$R_{DS(on)}$ (Ω)	$V_{GS} = 10\text{ V}$	0.18
Q_g (Max.) (nC)	70	
Q_{gs} (nC)	13	
Q_{gd} (nC)	39	
Configuration	Single	

TO-220AB



FEATURES

- Dynamic dV/dt rating
- Repetitive avalanche rated
- Fast switching
- Ease of paralleling
- Simple drive requirements
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



Note

* This datasheet provides information about parts that are RoHS-compliant and / or parts that are non-RoHS-compliant. For example, parts with lead (Pb) terminations are not RoHS-compliant. Please see the information / tables in this datasheet for details.

DESCRIPTION

Third generation power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.

ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF640PbF
	SiHF640-E3
SnPb	IRF640
	SiHF640

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T _C = 25 °C, unless otherwise noted)					
PARAMETER			SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage			V _{DS}	200	V
Gate-Source Voltage			V _{GS}	± 20	
Continuous Drain Current	V _{GS} at 10 V	T _C = 25 °C	I _D	18	A
		T _C = 100 °C		11	
Pulsed Drain Current ^a			I _{DM}	72	
Linear Derating Factor				1.0	
Single Pulse Avalanche Energy ^b			E _{AS}	580	mJ
Repetitive Avalanche Current ^a			I _{AR}	18	A
Repetitive Avalanche Energy ^a			E _{AR}	13	mJ
Maximum Power Dissipation		T _C = 25 °C	P _D	125	W
Peak Diode Recovery dV/dt ^c			dV/dt	5.0	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range			T _J , T _{stg}	-55 to +150	°C
Soldering Recommendations (Peak temperature) ^d		for 10 s		300	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw			10	lbf · in
				1.1	N · m

Notes

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
b. $V_{DS} = 50\text{ V}$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 2.7\text{ mH}$, $R_D = 25\ \Omega$, $I_{AS} = 18\text{ A}$ (see fig. 12).
c. $I_{SD} \leq 18\text{ A}$, $dI/dt \leq 150\text{ A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{DS}$, $T_J \leq 150^\circ\text{C}$.
d. 1.6 mm from case.

**THERMAL RESISTANCE RATINGS**

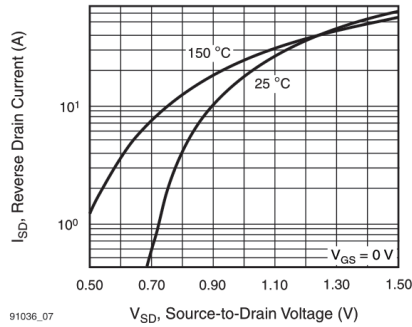
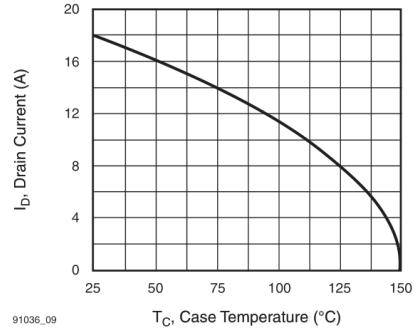
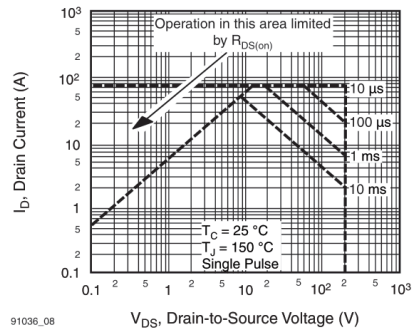
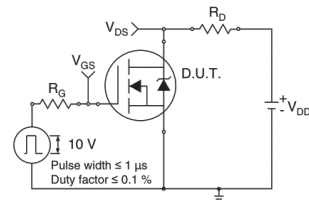
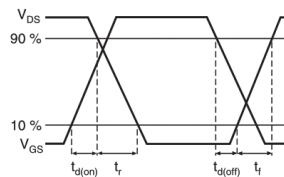
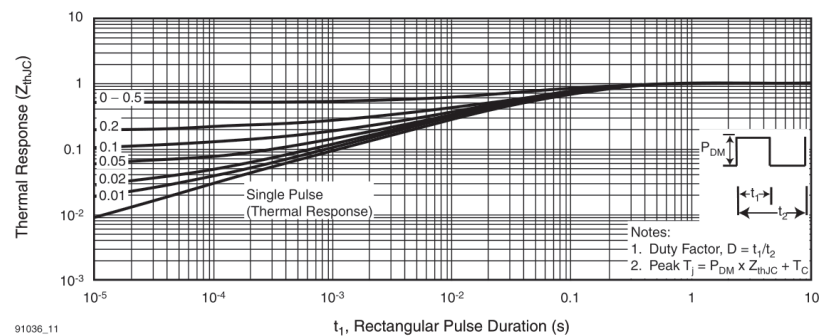
PARAMETER	SYMBOL	TYP.	MAX.	UNIT
Maximum Junction-to-Ambient	R_{thJA}	-	62	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	R_{thCS}	0.50	-	
Maximum Junction-to-Case (Drain)	R_{thJC}	-	1.0	

SPECIFICATIONS ($T_J = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-Source Breakdown Voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}$, $I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	200	-	-	V
V_{DS} Temperature Coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to 25°C , $I_D = 1\text{ mA}$	-	0.29	-	V/ $^\circ\text{C}$
Gate-Source Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-Source Leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 200\text{ V}$, $V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	25	μA
		$V_{DS} = 160\text{ V}$, $V_{GS} = 0\text{ V}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$	-	-	250	
Drain-Source On-State Resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}$ $I_D = 11\text{ A}^b$	-	-	0.18	Ω
Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 50\text{ V}$, $I_D = 11\text{ A}^b$	6.7	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0\text{ V}$, $V_{DS} = 25\text{ V}$, $f = 1.0\text{ MHz}$, see fig. 5	-	1300	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	430	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	130	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10\text{ V}$ $I_D = 18\text{ A}$, $V_{DS} = 160\text{ V}$, see fig. 6 and 13 ^b	-	-	70	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	13	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	39	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 100\text{ V}$, $I_D = 18\text{ A}$, $R_g = 9.1\text{ }\Omega$, $R_D = 5.4\text{ }\Omega$, see fig. 10 ^b	-	14	-	ns
Rise Time	t_r		-	51	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	45	-	
Fall Time	t_f		-	36	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S		-	7.5	-	
Gate Input Resistance	R_g	$f = 1\text{ MHz}$, open drain	0.5	-	3.6	Ω
Drain-Source Body Diode Characteristics						
Continuous Source-Drain Diode Current	I_S	MOSFET symbol showing the integral reverse p - n junction diode	-	-	18	A
Pulsed Diode Forward Current ^a	I_{SM}		-	-	72	
Body Diode Voltage	V_{SD}	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_S = 18\text{ A}$, $V_{GS} = 0\text{ V}^b$	-	-	2.0	V
Body Diode Reverse Recovery Time	t_{rr}	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_F = 18\text{ A}$, $dI/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}^b$	-	300	610	ns
Body Diode Reverse Recovery Charge	Q_{rr}		-	3.4	7.1	
Forward Turn-On Time	t_{on}	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S and L_D)				

Notes

- a. Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
b. Pulse width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.


Fig. 7 - Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

Fig. 9 - Maximum Drain Current vs. Case Temperature

Fig. 8 - Maximum Safe Operating Area

Fig. 10a - Switching Time Test Circuit

Fig. 10b - Switching Time Waveforms

Fig. 11 - Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

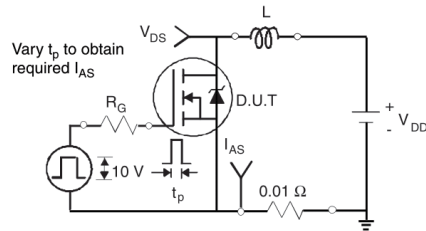


Fig. 12a - Unclamped Inductive Test Circuit

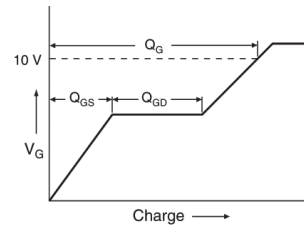


Fig. 13a - Basic Gate Charge Waveform

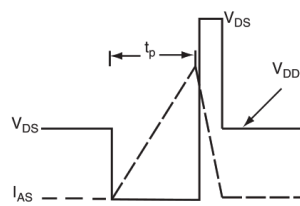


Fig. 12b - Unclamped Inductive Waveforms

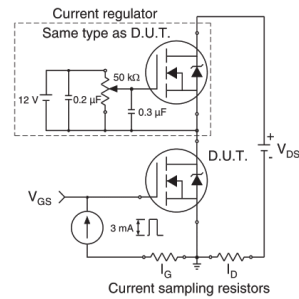


Fig. 13b - Gate Charge Test Circuit

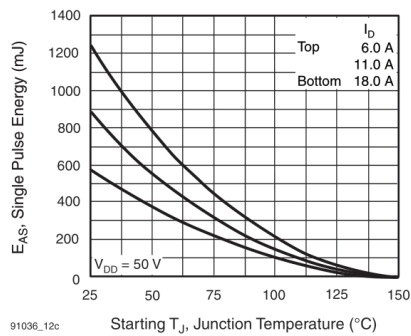


Fig. 12c - Maximum Avalanche Energy vs. Drain Current

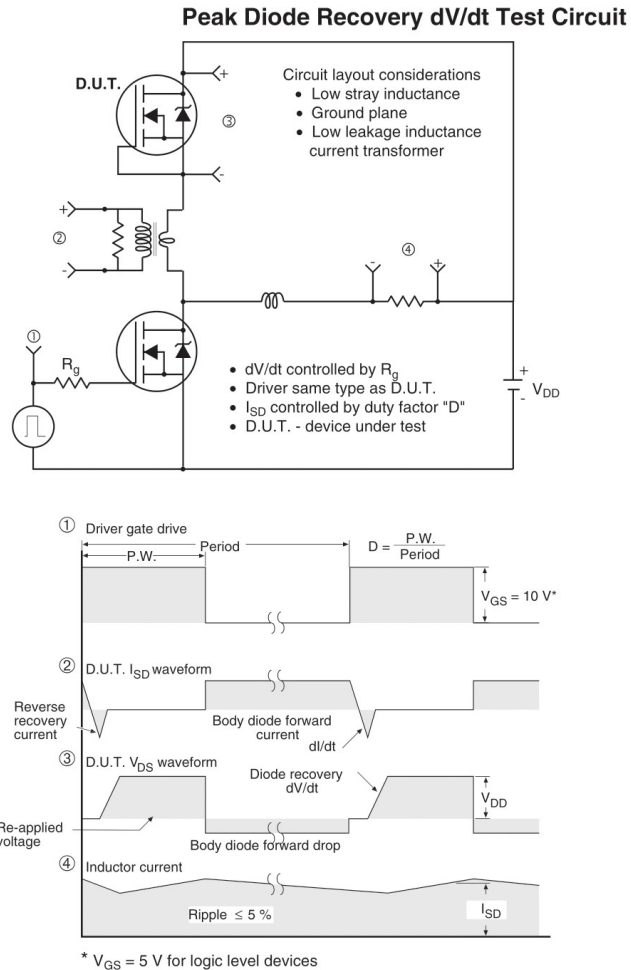


Fig. 14 - For N-Channel

Vishay Siliconix maintains worldwide manufacturing capability. Products may be manufactured at one of several qualified locations. Reliability data for Silicon Technology and Package Reliability represent a composite of all qualified locations. For related documents such as package/tape drawings, part marking, and reliability data, see <http://www.vishay.com/ppg791036>.



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Hyperlinks included in this datasheet may direct users to third-party websites. These links are provided as a convenience and for informational purposes only. Inclusion of these hyperlinks does not constitute an endorsement or an approval by Vishay of any of the products, services or opinions of the corporation, organization or individual associated with the third-party website. Vishay disclaims any and all liability and bears no responsibility for the accuracy, legality or content of the third-party website or for that of subsequent links.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.