



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA



Dener Carvalho Faria da Silva

CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA
VIA PLATAFORMA ARDUÍNO

DOURADOS/MS

2021

Dener Carvalho Faria da Silva

CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA
VIA PLATAFORMA ARDUÍNO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora da
Faculdade de Engenharia da Universidade
Federal da Grande Dourados para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Bessa Gibelli

DOURADOS/MS

2021

DENER CARVALHO FARIA DA SILVA

CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA VIA
PLATAFORMA ARDUÍNO

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal da Grande Dourados, na área de concentração 3.04.05.03-3 Controle de Processos Eletrônicos, Retroalimentação, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Energia.



Orientador: Prof. Dr. Gerson Bessa Gibelli
FAEN – UFGD



Prof. Dr. Etienne Biasotto
FAEN – UFGD



Prof. Dr. Clivaldo de Oliveira
FAEN - UFGD

DOURADOS-MS
29 DE NOVEMBRO DE 2021

RESUMO

No mundo moderno estamos cercados de processos cada vez mais complexos, que são criados para resolver problemas do dia a dia, entender o princípio desses processos é primordial. Dessa forma, esse trabalho, tem como objetivo a construção de uma bancada para o desenvolvimento da modelagem e controle por PWM de um motor de corrente contínua utilizando a plataforma Arduino. Essa bancada consiste em um protótipo composto por sensores para aquisição de dados, o motor CC com o disco, encoder e o Arduino. O sistema foi testado em diferentes velocidades e obteve-se a melhor resposta nas velocidades médias de 3000 a 6000 RPM para o *setpoint*.

Palavras-chave: Motor CC, Arduino, Controle.

ABSTRACT

In the modern world we are surrounded by increasingly complex processes, which are created to solve everyday problems, understand the process principles is overriding. Thus, this work aims to build a workbench for the development of PWM modeling and control of a direct current motor using an Arduino platform. This workbench consists of a prototype made up of sensors for data acquisition, the DC motor with the disk, encoder and Arduino. The system has been tested in different speed and it was obtained the best response in the speed averages of 3000 to 6000 RPM for the setpoint

Keywords: DC Motor, Arduino, Control.

CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA VIA PLATAFORMA ARDUÍNO

Dener Carvalho Faria da Silva¹; Gerson Bessa Gibelli²

Discente do curso de Engenharia de Energia¹; Docente do curso de Engenharia de Energia²;

dennerfaria13@hotmail.com¹; gersongibelli@ufgd.edu.br²;

RESUMO – No mundo moderno estamos cercados de processos cada vez mais complexos, que são criados para resolver problemas do dia-a-dia, entender o princípio desses processos é primordial. Dessa forma, esse trabalho, tem como objetivo a construção de uma bancada para o desenvolvimento da modelagem e controle por PWM de um motor de corrente contínua utilizando a plataforma Arduino. Essa bancada consiste em um protótipo composto por sensores para aquisição de dados, o motor CC com o disco, encoder e o Arduino. O sistema foi testado em diferentes velocidades e obteve-se a melhor resposta nas velocidades médias de 3000 a 6000 RPM para o *setpoint*.

Palavras-chave: Motor CC. Arduino. Controle.

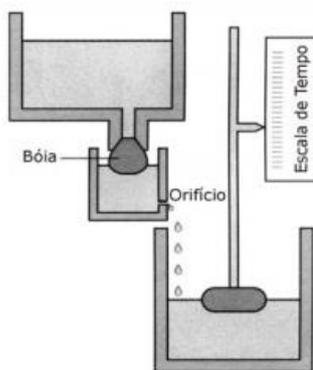
ABSTRACT – In the modern world we are surrounded by increasingly complex processes, which are created to solve everyday problems, understand the process principles is overriding. Thus, this work aims to build a workbench for the development of PWM modeling and control of a direct current motor using an Arduino platform. This workbench consists of a prototype made up of sensors for data acquisition, the DC motor with the disk, encoder and Arduino. The system has been tested in different speed and it was obtained the best response in the speed averages of 3000 to 6000 RPM for the *setpoint*.

Keywords: DC Motor. Arduino. Control.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de aplicações envolvendo controle com realimentação datam por volta de 300 a.C. através do uso de boias para controle de nível pelo grego Ktesibios, para construção do relógio de água (Figura 1). Nesse, um reservatório mantido a nível de água constante através de uma boia, possui um orifício em sua base, onde água também jorra aumentando a vazão constante para outro reservatório. Esse último reservatório, é preenchido de água proporcional ao tempo, uma boia com um cursor indica o tempo em escala linear (FACCIN, 2004).

Figura 1. Relógio de água de Ktesibios.

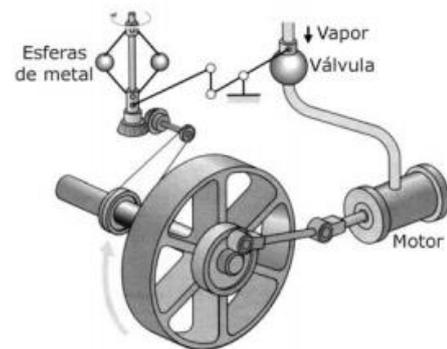


Fonte: (FACCIN, 2004).

Segundo o mesmo autor, o primeiro sistema reconhecido de realimentação é datado no ano de 1765 pelo russo I. Polzunov, tratando de um sistema mecânico de controle de água para caldeiras utilizando boias.

Além disso, no século XVIII, foi observado o desenvolvimento por James Watt do regulador centrífugo para controle da velocidade de máquinas a vapor (OGATA, 2010). Conforme apresentado através da Figura 2, esse sistema também conhecido como regulador de esferas, controla a velocidade através de duas esferas de metais girando ao redor de um eixo, fazendo movimentar uma válvula principal a qual aumenta ou diminui a quantidade de vapor, controlando assim a velocidade do motor (FACCIN, 2004).

Figura 2. Regulador de esferas de Watt.



Fonte: (FACCIN, 2004).

Luiz, *et al* (1997), aponta que a teoria clássica de controle por realimentação tem sido a base de desenvolvimento para sistemas simples de controle automático, devido a sua engenharia não complexa e simplicidade de implementação apresentam uma larga aplicação na indústria. Segundo o mesmo autor, entre as décadas de 1960 e 1990, houve grandes avanços para o controle adaptativo e o controle fuzzy afim de

substituir os métodos convencionais clássicos na indústria.

Para Ferreira (2006), a imposição de controle automático de malhas contínuas, não é de interesse intrínseco da automação, mas está ligada primeiramente a questões essenciais, como estabilizar sistemas instáveis, rejeitar perturbações, distúrbios, além de variações em um processo, planta ou até então alterar a dinâmica de um sistema, nesse sentido, deve-se utilizar os conceitos de realimentação, ou seja, malha fechada.

Petinari (2018) destaca que o sinal de saída de um sistema depende exatamente de seu controlador e da malha aberta ou fechada. No entanto, para Ogata (2010), os sistemas de malha fechada apresentam a vantagem do uso da realimentação a qual faz com que a resposta do sistema não sofra interferências de distúrbios externos nos parâmetros do mesmo, tornando-se assim, vantajosa a utilização de componentes de baixo custo e menor precisão, a fim de obter um controle preciso de certo sistema.

A modulação PWM, é uma técnica conhecida e amplamente utilizada, onde há uma grande disponibilidade de microcontroladores digitais comercializados no mercado sob a forma de periféricos dedicados (MIRANDA, 2012). Devido a esses fatores, a flexibilidade e a facilidade de manipulação, foi escolhida essa tecnologia para aplicação neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Amparando-se na literatura, este capítulo apresentará os conceitos pertinentes para a realização do trabalho, apresentando acerca dos requisitos necessários para controle da velocidade de um motor CC através da plataforma Arduino.

2.1 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

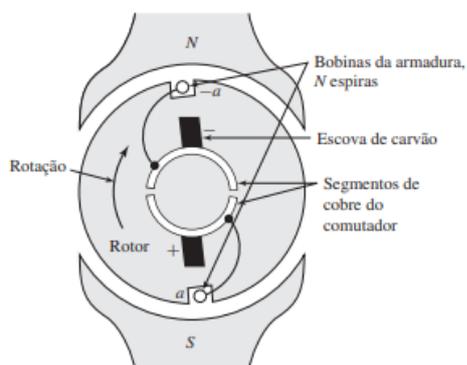
Os motores de corrente contínua, devido a seu controle preciso de velocidade, são conhecidos e utilizados em aplicações as quais exigem tais características. Sua popularização se deu com a evolução da eletrônica de potência, com fontes estáticas de correntes contínuas confiáveis e de baixo custo, fazendo com que os motores de corrente contínua passassem a constituir uma alternativa a aplicações de fino ajuste de velocidade (FRANCHI, 2008).

2.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O motor CC de ímã permanente, é encontrado em uma ampla variedade de aplicações de baixa potência, tendo como principal característica o ímã permanente que substitui o enrolamento de campo, e resulta em uma construção simplificada (UMANS, 2014).

A Figura 3 apresenta a seção transversal de um motor típico de ímã permanente com comutador.

Figura 3. Seção transversal de um motor de ímã permanente com comutador.



Fonte: (UMANS, 2014).

Segundo Umans (2014), nos motores CC de ímã permanente, os enrolamentos de armadura são colocados sobre um disco delgado. As escovas são usadas para comutar a corrente de armadura, contatando a porção de comutação da armadura que está em seu raio interno. As correntes fluem radialmente no disco de armadura, o qual está colocado entre dois conjuntos de ímãs permanentes, criando um fluxo axial que cruza o enrolamento da armadura. A comutação é responsável pela mudança de polaridade na bobina, juntamente com o fluxo magnético axial e as correntes radiais cria um conjugado que produz rotação.

2.2 PLATAFORMA ARDUÍNO

O Arduíno é uma plataforma construída para obter uma interação física entre o computador e o ambiente utilizando dispositivos eletrônicos de forma simples baseada em *softwares* e *hardwares* livres (CAVALCANTE, *at al*, 2011). O Arduíno é composto por um microcontrolador de placa

única e um conjunto de *softwares* para programá-lo. O *hardware* é composto de um processador Atmel AVR e suporte embutido de entrada/saída. Já o *software* é a combinação de uma linguagem de programação padrão e do *bootloader* que executa na placa (McRoberts, 2011). Na Figura 4 é apresentado o modelo oficial do Arduíno UNO.

Figura 4. Arduíno UNO.



Fonte: (ARDUINO, 2018).

2.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados, corresponde a coleta de todos os parâmetros necessários através de periféricos que estão conectados a plataforma Arduíno, sendo nesse tópico descritos.

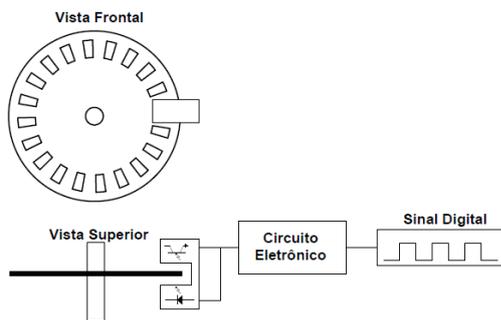
2.3.1 SENSOR ENCODER

O módulo sensor encoder é um dispositivo eletromecânico que conta pulsos elétricos a partir de um disco preso a um eixo rotacional conforme apresentado na Figura 5.

Os encoders ópticos utilizam discos com ranhuras ou aberturas transparentes,

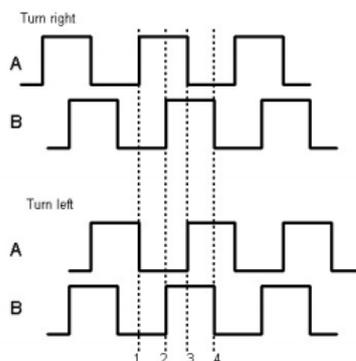
que se movem entre uma fonte de luz e um detector, essa luz pode ser visível, mas geralmente é infravermelha. O disco é acoplado a um eixo, o qual à medida que gira, permite que o feixe de luz passe pelas ranhuras, sendo interrompido assim que encontra a parte fechada, gerando assim uma onda pulsante quadrada, representada na Figura 6. A fonte luminosa, pode ser um LED ou diodo infravermelho. Já o receptor normalmente é composto de um fototransistor ou um diodo fotovoltaico (ANDRADE, 2008).

Figura 5. Estrutura básica de um encoder.



Fonte: (ANDRADE, 2008).

Figura 6. Ondas pulsantes quadradas na saída do encoder.



Fonte: (ANDRADE, 2018).

O sensor encoder utilizado possui uma tensão de operação de 3,3 a 5 V. Utiliza um comparador LM393 com um tempo de resposta de 1,4 μ s, além de contar com uma saída analógica e outra digital (FILIPEFLOP, 2020).

2.3.2 SENSOR DE CORRENTE

O módulo sensor de corrente (Figura 7) é composto por uma placa com um sensor ACS712 que por Efeito Hall gera uma saída de tensão proporcional a corrente que flui entre os pinos IP+ e IP- (DEMETRAS, 2018).

Segue as especificações do sensor de corrente (OLIVEIRA, 2019):

- Controlador: ACS712-30A;
- Tensão de operação: 5VDC
- Faixa de medição: -30A a +30A
- Tempo de resposta: 5 μ s
- Saída analógica proporcional: 66mV/A
- Largura de banda: 80KHz

Figura 7. Sensor de corrente utilizado.



Fonte: (OLIVEIRA, 2019).

2.3.3 SENSOR DE TENSÃO

O módulo sensor/detector de tensão (Figura 8) tem como função capturar as

variações de tensão ocorridas no sistema, em qualquer ponto que se deseja monitorar.

Segundo o site Eletrogate (2020), este sensor é para uso em microcontroladores de 5V, medindo uma tensão máxima até 25V.

Figura 8. Sensor de tensão utilizado.



Fonte: (ELETROGATE, 2020).

2.4 MODULAÇÃO PWM

A Modulação de Largura de Pulso ou PWM (*Pulse Width Modulation*) é umas das maneiras mais precisas de se controlar motores de corrente contínua. Entretanto esse método não controla a corrente do motor de forma constante, mas sim através de pulsos, resultando na média da corrente a qual circula na carga (OLIVEIRA, 2012).

Segundo o mesmo autor, para alterar a velocidade do motor, necessita-se alterar os pulsos aplicados (*duty cycle*) aumentando ou diminuindo sua duração. Aumentando a duração dos pulsos, automaticamente aumenta-se o tempo *on* das ondas retangulares, conseqüentemente o motor recebe alimentação por mais tempo, resultando em um aumento de velocidade. No mesmo princípio, diminuindo a duração dos pulsos aumenta-se o tempo *off*, fazendo com que o motor diminua sua velocidade.

Ramirez (2015) utiliza-se para acionar o motor CC com o arduíno, um circuito *driver* afim de proteger a placa arduíno, já que a mesma suporta até 40 mA, e a corrente do motor é superior a isso. Sendo assim, utiliza-se um transistor o qual através da corrente proveniente do arduíno excitando sua base, permite por meio do chaveamento trabalhar com uma corrente maior em seu coletor. Utiliza-se também um diodo retificador para dissipar a corrente residual gerada ao desligar o motor.

2.5 MALHAS DE CONTROLE

Para exercer o controle sobre um sistema, necessita-se de variáveis de saída pré determinadas a fim de produzir um sinal de controle o qual deve ser sobreposto ao sistema a cada instante. Em regra, para aumentar a precisão de um sistema, compara-se o sinal de saída com o sinal referência, a diferença entre eles é o erro. Esse erro por sua vez é empregado na determinação do sinal de controle. O sinal de controle é gerado pelo compensador ou controlador, o qual utiliza o erro como referência, empenhando sempre em corrigi-lo. Toda essa estrutura apresentada é chamada de malha de controle (HEY, 2008).

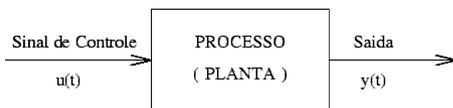
Segundo esse mesmo autor, para se projetar um sistema de controle é necessário conhecer o modelo de sistema que será controlado, afim de calcular o controlador

ideal, sendo que as variáveis utilizadas pelo controlador possam ser medidas ao decorrer do processo.

2.5.1 MALHA DE CONTROLE ABERTA

Os sistemas os quais o sinal de saída não exerce nenhuma ação sobre o controle são determinados sistemas de malha aberta (Figura 9). Isso implica que o sinal de saída não é comparado com o sinal de entrada, com isso a cada entrada referência equivale a uma condição fixa de operação. A precisão do sistema depende intrinsecamente de uma calibração, não sendo recomendado em sistemas que apresentam distúrbios (OGATA, 2010).

Figura 9. Ilustração de um sistema de controle malha aberta.



Fonte: (SILVA JR, 2019).

2.5.2 MALHA DE CONTROLE FECHADA

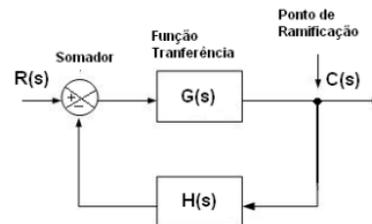
Em um sistema, quando seu sinal de saída é medido e comparado com o sinal de entrada, é determinado de malha fechada (Figura 10). Isso é possível fazendo uma realimentação de saída para a entrada, tornando-se realizável uma mudança na ação do controle. Nesse sistema, se tem maior precisão, pois mesmo com a presença de distúrbios externos, a tendência é que o sistema mantenha o valor de saída

requisitado, uma vez que por ser realimentado, sempre há um sinal de erro o qual fará a correção do sinal, tendendo ao sinal de referência (ELERO JR., 2011).

2.5.3 DIAGRAMA DE BLOCOS

O Diagrama de blocos é uma representação gráfica das funções realizadas em cada componente e o fluxo de sinais entre elas, conforme apresentado na Figura 10. Essa representação apresenta sistematicamente o fluxo de sinais em tempo real, sendo uma vantagem nessa visualização (ELERO JR., 2011).

Figura 10. Ilustração de um diagrama de blocos.



Fonte: (ELERO JR, 2011).

A Figura 10, sintetiza os elementos que integram um diagrama de blocos, onde as setas indicam os fluxos de sinais, o somador efetua operações de soma com o sinal, os quadrados assinalam a dinâmica do sistema, que é interpretado por uma função de transferência e o ponto de ramificação por sua vez, e o local onde o sinal é coletado de um bloco e avança para outros blocos.

2.6 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Segundo Ogata (2010), a função de transferência de um sistema é definida por uma equação diferencial linear invariante com o tempo sendo representado pela razão entre a Transformada de Laplace da saída pela Transformada de Laplace da entrada, admitindo todas as condições iniciais nulas. Utilizando esse conceito, consegue-se representar a dinâmica de um sistema através de uma equação algébrica. Sendo assim, a função de transferência de um sistema é um modelo matemático o qual estabelece um recurso operacional para expressar a equação diferencial que confronte a variável de saída à variável de entrada.

2.6.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE SEGUNDA ORDEM.

Para Ogata (2010), um sistema de segunda ordem é representado basicamente por três parâmetros: frequência natural não amortecida (ω_n), coeficiente de amortecimento (ξ), máximo sobressinal e o ganho (G_{CC}). Utilizando estes parâmetros através da Equação 2.1, tem-se:

$$H(s) = G_{CC} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.1)$$

Para determinar a frequência natural não amortecida foi utilizado segundo Ogata

(2010), o critério de 2%, sendo apresentada na Equação 2.2, onde τ_s corresponde ao tempo de acomodação.

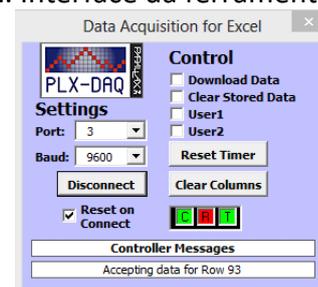
$$\tau_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (2.2)$$

2.7 SOFTWARE EXCEL

Para SANTOS (2000), o *software Excel* possui uma aplicabilidade muito ampla, que vai desde elaborar tarefas simples como o controle de contas bancárias e despesas domésticas, até tarefas de rotinas complexas de empresas, tais como folha de pagamento, planilhas financeiras, tabelas estatísticas, gráficos registro e gestão de dados comerciais, fazendo com que o *software* seja também uma ferramenta didática, criando pontes de conhecimentos através do trabalho de vários conteúdos.

Para aquisição dos dados no *Excel*, será utilizado a ferramenta PLX-DAQ (Figura 11) que se conecta a qualquer sensor e a porta serial de um computador que esteja aquisitando dados de um microcontrolador, como o Arduino (ROBOTICA, 2019).

Figura 11. Interface da ferramenta PLX-DAQ.



Fonte: Próprio autor

3 METODOLOGIA

A Metodologia desenvolvida neste trabalho foi baseada na pesquisa de livros, publicações de artigos técnicos e científicos e catálogos de fabricantes utilizados para aplicar a plataforma Arduino no controle de um motor CC.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO MOTOR UTILIZADO.

O motor CC de ímã permanente utilizado nesse trabalho é produzido pela Mabuchi Motor, modelo RS-380PH-3270. Os dados fornecidos pelo fabricante estão disponíveis no Quadro 1 a seguir (MABUCHI MOTOR, 2019).

Quadro 1. Dados do fabricante do motor utilizado.

Voltagem (V)	Faixa de operação		Nominal	
			V	
	4,5 – 15,0		12,0	
Sem Carga	Velocidade		Corrente	
	r/min		A	
	16400		0,37	
Máxima Eficiência	Velocidade	Corrente	Torque	Potência
	r/min	A	mN·m	W
	14110	2,28	13,0	19,2
Rotor Bloqueado	Torque		Corrente	
	mN·m		A	
	93,2		14,0	

Fonte: (MABUCHI MOTOR, 2019).

3.2 DESENVOLVIMENTO CONSTRUTIVO DA BANCADA DE TESTES.

A bancada de testes foi desenvolvida em laboratório, utilizando todos os

equipamentos e conhecimento técnico para ser construída de forma eficaz, seguindo todos os protocolos de segurança.

3.2.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para construção da bancada de testes, foram utilizados preferencialmente materiais de baixo custo, e de fácil manuseio, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2. Materiais utilizados para construção da bancada.

Quantidade	Material / Equipamento
1	base de madeira
1	disco de CD
1	motor CC modelo RS-380PH-3270
1	sensor de velocidade encoder modelo LM393
1	sensor de corrente modelo ACS712
1	sensor de tensão
1	protoboard
1	diodo modelo 1N4007
1	resistor de 500Ω
1	transistor NPN modelo TIP-142
1	plataforma Arduino UNO
1	fonte de 12V
10	jumpers

Fonte: Próprio autor.

3.2.2 CONSTRUÇÃO DA BANCADA DE TESTES.

Para construção da bancada de testes foram utilizados três pedaços retangulares de madeira, um de 26,5 cm de comprimento e 19,6 cm de largura, e os outros dois de 26,5 cm de comprimento e 6,5 cm de largura. O primeiro foi utilizado como base para fixação

do motor e dos componentes, já o segundo como apoio para a base.

3.2.3 DISCO E SENSOR ENCODER E ACIONAMENTO DO MOTOR.

Para medir a velocidade, utiliza-se um disco de CD com um furo, sendo este disco acoplado ao eixo do motor com o auxílio do torno. O sensor encoder é ajustado e fixado na bancada de maneira que o disco passe por dentro dele, mas não encoste, já que isso pode danificá-lo.

Para acionar o motor, foi projetado o circuito *driver* (Figura 12) uma vez que a placa Arduino suporta apenas uma corrente de 40 mA, o circuito *driver* consiste de uma fonte de alimentação de 12V, a qual é chaveada por um transistor NPN através da corrente vinda do Arduino.

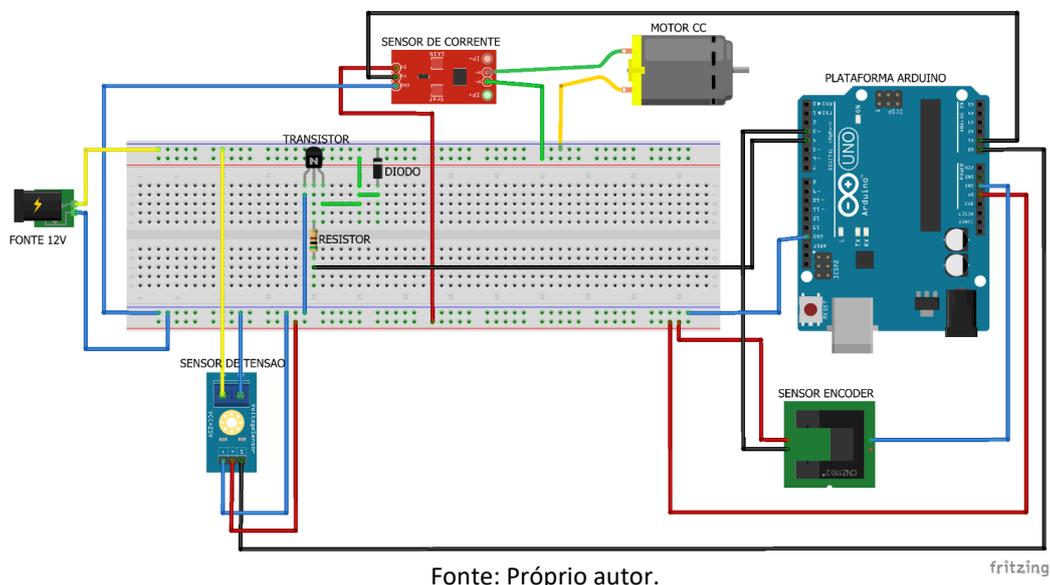
No circuito *driver* apresentado na Figura 12, é possível observar o esquemático

das ligações entre os componentes e a função de cada um para o funcionamento do sistema, além de auxiliar o entendimento da montagem da bancada. Vale ressaltar que o Arduino é alimentado através de sua porta USB continuamente.

3.3 ESQUEMÁTICO DO ARDUÍNO

Utilizando a Plataforma Arduino foi desenvolvido em seu IDE, uma programação onde determina-se uma velocidade referência (*setpoint*), o microcontrolador do Arduino verifica a velocidade atual do motor, através da contagem dos pulsos emitidos pelo sensor Encoder, sendo este o tempo ON do sinal. Esses pulsos são relacionados com o tempo através de funções programáveis no Arduino, tendo como resultado final a velocidade em RPM (Rotações por minuto). Tendo em vista que cada pulso é relacionado a uma rotação, já que o disco possui um furo.

Figura 12. Esquemático de ligação do circuito driver.



Fonte: Próprio autor.

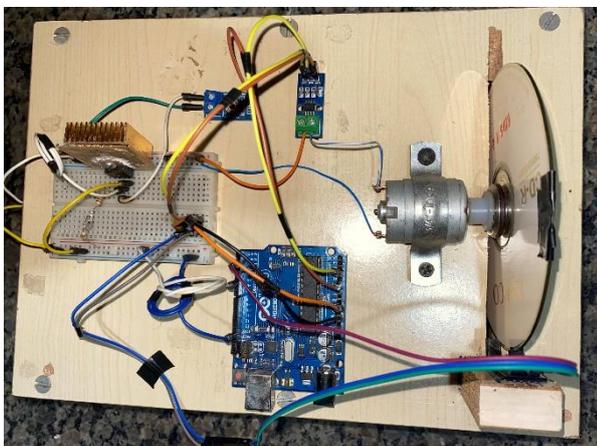
fritzing

Após o cálculo da velocidade vinda do sensor, o Arduíno a compara com o *setpoint*. Foi definido um tempo ON inicial para o sinal de saída de 30%, se a velocidade comparada com o *setpoint* é mais baixa, é injetado 1% ao PWM, aumentando a corrente enviada ao motor e conseqüentemente sua velocidade. Caso a velocidade seja mais alta, o processo inverso ocorre, diminuindo assim a corrente para o motor.

Os sensores de corrente e tensão não atuam diretamente sobre o controle do sistema, eles são utilizados para verificar parâmetros de corrente e tensão em determinados locais do sistema, onde se faz necessário.

Após ser desenvolvido no IDE, o script é compilado para placa Arduíno, onde através do PLX-DAQ, os dados são aqüisitados para o Excel onde é feita a coleta de dados.

Figura 13. Bancada de Testes montada com todos os componentes.



Fonte: Próprio autor.

3.4 DESENVOLVIMENTO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.

Após a definição de conceitos teóricos e matemáticos, segue-se para a fase de modelagem da bancada. E para isso, primeiramente é primordial o desenvolvimento de sua função de transferência característica, a partir do modelo já determinado anteriormente pela Equação 2.1, para isso, se fez necessário a realização de um ensaio para observar a resposta do motor a um degrau unitário de 12V.

O sistema de controle é em malha fechada, uma vez que no mesmo é perceptível uma maior estabilidade e menores interferências externas provenientes de possíveis distúrbios. Esse sistema é característico pela realimentação, onde a saída é a velocidade atual do motor, que é comparada com a velocidade de entrada, correspondente a velocidade de referência a qual deseja-se que esse motor permaneça.

Vale lembrar que, inicialmente há um parâmetro de velocidade a qual o sistema deverá alcançar conhecido como parâmetro de entrada, o qual é manipulado pelo Arduíno, que faz o papel do controlador. Após o funcionamento do sistema, sua resposta que é o sinal de saída, também conhecida como variável controlada é lida pelo sensor encoder que envia o sinal

necessário para realimentação do sistema garantindo seu funcionamento contínuo. A Figura 14, apresenta esse funcionamento.

Figura 14. Diagrama de blocos do sistema.



Fonte: Próprio autor.

O ensaio do motor alimentado com degrau unitário, resultou na curva de resposta da velocidade mostrada na Figura 15, que atingiu o regime permanente em aproximadamente 2 segundos.

Por fim, foi executado o cálculo da função de transferência do motor. Primeiramente, foi calculado a partir da Equação 2.2 a frequência natural não amortecida (ω_n), atribuindo um valor de 1 ao

coeficiente de amortecimento (ξ) já que, o gráfico da Figura 15, se assemelha a uma resposta criticamente amortecida e considerando o tempo de acomodação (τ_s) igual a 2s. Sendo assim, isolando a frequência natural, temos:

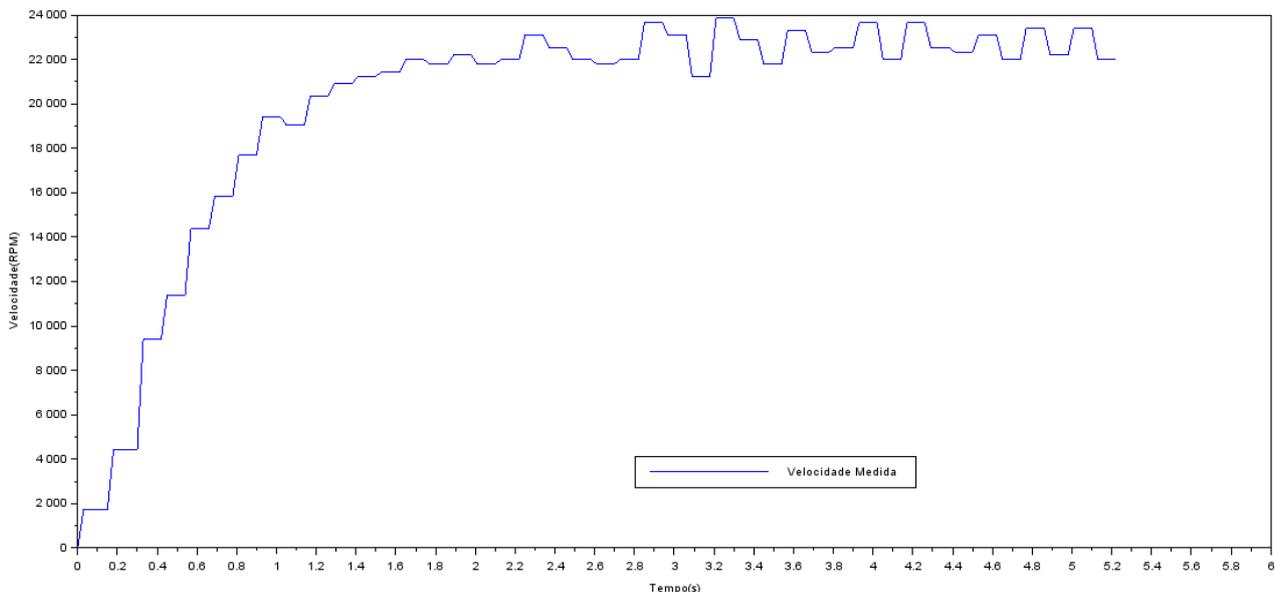
$$\omega_n = \frac{4}{\xi \tau_s} = \frac{4}{1 \cdot 2s} = 2 \quad (3.1)$$

Utilizando a Equação 2.1, e fazendo as devidas substituições e simplificações, obtém-se à função de transferência dada na Equação 3.2.

$$H(s) = \frac{90424}{s^2 + 4s + 4} \quad (3.2)$$

Por meio da Equação 3.2, serão obtidos e analisados os resultados no próximo capítulo.

Figura 15. Resposta do motor a degrau unitário de 12V.



Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando o software Scilab, foi inserida e simulada a função de transferência afim de comparação com a resposta em degrau visualizada na Figura 16.

O resultado é apresentado na Figura 16, onde a curva em cor preta, representa o resultado da simulação da função de transferência, e a curva na cor azul mostra os dados pertinentes a resposta do ensaio a degrau unitário.

Verifica-se que o comportamento das duas curvas é semelhante comprovando que o sistema é de segunda ordem criticamente amortecido.

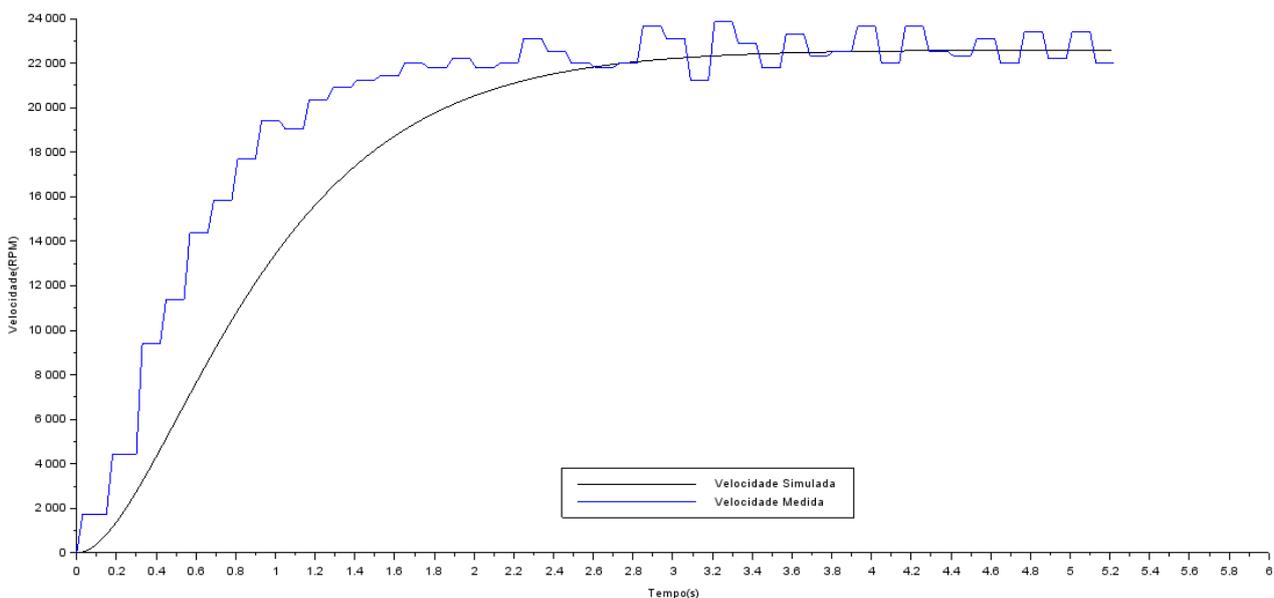
Na realização dos próximos ensaios, foi aplicado a técnica de controle ON/OFF por PWM, sendo definido inicialmente uma velocidade como *setpoint* a qual o motor

deve se estabilizar.

Considerando tempo ON inicial para saída do Arduíno de 30%, foram ensaiadas sete velocidades diferentes em um tempo de 60 segundos, para se observar o comportamento das curvas e precisão da estabilidade. Essa precisão é verificada através da variação em porcentagem para mais e para menos da velocidade (histerese) em relação a velocidade referência, após o sistema entrar em estado de regime.

A Figura 17, e o Quadro 3 apresentam respectivamente o comportamento da velocidade para ensaio de 1000 RPM e a porcentagem de variação da velocidade.

Figura 16. Comparação entre modelo e dados reais.



Fonte: Próprio autor.

Figura 17. Curva de velocidade ajustada para 1000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 3. Valores de máximo e mínimo e precisão para ensaio de 1000 RPM.

	Velocidade (RPM)	Variação (%)
Máxima	1353	41,90
Mínima	792	30,70
Média	1050	3,60

Fonte: Próprio autor.

Pelo gráfico da Figura 17 e o Quadro 3, observa-se que para a velocidade baixa de 1000 RPM, teve-se uma variação percentual acima dos 5%, além de um tempo de acomodação superior a 26 segundos.

Posteriormente, foi executado o ensaio para 2000 RPM e cálculo da variação percentual da velocidade dados na Figura 18 e Quadro 4.

Figura 18. Curva de velocidade ajustada para 2000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 4. Valores de máximo e mínimo e precisão para ensaio de 2000 RPM.

	Velocidade (RPM)	Variação (%)
Máxima	2409	16,98
Mínima	1650	21,21
Média	1992	0,40

Fonte: Próprio autor.

Pelo gráfico da Figura 18 e o Quadro 4, observa-se que para a velocidade baixa de 2000 RPM, teve-se uma variação percentual acima dos 5%, além de um tempo de acomodação superior a 20 segundos, mas verifica-se um comportamento melhor, do que observado para velocidade de 1000 RPM.

Em seguida, foi executado o ensaio para 3000 RPM (Figura 19) e cálculo da variação percentual da velocidade (Quadro 5).

Figura 19. Curva de velocidade ajustada para 3000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 5. Valores de máximo e mínimo e precisão para ensaio de 3000 RPM.

	Velocidade (RPM)	Variação (%)
Máxima	3267	8,17
Mínima	2739	9,53
Média	2996	0,14

Fonte: Próprio autor.

Observando o gráfico da Figura 19 e o Quadro 5, verifica-se um comportamento mais estável quando comparado aos ensaios anteriores, para velocidade de 3000 RPM, a variação ainda se encontra acima dos 5% e o tempo de acomodação é superior a 14 segundos.

O quarto ensaio foi executado para 4000 RPM, e seu resultado juntamente com o cálculo da variação percentual da velocidade são apresentados na Figura 20 e Quadro 6.

Figura 20. Curva de velocidade ajustada para 4000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 6. Valores de máximo e mínimo e precisão para ensaio de 4000 RPM.

	Velocidade (RPM)	Varição (%)
Máxima	4323	7,47
Mínima	3663	9,20
Média	4000,9	0,02

Fonte: Próprio autor.

Através do gráfico da Figura 20 e do Quadro 6, observa-se que para a velocidade de 4000 RPM, o tempo de acomodação foi maior que 10 segundos, e a variação percentual a menor dentre os ensaios

anteriores, atingindo 7,47%, mas ainda acima dos 5%.

O quinto ensaio foi executado para 5000 RPM, e seu resultado juntamente com o cálculo da variação percentual da velocidade são apresentados na Figura 21 e Quadro 7.

Figura 21. Curva de velocidade ajustada para 5000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 7. Valores de máximo e mínimo e precisão para ensaio de 5000 RPM.

	Velocidade (RPM)	Varição (%)
Máxima	5346	6,47
Mínima	4686	6,70
Média	4997,7	0,05

Fonte: Próprio autor.

Verificando o gráfico da Figura 21 e o Quadro 7, observa-se que para a velocidade de 5000 RPM, o tempo de acomodação é semelhante ao da velocidade de 4000 RPM, porém há uma melhora na variação percentual, ficando pouco maior que 6%.

Seguidamente, foi executado o ensaio para 6000 RPM e cálculo da variação percentual da velocidade dados na Figura 22 e Quadro 8.

Figura 22. Curva de velocidade ajustada para 6000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 8. Valores de máximo e mínimo e precisão para ensaio de 6000 RPM.

	Velocidade (RPM)	Variação (%)
Máxima	6369	5,79
Mínima	5676	5,71
Média	6016,5	0,27

Fonte: Próprio autor.

Pelo gráfico da Figura 22 e pelo Quadro 8, observa-se que para a velocidade de 6000 RPM, o tempo de acomodação volta a crescer, ficando por volta de 20 segundos, entretanto a variação percentual fica pouco acima de 5%, sendo o melhor resultado até então quando comparado com as velocidades menores.

Finalmente, o sétimo e último ensaio foi executado para 7000 RPM, e seu resultado juntamente com o cálculo da variação percentual da velocidade são apresentados na Figura 23 e Quadro 9

Figura 23. Curva de velocidade ajustada para 7000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Quadro 9. Valores de máximo e mínimo e precisão para ensaio de 7000 RPM.

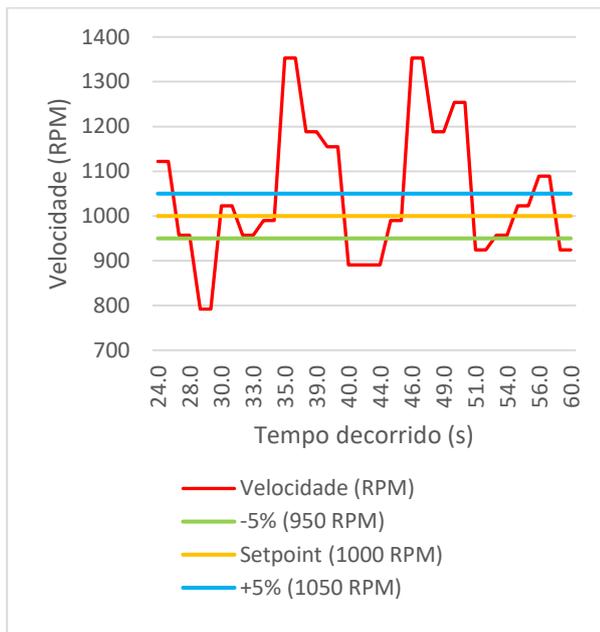
	Velocidade (RPM)	Variação (%)
Máxima	7326	8,42
Mínima	6831	2,41
Média	7052	1,30

Fonte: Próprio autor.

Observa-se através do gráfico da Figura 23 e no Quadro 9, um tempo de acomodação grande, superior a 30 segundos, mas uma variação mínima percentual de 2,41%, sendo assim o ensaio que obteve menor variação percentual.

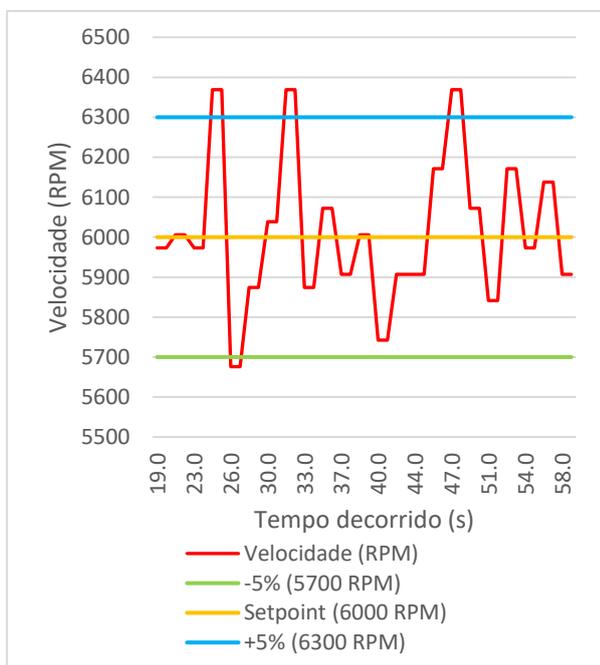
Para melhor observar-se a variação percentual (histerese), será apresentado a seguir para os ensaios correspondentes as velocidades de 1000 e 6000 RPM, os gráficos em escala reduzida, nas Figuras 24 e 25 respectivamente. Serão traçadas retas correspondentes as variações mínima e máxima de 5% em relação a velocidade referêcia (*setpoint*).

Figura 24. Curva de velocidade ajustada para 1000 RPM com histerese.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25. Curva de velocidade ajustada para 6000 RPM com histerese.



Fonte: Próprio autor.

Pela análise das curvas de resposta de velocidade e através dos cálculos pertinentes retratados nos quadros, pode-se identificar o

comportamento e características apresentadas pelo sistema.

O tempo de subida característico para atingir o *setpoint*, variou de acordo com a velocidade, visto após vários testes, o melhor tempo ON que satisfaz uma gama maior de velocidades a ser considerado para saída do Arduíno foi de 30%, o que impacta diretamente na estabilidade.

Para velocidades mais baixas e mais altas, mostrado nas Figuras 17, 18, 22 e 23 observamos um tempo de estabilização maior, superior a 25 segundos em todos os casos.

Em contrapartida, a velocidade de 7000 RPM apresentou um percentual de variação mais baixo, equivalente a 2,41% para menos conforme mostra o Quadro 9, estando dentro da margem de erro de 5%. Porém, a variação para mais foi de 8,42%, ficando acima da margem de erro.

A velocidade de 6000 RPM como visto na Figura 25, apresentou maior estabilidade, visto que tanto para mais quanto para menos, sua variação ficou na casa dos 5%, como visto no Quadro 8.

Para velocidades médias, conforme as Figuras 19, 20 e 21, observou-se um tempo de estabilidade menor, entre 7 e 15 segundos, apresentado também percentuais de variação entre 6 e 10% conforme mostrado nos Quadros 5, 6 e 7.

Vale ressaltar que para velocidades mais baixas, como 1000 RPM, observaram-se os piores casos, o que ficou nítido ao comparar os gráficos das Figuras 24 e 25.

Foram selecionadas essas sete velocidades pois as mesmas encontram-se dentro do range de velocidades possíveis de serem mesuradas pelo Arduino. Esse range teve como principal fator o poder de processamento de dados pelo Arduino Uno o qual utilizamos, já que, velocidades maiores requerem maior processamento de dados. Foi possível observar que a maior velocidade que a bancada foi capaz de medir foi 7000 RPM, a qual foi escolhida como velocidade mais alta para análise nesse trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a aplicação do controle PWM através da plataforma Arduino em um motor de corrente contínua.

Foi possível criar inicialmente um modelo matemático que corresponde ao modelo real do motor de corrente contínua, correlacionando a prática com a teoria.

A simplicidade da utilização da plataforma Arduino, possibilitou obter o controle PWM para diferentes velocidades, construindo uma bancada que utiliza componentes de baixo custo e/ou recicláveis que outrora seriam descartados.

Através de todos os estudos e ensaios realizados, pode-se concluir que foi possível

desenvolver na prática o que foi proposto. Apesar do sistema em algumas velocidades não compor a margem de erro esperada de 5%, foi viável observar o comportamento do sistema nessas diferentes velocidades, pois os mesmos foram pertinentes a teoria.

Uma possível solução para diminuição da variação percentual, seria o aperfeiçoamento da bancada em laboratório, já que, devido a pandemia do COVID-19, não foi possível a utilização dos mesmos devido a questões de segurança. Outro ponto a ser considerado é a utilização de técnicas de controle mais refinadas como o Proporcional, Integral e Derivativo (PID), além de uma placa controladora com maior taxa de processamento de dados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Hudson Pinheiro. **Sensor de velocidade**. Trabalho Técnico, 2008. Disponível em: <http://www.dee.ufrn.br/~luciano/arquivos/ins_ele/Apresenta%E7%F5es_2008_2/HUDSON%20PINHEIRO/Sensor_de_velocidade.pdf>, Acesso em 02 de julho de 2019.

ARDUINO. **Arduino uno**. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-wifi-rev2>>. Acesso em 03 de julho de 2019.

CAVALCANTE, A. C; TAVOLARO, C. R. C; MOLISANI, E. **Física com arduíno para iniciantes**. Artigo Técnico, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n4/18.pdf>>, acesso em 02 de julho de 2019.

DEMETRAS, Ezequiel. **Módulo ACS712 – Medindo corrente elétrica alternada e contínua com Arduíno**. Artigo Técnico, 2018. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/acs712-medindo-corrente-eletrica-alternada-continua/>>, acesso em 08 de novembro de 2020.

ELERO JÚNIOR., Pedro Luiz. **Projeto para controle de velocidade para cadeira de rodas a sopro e sucção, utilizando controlador analógico PI**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual de Londrina – PR, 2011.

ELETROGATE. **Módulo Sensor de Tensão 0-25V DC**. 2020. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/modulo-sensor-de-tensao-0-25v-dc>>, acesso em 10 de novembro de 2020.

FACCIN, Flávio. **Abordagem inovadora no projeto de controladores PID**. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS, 2004.

FERREIRA, Helenice Cristina. **Implementação de um sistema via internet para experiências à distância de malhas de controle**. Dissertação de pós-graduação. Universidade Federal de Itajubá – MG, 2006.

FILIFELOP. **Sensor de Velocidade Encoder**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-velocidade-encoder/>>, Acesso em 02 de Julho de 2020.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos**. 4ª ed. São Paulo, SP: Érica editora, 2008.

HEY, Fernando. **Estratégias de controle aplicadas ao problema de dirigibilidade de veículos terrestres em trajetórias fechadas pré-definidas**. Tese de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – RJ, 2008.

LUIZ, Cristiano C. et al. **Controle Adaptativo Versus Controle Fuzzy: Um Estudo de Caso em Um Processo de Nível**. Revista SBA: Controle & Automação. Vol. 8 no. 2, Florianópolis, SC, Mai., Jun., Jul. e Agosto de 1997.

MABUCHI MOTOR, **Catálogo completo de motores**. Disponível em:

<http://home.mlab.cz/Downloads/PDF/datasheets/Mabuchi_Motors_Complete.pdf>, acesso em 06 de julho de 2019.

MICROBERTS, Michael. **Arduíno básico**. 1ª ed. São Paulo, SP: Novatec editora, 2011.

MIRANDA, Rubens Domingos de. **Modelamento de malha de controle da modulados em largura de pulso**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo – SP, 2012.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5ª ed. São Paulo, SP: Pearson editora, 2010.

OLIVEIRA, Euler. **Como usar com Arduíno – Sensor de corrente (AC e DC) ACS712 (5A/20A/30A)**. Artigo Técnico, 2019. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-de-corrente-ac-e-dc-ac712-5a-20a-30a/>>, acesso em 08 de novembro de 2020.

OLIVEIRA, P. C. J. **Controle da velocidade de um motor DC aplicado em um mecanismo de transmissão utilizando arduíno**. Atividade Autônoma, 2012. Disponível em: <<https://1drv.ms/b/s!AnEDdfUqR1ytkL2cP-ddwl-07n7>>, acesso em 02 de Julho de 2019.

PETINARI, Vinícius Decarli. **Aplicação do arduíno no controle da estufa de secagem**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Grande Dourados – MS, 2018.

RAMIREZ, Ernesto Fernando Ferreyra. **Experiência 10: acionamento de motor DC**. Universidade Estadual de Londrina. Apostila didática, 2015. Disponível em: <http://meyer/www.uel.br/pessoal/ernesto/arduino/10_Acionamento_de_motor_DC.pdf>, acesso em 02 de julho de 2019.

SANTOS, Aldemar de Araújo. **Informática na empresa**. São Paulo: Atlas. 2000.

SILVA JR., João Manoel Gomes. **Controle em malha aberta**. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node5.html>>, acesso em 05 de julho de 2019.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7ª ed. Porto Alegre, RS: AMGH Editora, 2014.