



Fundação Universidade Federal do ABC
Pró reitoria de pesquisa
Av. dos Estados, 5001, Santa Terezinha, Santo André/SP
CEP 09210-580
Bloco L, 3ºAndar, Fone (11) 3356-7617
iniciacao@ufabc.edu.br

Projeto de Iniciação Científica submetido
para avaliação no Edital: 4/2022

Título do projeto: Controle de posição angular do motor elétrico de corrente contínua com PID implementado em Arduino

Palavras-chave do projeto: Modelagem de transitório; Motor CC; Controle PID; Arduino

Área do conhecimento do projeto: Engenharia de controle

Sumário

1 Resumo.....	2
2 Introdução e Justificativa	3
3 Objetivos.....	3
4 Metodologia	4
4.1 Motor CC.....	4
4.2 Ponte H	5
4.3 Encoder.....	5
4.4 Controle PID.....	6
4.5 ARDUINO e controlador PID digital.....	6
4.6 Softwares para simulação e aquisição de dados	7
5 Viabilidade.....	9
6 Cronograma de atividades.....	11
Referências bibliográficas	12

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma do processo de controle do motor CC	7
Figura 2 – Aplicação feita em LABVIEW para monitorar o motor CC	8
Figura 3 – Motor CC com caixa de redução e eixo duplo	9
Figura 4 – Ponte H L298N	9
Figura 5 – Encoder E2-Q2	10
Figura 6 – ARDUINO UNO.....	10

1 Resumo

Este Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica aborda o projeto de um controlador PID para o posicionamento do eixo de um motor elétrico de corrente contínua (motor CC) implementado em ARDUINO. A metodologia de projeto do controlador PID é baseada na sintonia dos ganhos proporcional (P), integral (I) e derivativo (D), com base nos parâmetros do modelo matemático e nas especificações desejadas para a resposta transitória, tais como máximo sobressinal, tempo de pico e tempo de acomodação, para uma entrada de referência de ângulo em degrau. Considerando o fato de que este sistema é monovariável, linear e invariante no tempo e descrito por uma função de transferência de primeira ordem, resulta que os seus parâmetros são o ganho de malha aberta e a constante de tempo. Ambos os parâmetros do modelo matemático da planta podem ser determinados experimentalmente através da sua resposta transitória em malha aberta para uma entrada em degrau. O foco principal deste Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica será o estudo desta técnica de controle e a implementação experimental pelo discente com a possibilidade de aplicação no controle de atitude de um veículo controlado remotamente em estudos futuros.

2 Introdução e Justificativa

O controle da posição de um motor CC é muito importante para diversas aplicações, como no controle de esteiras, braços robóticos, robôs móveis, entre outros. Uma aplicação prática desse tipo de controle é apresentada por Santana, Silva e Oliveira (2008, p.7) que utilizam o método ITAE (integral of time multiplied by the absolute value of error) para controlador PID robusto, com o intuito de fazer o controle da posição de uma mesa coordenada cartesiana utilizada em máquinas ferramenta, sendo essa mesa equipada com um servo motor CC (motor CC controlado). Cada aplicação exigirá diferentes métodos de controle, devido à isso, é imprescindível analisar os recursos disponíveis no mercado para fazer esse processo de controle, pois é necessário o uso de sensores de monitoramento do seu desempenho e de dispositivos para controlar o motor.

Para isso, é preciso abordar métodos de modelagem e simulação do funcionamento desses motores para que o sistema de controle a ser projetado atenda às especificações de desempenho desejadas. O procedimento de modelagem matemática envolve a obtenção experimental dos parâmetros de uma função de transferência de primeira ordem, no caso, o ganho de malha e a constante de tempo, com boa exatidão.

Do ponto de vista de implementação experimental, deve-se programar adequadamente um microcontrolador, no caso, um Arduino, de maneira a atuar como um controlador PID. O sinal mensurado da posição angular do eixo do motor CC é obtido através de um encoder óptico que, quando comparado com a referência desejada para a posição angular, gera o sinal de erro dinâmico disponível para o controlador PID.

Dessa forma, este projeto se interessa em buscar soluções para lidar com esses problemas e analisar os diferentes recursos e métodos disponíveis para que isso seja possível, focando em soluções de baixo custo e pequeno porte que possibilitem o uso dos microcontroladores utilizados pelas placas arduino ou similares.

3 Objetivos

O principal objetivo deste Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica é o estudo, pelo discente, da técnica de projeto de controladores PID aplicados no posicionamento do eixo de um motor elétrico de corrente contínua (motor CC). Este estudo aborda a teoria relacionada ao projeto do controlador PID, a simulação computacional e a implementação experimental que, por sua vez, envolve a identificação dos parâmetros da planta e a implementação do controlador PID utilizando um computador com ARDUINO, encoder e outros componentes eletrônicos. A metodologia de projeto do controlador PID é baseada na sintonia dos ganhos proporcional (P), integral (I) e derivativo (D), com base nos parâmetros do modelo matemático e nas especificações desejadas para a resposta transitória, tais como máximo sobressinal, tempo de pico e tempo de acomodação, para uma entrada de referência de ângulo em degrau. Considerando o fato de que este sistema é monovariável, linear e invariante no tempo e descrito por uma função de transferência de primeira ordem, resulta que os seus parâmetros são o ganho de malha aberta e a constante de tempo. Ambos os parâmetros do modelo matemático da planta podem ser determinados experimentalmente através da sua resposta transitória em malha aberta. Além disso, o foco deste projeto será em soluções de baixo custo e pequeno porte que possibilitem o uso dos microcontroladores utilizados pelas placas arduino ou similares. Os objetivos secundários envolvem o estudo da viabilidade, em estudos futuros, da aplicação do motor CC no controle remoto, com o PID, da atitude de um veículo sobre rodas. Os objetivos específicos dessa Iniciação Científica são:

- Pesquisar recursos disponíveis no mercado para o controle de motores CC;
- Obter o modelo matemático do motor CC na forma de função de transferência;
- Projetar um controle em malha fechada do motor CC utilizando um controlador PID para o posicionamento angular do eixo;
- Estudar e aplicar metodologias de sintonia dos ganhos do controlador PID;
- Simular computacionalmente e Implementar experimentalmente o controlador PID em um microcontrolador ARDUINO;
- Apresentar e analisar os gráficos da resposta transitória e de regime estacionário, de forma a determinar o desempenho do controlador perante as especificações de projeto.

4 Metodologia

O controle da posição angular do motor CC consiste em posicionar o eixo do motor em uma determinada posição angular. Para isso, é utilizado um encoder óptico como sensor de posição angular, que gera o sinal da saída a ser realimentado no sistema de controle. O sinal de erro é dado pela diferença entre o sinal da saída e o sinal da entrada de referência (setpoint). Este sinal de erro alimenta a entrada do controlador PID, implementado com o ARDUINO. O objetivo do controle é minimizar o erro de regime permanente com um transitório próximo ao especificado em projeto.

A seguir, são apresentados os componentes que compõe o sistema de controle e uma breve descrição da teoria abordada no projeto do controlador PID.

4.1 Motor CC

O motor de corrente contínua é um componente eletromecânico capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica, funcionando com base nos princípios do eletromagnetismo.

De acordo com Mattede (2019):

Os motores de corrente contínua (motor CC) são máquinas de corrente contínua (MCC), isto é, funcionam tanto como motores quanto geradores de energia elétrica. Como o próprio nome indica, os motores CC são acionados por uma fonte de corrente contínua. Esses motores possuem ímãs permanentes ou então têm um campo magnético de armadura, caso não possuam ímãs permanentes. Os motores de corrente contínua são muito usados em aplicações como, brinquedos, eletrodomésticos, máquinas industriais, veículos elétricos, entre outros.

Uma característica interessante do motor de corrente contínua é que o controle da velocidade angular e o sentido de rotação pode ser feito facilmente com a variação da tensão em seus terminais, que é algo simples de ser implementado com o uso de circuitos eletrônicos e microcontroladores.

Além disso, os motores CC possuem outras características importantes que devem ser levadas em conta para a sua implementação em um projeto, que são principalmente a sua tensão e corrente de operação. Também, o torque e a velocidade angular máxima precisam ser verificados de acordo com as necessidades do projeto.

Em alguns casos, também se é necessário utilizar uma relação de engrenagens para que o motor alcance a velocidade ou o torque desejado, nesses casos o motor sacrificaria seu torque

para aumentar a velocidade ou vice-versa. Para aumentar o torque, uma boa solução é buscar um motor com caixa de redução.

4.2 Ponte H

De acordo com Cardoso (2017) as pontes H funcionam da seguinte forma:

As pontes H possuem este nome devido ao formato que é montado o circuito, semelhantes a letra H. O circuito utiliza quatro chaves (S1, S2, S3 e S4) que são acionadas de forma alternada, ou seja (S1-S3) ou (S2-S4). Dependendo da configuração entre as chaves, a corrente percorre o motor tanto por um sentido ou como por outro. Quando nenhum par de chaves está acionado, o motor está desligado. Quando o par S1-S3 é acionado a corrente que percorre S1-S3 faz com que o motor gire em um sentido. Quando o par S2-S4 é acionado, a corrente percorre outro caminho, fazendo com que o motor gire no sentido oposto.

Para este projeto, será necessária uma ponte H que permita o controle do sentido de rotação do motor com sinais digitais e também da velocidade angular com sinais PWM (Pulse Width Modulation), que são sinais digitais controlados de modo a se controlar a tensão média na saída. Isso permite o controle da velocidade angular do motor sem grandes perdas no torque. Além disso, a tensão e a corrente máxima suportada pela ponte H devem ser suficientes para alimentar o motor controlado por ela e a tensão lógica deve ser compatível com o microcontrolador a ser utilizado.

4.3 Encoder

De acordo com Almeida (2017) o encoder funciona da seguinte forma:

Os encoders são dispositivos/sensores eletro-opto-mecânicos, cuja funcionalidade é transformar posição angular em sinal elétrico e digital. Com a utilização de encoders, é possível quantizar distâncias, medir ângulos, número de rotações, realizar posicionamentos, rotacionar braços robóticos e etc.

O encoder é composto basicamente por um disco com marcações, um componente emissor e um receptor. Os encoder ópticos utilizam led como componente emissor e um sensor fotodetector como receptor.

As marcações no disco possuem a funcionalidade de bloqueio e desbloqueio do feixe de luz do led para o fotodetector, de maneira que à medida que o disco rotaciona, o fotodetector, juntamente com um circuito eletrônico, repassa para as saídas do encoder um sinal em forma de uma onda quadrada, proporcional ao número de marcações do encoder e à sua resolução. A resolução do encoder é o número de marcações presentes no disco do dispositivo por revolução.

O encoder óptico incremental, que é o mais comum do mercado, possui 2 sinais de saída: "A" e "B". Através desses sinais, adquire-se o ângulo de rotação, o sentido da rotação e o início/fim de uma volta. O sinal A é o sinal principal, que fornece os pulsos (ou clock) à medida que o encoder gira. O sinal B é equivalente ao sinal A, porém defasado em + ou -90°, cujo objetivo é sinalizar o sentido da rotação.

Existem vários tipos de encoder, sendo diferenciados pelo funcionamento e pelo tipo de sensor utilizado, alguns desses tipos são: incremental, absoluto, magnético, óptico, mecânico,

etc. Os encoders também se diferenciam por outras características como a resolução (pulsos por revolução) ou tensão e corrente de operação.

4.4 Controle PID

De acordo com Garcia (2017, p. 322) a função do controlador é:

A função do controlador é manter a variável controlada no valor desejado (ou o mais próximo possível deste), atuando nela apesar das variações de carga de alimentação ou de demanda. Deseja-se que o sistema em malha fechada tenha certas características de resposta estacionária e transitória.

A medição quantifica o valor da variável que se deseja controlar (variável controlada), e é feita pelos sensores e transmissores. A comparação calcula o desvio $e(t)$, dado pela diferença entre o valor da variável medida $b(t)$ e o valor de referência $r(t)$. É aqui que se define se a ação do controlador é direta [$b(t) - r(t)$] ou reversa [$r(t) - b(t)$]. A computação executa o algoritmo de controle, recebendo o valor do desvio $e(t)$ e gerando um sinal $m(t)$, que atua sobre a variável manipulada, obedecendo a equação $m(t) = f[e(t)]$, em que a função f equivale ao algoritmo de controle. A comparação e a computação são efetuadas pelo controlador. A atuação é feita pelos elementos finais de controle (válvulas, dampers, motores de velocidade variável, reguladores de potência elétrica etc.), visando fazer com que o valor da variável manipulada siga o comando de saída do controlador.

No caso do controlador PID, a saída vai depender da soma das respostas proporcional, derivativa e integral, tendo cada uma delas uma função na correção do erro. Sendo assim, a resposta proporcional é proporcional ao erro que atuará no erro com base em um ganho proporcional, a resposta integral se encarrega de somar o erro ao longo do tempo com o intuito de corrigir o erro estacionário (erro remanescente após um grande tempo) e, por fim, a resposta derivativa se baseia na taxa de variação do erro e tem o intuito de tornar o sistema sensível à taxa de variação do erro e ajustar mais rapidamente e suavemente a variável controlada.

4.5 ARDUINO e controlador PID digital

De acordo com Motta (2017):

O ARDUINO é uma plataforma formada por dois componentes: A placa, que é o hardware que se usa para construir os projetos e o ARDUINO IDE, que é o Software no qual escrevemos o que queremos que a placa faça.

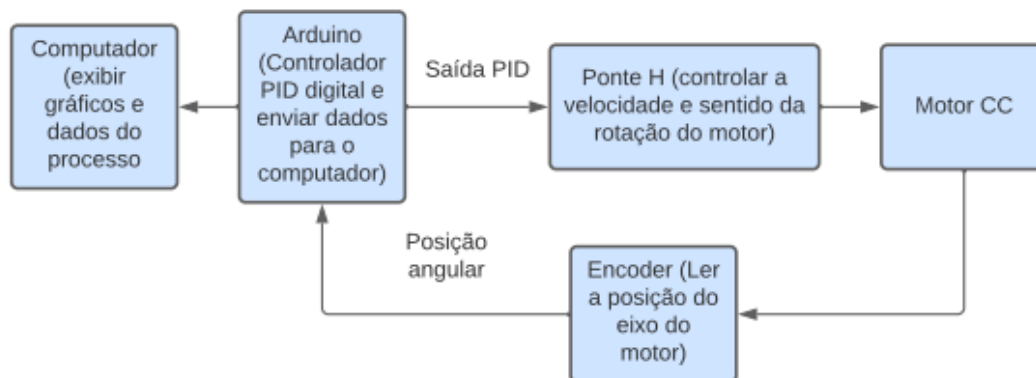
A maior vantagem dessa plataforma de desenvolvimento sobre as demais é a sua facilidade de utilização. Por exemplo, pessoas que não são da área técnica podem aprender o básico e criar seus próprios projetos em um intervalo de tempo relativamente curto.

Falando em termos práticos, o ARDUINO é um pequeno computador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos ligados a ele, interagindo com o ambiente por meio de hardware e software. Para programar o ARDUINO, utiliza-se o seu IDE (Ambiente Integrado de Desenvolvimento), que é um software no qual podemos escrever um código numa linguagem semelhante a C/C++ e que será traduzida, após a compilação, num código compreensível pelo ARDUINO.

No caso desse projeto, o ARDUINO é muito útil, pois permite enviar e ler sinais digitais através de suas I/Os, como mostra a Figura 1, que são as entradas e saídas do microcontrolador embarcado na placa do ARDUINO. Além disso, ele também permite o uso de sinais PWM (do

inglês, Pulse Width Modulation) e comunicação serial (para imprimir na tela alguns dados), permitindo o controle do motor CC e a análise dos dados enviados pelo encoder.

Figura 1 – Fluxograma do processo de controle do motor CC



Fonte: Autor, 2022¹

Assim, é importante conhecer o sinal PWM, que se refere ao conceito de pulsar rapidamente um sinal digital (onda quadrada) em um condutor, controlando a sua largura de pulso enquanto se mantém uma frequência constante do sinal. Dessa forma, com o controle do tempo do sinal no nível alto e mantendo o período constante, é possível simular a variação da tensão de saída e controlar diferentes dispositivos, como um motor CC. Além de várias outras aplicações, esta técnica de modulação pode ser utilizada para simular uma tensão estática variável e é comumente aplicada no controle de motores elétricos, aquecedores, LEDs ou luzes em diferentes intensidades ou frequências.

Para que o controlador PID possa ser implementado digitalmente, será utilizado um ARDUINO, pois ele é capaz de ler os sinais do encoder e controlar o motor através de uma ponte H. Além disso, ele permite a exibição de alguns dados na tela. Com isso o algoritmo do PID digital poderá ser obtido através da discretização das ações de controle proporcional, integral e derivativa, resultando em um algoritmo possível de ser implementado em um microcontrolador. Tal algoritmo usará a aproximação retangular para calcular a integral e a derivada será aproximada por uma diferença de 1ª ordem (aproximação do tipo “backward difference”). Outros algoritmos e aproximações mais precisas para a integral e a derivada também podem ser exploradas.

4.6 Softwares para simulação e aquisição de dados

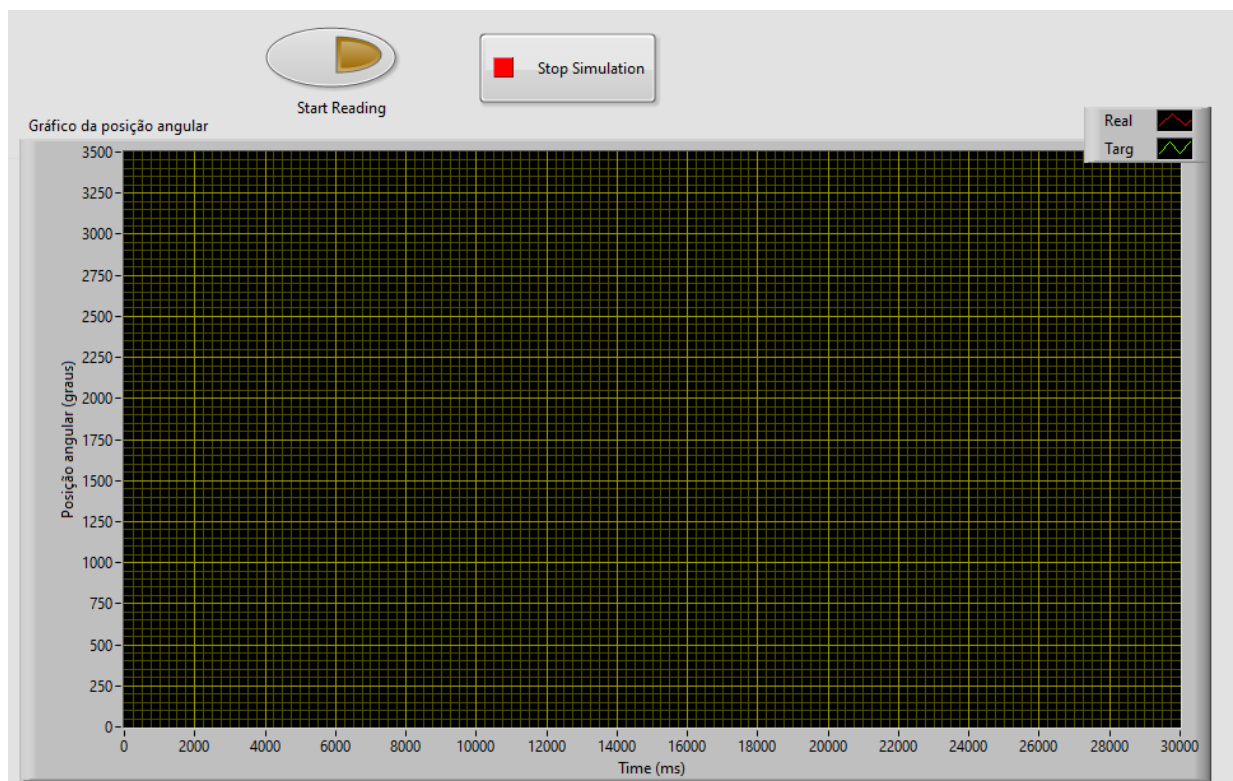
A simulação do sistema será feita com o software OCTAVE. Com esse software, através da função de transferência da planta e do controlador, o sistema será simulado com o objetivo de obter o desempenho de transitório especificado. O projeto do controlador PID é baseado em um algoritmo descrito em Ogata (2010, p. 536). Para encontrar os ganhos do controlador PID, primeiro deve-se especificar a região de busca para os ganhos adequados ao transitório especificado. Esse algoritmo retorna esses ganhos, que são convertidos para os ganhos P, I e D. Para utilizar o algoritmo é necessário conhecer a função de transferência do motor DC que está

¹ Fluxograma criado pelo autor via lucidchart.com.

sendo estudado para que seja possível obter o desempenho de transitório desejado. Esse programa é facilmente adaptado do Matlab para o Octave.

A obtenção dos dados da posição do motor para análise gráfica em tempo real será feita utilizando a comunicação serial entre o ARDUINO UNO e um computador. Dessa forma, conforme o ARDUINO obtém a posição do motor, com base nos pulsos enviados pelo encoder, ele envia essas informações em sequência a um computador que é capaz de exibir esses dados em gráficos com uma aplicação feita no software LABVIEW, como mostra a Figura 2. Essa aplicação, ao receber os dados via serial, é capaz de organizá-las em gráficos que são gerados em tempo real e armazená-los para análise posterior em programas como Excel ou Octave.

Figura 2 – Aplicação feita em LABVIEW para monitorar o motor CC



Fonte: Autor, 2022²

² Aplicação criada pelo autor via LabView Community.

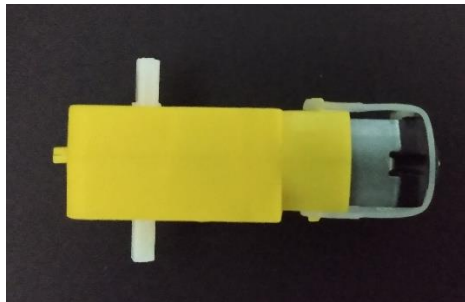
5 Viabilidade

Os materiais que serão utilizados nesse projeto são:

- Motor CC com caixa redutora e eixo duplo

Para esse projeto, optou-se por um motor brushed com caixa redutora e eixo duplo, pela sua facilidade de controle e por possibilitar o acoplamento, de maneira simples, de um encoder em um de seus eixos, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Motor CC com caixa de redução e eixo duplo

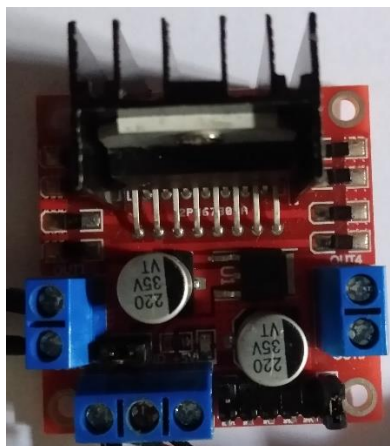


Fonte: Autor, 2022³

- Ponte H L298N

Para esse projeto, foi escolhido o módulo ponte H com o CI L298N, que permite o controle do sentido de rotação do motor com sinais digitais e também da velocidade de rotação com sinais PWM, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Ponte H L298N



Fonte Autor, 2022⁴

- Encoder óptico E2-Q2

Para esse projeto, optou-se por um encoder E2-Q2 incremental óptico com 6 pulsos por revolução, como mostra a Figura 5. Ele possui um bom tempo de resposta, facilidade de leitura dos dados e preço acessível.

³ Foto do motor CC capturada pelo autor.

⁴ Foto da ponte H capturada pelo autor.

Figura 5 – Encoder E2-Q2

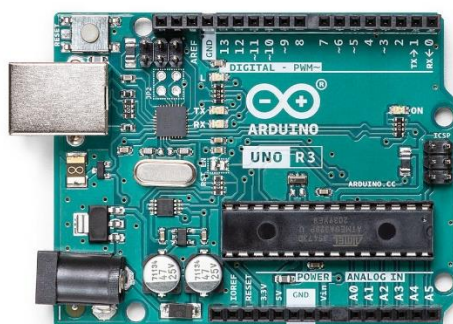


Fonte: RoboCore, 2022⁵

- ARDUINO UNO

Para esse projeto, foi escolhido o ARDUINO UNO mostrado na Figura 6, pois permite enviar e ler sinais digitais através de suas I/Os, que são as entradas e saídas do microcontrolador embarcado na placa do ARDUINO. Além disso, ele também permite o uso de sinais PWM e comunicação serial, que possibilita imprimir dados na tela, além do controle do motor e da análise dos dados enviados pelo encoder.

Figura 6 – ARDUINO UNO



Fonte: Arduino CC, 2022⁶

Também serão utilizados materiais complementares para alimentação e desenvolvimento do código que será implementado no ARDUINO, tais como, fios, bateria para a alimentação elétrica e um computador para o desenvolvimento do software. Todos os materiais necessários encontram-se disponíveis para o uso no Projeto de Iniciação Científica. Além disso, os softwares necessários para o andamento do projeto também estão disponíveis e são gratuitos, tais como o Octave, ARDUINO IDE, LABVIEW COMMUNITY e MICROSOFT EXCELL online. Os preços estimados dos principais componentes que serão utilizados neste projeto estão apresentados na tabela abaixo:

⁵ Encoder E2-Q2. Robocore, 2022. Disponível em: <https://www.robocore.net/sensor-robo/encoder-e2-q2>. Acesso em 24/02/2022.

⁶ Arduino UNO. Arduino CC, 2022. Disponível em: <https://store-usa.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-uno-rev3>. Acesso em 24/02/2022.

Tabela 1 – Estimativa de preços

Produto	Preço	Fornecedor
Arduino Uno	R\$85,00	Curto Circuito
Ponte H L298N	R\$23,50	RoboCore
Encoder E2-Q2	R\$25,00	RoboCore
Motor CC com caixa de redução eixo duplo	R\$15,00	RoboCore
Kit cabo jumper 20 cm	R\$24,90	Tecnotronics
Total	R\$173,40	

6 Cronograma de atividades

1. Etapa 1
 - a. Levantamento bibliográfico detalhado para o desenvolvimento do projeto;
 - b. Estudo teórico sobre modelagem matemática do motor CC;
 - c. Estudo teórico sobre controladores PID, com base nas especificações de desempenho transitório.
2. Etapa 2
 - a. Projeto dos ganhos PID e simulação computacional;
 - b. Programação do ARDUINO e implementação experimental para a obtenção dos parâmetros do modelo matemático do motor CC;
 - c. Implementação experimental do controle PID com o ARDUINO.
3. Etapa 3
 - a. Análise dos resultados experimentais em comparação aos resultados obtidos por simulações computacionais;
 - b. Redação do relatório final.

Tabela 2 – Cronograma das atividades

Etapa	Mês											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1.a.	X											
1.b.		X										
1.c.		X	X									
2.a.				X								
2.b.					X	X						
2.c.						X	X	X				

3.a.									X	X		
3.b.											X	X

Referências bibliográficas

Almeida, Fernanda. O que é Encoder? Para que serve? Como escolher? Como interfacear?. *HI tecnologia*, 2017. Disponível em: <https://www.hitecnologia.com.br/blog/o-que-é-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>. Acesso em 18/11/2021.

Cardoso, Daniel. Driver motor com Ponte H L298N – Controlando Motor DC com Arduino. *Vida de Silício*, 2017. Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/driver-motor-com-ponte-h-l298n/>. Acesso em 18/11/2021.

GARCIA, Claudio. Controle de processos industriais: Estratégias Convencionais. 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2017. 9788521211860. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211860/>. Acesso em: 24 fev. 2022.

Mattede, Henrique. Motor de corrente contínua, características e aplicações!. *Mundo da elétrica*, 2019. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/motor-de-corrente-continua-caracteristicas-e-aplicacoes/>. Acesso em 24/02/2022.

Motta, Allan. O que é o Arduino UNO?. Arduino Portugal, 2017. Disponível em: <https://www.arduinoportugal.pt/o-que-e-o-arduino/>. Acesso em 18/11/2021.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. 5ª ed. São Paulo: Editora Pearson/Prentice Hall, 2010.

Santana, Douglas D. S.; Silva, P. A.; Oliveira, A. L. Sistema de controle de velocidade e posição para mesa coordenada cartesiana utilizada em máquinas ferramenta. Jundiaí, SP. 2008. Artigo publicado na Revista de Ciências Exatas e Tecnologia. Disponível em: <https://revista.pgsskroton.com.br/index.php/rcext/article/view/2366/2270>. Acesso em 04/06/2022.