

MEC - SETEC
INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS - CAMPUS FORMIGA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMA EMBARCADO COM COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA
CONTROLE ANALÓGICO DA VELOCIDADE DE MOTOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO ACIONADO POR INVERSOR DE
FREQUÊNCIA

THUANNY REIS NEVES

ORIENTADORA: PROF^a. MSC. ANA PAULA LIMA DOS SANTOS

FORMIGA - MG

2018

THUANNY REIS NEVES

**SISTEMA EMBARCADO COM COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA CONTROLE
ANALÓGICO DA VELOCIDADE DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
ACIONADO POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^ª. Msc. Ana Paula Lima dos Santos

FORMIGA - MG

2018

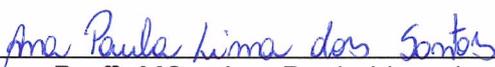
THUANNY REIS NEVES

**SISTEMA EMBARCADO COM COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA CONTROLE
ANALÓGICO DA VELOCIDADE DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO
ACIONADO POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Minas Gerais como
requisito para obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 20 de Novembro de 2018.
Nota: 95

BANCA EXAMINADORA


Orientadora: Prof^a. MSc. Ana Paula Lima dos Santos


Prof^a. MSc. Danielle Costa de Oliveira


Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos

Dedico esse trabalho aos meus pais, Rangel e Elizaine, por todo o apoio e incentivo durante a
minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida, por me sustentar durante a minha caminhada, e por nunca me deixar perder a fé;

Aos meus pais, Rangel e Elizaine, por sempre me apoiarem e me darem todo o suporte necessário para que eu pudesse chegar até aqui;

Ao meu irmão, Gustavo, por toda a motivação para que eu continuasse seguindo meu sonho;

Ao meu namorado, Matheus, por todo o companheirismo e incentivo para que eu buscasse ser melhor a cada dia;

Aos meus avós e demais familiares, por sempre torcerem por mim e me se alegrarem com as minhas conquistas;

À minha orientadora, Prof^a. Ana Paula Lima dos Santos, por todo o auxílio e conhecimento que me foi passado;

Aos técnicos de laboratório Rodrigo Menezes Sobral Zacaroni, Alysson Fernandes Silva e Evandro da Silveira Loschi, por todo o suporte concedido;

Aos demais funcionários do IFMG- campus Formiga, por toda a dedicação ao seu trabalho;

Aos meus amigos, por todos os momentos de descontração e apoio;

E a todos que contribuíram para que eu pudesse concluir essa etapa.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

RESUMO

Os Motores de Indução Trifásicos (MITs) do tipo gaiola de esquilo são componentes essenciais em plantas industriais automatizadas, dessa forma suas características operacionais são frequentemente monitoradas e controladas. No entanto, há uma constante busca por tecnologias de fácil acesso e baixo custo, que permitam ampliar as possibilidades de compartilhamento de dados entre os dispositivos, como os sistemas embarcados. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo realizar o acionamento e controle analógico da velocidade de um MIT utilizando um inversor de frequência, o qual receberá o sinal de controle de um microcontrolador Arduino. Um potenciômetro conectado à entrada analógica do Arduino produzirá o sinal de referência. A comunicação entre os sinais de referência e de controle será realizada sem fio, utilizando a tecnologia *Bluetooth*, por meio de *Shields* (módulos) de comunicação, formando uma rede mestre-escravo. Para isso, serão utilizados dois Arduinos e dois módulos de comunicação, sendo um módulo configurado como mestre para o envio do sinal, e outro como escravo, para a recepção do sinal. No entanto, as saídas analógicas do Arduino fornecem apenas sinais PWM (*Pulse Width Modulation*), Modulação por Largura de Pulso, e, assim, será necessário condicionar esse sinal para aplica-lo à entrada analógica do inversor de frequência, o que será realizado por meio de um circuito eletrônico. O valor médio da tensão aplicada à entrada analógica do inversor será, então, proporcional ao *duty cycle* (ciclo de trabalho) do PWM do sinal da saída analógica do Arduino ligado ao módulo escravo, o qual pode ser modificado por meio do potenciômetro conectado ao Arduino que opera juntamente com o módulo mestre. A velocidade do MIT será, então, regulada pelo valor da tensão aplicada à entrada analógica do inversor. A validação, realizada tanto com dados experimentais de medições em laboratório quanto com literatura técnica, demonstra a aplicabilidade do protótipo desenvolvido.

Palavras chave: Arduino, Comunicação *Bluetooth*, Inversor de frequência, Motor de indução.

ABSTRACT

Three phase induction motors (MITs) are the best components in automated companies, so their operational characteristics are often monitored and controlled. However, there is a constant search for technologies that are inexpensive and easy to access, which allows an increase of possibilities of data communication between devices, such as embedded systems. Therefore, this study aims to perform the analogue and speed control of an MIT using a frequency inverter, which will receive the control signal of an Arduino microcontroller. A potentiometer connected to the Arduino's analog input will produce the reference signal. The communication between the reference and control signals will be performed wirelessly, using Bluetooth technology, through Communication Shields, forming a master-slave network. For this purpose, two Arduino and two communication modules will be used, one module configured as master, for sending the signal, and another as a slave, for its reception. However, the Arduino's analog outputs only provide PWM signals, so it will be necessary to condition this signal to apply it to the analog input of the frequency inverter, which will be performed by an electronic circuit. The average value of the voltage applied to the analogue input of the inverter will then be proportional to the duty cycle of the PWM of the analogue output signal of the Arduino connected to the slave module, which can be modified by the potentiometer connected to the Arduino which operates in conjunction with the master module. The speed of the MIT will then be adjusted by the value of the voltage applied to the analog input of the inverter. The validation, performed both with experimental data from laboratory measurements and with technical literature, demonstrates the applicability of the developed prototype.

Keywords: Arduino, Bluetooth Communication, Frequency Inverter, Induction Motor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Motor de Indução Trifásico	20
Figura 2- Barramento do Inversor de Frequência.....	22
Figura 3- Blocos que compõem o inversor de frequência	23
Figura 4- (a) PWM de 60 Hz e 120V; (b) PWM de 30 Hz e 60V	24
Figura 5- Controle de velocidade abaixo e acima da nominal	25
Figura 6- Placa Arduino UNO.....	26
Figura 7- Sinal de PWM.....	27
Figura 8- Banda de passagem do filtro passa-baixas.....	28
Figura 9- Filtro em cascata para converter sinal de PWM em sinal DC	28
Figura 10- Scatternet formada de duas piconets.....	30
Figura 11- Pilha de Protocolos Bluetooth	31
Figura 12- Esquemático do sistema proposto.....	35
Figura 13- Potenciômetro analógico	36
Figura 14- Circuito utilizado para obter o sinal de referência.....	37
Figura 15- Módulo HC-05	38
Figura 16- Módulo HC-06.....	38
Figura 17- Ligação do módulo HC-05 para o pareamento.....	40
Figura 18- Ligação do módulo HC-06 para o pareamento.....	41
Figura 19- Pareamento entre os dois módulos Bluetooth.....	43
Figura 20- Circuito no modo mestre completo.....	44
Figura 21- Bits do registrador TCCR2A	46
Figura 22- Modo de operação do PWM	46
Figura 23- Configuração do fast PWM para o comparador OC2A.....	47
Figura 24- Configuração do fast PWM para o comparador OC2B	47
Figura 25- Prescaler atribuído ao sinal do PWM	47
Figura 26- Prescaler atribuído ao sinal do PWM	48
Figura 27- Filtro em cascata	49
Figura 28- Filtro em cascata no circuito em modo escravo.....	50
Figura 29- Pinagem do LM358	51
Figura 30- Amplificador operacional	52
Figura 31- Circuito completo com amplificação.....	53
Figura 32- Diagrama de comando CFW-11	54

Figura 33- Esquema de ligação do circuito de potência do CFW-11	55
Figura 34- Implementação prática do sistema	58
Figura 35- Aplicação de 0V no potenciômetro	60
Figura 36- Aplicação de 1,21V no potenciômetro	60
Figura 37- Aplicação de 2,47V no potenciômetro	61
Figura 38- Aplicação de 3,25V no potenciômetro	61
Figura 39- Aplicação de 4,93V no potenciômetro	62
Figura 40- Pareamento entre os módulos HC-05 e HC-06.....	63
Figura 41- Sinal digital recebido pelo HC-06 para 0V	64
Figura 42- Sinal digital recebido pelo HC-06 para 1,21V.....	64
Figura 43- Sinal digital recebido pelo HC-06 para 2,47V.....	65
Figura 44- Sinal digital recebido pelo HC-06 3,25V.....	65
Figura 45- Sinal digital recebido pelo HC-06 para 4,93V.....	66
Figura 46- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 0%	67
Figura 47- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 25%	67
Figura 48- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 50%	68
Figura 49- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 75%	68
Figura 50- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 100%	69
Figura 51- Sinal filtrado	70
Figura 52- Sinal amplificado	70
Figura 53- Aplicação do sinal de controle na entrada analógica do inversor de frequência	71
Figura 54- Testes realizados no sistema implementado	72
Figura 55- Gráfico de velocidade do MIT em função na tensão na entrada analógica do inversor	75
Figura 56- Gráfico obtido para o teste com o potenciômetro acoplado ao kit utilizado nos testes	75
Figura 57- (a) Zona morta inativa; (b) Zona morta ativa	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Revisão bibliométrica feita sobre o tema do trabalho	18
Tabela 2- Ligação do potenciômetro à placa Arduino	36
Tabela 3- Ligação do HC-05 à placa Arduino.....	43
Tabela 4- Ligação do amplificador operacional	51
Tabela 5- Parametrização do inversor de frequência.....	55
Tabela 6- Configuração dos parâmetros correspondentes aos dados de placa do motor	56
Tabela 7- Custo estimado do protótipo	57
Tabela 8- Dados coletados.....	73
Tabela 9- Testes realizados com o potenciômetro acoplado ao kit do inversor de frequência	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Considerações gerais	13
1.2 Justificativa	15
1.3 Objetivos geral e específicos	16
1.4 Estrutura do trabalho	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Revisão bibliométrica	18
2.2 Motor de Indução Trifásico	19
2.3 Controle de velocidade do Motor de Indução Trifásico	21
2.4 Plataforma Arduino	26
2.5 Filtragem do sinal de PWM	28
2.6 Comunicação sem fio	29
2.6.1 Módulos de comunicação Bluetooth	32
3 METODOLOGIA	34
3.1 O sistema proposto	34
3.1.1 Sinal de referência	36
3.1.2 Comunicação Bluetooth	38
3.1.2.1 Módulo HC-05	38
3.1.2.2 Módulo HC-06	40
3.1.2.3 Pareamento dos módulos de comunicação HC-05 e HC-06	41
3.1.3 Transmissão do sinal de referência	43
3.1.4 Recepção do sinal de referência	45
3.1.5 Geração do sinal analógico de controle	45
3.1.6 Condicionamento do sinal de controle	48

3.1.6.1 Filtragem do sinal	48
3.1.6.2 Amplificação do sinal	51
3.1.7 Parametrização do Inversor de frequência para receber o sinal de controle via entrada analógica	53
3.2 Custo estimado do protótipo.....	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1 Protótipo implementado	58
4.2 Sinal de referência após conversão A/D	59
4.3 Pareamentos dos módulos <i>Bluetooth</i>	62
4.4 Recebimento do sinal de referência	63
4.5 Geração do sinal de controle	66
4.6 Condicionamento do sinal de controle.....	69
4.6.1 Sinal filtrado	69
4.6.2 Sinal amplificado	70
4.7 Aplicação do sinal obtido para o controle da velocidade do motor de indução trifásico via entrada analógica do inversor de frequência	71
4.8 Coleta de dados experimentais	72
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
5.1 Sugestão para trabalhos futuros	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXO I.....	85
ANEXO II.....	86
ANEXO III.....	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Os motores de indução trifásicos (MITs) do tipo rotor gaiola de esquilo vêm se destacando cada vez mais no setor industrial, devido à sua confiabilidade, facilidade de manuseio, manutenção reduzida, robustez, boa relação custo-benefício e aplicabilidade no acionamento de diversos tipos de cargas mecânicas (SANTOS et al., 2016).

A importância desses motores nas plantas industriais automatizadas consiste em sua grande aplicação e consumo de energia. De acordo com dados da revista Aranda, os motores elétricos consomem aproximadamente 30% da energia gerada no Brasil. Dentre eles, os mais utilizados são os motores de indução, em torno de 90% (REIS, 2018).

No entanto, uma limitação desses motores é que eles possuem velocidade constante, a qual depende da frequência da rede de alimentação e do número de polos magnéticos da máquina (parâmetro construtivo). Como existem aplicações nas quais a variação na velocidade da carga acionada é necessária, como, por exemplo, esteiras transportadoras, elevadores, ventiladores, bombas e bobinadeiras, técnicas de controle de velocidade devem ser empregadas (JUNIOR, 2013).

Com o advento da eletrônica de potência, uma técnica eficaz amplamente utilizada para realizar o controle da velocidade dos MITs é o acionamento da máquina por meio dos conversores de frequência. Esses equipamentos fazem o ajuste da frequência e da tensão aplicada nos terminais do motor por meio de técnicas de PWM (*Pulse Width Modulation*), Modulação por Largura de Pulso. Nos conversores, a frequência da tensão da rede de alimentação pode ser alterada de acordo com o chaveamento dos tiristores, que serão responsáveis por permitir ou impedir a passagem de corrente elétrica. Dessa forma, será obtido um trem de pulsos com largura variável, cujo nível de tensão eficaz na saída será proporcional ao tempo de condução ou corte. A frequência da tensão será definida de acordo com a velocidade em que ocorre a mudança na polaridade dos pulsos de tensão (CHAPMAN, 2013).

No setor industrial, o avanço da tecnologia impulsionou a quarta revolução industrial (Indústria 4.0) e a necessidade de otimizar os processos para modernizar as aplicações, buscando rapidez, eficiência e criatividade. A indústria 4.0 visa à inovação, para atender ao mercado competitivo, extraindo ao máximo o que as tecnologias têm a oferecer e priorizando o custo-benefício (DO VAL, 2016; MAGNUS, 2018).

Neste contexto, nas fábricas inteligentes (*Smart factories*), com o aparecimento da internet das coisas industrial (*Industrial Internet of Thing*, IIoT), as tecnologias sem fio estão levando a produtividade e a eficiência a novos níveis. A fabricação está se tornando mais inteligente, flexível e dinâmica. Como resultado, a conectividade sem fio está se tornando ainda mais comercial e de missão crítica (ROHDE & SCHWARZ, 2018).

A comunicação sem fio na transmissão de informações entre dispositivos é uma técnica largamente empregada tanto em ambiente industrial, como na otimização de tarefas simples. Diversas tecnologias foram desenvolvidas, e uma das mais populares é a comunicação *Bluetooth*, que utiliza tecnologia de rádio e vem sendo melhorada ao longo dos anos. Versões de última geração já possuem alcance de até 300 metros de distância. Além disso, o *Bluetooth* se destaca pelo seu baixo consumo de energia (ESTES, 2018; BRANQUINHO et al., 2005).

Quando se trata de inovação no setor industrial, a utilização dos sistemas embarcados também vem se destacando. Esses componentes possuem um *hardware* (eletrônica) e *software* (instruções) incorporados em um único dispositivo desenvolvido para executar tarefas predeterminadas, e ainda, é reduzido em tamanho, necessita de poucos recursos computacionais e possui baixo custo.

Nesse âmbito, uma ferramenta bastante empregada é a plataforma Arduino (PEIXOTO et al., 2012). Tal tecnologia é versátil, possui facilidade de programação e possibilita o controle de sistemas interativos. Esses dispositivos vêm sendo cada vez mais utilizados no setor industrial para automatizar os processos e inovar técnicas de custo elevado, cujos controladores tradicionalmente utilizados são os CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) (ARAUJO e BRAGA, 2017).

Dessa forma, uma possibilidade é utilizar comunicação sem fio trabalhando em conjunto com os sistemas embarcados. A plataforma Arduino possui pinos que permitem a conexão com *Shields* de comunicação, podendo aplicar o padrão *Bluetooth* para integrar projetos de automação e eletrônica (PORTANTI e FRESSATTI, 2015; SIQUEIRA, 2006).

Dessa maneira, busca-se interligar esses conceitos para implementar o controle de velocidade de motores de indução acionados por inversores de frequência. No qual, o sistema embarcado compõe o circuito de controle, sendo esse formado por dois Arduinos e dois *Shields* de comunicação *Bluetooth*, constituindo uma rede mestre-escravo. Tal circuito terá a função de gerar e transmitir o sinal de referência, a partir do qual um sinal de controle será obtido e aplicado na entrada analógica do inversor de frequência, controlando, assim, a velocidade do motor de forma remota e por meio de comunicação sem fio.

1.2 Justificativa

Com advento da indústria 4.0, se torna cada vez mais necessário inserir técnicas modernas em aplicações indispensáveis na indústria, como o controle de velocidade de motores de indução, para inovar de maneira competente e acompanhar o crescimento do mercado econômico.

A aplicação de sistemas embarcados no meio industrial tem causado um desenvolvimento tecnológico considerável nesse setor (RODRIGUES et al., 2013). A junção de áreas multidisciplinares de estudo possibilita a otimização dos processos, diminuindo custos, facilitando a comunicação entre dispositivos e pessoas, além da interligação de diferentes métodos, por meio de tecnologias eficientes, proporcionando a renovação do ambiente de manufatura (PILON, 2009; WIKIEAM, 2018).

Devido à ascensão do interesse em realizar estudos para possibilitar a aplicação das tecnologias de redes de comunicação sem fio, cresce a possibilidade da sua implementação no ambiente industrial (AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2017).

É com base no exposto que se encontra a motivação para o presente trabalho, o qual busca permitir o controle remoto de motores de indução trifásicos, que são as máquinas mais utilizadas nos acionamentos eletromecânicos industriais, por meio de comunicação sem fio, utilizando sistema embarcado e módulos de comunicação.

A utilização da comunicação sem fio no controle de velocidade de motores de indução ainda é um assunto pouco abordado, e observa-se que há trabalhos insuficientes nesse âmbito (GOOGLE ACADÊMICO, 2018). Portanto, o presente trabalho proporciona uma inovação nessas áreas do conhecimento, além de possibilitar a resolução da problemática, que é a necessidade de estar próximo a máquina de indução ao realizar o controle de velocidade do equipamento.

A implementação do sistema proposto visa o avanço tecnológico possibilitado pela interligação de técnicas presentes em diferentes áreas do estudo, e a busca pelo custo-benefício ao utilizar componentes eficientes e de baixo custo. Dessa forma, a relevância do presente trabalho consiste na inserção de técnicas modernas para otimizar aplicações fundamentais no setor industrial.

1.3 Objetivos geral e específicos

O objetivo geral desta monografia é o desenvolvimento de um protótipo de um sistema embarcado, composto por um circuito utilizando a plataforma Arduino para realizar o controle da velocidade de um motor de indução acionado por um inversor de frequência. A comunicação entre o sinal de controle e o dispositivo de acionamento é realizada sem fio, via tecnologia *Bluetooth*.

Para consolidar o objetivo geral, alguns objetivos específicos devem ser alcançados. São eles:

- Comunicação sem fio entre os dados utilizados pelos Arduinos, por meio de *Shields* de comunicação *Bluetooth*, formando uma rede mestre-escravo;
- Ligação de um potenciômetro à entrada analógica do Arduino ligado ao módulo mestre para gerar o sinal analógico de referência;
- Envio do sinal de referência ao Arduino ligado ao módulo escravo;
- Geração de sinal analógico de controle variável na saída do Arduino escravo proporcional ao sinal de referência;
- Construção de um circuito eletrônico para filtrar e amplificar o sinal obtido na saída do Arduino escravo, sinal analógico PWM, para transformá-lo em um sinal contínuo de 0 a 10Vcc;
- Implementação do sistema embarcado em *proto-board* para permitir a aplicação do sinal obtido, após a etapa de amplificação, na entrada analógica do inversor de frequência.
- Aplicação do sinal contínuo variável na entrada analógica do inversor de frequência para o controle de velocidade do motor de indução.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, sendo este o primeiro capítulo. O segundo capítulo descreve a revisão bibliográfica que trata dos princípios teóricos que servem de base para o desenvolvimento das partes associadas à construção do protótipo proposto, como obtenção do sinal de controle e estabelecimento da comunicação sem fio. O terceiro capítulo apresenta os componentes utilizados no projeto, a metodologia utilizada na sua construção, a forma como foi realizada a integração das partes do sistema, além dos respectivos esquemáticos de montagem. O quarto capítulo expõe os resultados obtidos com os

testes realizados, o funcionamento do sistema proposto e as discussões pertinentes. E, por fim, no capítulo cinco são feitas as considerações finais sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliométrica sobre o tema abordado e o referencial teórico que fundamenta a construção do protótipo. São abordadas as principais características dos motores de indução trifásicos, bem como as técnicas de controle de velocidade. Também são indicadas as principais características dos microcontroladores e sistemas embarcados, com destaque na placa de desenvolvimento Arduino. Por fim, é discorrido sobre a comunicação *Bluetooth* e seus respectivos módulos de comunicação.

2.1 Revisão bibliométrica

Primeiramente, para analisar a produção científica na área de estudo deste trabalho, foi realizada uma revisão bibliométrica, que consiste em uma análise quantitativa de trabalhos publicados de acordo com o tema abordado. Tal revisão foi realizada no Google Acadêmico e foram pesquisados artigos e monografias, em português e inglês (GOOGLE ACADÊMICO, 2018).

A busca foi realizada inicialmente com temas mais amplos, sendo afinada para, no fim, possuir termos mais próximos ao tema abordado. Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Os resultados encontrados para a pesquisa são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Revisão bibliométrica feita sobre o tema do trabalho

Tema de estudo	Resultados em português	Resultados em inglês
Controle de velocidade de motores de indução	537	6910
Controle de velocidade de motores de indução utilizando sistema embarcado	19	150
Controle de velocidade de motores de indução utilizando sistema embarcado e comunicação sem fio	3	4

Fonte: Acervo da Autora (2018).

Dessa forma, por meio da pesquisa realizada, é possível observar que existem poucos trabalhos desenvolvidos na aplicação dos sistemas embarcados e da comunicação sem fio para

o controle de velocidade das máquinas de indução (GOOGLE ACADÊMICO, 2018). Também é importante ressaltar que não foi encontrado nenhum trabalho com os mesmos objetivos e resultado final do presente trabalho. Os trabalhos encontrados são variantes do presente trabalho que utilizam as tecnologias similares abordadas para diferentes finalidades.

2.2 Motor de Indução Trifásico

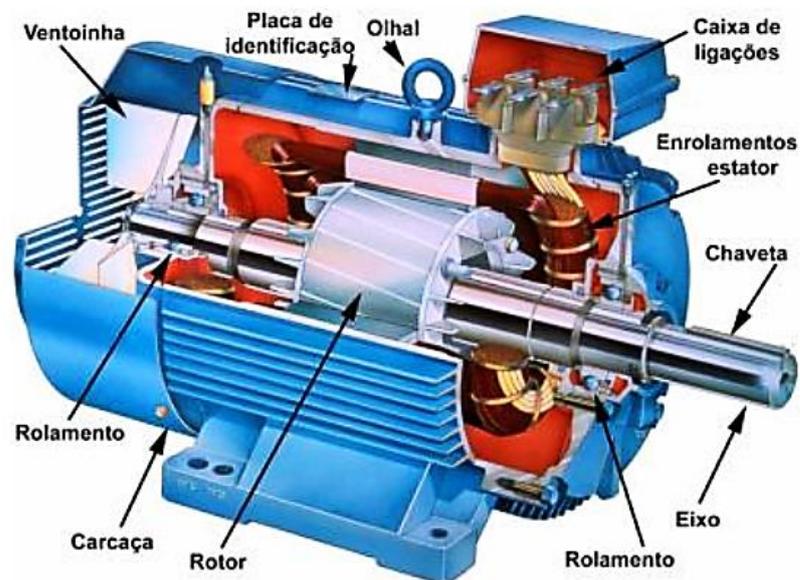
Motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução é o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina as vantagens como baixo custo, comando e construção simples, além de grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos (WEG, 2016).

Os motores de indução podem ser divididos, de acordo com sua forma construtiva, em rotor bobinado e rotor gaiola de esquilo. Nos motores de indução de rotor bobinado, as terminações dos enrolamentos são conectadas aos anéis coletores no eixo do rotor e por meio de escovas de carvão, esses terminais se tornam acessíveis externamente na caixa de ligação do motor. Dessa forma, é possível variar as características de conjugado \times velocidade do motor inserindo resistências externas ao circuito do rotor. No entanto, esses motores exigem maior manutenção devido ao desgaste associado as suas escovas e anéis coletores e, além disso, possuem maior custo, como resultado raramente são utilizados (CHAPMAN, 2013).

O enrolamento do rotor gaiola é constituído por barras de material condutor curto-circuitadas nas extremidades e que são encaixadas nas ranhuras do núcleo ferromagnético, por isso, não é possível acessar o seu circuito interno ou alterar o valor da sua resistência de rotor (CHAPMAN, 2013). No entanto, como não possui conjunto de anéis e escovas, é um motor mais barato, robusto e que exige menor manutenção.

As partes componentes do motor podem ser observadas na Figura 1 a seguir. A máquina se divide em duas partes principais, que são o rotor (parte girante do motor) e estator ou carcaça (parte fixa). Os enrolamentos do estator do motor indução são distribuídos ao longo da circunferência de entreferro formando um defasamento de 120° elétricos entre si e são alimentados com tensões trifásicas equilibradas com defasamento de 120° . Dessa forma, é criada uma onda de FFM (Força Magnetomotriz) resultante, campo magnético girante, cuja velocidade depende da frequência da alimentação e do número de polos magnéticos da máquina. A essa velocidade é dado o nome de velocidade síncrona (n_s). A velocidade síncrona pode ser calculada conforme a equação (1) (FITZGERALD et al., 2006).

Figura 1- Motor de Indução Trifásico



Fonte: FRANCHI (2009).

$$n_s = \frac{60 \times f}{p} \quad (1)$$

em que:

n_s é a velocidade síncrona da máquina em *rpm*;

f é a frequência elétrica em *Hz*;

p é o número de par de pólos da máquina.

Dessa forma, será induzida corrente nos enrolamentos do rotor, por efeito da indução eletromagnética, produzindo torque e fazendo com que seu eixo entre em movimento. Porém, o eixo do motor não consegue acompanhar a velocidade do campo magnético do estator, girando com uma velocidade inferior a mesma. Essa diferença de velocidade é denominada escorregamento (CHAPMAN, 2013. FITZGERALD et al., 2006).

A velocidade mecânica do rotor pode, então, ser calculada pela equação (2)

$$n = (1 - s)n_s \quad (2)$$

em que:

s é o escorregamento;

n é a velocidade mecânica do rotor, em *rpm*;

2.3 Controle de velocidade do Motor de Indução Trifásico

Em diversas aplicações, é necessário realizar o controle da velocidade de giro do motor para adequá-la às necessidades da carga acionada. O controle da velocidade da máquina de indução com rotor gaiola, conforme equação (1), pode ser realizado pela modificação da frequência da tensão de alimentação aplicada ao seu enrolamento de estator ou pela modificação do número de polos magnéticos, parâmetro que é alterado pela forma construtiva.

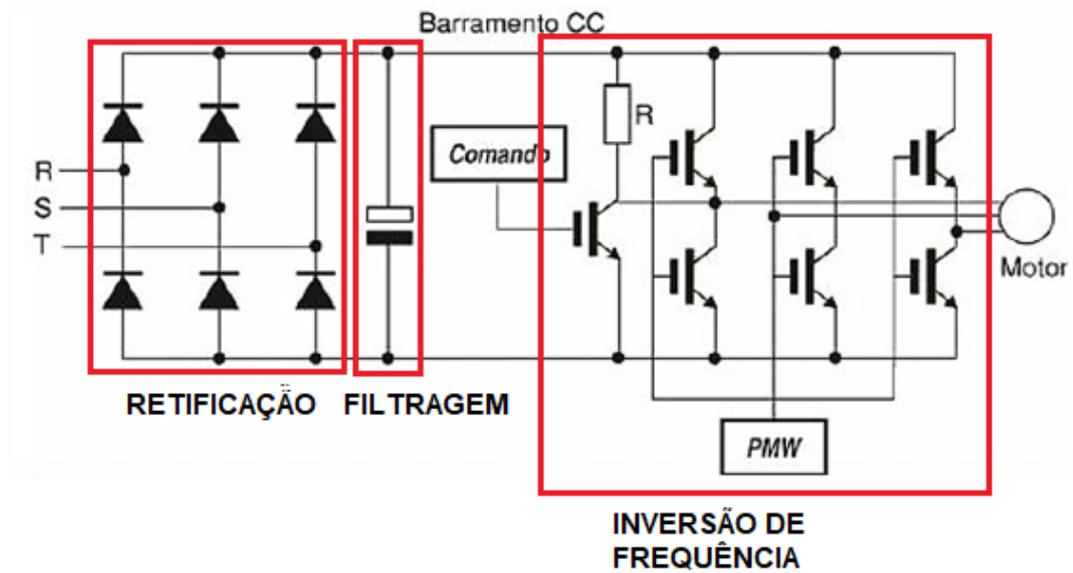
Atualmente, a técnica mais empregada para realizar o controle da velocidade do motor de indução gaiola é o acionamento de estado sólido por meio do inversor de frequência. O inversor pode modificar a forma de onda da tensão da rede, modificando o valor eficaz e a frequência da tensão de alimentação do motor de indução (FITZGERALD et al., 2006).

O diagrama de blocos das partes constituintes do inversor de frequência é apresentado na Figura 2.

As etapas realizadas pelos componentes do diagrama apresentado na Figura 2 são (GUEDES, 2015. AHMED, 2000):

- Retificação: A tensão senoidal é retificada por ponte de diodos em onda completa, fornecendo apenas semi-ciclos positivos na saída, cuja frequência da ondulação é o dobro da frequência da tensão de entrada;
- Filtragem: Faz a redução da ondulação (*ripple*) da tensão retificada, transformando-a em tensão contínua;
- Inversão com transistores IGBT (*Insulated Gate Bipolar*), Transistor Bipolar de Porta Isolada: São geradores de trens de pulsos, cujo controle é realizado por meio de sinais de PWM (*Pulse Width Modulation*), Modulação por Largura de Pulso, os quais determinarão o valor eficaz e a frequência da tensão aplicada no motor.

Figura 2- Barramento do Inversor de Frequência

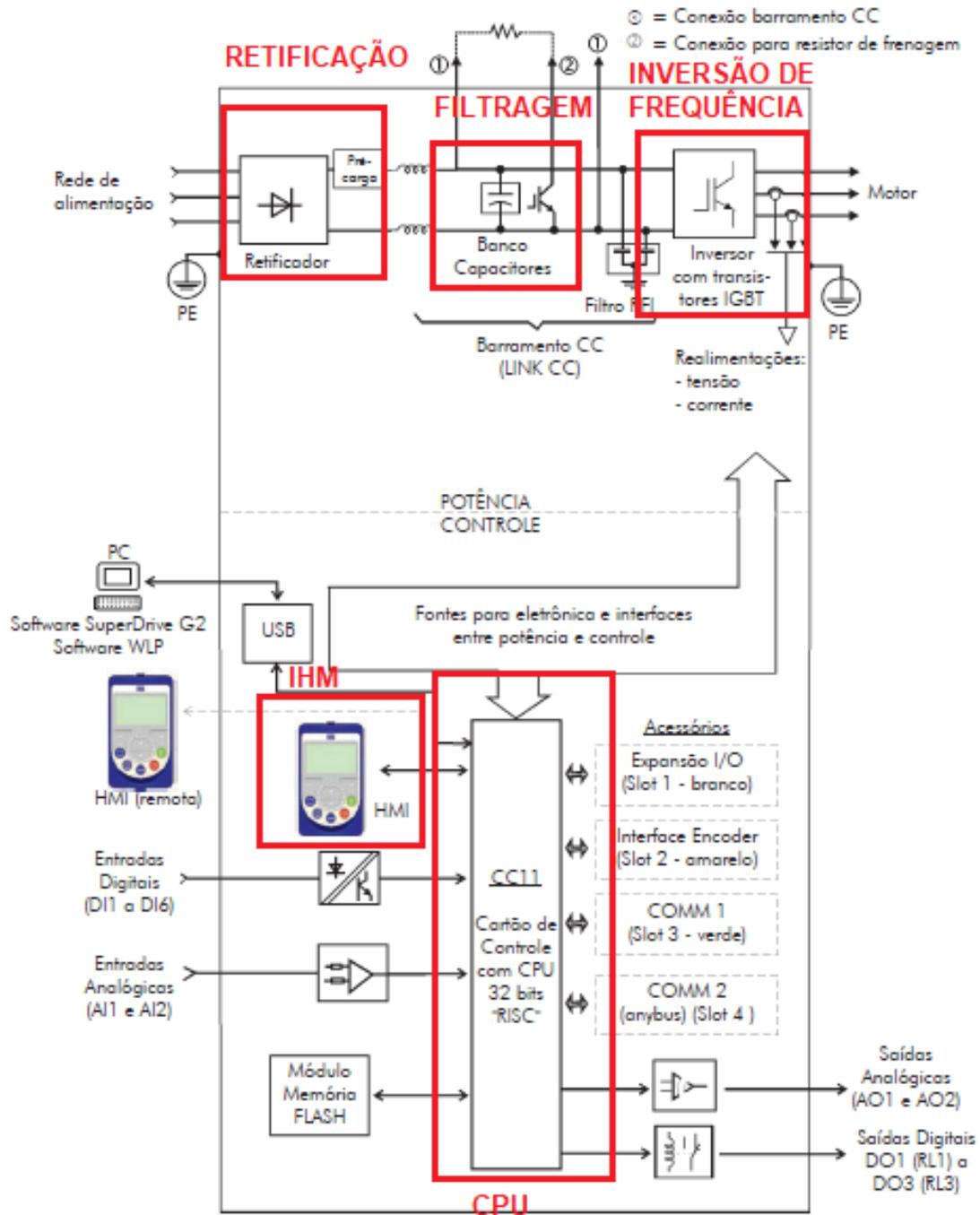


Fonte: Adaptado de FRANCHI (2008).

Além disso, o inversor de frequência possui uma CPU (Unidade Central de Processamento), responsável pelo controle das etapas citadas acima, e possibilita ao usuário monitorar as características de funcionamento do motor por meio da IHM (Interface Homem-Máquina) (FRANCHI, 2008).

Os blocos destacados podem ser observados no diagrama de blocos do inversor de frequência modelo CFW11 da WEG, apresentado na Figura 3.

Figura 3- Blocos que compõem o inversor de frequência



Fonte: Adaptada de WEG (2008).

Na entrada do inversor é aplicada a tensão da rede de alimentação com 60 Hz, e na saída do inversor é obtida uma tensão com nível eficaz e frequência diferentes, um sinal com modulação por largura de pulsos (PWM), como pode ser visto na Figura 4. A frequência do

sinal de saída depende da velocidade com que o sinal troca de polaridade e a amplitude depende do tempo de condução dos tiristores, ou ciclo de trabalho (*duty cycle*).

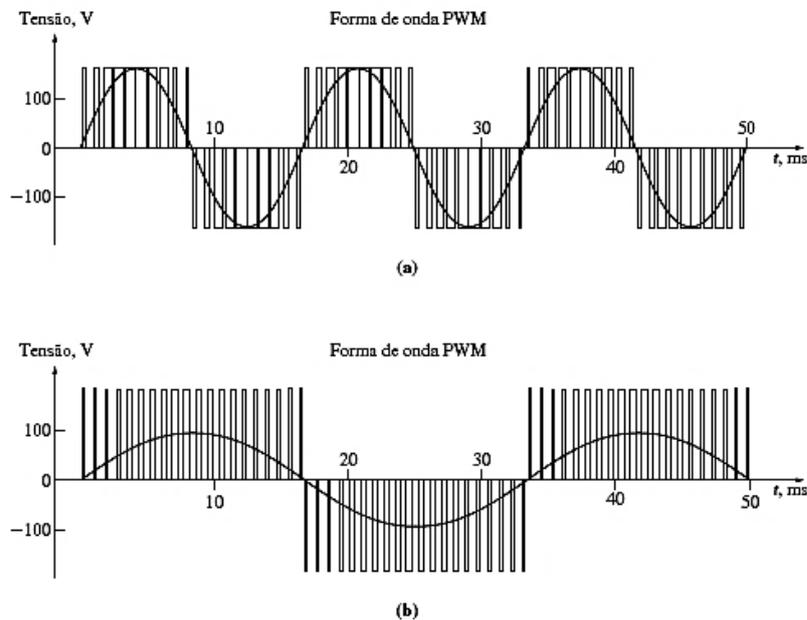
O fluxo magnético (ϕ) produzido pelo enrolamento de estator é calculado como apresentado na equação (3) (CHAPMAN, 2013):

$$\phi = \frac{V}{4,44 \times f \times N} \quad (3)$$

na qual:

- ϕ é o fluxo magnético em *Wb*;
- f é a frequência elétrica em *Hz*;
- N é o número de polos magnéticos da máquina;
- V é a velocidade da máquina em *rpm*;

Figura 4- (a) PWM de 60 Hz e 120V; (b) PWM de 30 Hz e 60V



Fonte: CHAPMAN, 2013.

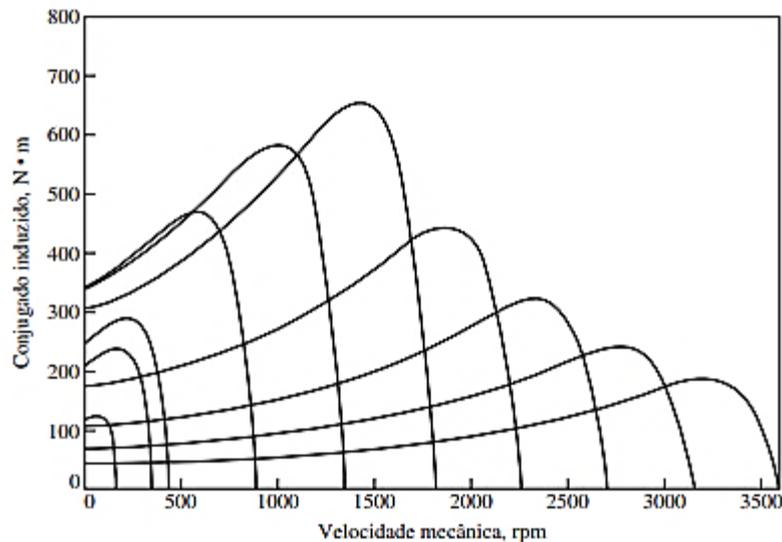
Se a frequência aplicada ao motor de indução trifásico muda, sua velocidade síncrona também se altera, proporcionalmente, como mostra a equação (1). Ao realizar o controle de velocidades do motor abaixo da nominal, a tensão e a frequência aplicadas se modificam linearmente, $V/f = constante$, para manter o fluxo magnético constante e evitar que a

máquina opere saturada, como mostra a equação (3), o que faria que correntes de magnetização excessivas circulassem no motor.

Já no controle de velocidades do motor acima da nominal, a tensão é limitada ao valor nominal, para proteger a isolação do enrolamento, enquanto a frequência aumenta. Dessa forma, o fluxo magnético diminui, assim como o torque.

As características de conjugado \times velocidade para o motor de indução operando acionado por inversor de frequência podem ser observadas na Figura 5, a qual apresenta o controle de velocidades abaixo da velocidade síncrona (neste caso 1800 rpm), com fluxo magnético constante, e acima desta, com enfraquecimento de campo.

Figura 5- Controle de velocidade abaixo e acima da nominal



Fonte: CHAPMAN (2013).

O inversor possui, ainda, proteção elétrica para o motor com o qual está trabalhando. Ele proporciona proteção contra curto-circuito, sobrecarga, fuga à terra, falta de fase, queda de tensão da rede de alimentação, inversão de sequência de fase, entre outras. Além disso há um sistema de controle interno para manter as características de operação da máquina, como temperatura e velocidade, dentro dos valores aceitáveis, impedindo que fosse ultrapassado seus limites operacionais (PAIXÃO, 2009).

Dentre as principais aplicações da utilização do inversor de frequência no acionamento e controle de velocidade de motores de indução, destacam-se: bombas centrífugas, ventiladores, exaustores, misturadores, esteiras transportadoras, mesas de rolos, secadores, máquinas rotativas, máquinas de solda e multimotores (WEG, 2014).

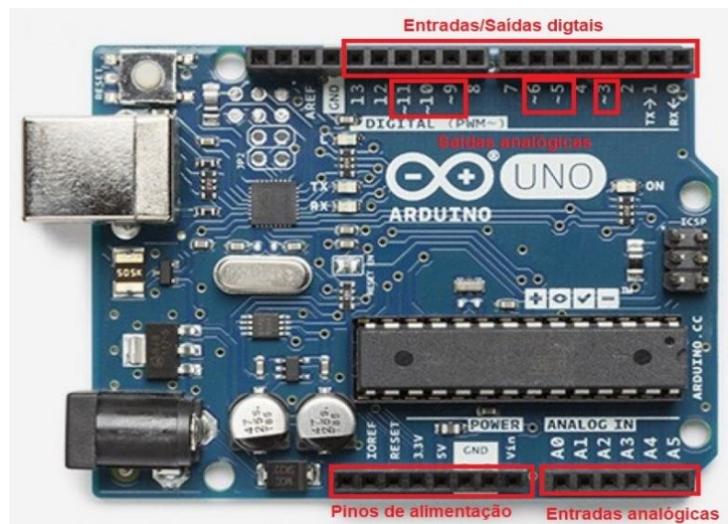
2.4 Plataforma Arduino

O Arduino consiste, essencialmente, em uma placa eletrônica com um microcontrolador programável. Esta placa possui pinos de entrada e saída digitais e analógicos, permitindo ao usuário realizar múltiplas tarefas de forma simultânea, de acordo com a programação feita no IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado ou *Integrated Development Environment*, em inglês). A programação, baseada em linguagem C e C++ é então carregada na placa Arduino, permitindo que os sistemas acoplados à mesma executem as tarefas programadas.

Por meio das suas entradas e saídas é possível realizar conexões com outros dispositivos, que podem ser sensores, atuadores, displays, componentes de sinalização, botões, *shields*, ou qualquer outro componente inteligente. Além disso, o microcontrolador pode ser programado diretamente pela porta USB, sem necessitar de um gravador externo (BLUM, 2016).

Um modelo que vem se destacando é a placa Arduino UNO devido a características como custo-benefício e desempenho, ambiente de fácil utilização e simples programação. A placa Arduino UNO possui 14 pinos de entrada e saída digital, 6 pinos de entradas analógicas e 6 pinos de saídas analógicas. Ela também possui entrada USB para conexão com um computador, não necessitando de fonte de alimentação externa quando ligada ao mesmo (MCROBERTS, 2011). A placa pode ser observada na Figura 6.

Figura 6- Placa Arduino UNO



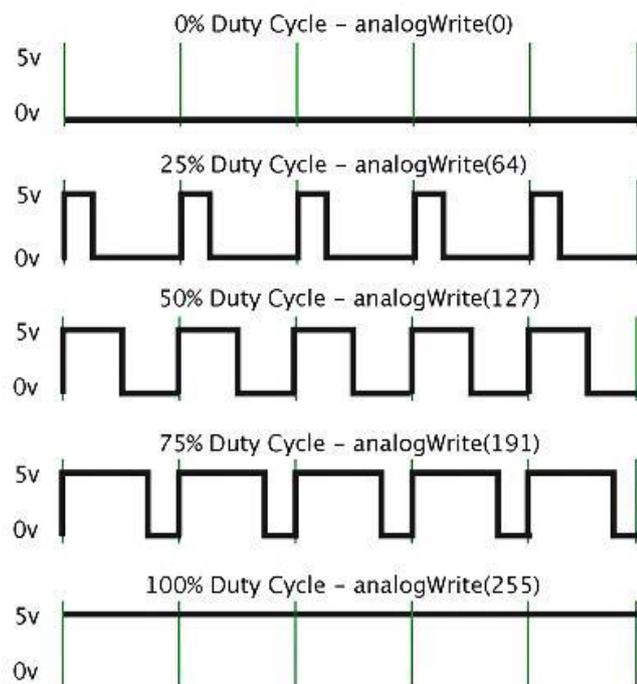
Fonte: Adaptada de ARDUINO.CC (2018).

Analisando a Figura 6, é possível observar os pinos de entrada e saída do Arduino, todos numerados. Os pinos de 0 a 13 podem funcionar como saídas ou entradas digitais, já os pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11 têm a possibilidade de serem programados para trabalhar como saídas analógicas, e os pinos A0, A1, A2, A3, A4 e A5 são entradas analógicas.

As entradas e saídas digitais recebem ou enviam apenas sinais de nível alto ou baixo, ou seja, 0V ou 5V, porém os pinos 0 e 1 do Arduino também são as portas RX e TX, utilizadas para realizar comunicação serial de recepção e transmissão de dados do software para a placa do microcontrolador (PEIXOTO et al., 2012, BLUM, 2016). Dessa forma, não é viável utilizar esses pinos como entradas e saídas digitais, sendo melhor optar pelo uso dos demais pinos.

Já as entradas analógicas, podem receber sinais com amplitude variável de 0 a 5V. Da mesma forma, as saídas analógicas enviam sinais variáveis de 0 a 5V, os quais são enviados na forma de PWM e podem ser observados na Figura 7, a qual é um sinal analógico, emitido na forma de pulsos digitais, com largura de pulso variável (PEIXOTO et al., 2012).

Figura 7- Sinal de PWM



Fonte: ARDUINO.CC (2018).

O sinal de PWM do Arduino trabalha na frequência de aproximadamente 500 Hz. O *duty cycle* do sinal pode ser controlado por meio do *software*. Assim, esse sinal de saída pode ser utilizado em aplicações nas quais deseja-se obter uma tensão variável na saída, como por

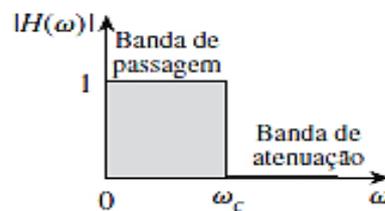
exemplo, no controle da intensidade da luz de uma lâmpada de LED, em que quanto maior o tempo de condução do sinal, maior será a luminosidade do LED (ARDUINO.CC, 2018).

Dessa forma, o sinal de PWM extraído na saída analógica do Arduino pode ser utilizado em diversas aplicações.

2.5 Filtragem do sinal de PWM

Para realizar a conversão do sinal PWM em tensão contínua, pode-se utilizar um filtro passivo passa-baixas, que é um circuito elétrico composto por resistor e capacitor, no qual a tensão de saída é obtida a partir do capacitor. O filtro passa-baixas deixa passar as frequências baixas e rejeita frequências acima da frequência de corte. A banda de passagem de um filtro passa-baixas ideal é apresentada na Figura 8.

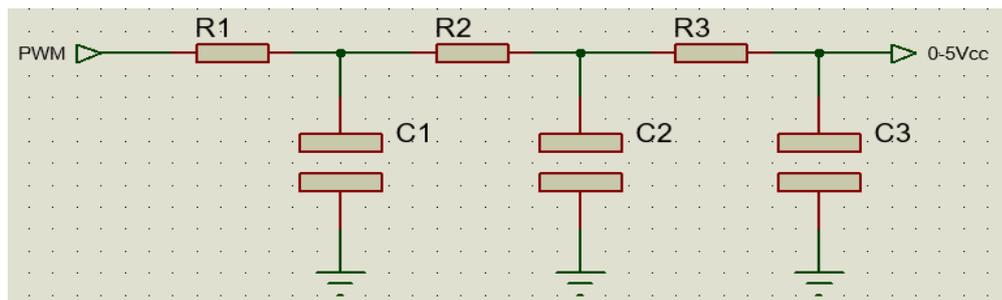
Figura 8- Banda de passagem do filtro passa-baixas



Fonte: ALEXANDER, SADIKU (2013).

Como o PWM é uma onda quadrada com largura de pulso variável, quanto maior a frequência do sinal, melhor é a atenuação realizada pelo filtro. E, para melhorar ainda mais a qualidade do sinal contínuo obtido na saída do circuito, pode ser implementado um filtro passa-baixas em cascata, no qual a atenuação é triplicada (FRITZENLAB, 2016). O esboço do filtro é apresentado na Figura 9.

Figura 9- Filtro em cascata para converter sinal de PWM em sinal DC



Fonte: Acervo da Autora (2018).

A função de transferência do filtro é obtida ao relacionar a tensão na saída do circuito com a tensão de entrada, de acordo com a equação (4) (ALEXANDER, SADIKU, 2013).

$$H(\omega) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (4)$$

Já a frequência de corte, conhecida como ω_c é obtida ajustando-se a amplitude da função de transferência para $\frac{1}{\sqrt{2}}$, como mostra a equação (5) (ALEXANDER, SADIKU, 2013).

$$H(\omega_c) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \omega_c^2 R^2 C^2)}} \quad (5)$$

em que:

- V_0 é a tensão de entrada em V ;
- V_i é a tensão de saída em V ;
- ω é a frequência de operação do filtro em rad/s ;
- ω_c é a frequência de corte do filtro em rad/s ;
- R é a resistência do resistor em Ω ;
- C é a capacitância do capacitor em F .

2.6 Comunicação sem fio

Há um crescente interesse em trabalhar com tecnologias de comunicação a distância, que permitam enviar dados por conexão sem fio, de acordo com determinadas configurações de transmissão, que podem ser topologia em ponto a ponto, barramento, anel, estrela, garfo, mista ou árvore.

É possível empregar a comunicação sem fio aliada a componentes de baixo custo, como os microcontroladores, em conjunto com elementos inteligentes como sensores, para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento remoto, controle e armazenamento de dados (ROCHA et al., 2014; TEIXEIRA, 2005).

Uma tecnologia que permite a transmissão de dados entre dispositivos sem fio é o *Bluetooth*, que é um padrão global conhecido por IEEE 801.15.1, de baixo custo e que possibilita a construção de redes pessoais e sem fio WPANs (*Wireless Personal Area Networks*). A transmissão de dados é feita por meio de radiofrequência, na

faixa *ISM (Industrial, Scientific, Medical)*, que opera à frequência de 2,45 GHz, sendo utilizada em vários países, com variações que vão de 2,4 GHz a 2,5 GHz (SIQUEIRA, 2006; SILVA, 2009). O envio de sinais depende da distância entre os dispositivos, ou seja, quanto mais próximos, mais eficiente é o envio do sinal, sendo que, os mesmos devem estar dentro do limite de proximidade, o qual é definido de acordo com a classe de alcance máximo do *Bluetooth*, que pode ser (INFOWESTER, 2018):

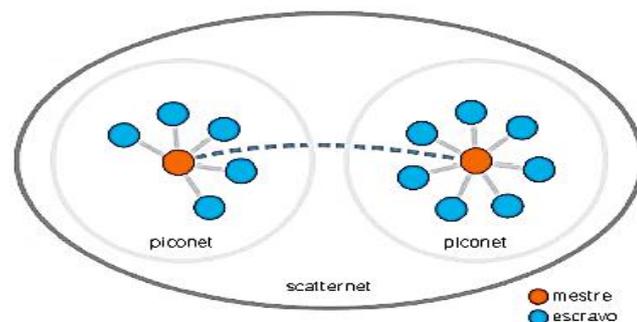
- Classe 1: Potência máxima de 100 mW e alcance de até 100 metros.
- Classe 2: Potência máxima de 2,5 mW e alcance de até 10 metros.
- Classe 3: Potência máxima de 1 mW e alcance de 1 metro.

Essa tecnologia trabalha com transmissão FHSS, que significa, Espalhamento Espectral por saltos em Frequência. Ou seja, os dados são convertidos em códigos binários e transmitidos como sinais de rádio, cuja velocidade de transmissão depende da versão da tecnologia *Bluetooth*. Na versão 1.2 o sinal é enviado com velocidade média de 1Mbps. Já na versão 2.0, a taxa de transmissão é aproximadamente 2Mbps. Na versão 5.0, que é a mais recente, são alcançadas velocidades de transmissão de até 50Mbps (SILVA, 2009; INFOWESTER, 2018).

A comunicação *Bluetooth* trabalha em modo mestre/escravo. No qual o dispositivo trabalha em modo mestre ao realizar o envio de dados e em modo escravo ao receber dados. Uma vez pareados, esses dispositivos se conectam automaticamente quando estiverem dentro da distância de abrangência, de acordo com sua classe de alcance (STEFANUTO et al., 2016).

Também é possível formar redes de transmissão de dados, que são denominadas *piconets*, podendo conter até oito dispositivos, sendo um dispositivo mestre e os demais escravos. É possível, ainda, estabelecer conexão entre mais de uma *piconet*, formando uma *scatternet*, conforme apresenta a Figura 10 (STEFANUTO et al., 2016; SILVA, 2009).

Figura 10- *Scatternet* formada de duas *piconets*



Fonte: SIQUEIRA (2006).

A arquitetura *Bluetooth* é composta por *software* e *hardware* combinados. O *software* é constituído por uma pilha de protocolos, como pode ser observado na Figura 11, divididos em três grupos (STEFANUTO et al., 2016; SILVA, 2009):

- Protocolos de Transporte: São responsáveis por realizar a localização de outros dispositivos;
- Protocolos de *middleware*: Incluem protocolos já padronizados para permitir comunicação por meio de aplicações (comunicação e transferência de dados entre dispositivos) já existentes;
- Grupo de Aplicações: São as próprias aplicações que utilizam os *links Bluetooth*

Os Protocolos de Transporte estão subdivididos nas camadas (STEFANUTO et al., 2016; SILVA, 2009):

- Radio: Responsável por definir a frequência de operação e técnicas de transmissão utilizadas;
- *Baseband*: Responsável por localizar dispositivos na rede e estabelecer conexão;
- LMP: Camada na qual é feito o processo de autenticação e criptografia de dados, além da realização de outras operações de controle de conexão, segurança e fornecimento de informações de operação;
- HCI: Camada encarregada de fornecer uma interface de controle e receber notificações dos eventos ocorridos no processo de transmissão;
- L2CAP: Protocolo da camada de enlace. É uma interface entre os protocolos de transporte. Também é responsável pelo ajuste dos dados transmitidos.

Figura 11- Pilha de Protocolos *Bluetooth*



Fonte: SILVA, 2009.

Já o *hardware* dos dispositivos *Bluetooth* é implementado por componentes responsáveis pelo processamento do sinal, e todos os dispositivos que possuem a especificação *Bluetooth* devem possuí-los, são eles (SIQUEIRA, 2006):

- *Host Controller*: Responsável pelo processamento do código de alto nível;
- *Link Control Processor*: Microprocessador responsável pelo processamento das camadas mais baixas da pilha de protocolos;
- *Baseband Controller*: Bloco lógico responsável pelo controle do *transceiver* de radiofrequência;
- *Transceiver RF*: Dispositivo que combina transmissão e recepção em um mesmo componente;
- *RF Front-End*: Responsável pela troca de estados emissor e receptor;
- Antena: Componente externo ou interno que transmite ou recebe ondas eletromagnéticas.

Dessa forma, a comunicação entre dois dispositivos ocorre quando um dispositivo no modo mestre busca outro dispositivo, e tenta conectar-se. O outro dispositivo recebe essa solicitação, e ao aceitar a conexão, entra em modo escravo e a pareamento é efetuado, possibilitando a transmissão de dados (SIQUEIRA, 2006).

2.6.1 Módulos de comunicação Bluetooth

Existem alguns módulos (*Shields*) de comunicação *Bluetooth* que permitem a conexão com microcontroladores. Dois modelos amplamente utilizados em projetos eletrônicos são o HC-06, o qual trabalha somente em modo escravo no recebimento de sinais, e o HC-05, que pode ser configurado para trabalhar tanto em modo mestre como escravo.

O HC-05 é um módulo *Bluetooth* SPP (protocolo de porta serial), que trabalha na versão 2.0+EDR (taxa de dados aprimorada), com modulação de 3Mbps, frequência de 2,4 GHz. Esse componente possui transceptor de rádio, ou seja, ele atua tanto na transmissão quanto no recebimento de dados, e *baseband* (antena), para controlar a frequência dos sinais emitidos. O módulo é projetado para estabelecer comunicação serial, sem fio, com outros dispositivos, e possui *chip* externo com tecnologia CMOS e AFH (característica de frequência adaptável) (ITEAD STUDIO, 2010).

Para configurar o módulo HC-05, o mesmo deve ser ligado ao Arduino por meio de comunicação serial com o microcontrolador. O módulo trabalha com uma tensão de alimentação de 3,3V no pino RX, e possui um alcance de envio e recebimento de informações

de até 10 metros, curto alcance, além de suportar diferentes taxas de transmissão de dados (*baud rate*) (ARAÚJO E SANTANA, 2015).

Já o módulo HC-06 possui versão LV_BC_2.0 trabalha nas mesmas características de frequência e velocidade de transmissão que o HC-05, porém, não possui o transceptor de rádio, trabalhando apenas no recebimento de sinais. Ele trabalha com tensão de alimentação de 3,3V no pino RX, da mesma forma que o módulo HC-05 (GUANGZHOU HC,2011).

Para realizar o pareamento do módulo *Bluetooth* com outros dispositivos, inicialmente, é necessário enviar uma série de comandos ao módulo, denominados conjunto de comandos AT (*AT Command Set*), que é uma sequência de textos, interpretados pelo microcontrolador, para controlar a configuração do dispositivo conectado a ele.

Ao realizar a comunicação entre o módulo e o microcontrolador, por meio dos pinos RX e TX, é possível acessar as configurações internas do módulo HC-05, por meio de um recurso disponibilizado pelo *software* do microcontrolador, que é o monitor serial. O monitor serial é uma tela independente da IDE , e possibilita ao usuário o acesso aos comandos AT, para modificação e leitura das configurações do módulo, como, por exemplo, modo de operação (mestre ou escravo), taxa de transmissão de dados, comando para realizar a varredura e pareamento com outros dispositivos, *reset* do módulo para as configurações de fábrica, entre outras configurações. (ARAÚJO E SANTANA, 2015).

Com base no que foi abordado na revisão bibliográfica, no próximo capítulo será apresentada a metodologia empregada para a implementação do protótipo proposto, bem como as características dos componentes, programação e configurações realizadas.

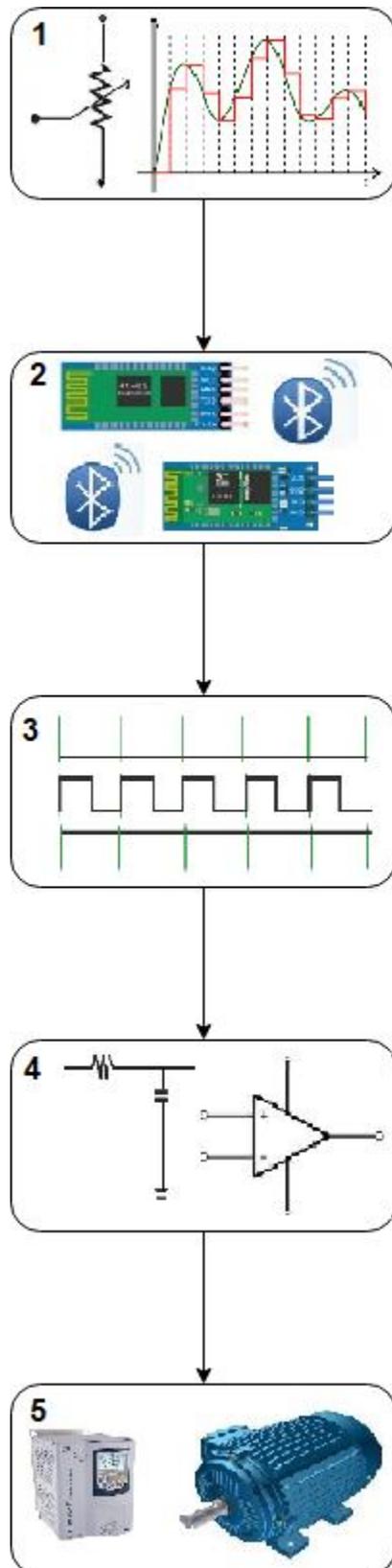
3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia das atividades desenvolvidas, que incluem desde o processamento e condicionamento do sinal, até a parametrização do inversor de frequência para o controle da velocidade do motor. Primeiramente é apresentada uma visão geral do sistema proposto. Em seguida, as principais características dos equipamentos utilizados são apresentadas, assim como da placa de desenvolvimento Arduino, do *shield* de comunicação *Bluetooth*, do circuito de condicionamento do sinal e do inversor de frequência CFW11.

3.1 O sistema proposto

O desenvolvimento do projeto foi dividido em etapas, conforme ilustra a Figura 12 a seguir. São elas:

Figura 12- Esquemático do sistema proposto



Fonte: Acervo da autora (2018).

1. Gerar o sinal analógico de referência por meio do potenciômetro e realizar conversão analógico/digital do sinal.
2. Transmitir o sinal digitalizado pelo *Shield Bluetooth HC-05*, configurado no modo mestre, e receber o sinal de referência pelo *Shield Bluetooth HC-06*, que trabalha como escravo.
3. Obter um sinal de PWM (analógico) de controle na saída do Arduino, conectado ao módulo escravo, com amplitude variável entre 0 e 5 V e proporcional ao sinal gerado pelo potenciômetro.
4. Condicionar o sinal de controle (PWM) para obtenção de um sinal contínuo variável entre 0 e $10 V_{CC}$.
5. Parametrizar o inversor de frequência para trabalhar com comando remoto por meio de sua entrada analógica e aplicar o sinal de controle obtido para realizar a variação da velocidade do motor.

Nas próximas seções, cada uma das partes enumeradas na Figura 12 são descritas, bem como seu funcionamento e a forma como foram implementadas.

A programação realizada para efetivar as etapas retratadas e as respectivas descrições das funções utilizadas no código estão presentes nos Anexos I, II e III.

3.1.1 Sinal de referência

Para gerar um sinal analógico variável na entrada do Arduino foi utilizado um potenciômetro linear com resistência nominal de $10\text{ K}\Omega$, que pode ser observado na Figura 13. O potenciômetro é um componente de três terminais e possui resistência variável, que permite realizar divisão de tensão e disponibilizar na saída, terminal 2, uma fração da tensão de entrada.

Figura 13- Potenciômetro analógico



Fonte: adaptada de TT ELETRONICS (2007).

A alimentação do potenciômetro foi realizada, conforme é apresentado na Tabela 2, que relaciona os pinos do potenciômetro e os pinos do Arduino, e a ligação foi feita como mostra a Figura 14. A placa trabalha com sinal de referência de 5V, e possui 6 entradas analógicas (AAIA OC ROKETRY, 2014).

Tabela 2- Ligação do potenciômetro à placa Arduino

Potenciômetro	Arduino
1	5V
2	A0
3	GND

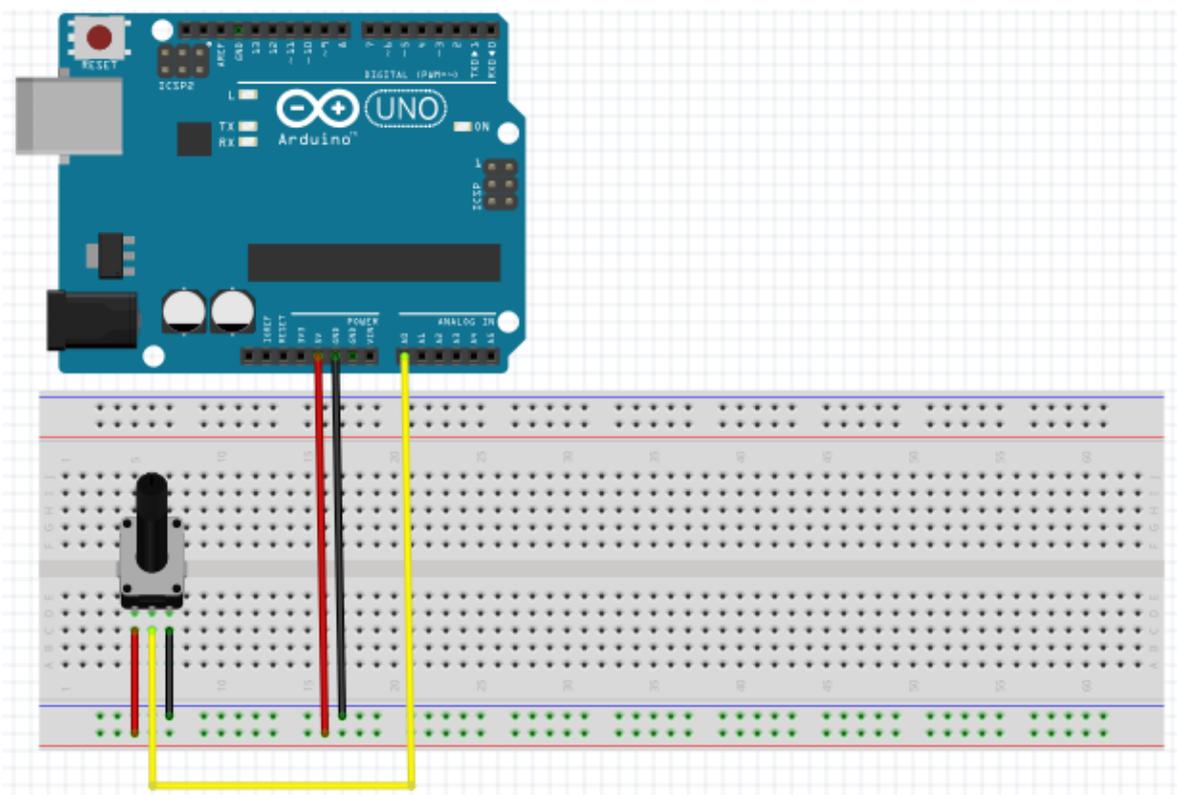
Fonte: Acervo da autora (2018).

Para realizar o processamento desse sinal foi utilizada a função *analogRead()*. Essa função realiza a leitura do sinal aplicado e a conversão analógico-digital (A/D). O conversor A/D do microcontrolador possui resolução de 10 *bits*, isso significa que as tensões de entrada entre 0 V e 5 V aplicadas à entrada analógica serão mapeadas em valores inteiros entre 0 e 1023 (2^{10}), com uma resolução de leitura de $5V/1024 = 4,9\text{ mV}$ por unidade de medida (ARDUINO, 2018).

Em seguida, o valor obtido entre 0 e 1023, foi convertido em números de 0 a 100 de acordo com a porcentagem de tensão aplicada à entrada analógica. Para isso, foi utilizada a função *map()*, que mapeia valores de um intervalo para o outro (ARDUINO, 2018).

Portanto, nessa etapa foi obtido um sinal de referência digital e variável, com valor entre 0 e 100, que representa o sinal de referência, o qual será transmitido por meio dos módulos de comunicação.

Figura 14- Circuito utilizado para obter o sinal de referência



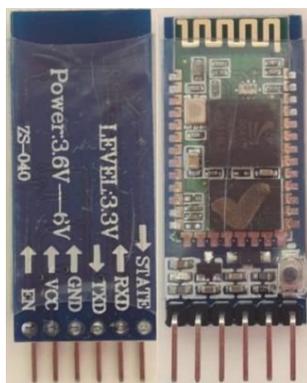
Fonte: Acervo da autora (2018).

3.1.2 Comunicação Bluetooth

O modelo de comunicação proposto nesse trabalho é caracterizado por dois dispositivos, um transmissor e um receptor. Cada um desses é formado por uma placa de desenvolvimento Arduino e um módulo de comunicação *Bluetooth*. Um dispositivo recebe o papel de mestre (módulo *Bluetooth* HC-05) e o outro de escravo (módulo *Bluetooth* HC-06).

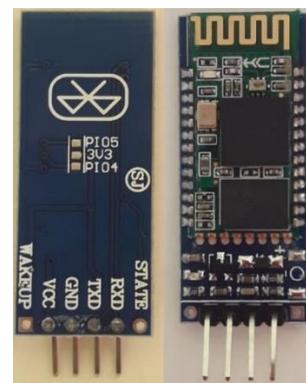
Os módulos são apresentados nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

Figura 15- Módulo HC-05



Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 16- Módulo HC-06



Fonte: Acervo da autora (2018).

Antes de realizar a transmissão e recepção do sinal de referência, foi necessário efetivar o pareamento entre os módulos de comunicação, para possibilitar o compartilhamento de informações entre os mesmos.

3.1.2.1 Módulo HC-05

O módulo HC-05 pode ser configurado tanto em modo mestre, quanto em modo escravo, por meio do acesso aos seus comandos AT, como será descrito posteriormente.

Neste projeto, o módulo HC-05 foi configurado como mestre. Para isso, é necessário estabelecer a comunicação serial entre a placa Arduino e o módulo, possibilitando o compartilhamento de dados entre os dispositivos.

A placa Arduino Uno possui as entradas RX e TX, que são aplicadas, respectivamente, para recepção e transmissão de dados pela porta serial (AAIA OC ROKETRY, 2014). Dessa forma elas podem ser usados para acessar o monitor serial, por meio da função *Serial.begin()*, que faz com que a comunicação entre a placa e o monitor serial seja iniciada para compartilhar informações (ARDUINO, 2018).

O módulo HC-05 possui 6 pinos, os quais são (ITEAD STUDIO, 2010):

- Pinos de alimentação GND e VCC: podem ser conectados diretamente aos pinos de alimentação 5V e GND do Arduino;
- Pino RX: tem por função o recebimento de dados através da comunicação serial. Esse pino trabalha com 3,3 V, portanto deve ser ligado à placa por meio de divisor de tensão.
- Pino TX: tem por função a transmissão de dados quando estabelecida a comunicação serial;
- Pino EN/Key: utilizado para configurar o módulo em modo mestre;
- State: não é utilizado nessa aplicação.

Os pinos RX e TX do módulo HC-05 foram conectados às entradas analógicas 10 e 11 do Arduino, que foram programadas para realizar a comunicação serial da placa com o módulo, para acessar os parâmetros de configuração.

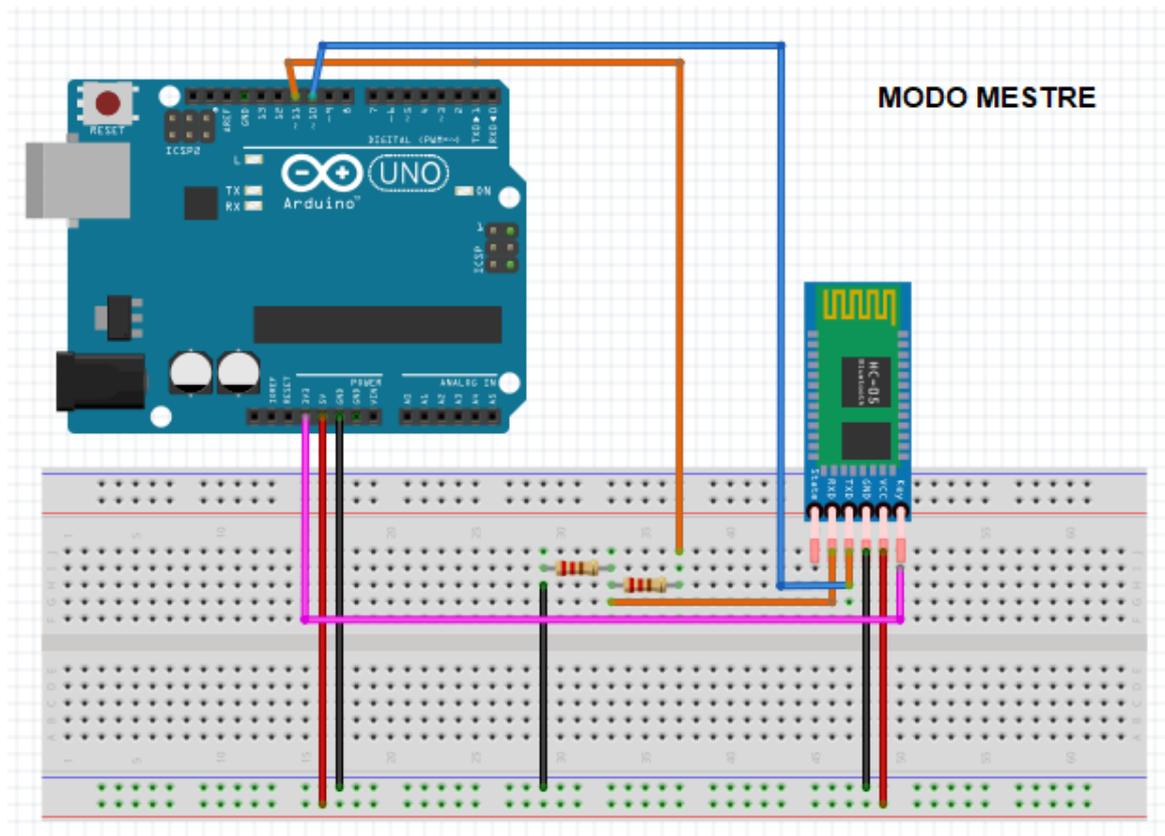
Para isso, foi necessário incluir a biblioteca *SoftwareSerial* na programação. Essa biblioteca tem por função permitir a comunicação serial do Arduino com outros dispositivos (ARDUINO, 2018).

Foi utilizada a função *mySerial()*, atribuindo aos pinos analógicos 10 e 11 as funções de RX e TX, respectivamente, para possibilitar a comunicação serial do Arduino com o módulo HC-05.

Ao realizar a ligação do módulo, foram utilizados resistores de $10K\Omega$ para realizar a divisão de tensão no pino RX, pois ele trabalha no recebimento de dados com nível de tensão de 3,3V.

A conexão do HC-05 ao Arduino pode ser observada na Figura 17.

Figura 17- Ligação do módulo HC-05 para o pareamento



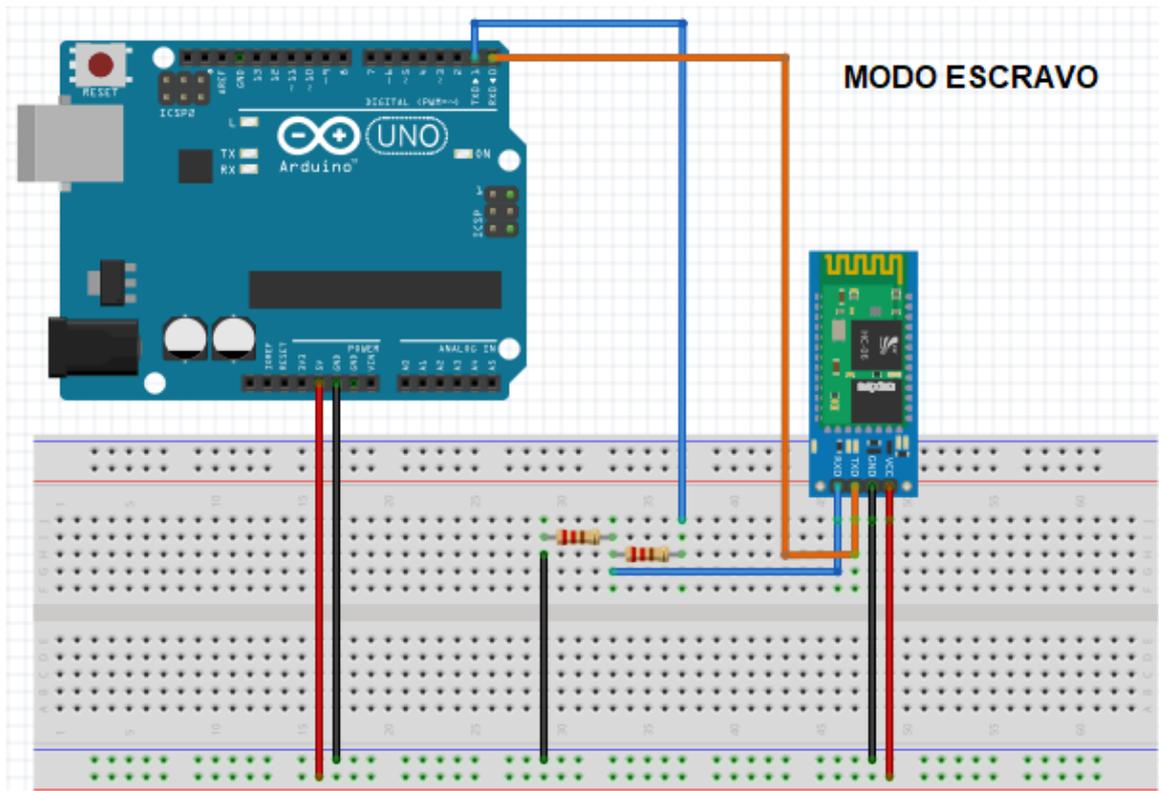
Fonte: Acervo da autora (2018).

3.1.2.2 Módulo HC-06

Já o módulo HC-06 trabalha apenas em modo escravo e possui 4 pinos, os quais são: os pinos de alimentação GND e VCC e os pinos RX e TX, que trabalham de forma similar ao HC-05 (GUANGZHOU HC, 2011).

Os pinos TX e RX do módulo HC-06 foram conectados diretamente às entradas RX e TX do Arduino, respectivamente, e os terminais de alimentação do módulo foram conectados aos pinos 5V e GND da placa, de acordo com a Figura 18, que apresenta o circuito composto por Arduino e módulo HC-06, aqui chamado circuito escravo.

Figura 18- Ligação do módulo HC-06 para o pareamento



Fonte: Acervo da autora (2018).

Ao realizar a ligação do módulo, novamente, foram utilizados resistores de 10 K Ω para realizar a divisão de tensão no pino RX, que recebe 3,3 V.

Como o HC-06 trabalha apenas no recebimento de sinais, a comunicação entre ele e a placa é estabelecida automaticamente, sem necessidade de realizar nenhuma programação adicional.

3.1.2.3 Pareamento dos módulos de comunicação HC-05 e HC-06

Após realizada a ligação física, foi necessário acessar as configurações do módulo HC-05 para realizar o pareamento do mesmo com o HC-06. Para isso, comandos foram enviados por meio do monitor serial do Arduino. Para realizar o pareamento, o pino EN do módulo HC-05 foi energizado com 3,3V, conforme mostra a Figura 17, e desenergizado no momento em que a conexão entre os módulos foi concluída.

O monitor serial foi acessado com o auxílio do comando *SoftwareSerial mySerial()* (ARDUINO, 2018). Os comandos enviados foram (LINOTUX, 2011):

- AT+ORGL: Reseta o módulo para o padrão de fábrica;
- AT+RMAAD: Remove todos os dispositivos pareados ao módulo;

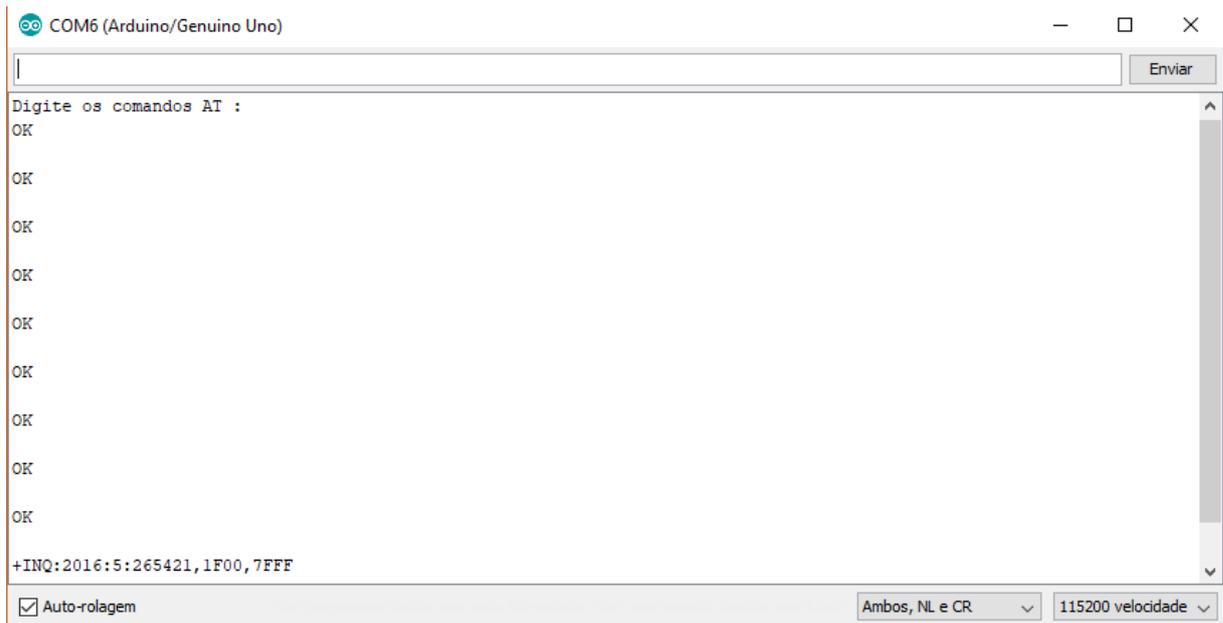
- AT+ROLE=1: Configura o módulo para operar em modo mestre;
- AT+RESET: *Reset* do módulo após a definição do modo de operação;
- AT+CMODE=1: Permite a conexão com qualquer endereço;
- AT+INQM=0,5,10: Modo de varredura padrão (procura por 5 dispositivos e interrompe a varredura em 10 segundos);
- AT+PSWD=1234: Define a senha em modo mestre, que deve ser a mesma do dispositivo em modo escravo;
- AT+INIT: Inicializa o perfil para transmissão ou recepção;
- AT+INQ: Inicializa a varredura por outros dispositivos.

Todos os comandos, anteriormente descritos, devem retornar a mensagem “OK”, indicando que a configuração foi realizada com êxito, como pode ser observado na Figura 19.

Após enviar esses comandos, o módulo HC-05 fez a varredura e encontrou o dispositivo *Bluetooth* HC-06, por meio do seu endereço. O endereço obtido foi o 2016:5:265421, conforme mostra a Figura 19.

Assim, utilizou-se os comandos AT+PAIR e AT+LINK para finalizar o pareamento (LINOTUX, 2011).

Cada módulo possui um LED acoplado ao mesmo. Antes do pareamento tanto o LED do HC-06 quanto o LED do HC-05 piscavam constantemente e de forma rápida, por volta de cinco vezes por segundo, indicando que estavam prontos para estabelecer conexão. Após realizar o pareamento, o LED do módulo HC-06 parou de piscar, e o LED do HC-05 passou a piscar de forma lenta, aproximadamente duas vezes por segundo. Uma vez pareados, os dois módulos se comunicam de forma automática.

Figura 19- Pareamento entre os dois módulos *Bluetooth*

Fonte: Acervo da autora (2018).

3.1.3 Transmissão do sinal de referência

É importante observar que após realizar o pareamento dos módulos, o pino EN do módulo HC-05 foi desconectado. O circuito composto por Arduino, potenciômetro e módulo HC-05 operando em modo mestre, aqui chamado circuito mestre, é apresentado na Figura 20.

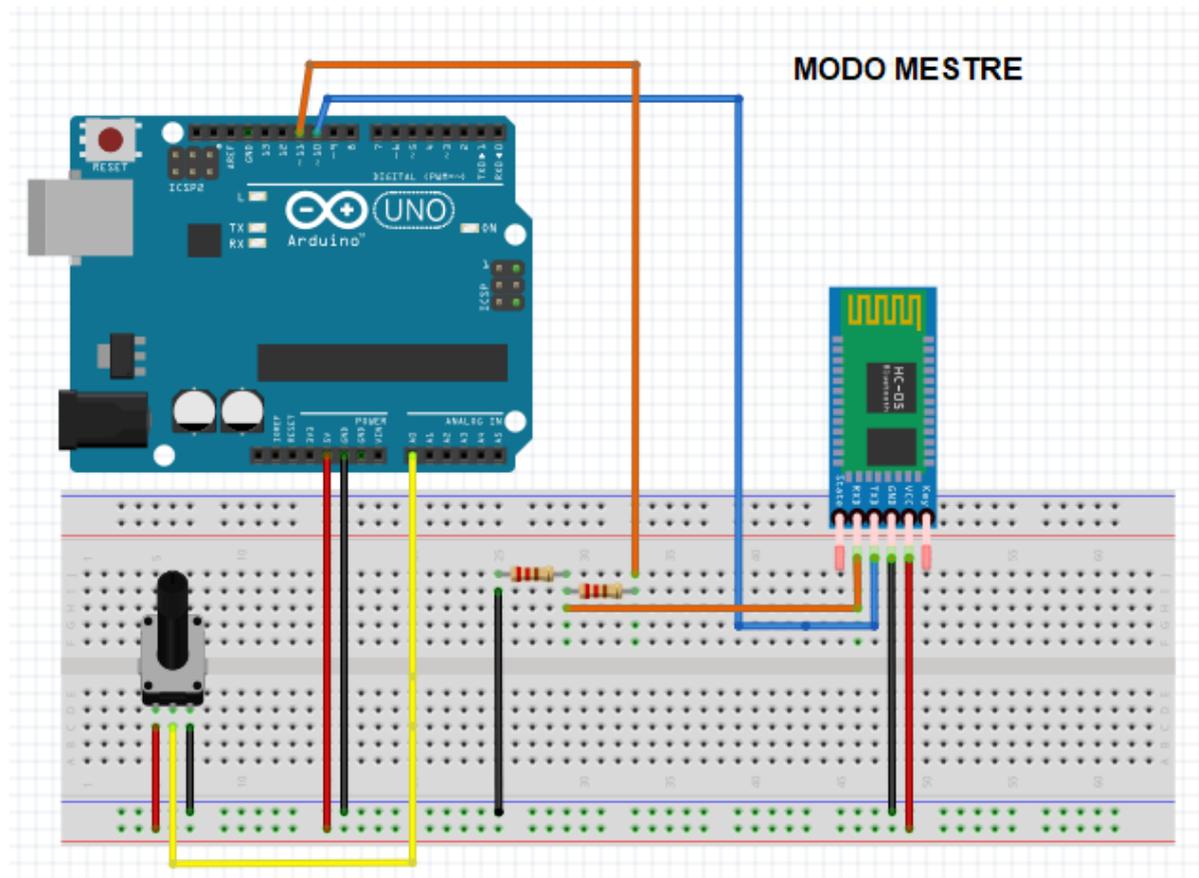
Na Figura 20, é possível observar que a ligação do potenciômetro à placa Arduino foi realizada conforme a Tabela 1, e a conexão dos pinos de alimentação do HC-05 com a placa Arduino foi feita como mostra a Tabela 3.

Tabela 3- Ligação do HC-05 à placa Arduino

Pinos HC-05	Arduino
VCC	5V
GND	GND
RX	11
TX	10

Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 20- Circuito no modo mestre completo



Fonte: Acervo da autora (2018).

Dessa forma, o circuito mestre funciona, primeiramente, realizando a leitura do sinal recebido em A0, e, posteriormente, transformando-o em um sinal a ser enviado para o circuito escravo, por meio dos módulos *Bluetooth*.

Como abordado anteriormente na seção 3.1.1, foi obtido um sinal digital na forma de números inteiros que variam de 0 a 100. Porém, não é possível enviar números inteiros por meio de comunicação serial. As funções disponíveis na biblioteca do Arduino permitem apenas o envio de caracteres e bytes (ARDUINO, 2018).

Portanto, foi necessário transformar o sinal da forma de número inteiro para o formato de variável do tipo *byte*. Para isso, declarou-se uma variável auxiliar do tipo *byte* e a ela foi atribuída o valor da variável inteira obtida na etapa descrita pela seção 3.1.1.

Para enviar o sinal para o Arduino escravo, foi utilizada a função *mySerial.write()* (ARDUINO, 2018). Essa função irá escrever o valor da variável a ser enviada na porta *mySerial* do Arduino, conectado ao módulo configurado como mestre, da Figura 20, que no

caso, foi atribuída aos pinos 10 e 11, conectados ao módulo de comunicação *Bluetooth* HC-05.

3.1.4 Recepção do sinal de referência

Nessa etapa, é realizada a leitura do sinal de referência por meio do módulo HC-06, conforme montagem apresentada na Figura 18. Para isso, foi utilizado o comando *Serial.read()*, a qual lê dados disponíveis na porta serial (ARDUINO, 2018).

3.1.5 Geração do sinal analógico de controle

Para aplicar o sinal de controle na entrada do inversor de frequência, é necessário a obtenção de um sinal analógico, proporcional ao sinal de referência, na saída do Arduino conectado ao módulo *Bluetooth* escravo. No entanto, na placa Arduino, as saídas analógicas são sinais na forma de PWM.

A tensão média do sinal de obtido é proporcional à fração de tempo na qual o sinal de PWM estará em nível alto. Essa fração de tempo, é definida por *duty cycle* (ciclo de trabalho) do sinal.

Um comando que pode ser utilizado para obter um sinal de PWM é a função *analogwrite()*, ela é capaz de escrever um sinal de PWM, com um *duty cycle* pré-definido em uma porta analógica do Arduino. Porém, essa função pode gerar apenas sinais de PWM com frequência fixa de 500 Hz (ARDUINO, 2018; MCROBERTS, 2011).

No entanto, foram realizados testes para observar a filtragem dos sinais de PWM na frequência de 500Hz por meio de um filtro passa-baixas, e observou-se que na saída do filtro não é obtido um sinal totalmente contínuo, devido à baixa frequência do sinal. Portanto, foi necessário realizar testes com frequências maiores, para possibilitar um ajuste mais fino do sinal, obtendo uma tensão contínua limpa e sem ruídos na saída do filtro.

Portanto, foi necessário trabalhar com a configuração em *fast PWM* (PWM rápido), ou seja, PWM de alta frequência. Dessa forma, foi adotada a frequência de 7,81 KHz para o sinal de PWM.

Para isso, foi utilizado o registrador TCCR2A, que é um contador disponibilizado pelo chip *Atmel* do Arduino e atua de forma independente do restante das funções presentes no

software do programa. No projeto, baseado nas configurações disponíveis no manual do *chip*, o registrador recebeu o valor em hexadecimal de 0xA3 (ATMEL, 2013).

O *nibble* menos significativo, que é A3, em binário 0011, é utilizado para configurar o *fast* PWM do sinal de saída. Essa configuração é apresentada nas Figuras 21 e 22.

Figura 21- Bits do registrador TCCR2A

TCCR2A – Timer/Counter Control Register A

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB0)	COM2A1	COM2A0	COM2B1	COM2B0	–	–	WGM21	WGM20	TCCR2A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

Fonte: ATMEL (2013).

Figura 22- Modo de operação do PWM

Mode	WGM22	WGM21	WGM20	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCRx at	TOV Flag Set on ⁽¹⁾⁽²⁾
0	0	0	0	Normal	0xFF	Immediate	MAX
1	0	0	1	PWM, Phase Correct	0xFF	TOP	BOTTOM
2	0	1	0	CTC	OCRA	Immediate	MAX
3	0	1	1	Fast PWM	0xFF	BOTTOM	MAX
4	1	0	0	Reserved	–	–	–
5	1	0	1	PWM, Phase Correct	OCRA	TOP	BOTTOM
6	1	1	0	Reserved	–	–	–
7	1	1	1	Fast PWM	OCRA	BOTTOM	TOP

Fonte: Adaptada de ATMEL (2013).

Dessa maneira, observa-se pela Figura 22 que os *bits* utilizados para configurar o modo de operação do PWM são WGM20, WGM21 e WGM22, que tiveram seus valores atribuídos em 011, o que implica no binário 0011, que é o mesmo que A3 em hexadecimal.

Já a configuração do *nibble* mais significativo é programada para utilizar dois registradores de comparação para alterar o *duty cycle* do PWM, que é o seu ciclo de trabalho, definido como o intervalo de tempo em que o sinal fica em nível alto, ou seja, em condução. A ele foi atribuído o binário 1010, conforme apresentado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23- Configuração do *fast* PWM para o comparador OC2A

COM2A1	COM2A0	Description
0	0	Normal port operation, OC2A disconnected.
0	1	WGM22 = 0: Normal Port Operation, OC0A Disconnected. WGM22 = 1: Toggle OC2A on Compare Match.
1	0	Clear OC2A on Compare Match, set OC2A at BOTTOM, (non-inverting mode).
1	1	Set OC2A on Compare Match, clear OC2A at BOTTOM, (inverting mode).

Fonte: Adaptada de ATMEL (2013).

Figura 24- Configuração do *fast* PWM para o comparador OC2B

COM2B1	COM2B0	Description
0	0	Normal port operation, OC2B disconnected.
0	1	Reserved
1	0	Clear OC2B on Compare Match, set OC2B at BOTTOM, (non-inverting mode).
1	1	Set OC2B on Compare Match, clear OC2B at BOTTOM, (inverting mode).

Fonte: Adaptada de ATMEL (2013).

Para configurar a frequência de operação do PWM foi utilizado o registrador TCCR2B, por meio do *prescaler*, que é responsável por modificar a frequência de oscilação, por um fator pré-determinado. O *prescaler* escolhido corresponde a frequência de 7,81 KHz, de acordo com as Figuras 25 e 26.

Figura 25- *Prescaler* atribuído ao sinal do PWM

CS22	CS21	CS20	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped).
0	0	1	clk_{T2S} /(No prescaling)
0	1	0	$\text{clk}_{T2S}/8$ (From prescaler)
0	1	1	$\text{clk}_{T2S}/32$ (From prescaler)
1	0	0	$\text{clk}_{T2S}/64$ (From prescaler)

Fonte: Adaptada de ATMEL (2013).

Figura 26- *Prescaler* atribuído ao sinal do PWM

CS22	CS21	CS20	Description
1	0	1	$\text{clk}_{T2S}/128$ (From prescaler)
1	1	0	$\text{clk}_{T2S}/256$ (From prescaler)
1	1	1	$\text{clk}_{T2S}/1024$ (From prescaler)

Fonte: ATMEL (2013).

Para isso, o valor recebido pela porta serial do Arduino conectado ao módulo HC-06 foi convertido em valores variáveis de 0 a 255 (comparador de 8 *bits*) e atribuído ao comparador OC2B, para gerar um sinal de PWM na saída analógica A3 do microcontrolador, com *duty cycle* de 7,81 KHz.

Dessa forma, à medida que é feita a variação da tensão aplicada à entrada analógica do Arduino mestre, por meio do potenciômetro, o *duty cycle* do PWM obtido na saída analógica A3 do Arduino escravo é modificado.

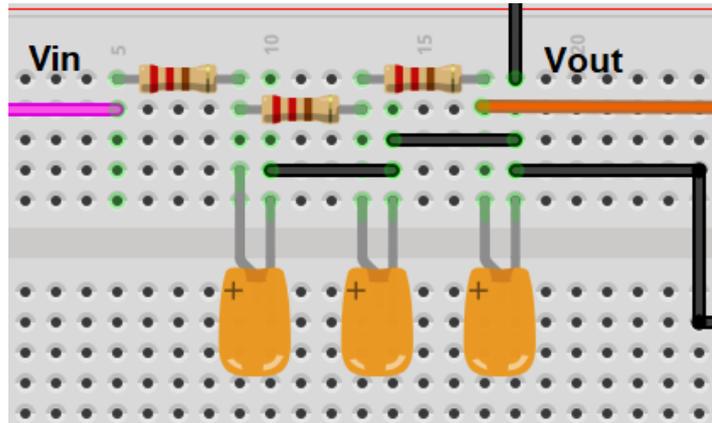
3.1.6 Condicionamento do sinal de controle

Como não é possível aplicar o sinal de PWM diretamente na entrada analógica do inversor de frequência, é necessário realizar o condicionamento do sinal, que consiste na conversão de um tipo de sinal elétrico em outro. Portanto, foi necessário realizar a modificação do sinal de PWM com amplitude de tensão média máxima de 5V para tensão contínua com amplitude máxima de 10V. Para isso, realizou-se a filtragem e amplificação do sinal de controle obtido.

3.1.6.1 Filtragem do sinal

Após obter um sinal de PWM variável na saída analógica A3 do Arduino escravo, foi necessário filtrar esse sinal para transformá-lo em uma tensão contínua. Para isso, foi utilizado um filtro passa baixa em cascata composto por resistores e capacitores, de acordo com a Figura 27.

Figura 27- Filtro em cascata



Fonte: Acervo da autora (2018).

O circuito realiza a filtragem do sinal PWM e permite apenas a passagem de tensão com frequência abaixo da frequência de corte. No trabalho foram utilizadas três etapas de filtragem, com três filtros em cascata para garantir um sinal limpo e sem ruídos na saída.

Os valores dos resistores e capacitores foram calculados de acordo com a equação (6) (RIEDEL, 2009):

$$\omega = \frac{1}{RC} \quad (6)$$

Na qual:

- ω é a frequência de corte do filtro em rad/s ;
- R é a resistência do resistor em Ω ;
- C a capacitância do capacitor empregado em F .

Como a frequência do sinal de PWM gerado é $7,81\text{ KHz}$:

$$2 \times \pi \times 7810 = \frac{1}{RC} \quad (7)$$

$$RC = 2,04 \times 10^{-5} \quad (8)$$

Portando a relação entre os valores dos resistores e capacitores deve ser conforme calculado pela equação (8).

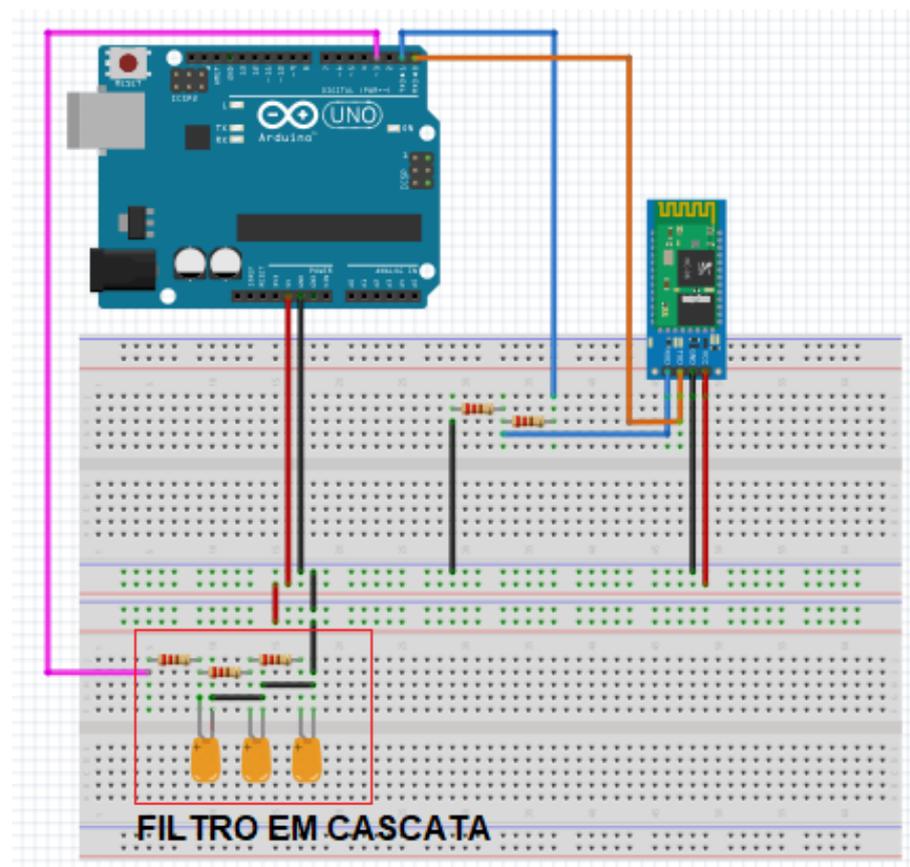
Assim, os valores comerciais escolhidos para os componentes que constituem o filtro, que resultam numa relação próxima àquela determinada pela equação (8), foram:

$$R = 10K\Omega \quad (9)$$

$$C = 15nF \quad (10)$$

A entrada do filtro foi conectada diretamente à saída analógica A3 do Arduino escravo, como na Figura 28.

Figura 28- Filtro em cascata no circuito em modo escravo

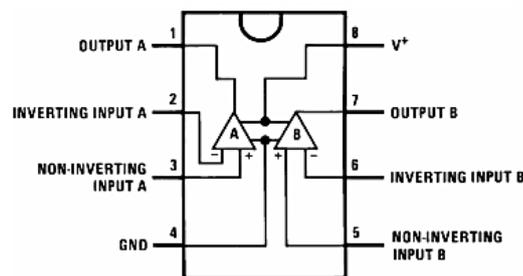


Fonte: Acervo da autora (2018).

3.1.6.2 Amplificação do sinal

Para aplicar o sinal filtrado no inversor de frequência, foi necessário realizar amplificação, pois a entrada analógica do inversor de frequência trabalha com sinal de 0 a 10Vcc. Para isso, foi utilizado o amplificador operacional LM358, cuja composição dos pinos pode ser observada na Figura 29, (TEXAS INSTRUMENTS, 2014).

Figura 29- Pinagem do LM358



Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2014).

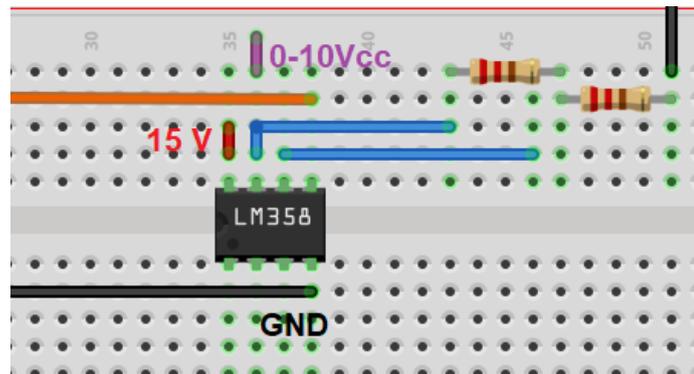
A conexão dos terminais do LM358, conforme apresentada na Figura 29, foi realizada da seguinte forma conforme a Tabela 4, e é representada na Figura 30. Também foi necessário interligar os pinos 4 e 6 juntamente com o GND do Arduino, para, assim, trabalhar com o mesmo referencial de terra.

Tabela 4- Ligação do amplificador operacional

Pinos do amplificador	Conexão dos pinos
4	GND
5	Saída do filtro (0 a 5Vcc)
6	Resistores
7	Saída do amplificador (0 a 10Vcc)
8	Fonte de alimentação de 15V.

Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 30- Amplificador operacional



Fonte: Acervo da autora (2018).

Dessa forma, o circuito em modo escravo completo, com a etapa de amplificação pode ser observado na Figura 31.

Como deseja-se obter uma saída máxima de 10V no pino 7 (*output B*) do amplificador operacional, os resistores utilizados na montagem do circuito de amplificação foram calculados de acordo com a equação (11) (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004):

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} \times (V_s - V_i) \quad (11)$$

Em que V_0 é a tensão obtida na saída, V_s é a tensão da fonte, e V_i a tensão de entrada. Portanto, a relação dos resistores foi calculada na Equação (12):

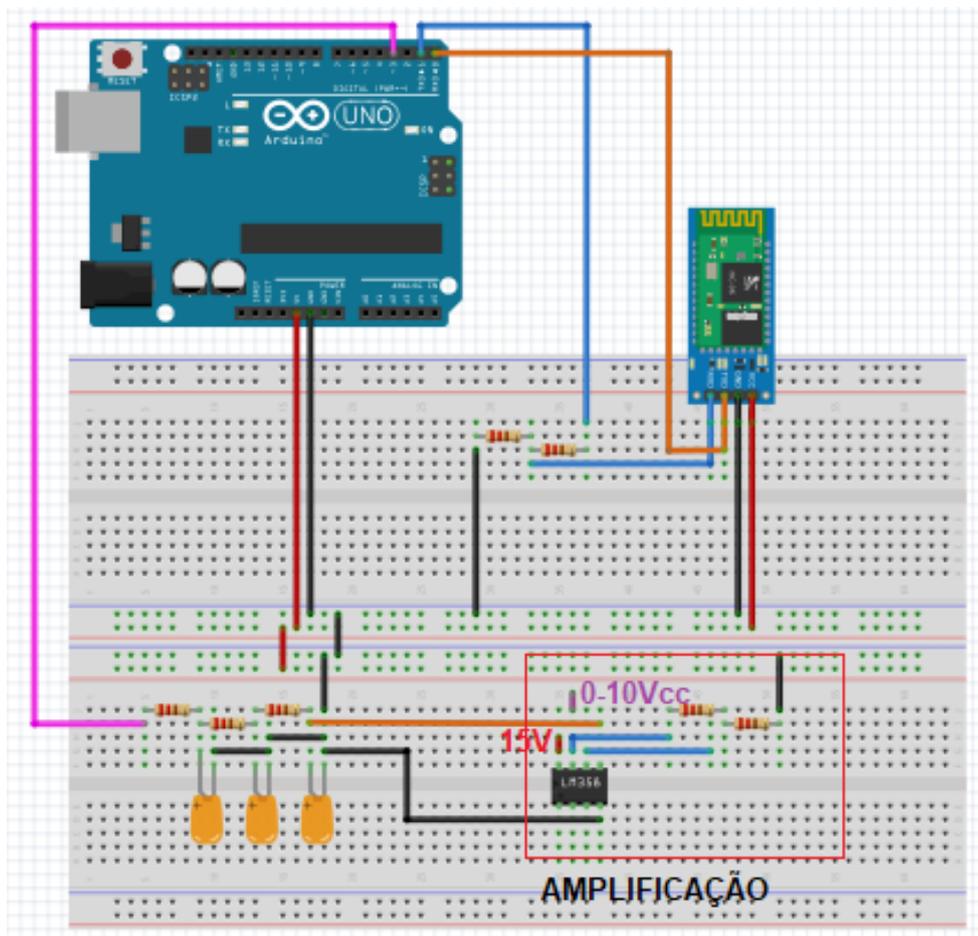
$$10 = \frac{R_2}{R_1} \times (15 - 5) \quad (12)$$

A relação obtida foi:

$$\frac{R_2}{R_1} = 1 \quad (13)$$

Portando, como apresentado na Equação (13), os resistores utilizados no circuito devem ter o mesmo valor de resistência. No projeto, foram utilizados resistores de 10KΩ.

Figura 31- Circuito completo com amplificação



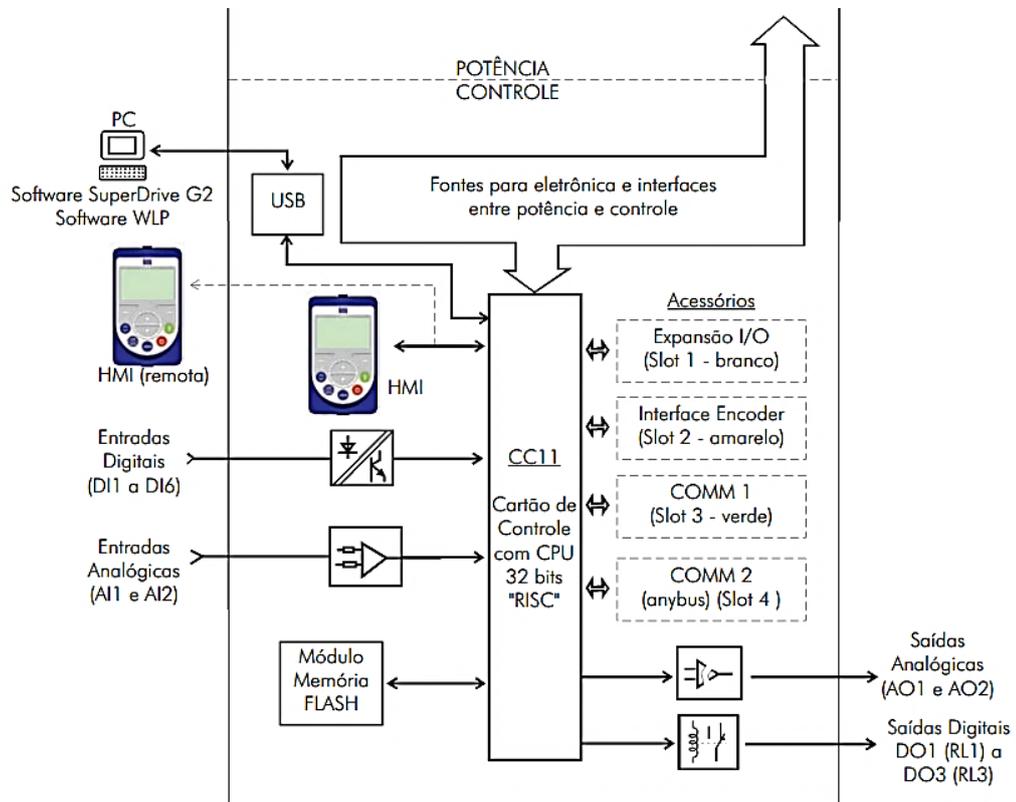
Fonte: Acervo da autora (2018).

3.1.7 Parametrização do Inversor de frequência para receber o sinal de controle via entrada analógica

O controle de velocidade do motor de indução trifásico pode acontecer de forma remota por meio da sua entrada analógica, que pode ser por sinal de corrente (de 4 a 20mA) ou tensão (0 a 10V_{CC}). Neste trabalho, o sinal de controle utilizado foi de tensão, sinal obtido na saída do circuito escravo apresentado na Figura 31. Essa forma de controle de velocidade permite um controle analógico ao longo de toda a faixa operacional do motor.

O inversor de frequência utilizado foi o modelo CFW11 da WEG, cujo diagrama de blocos do circuito de comando é apresentado na Figura 32.

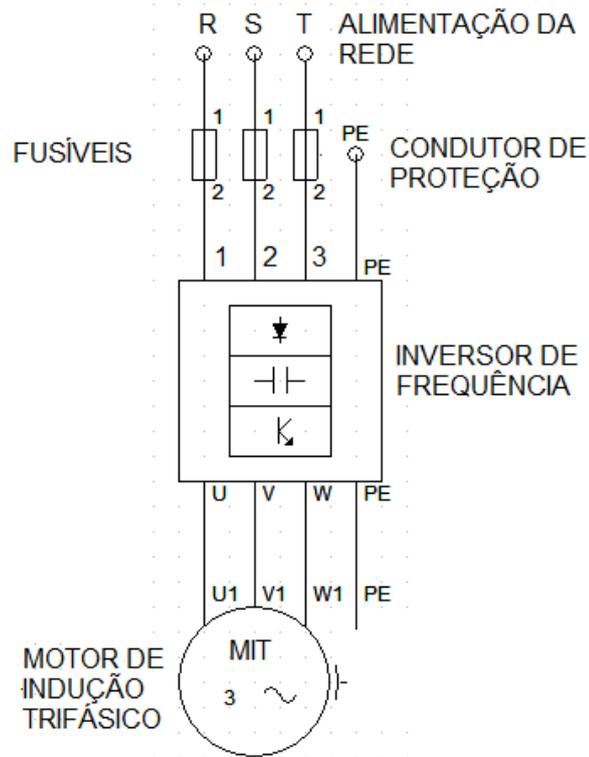
Figura 32- Diagrama de comando CFW-11



Fonte: WEG (2008).

O esquema de ligação para o circuito de força foi realizado conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33- Esquema de ligação do circuito de potência do CFW-11



Fonte: Acervo da autora (2018).

Para permitir o controle de velocidade do motor de indução trifásico de forma remota por meio da entrada analógica do inversor de frequência, é necessário realizar a parametrização do inversor.

Os parâmetros do modo de operação do inversor foram configurados de acordo com o manual do usuário, e são apresentados na Tabela 5 (WEG, 2008):

Tabela 5- Parametrização do inversor de frequência

Parâmetros	Valores	Descrição
P000	5	Permissão para modificar os valores dos parâmetros
P0133	100	Referência de velocidade mínima em 100 rpm
P0134	1200	Referência de velocidade máxima em 1200 rpm
P0231	0	Referência de velocidade definida pela entrada analógica
P0232	9	Ganho de velocidade da entrada analógica
P0265	6	Entrada digital D3 definida como função <i>start</i>
P0266	7	Entrada digital D4 definida como função <i>stop</i>

Fonte: Acervo da autora (2018).

Os parâmetros P0133 e P0134 devem ser modificados de acordo com os limites operacionais do motor.

Além disso, é necessário configurar os parâmetros que correspondem aos dados nominais do motor de indução utilizado, cujos dados de placa são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Configuração dos parâmetros correspondentes aos dados de placa do motor

Dados nominais do motor	Dados de placa
Tensão nominal	220 V
Corrente nominal	1,11 A
Potência nominal	¼ cv
Velocidade nominal	1695 rpm
Classe de isolamento	B (limite de temperatura 130° C)

Fonte: Acervo da autora (2018).

Após realizar a parametrização descrita, o sinal de controle, saída do circuito da Figura 31, foi conectado à entrada analógica do inversor de frequência, para variar a velocidade do motor de indução, por meio do potenciômetro conectado ao Arduino mestre.

3.2 Custo estimado do protótipo

Foi realizado um levantamento do custo aproximado dos componentes utilizados na montagem do protótipo desenvolvido no projeto, cujo orçamento é apresentado na Tabela 7. Os valores apresentados são uma estimativa dos preços encontrados no mercado e podem apresentar variações.

Tabela 7- Custo estimado do protótipo

Componente utilizado	Custo estimado
2 Kits Arduino UNO	R\$ 100,00
1 Módulo <i>bluetooth</i> HC-05	R\$ 39,90
1 Módulo <i>bluetooth</i> HC-06	R\$ 39,90
9 Resistores de 10 $K\Omega$	R\$ 9,00
3 Capacitores de 12nF	R\$ 3,12
1 Potenciômetro linear de 10 $K\Omega$	R\$ 0,40
Amplificador operacional LM358	R\$1,38
Total estimado	R\$ 193,70

Fonte: Acervo da autora (2018).

No próximo capítulo são apresentados o protótipo implementado, os testes realizados e os respectivos resultados, com o objetivo de validar o protótipo desenvolvido.

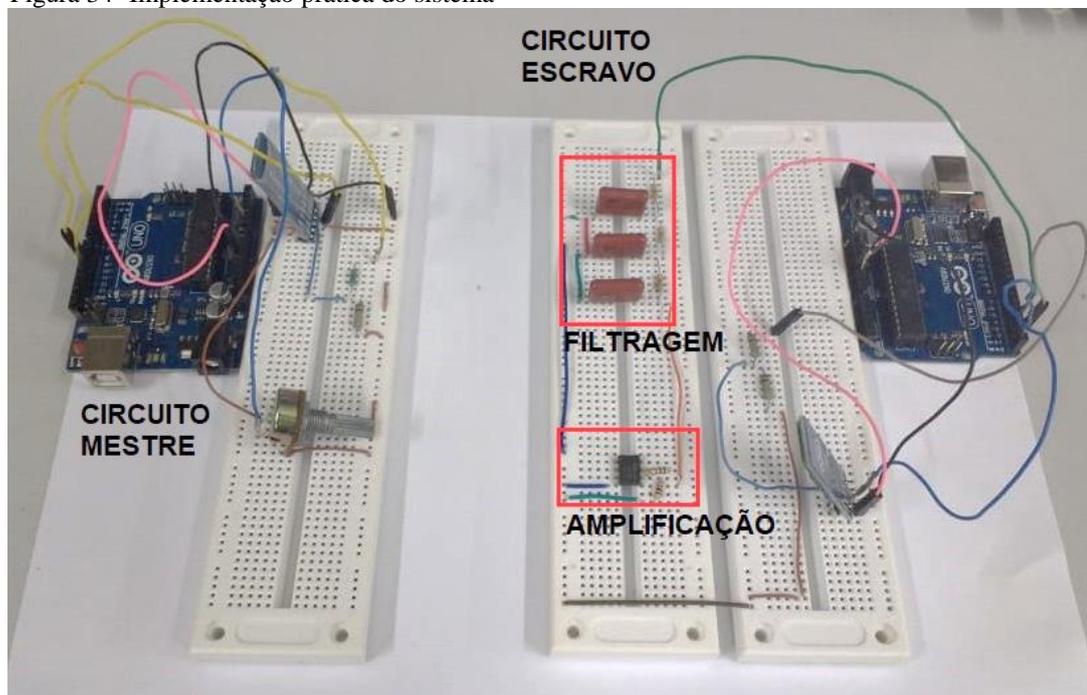
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar o funcionamento do sistema proposto, foram realizados testes nos laboratórios de eletrônica e de máquinas elétricas do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Formiga. Inicialmente, foi avaliado o comportamento dos módulos isolados retratados no capítulo 3. Em seguida, foi averiguado o desempenho do sistema completo. A validação do protótipo é realizada pela coleta dos dados experimentais obtidos para diferentes condições de operação, e pela comparação dos resultados alcançados com dados operacionais esperados, encontrados na bibliografia. Desta forma, segue a apresentação dos resultados.

4.1 Protótipo implementado

Todas as etapas descritas na metodologia foram implementadas em *protoboard* para a realização dos testes práticos e validação do funcionamento do sistema. A construção prática dos circuitos mestre, escravo e de condicionamento do sinal é apresentada na Figura 34.

Figura 34- Implementação prática do sistema



Fonte: Acervo da autora (2018).

4.2 Sinal de referência após conversão A/D

Após montar o circuito mestre, foi obtido o sinal de referência, por meio do potenciômetro conectado à entrada analógica A0 do Arduino. Como abordado anteriormente, esse sinal é processado, e após a conversão analógico/digital, é realizado o seu mapeamento para valores digitais de 0 a 100, proporcionais ao sinal de tensão aplicado (via potenciômetro), com amplitude variável de 0 a 5V.

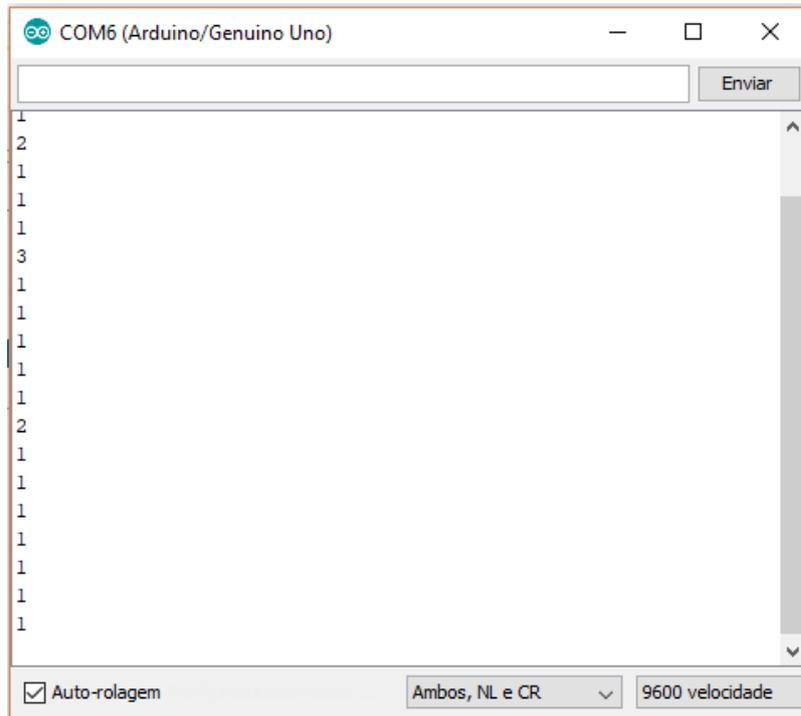
Foi realizado um levantamento do mapeamento do sinal de tensão aplicada na entrada analógica A0, por meio do monitor serial do Arduino, cuja porta é definida como COM6. O envio dos dados para o monitor serial ocorre a cada 0,5 segundos, conforme definido na programação do Arduino, pela função *delay* (pausa) (ARDUINO,2018).

Foram aplicados sinais que correspondem a 0, 25%, 50%, 75% e 100% da tensão máxima de 5V, e os valores na forma digital são proporcionais ao mesmo. Ou seja, o monitor serial apresentará os valores enviados a cada 0,5 segundos pela porta serial do módulo, de acordo com o sinal aplicado na entrada analógica A0 do Arduino mestre, por meio do potenciômetro. Ao aplicar 0V no terminal variável do potenciômetro, pino 2, espera-se obter na tela do monitor valores em torno de 0. Ao aplicar 1,21V sob o pino 2 do componente, espera-se obter no monitor valores próximos de 25. Ao aplicar 2,47V, espera-se obter valores que variam em torno de 50. Ao aplicar 3,25V, espera-se obter valores em torno de 75. E, por fim, ao aplicar 4,93V espera-se obter valores próximos de 100.

O mapeamento do sinal aplicado se relaciona com a tensão na entrada analógica A0, conforme é apresentado nas Figuras 35 a 39.

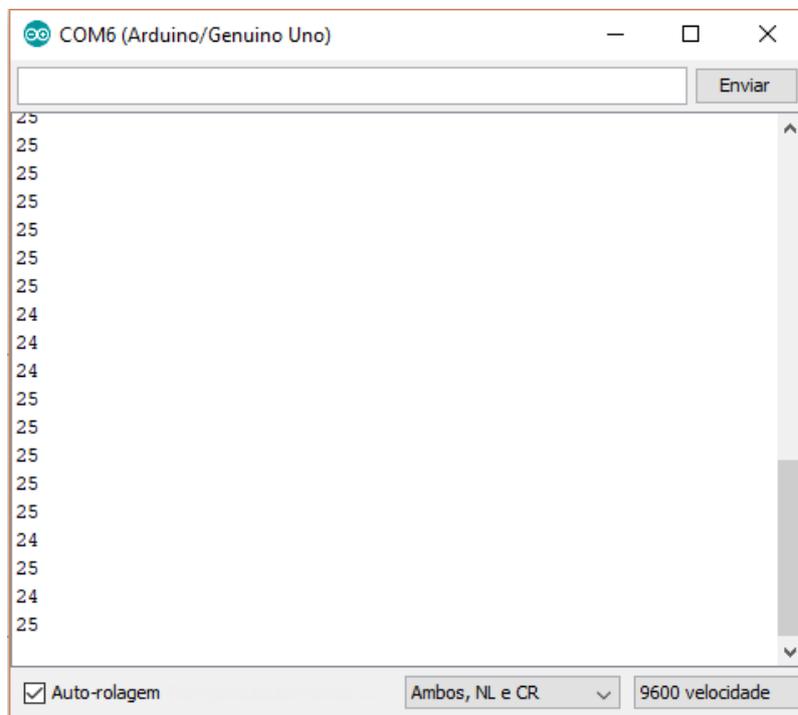
Ao analisar as Figuras 35 a 39, é possível observar que o valor na forma digital varia proporcionalmente à alteração da tensão na saída do potenciômetro. É importante ressaltar que há perdas no sinal, e a tensão aplicada não atinge o máximo de 5V, isso se deve a queda de tensão dos componentes e equipamentos, o que é esperado, se tratando da implementação prática de circuitos elétricos. O mesmo se aplica para todos os sinais digitais e sinais de PWM obtidos.

Figura 35- Aplicação de 0V no potenciômetro



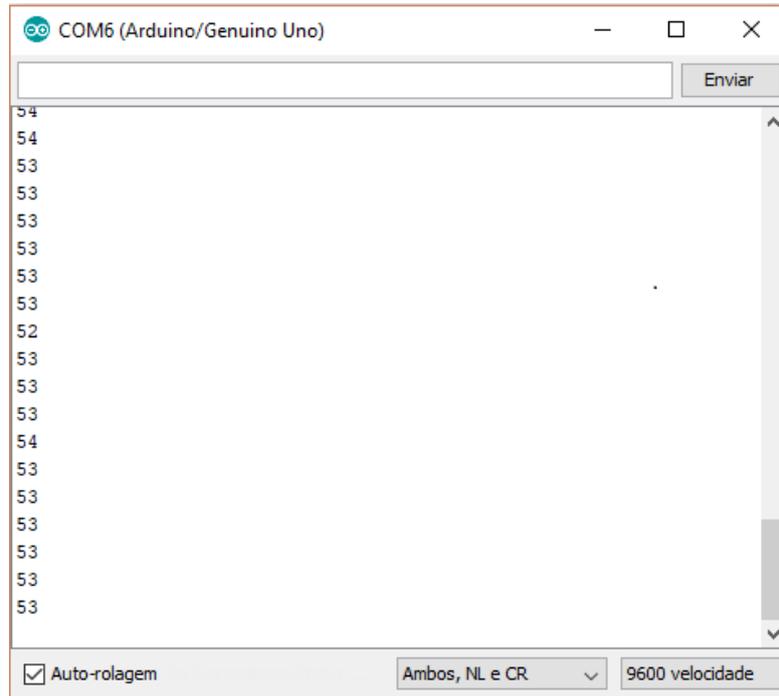
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 36- Aplicação de 1,21V no potenciômetro



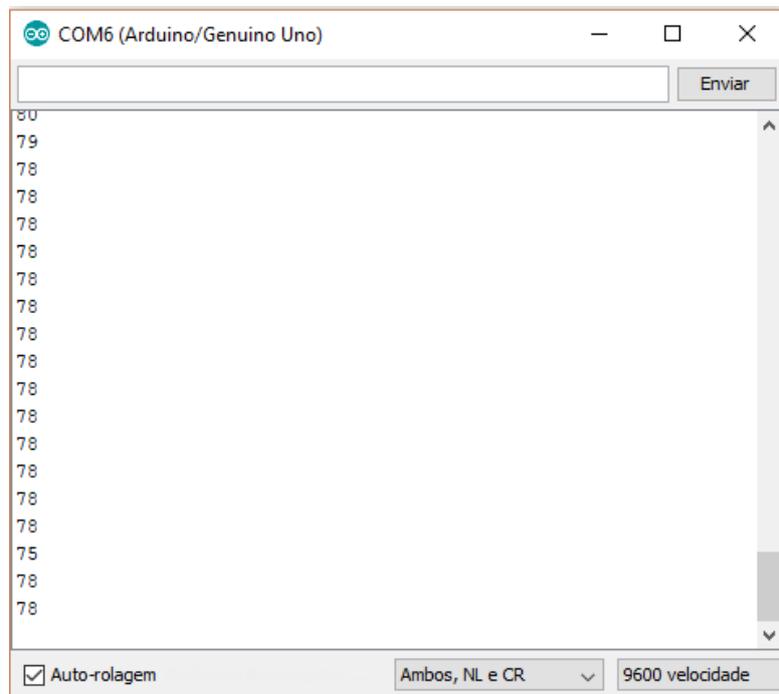
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 37- Aplicação de 2,47V no potenciômetro



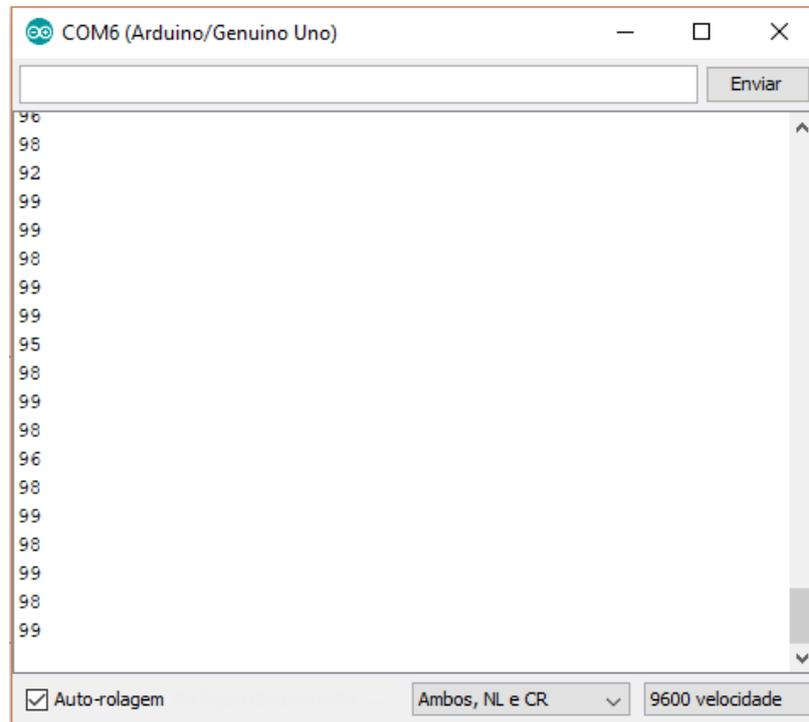
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 38- Aplicação de 3,25V no potenciômetro



Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 39- Aplicação de 4,93V no potenciômetro

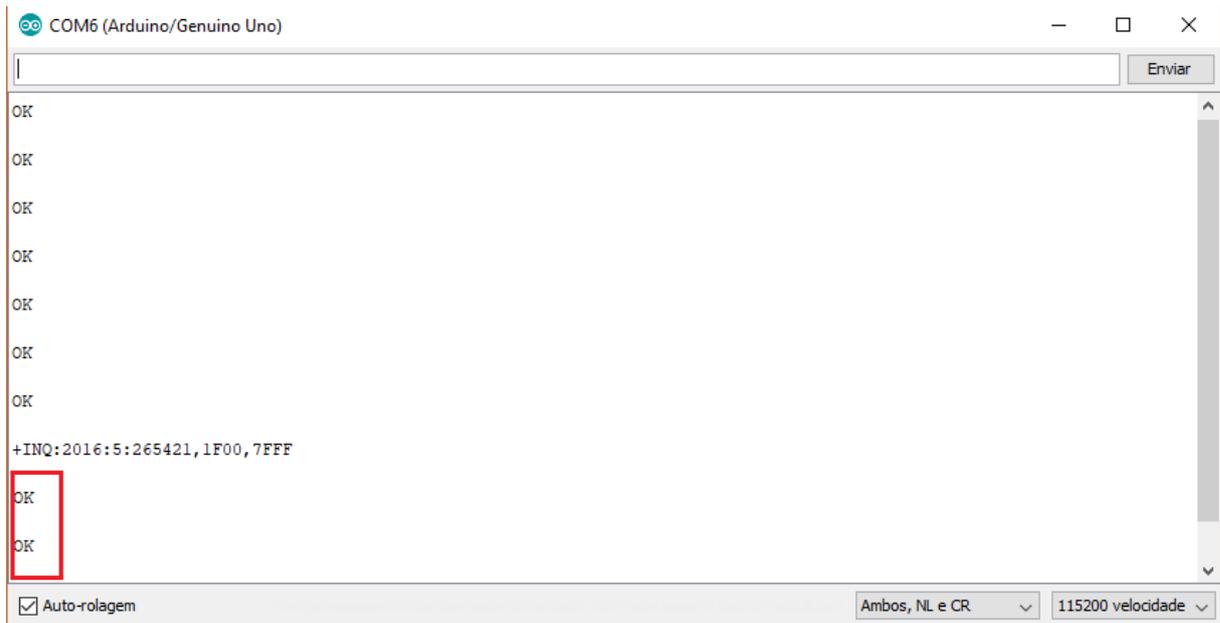


Fonte: Acervo da autora (2018).

4.3 Pareamentos dos módulos *Bluetooth*

Após realizar o acesso aos comandos AT do módulo HC-05, e enviar os comandos descritos na seção 3.1.2.3, o pareamento dos módulos foi efetivado, como é apresentado na Figura 40. No monitor serial, após a localização do endereço do módulo HC-06, foi retornada a mensagem OK confirmando que o módulo HC-05 solicitou a conexão com o módulo HC-06 e outra mensagem OK confirmado que o módulo HC-06 aceitou a conexão e os dispositivos foram pareados.

Figura 40- Pareamento entre os módulos HC-05 e HC-06



Fonte: Acervo da autora (2018).

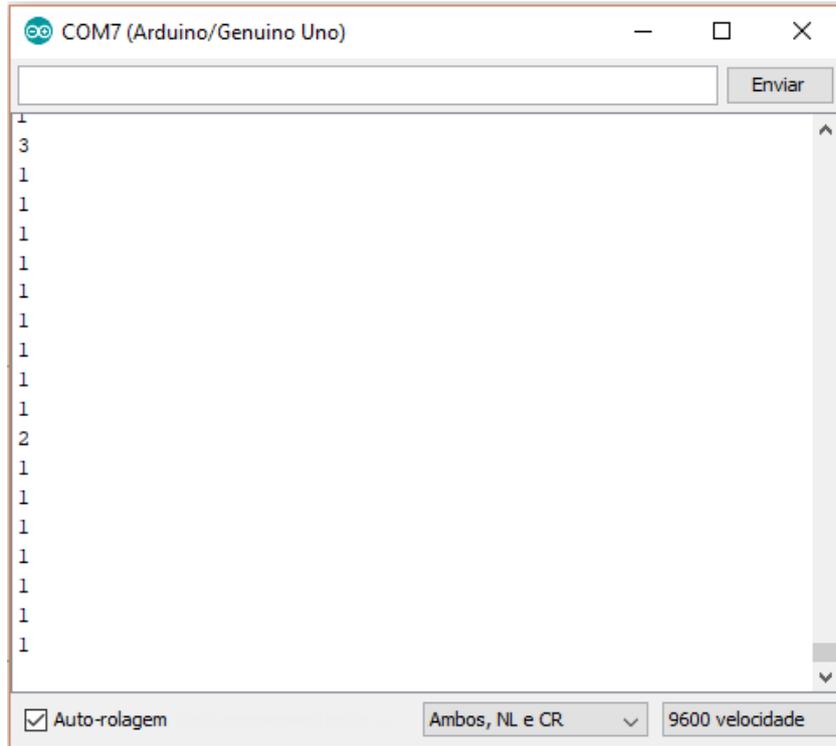
4.4 Recebimento do sinal de referência

O sinal de referência apresentado na seção 4.1 foi transmitido pelo módulo HC-05, via *Bluetooth*, e recebido pelo módulo HC-06, conectado ao Arduino escravo. O sinal recebido foi enviado para o monitor serial do Arduino, nesse caso definido como COM7.

Os sinais recebidos são apresentados nas Figuras 41 a 45.

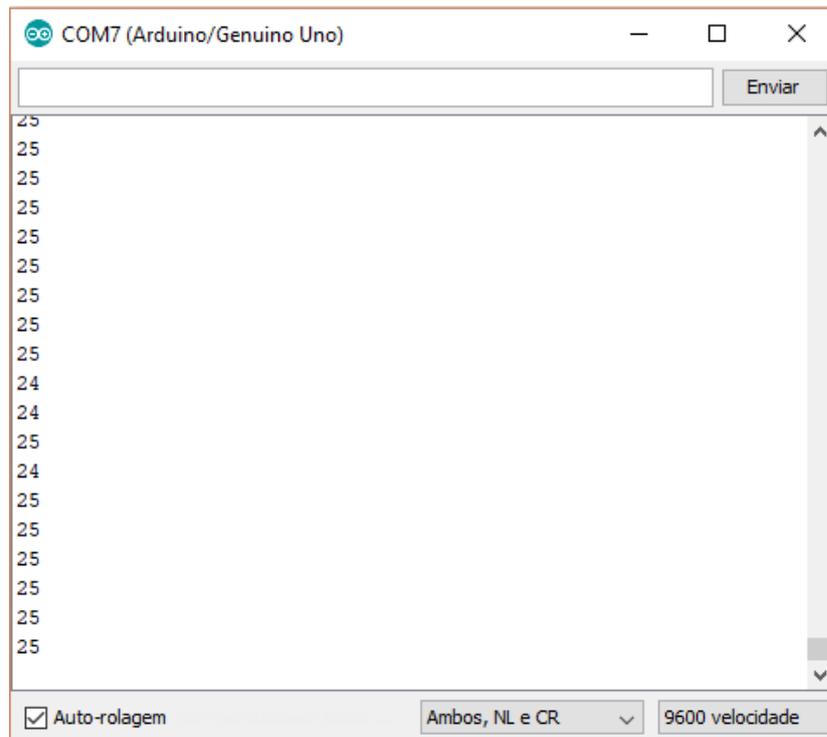
Observando as Figuras 41 a 45, é possível analisar que o sinal enviado pelo Arduino mestre foi recebido pelo Arduino escravo. Foram observadas algumas divergências entre os dados enviados e recebidos, o que pode ocorrer devido às interferências, como fontes de alimentação, outros dispositivos sem fio, entre outros.

Figura 41- Sinal digital recebido pelo HC-06 para 0V



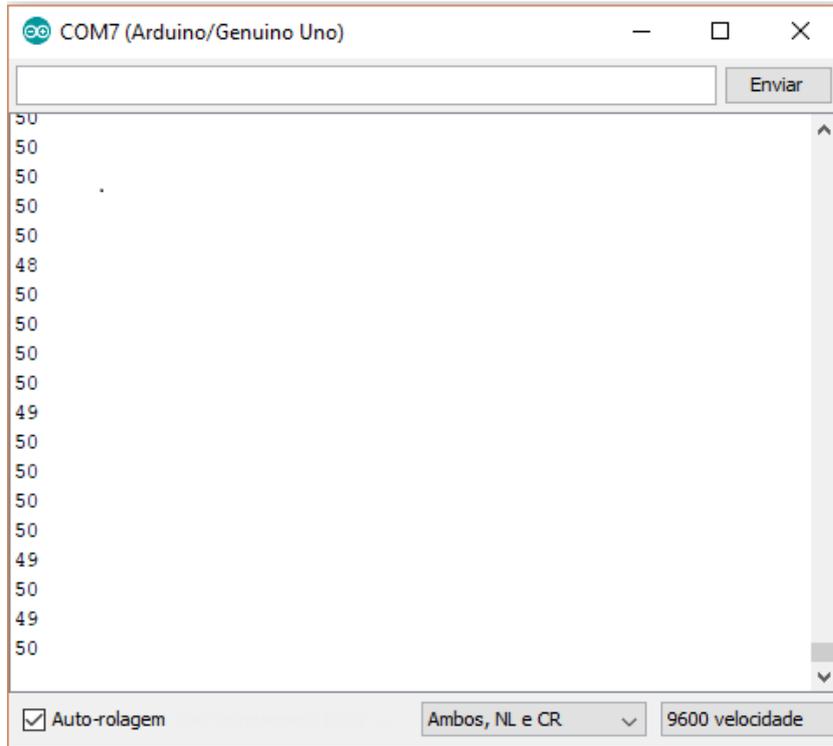
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 42- Sinal digital recebido pelo HC-06 para 1,21V



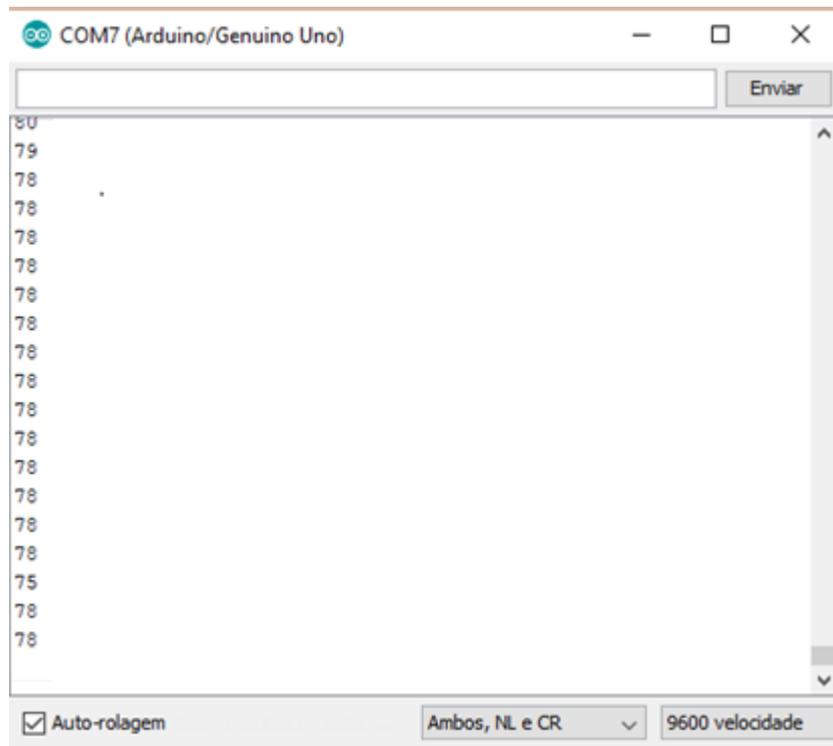
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 43- Sinal digital recebido pelo HC-06 para 2,47V



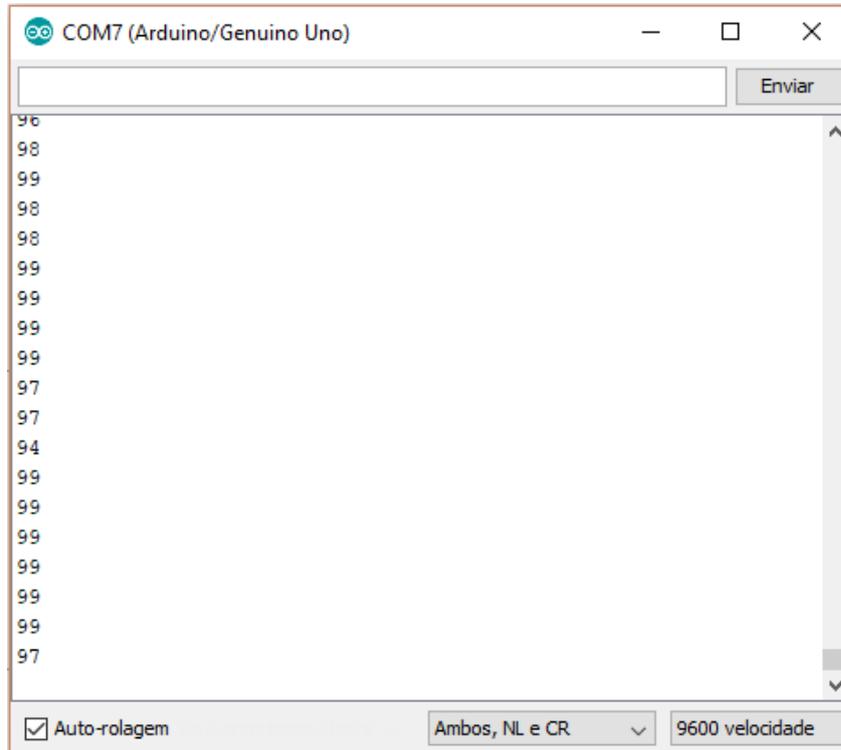
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 44- Sinal digital recebido pelo HC-06 3,25V



Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 45- Sinal digital recebido pelo HC-06 para 4,93V



Fonte: Acervo da autora (2018).

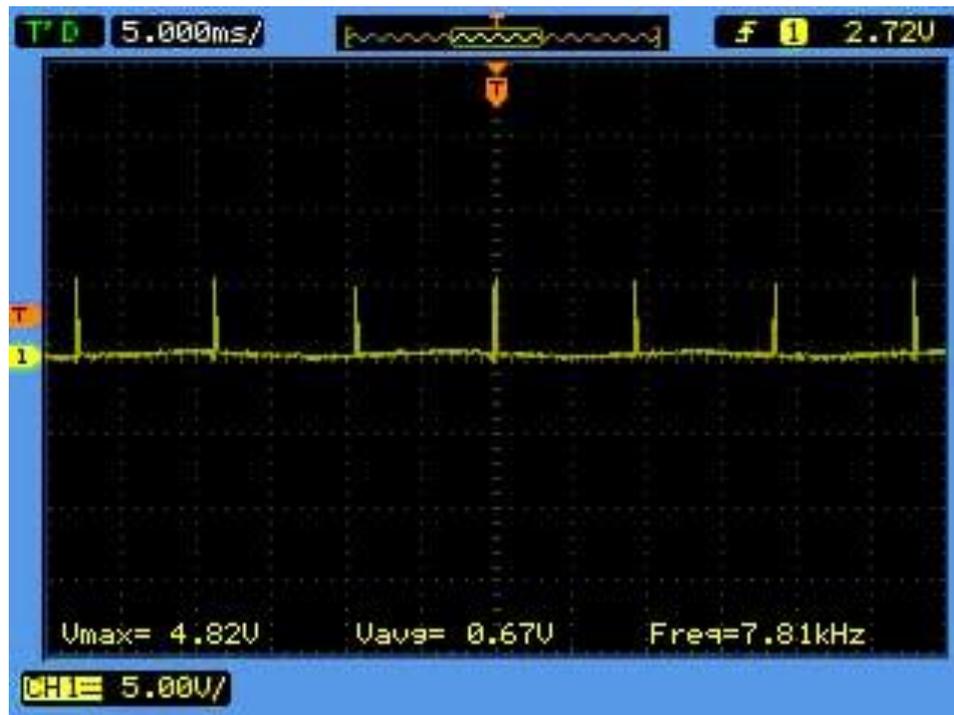
4.5 Geração do sinal de controle

A partir do sinal digital recebido, foi gerado um sinal de PWM variável, cuja tensão máxima, definida nas imagens por V_{max} , com tensão média, definida por V_{avg} , proporcional aos valores recebidos pelo módulo.

Os respectivos sinais gerados na saída analógica A3 do Arduino escravo, coletados por meio do osciloscópio, para um *duty cycle* (ciclo de trabalho) de 0, 25%, 50%, 75% e 100%, são apresentados nas Figuras 46 a 50.

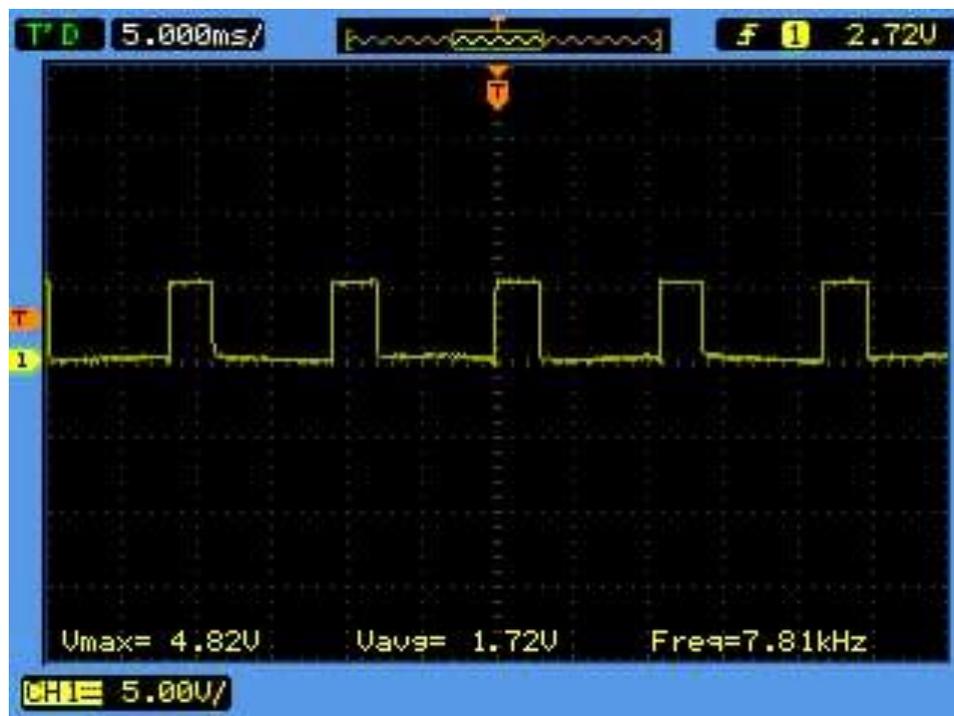
Por meio das Figuras 46 a 50, é possível observar que o sinal de PWM foi gerado de acordo com o *duty cycle* configurado pelos respectivos valores digitais recebidos pelo Arduino escravo, ajustados no Arduino mestre pelo potenciômetro conectado à entrada analógica A0. Portanto, a tensão média na saída analógica A3 do Arduino escravo corresponde à tensão aplicada na entrada analógica A0 do Arduino mestre.

Figura 46- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 0%



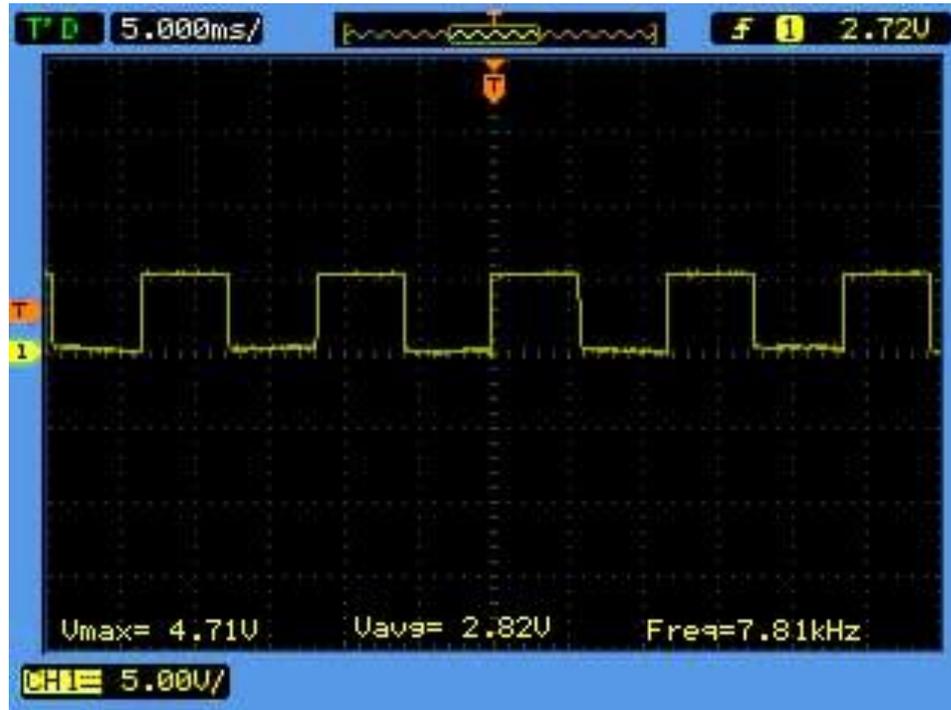
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 47- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 25%



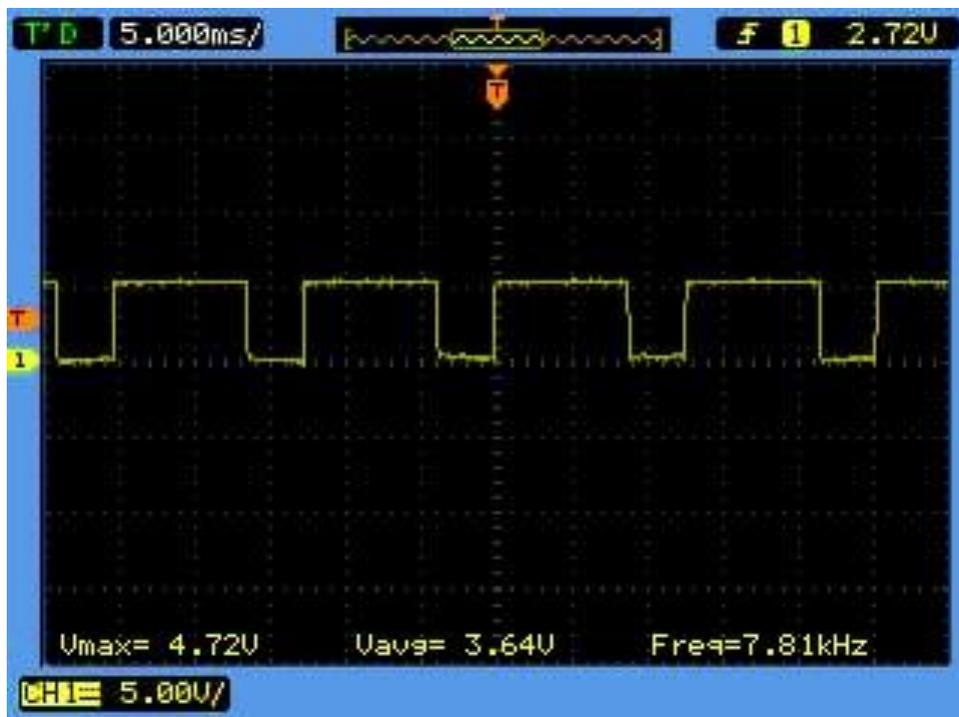
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 48- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 50%



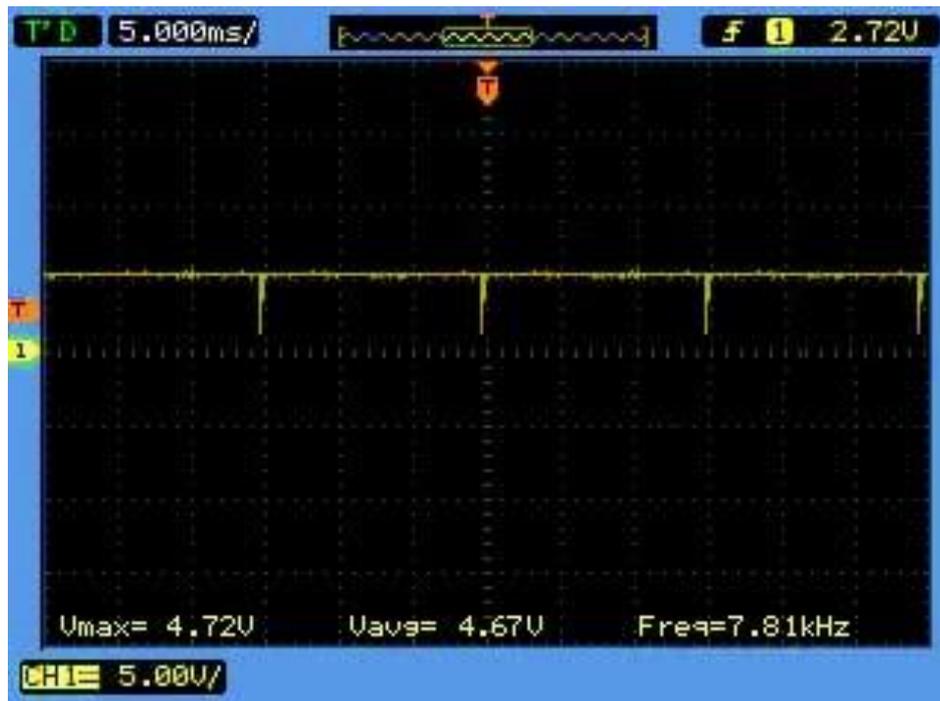
Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 49- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 75%



Fonte: Acervo da autora (2018).

Figura 50- Sinal de PWM gerado para duty cycle de 100%



Fonte: Acervo da autora (2018).

4.6 Condicionamento do sinal de controle

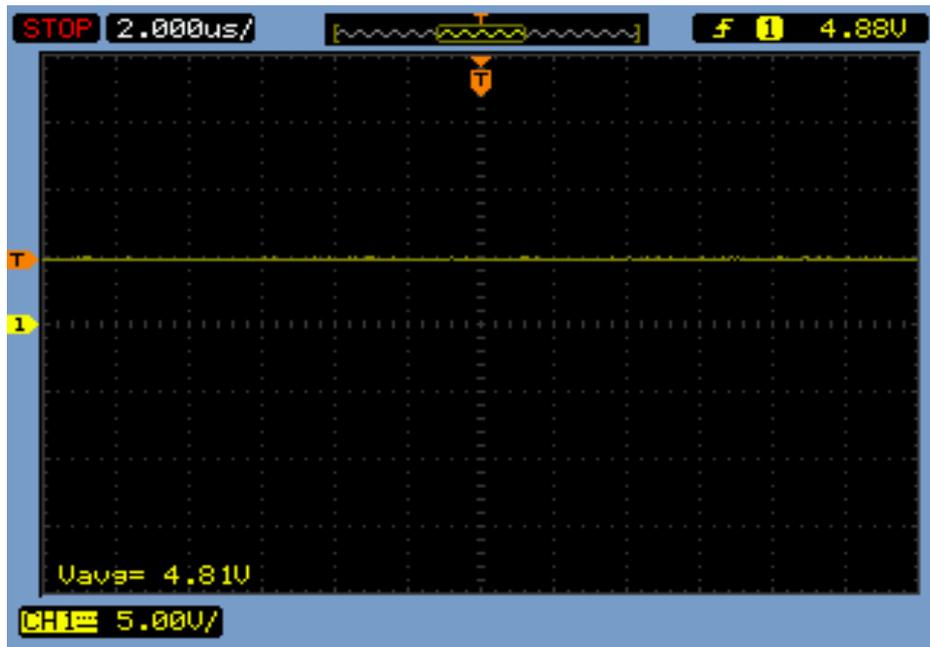
Nessa etapa, foi necessário modificar o sinal de PWM variável com tensão média máxima de 5V, obtido anteriormente, para um sinal de tensão contínua variável com amplitude máxima de 10V. Para isso, o sinal foi primeiramente filtrado para se obter tensão contínua com amplitude máxima de 5V. E, logo após, foi realizada a amplificação para um valor máximo de 10Vcc.

4.6.1 Sinal filtrado

O sinal obtido após a etapa de filtragem, saída do circuito RC, é apresentado na Figura 51.

Para o teste apresentado na Figura 51, foi aplicada tensão máxima de 5V no potenciômetro, configurando um *duty cycle* de 100% para o sinal de controle. Dessa forma, a tensão média obtida foi de 4,81V, cuja diferença em relação ao valor ideal ocorre devido às perdas e ruídos nos componentes eletrônicos, como citado anteriormente.

Figura 51- Sinal filtrado

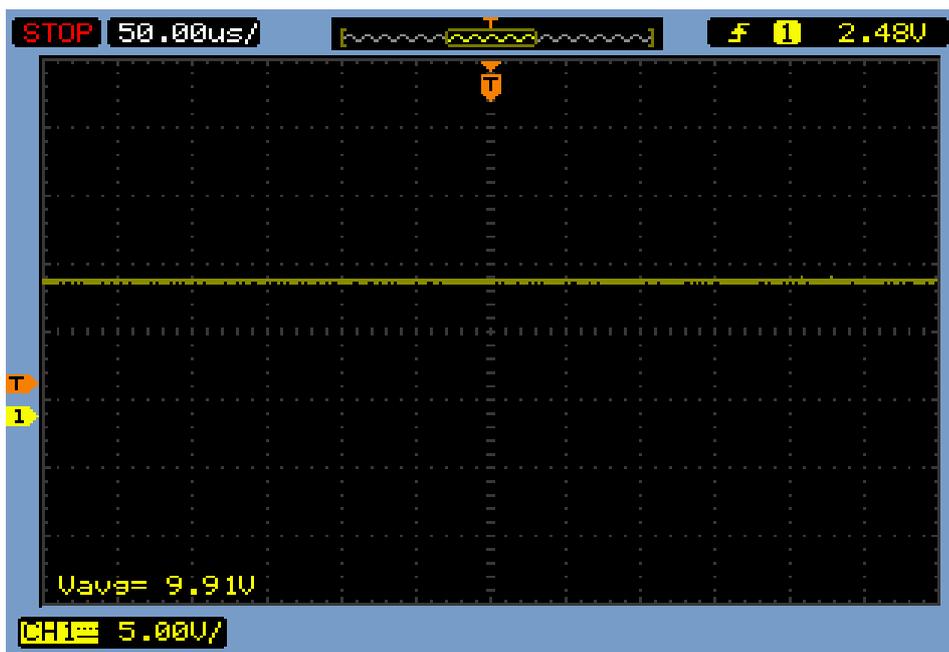


Fonte: Acervo da autora (2018).

4.6.2 Sinal amplificado

Após a filtragem, foi realizada a amplificação do sinal para a obtenção de um valor máximo de aproximadamente 10V. O sinal na saída do amplificador é apresentado na Figura 52.

Figura 52- Sinal amplificado



Fonte: Acervo da autora (2018).

Dessa forma, no último estágio, foi obtido um sinal máximo de 9,91Vcc na saída do circuito de condicionamento. Portanto, a implementação do circuito e a utilização dos módulos de comunicação permitiu variar a tensão analógica obtida na saída do circuito escravo, para ser aplicada na entrada analógica do inversor de frequência, de forma remota e sem fio, por meio do potenciômetro conectado ao circuito mestre, possibilitando o controle de velocidade do motor de indução sem a necessidade de estar presente no local onde se encontra a máquina.

4.7 Aplicação do sinal obtido para o controle da velocidade do motor de indução trifásico via entrada analógica do inversor de frequência

Finalmente, o sinal obtido na etapa descrita na seção 4.5.2 foi aplicado na entrada analógica do inversor de frequência, após realizar toda a parametrização citada na seção 3.1.7.

A montagem realizada é apresentada na Figura 53.

Figura 53- Aplicação do sinal de controle na entrada analógica do inversor de frequência



Fonte: Acervo da autora (2018).

Os testes foram realizados com o circuito mestre e o circuito escravo à distância de cerca de 2,5 m, de acordo com a Figura 54, pois foi verificado que para distâncias maiores a

comunicação entre os módulos não era realizada de forma eficiente, por meio do aparecimento de dados espúrios.

Figura 54- Testes realizados no sistema implementado



Fonte: Acervo da autora (2018).

4.8 Coleta de dados experimentais

Após realizar as ligações necessárias, o motor de indução trifásico foi acionado por meio do inversor de frequência já conectado ao circuito escravo através da sua entrada analógica. A velocidade do motor foi controlada pelo potenciômetro conectado ao circuito mestre. Os dados coletados durante os testes são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Dados coletados

V_{pot} [V]	V_{filtro} [V]	V_{ampop} [V]	V_{analog} [V]	n [rpm]
0,0003	0,043	0,093	0,097	100
1,019	1,029	2,039	2,033	100
2,12	2,172	4,32	4,19	100
2,78	2,83	5,60	5,34	482
3,08	3,06	6,06	6,00	953
3,50	3,57	7,08	6,30	1190
4,14	4,17	8,20	7,00	1200
4,62	4,63	9,07	8,16	1200
4,94	4,94	9,67	9,62	1200

Fonte: Acervo da Autora (2018).

Em que:

- V_{pot} é a tensão na saída do potenciômetro analógico;
- V_{filtro} é a tensão na saída do filtro;
- V_{ampop} é a tensão na saída do amplificador operacional;
- V_{analog} é a tensão na entrada analógica do inversor de frequência;
- n é a velocidade de giro do motor de indução trifásico, em [rpm].

É possível observar que um aumento na tensão de saída do potenciômetro analógico causa respectivo aumento na velocidade de giro do motor de indução trifásico. Pois, ao variar a tensão nos terminais do potenciômetro, o sinal aplicado na entrada analógica A0 do Arduino mestre se altera. Como os dados são compartilhados entre os módulos constantemente, conforme a taxa de transmissão, o sinal transmitido do módulo HC-05 para o módulo HC-06 também é modificado, fazendo com que o *duty cycle* obtido na saída analógica A3 do Arduino escravo seja configurado de acordo com os novos sinais recebidos pelo módulo HC-06. Dessa forma, após o condicionamento do sinal, a tensão contínua obtida, aplicada na entrada analógica do inversor de frequência, varia de acordo com a variação do potenciômetro, acarretando na alteração na velocidade de giro do motor de indução.

Nota-se que, mesmo após a etapa de filtragem, o nível do sinal praticamente não foi alterado, mantendo aproximadamente os mesmos valores apresentados na saída do

potenciômetro analógico. E, para todos os níveis de tensão CC, após a etapa de amplificação, a amplitude do sinal dobrou de valor, o qual foi recebido pela entrada analógica do inversor de frequência, com algumas perdas no sinal devido à queda de tensão nos cabos de ligação e componentes.

Para comparar os dados coletados, foi realizado um teste para observar a variação de velocidade com a alteração de tensão aplicada pelo próprio potenciômetro acoplado ao *kit* do inversor de frequência utilizado nos testes. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9- Testes realizados com o potenciômetro acoplado ao *kit* do inversor de frequência

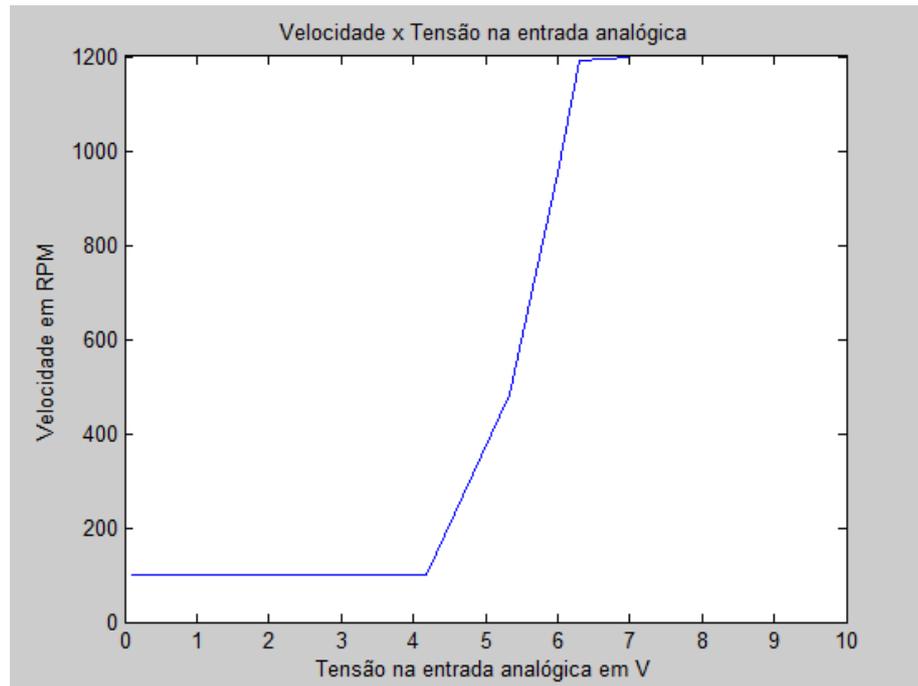
V_{analog} [V]	n [rpm]
1,40	100
2,80	100
4,90	182
5,30	448
5,75	787
6,3	1190
7	1200
8	1200
9	1200
10	1200

Fonte: Acervo da autora (2018).

Portanto, é possível analisar que os resultados apresentados na Tabela 2 estão de acordo com os dados exibidos na Tabela 3, o que comprova que o protótipo desenvolvido no trabalho funcionou conforme esperado, de maneira semelhante ao próprio circuito de controle acoplado ao *kit* do inversor de frequência.

O gráfico obtido para a variação da velocidade do motor de indução trifásico em função da variação da tensão aplicada na entrada analógica do inversor de frequência pelo protótipo desenvolvido é apresentado na Figura 55.

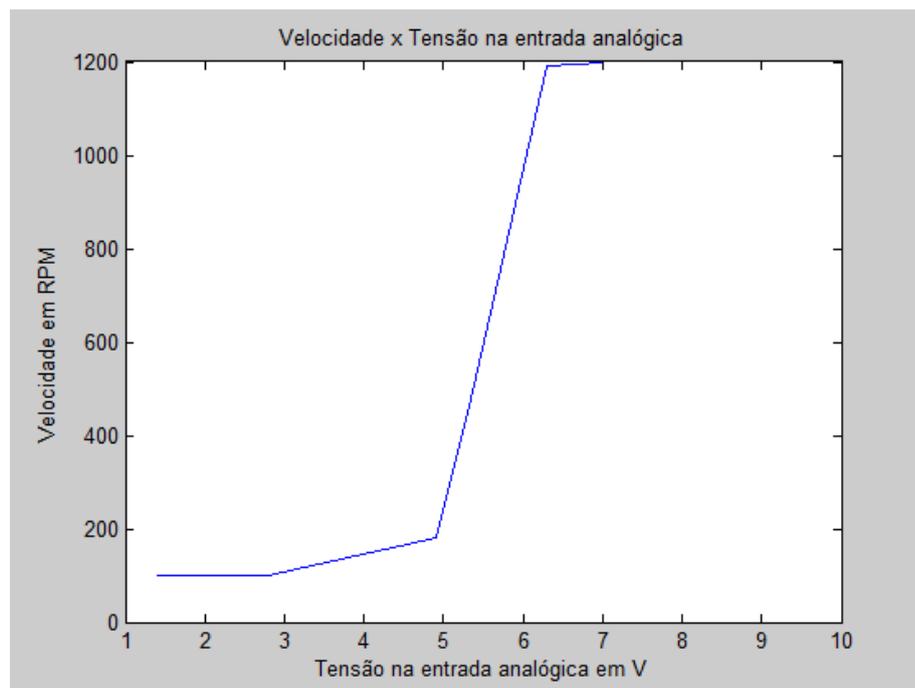
Figura 55- Gráfico de velocidade do MIT em função na tensão na entrada analógica do inversor



Fonte: Acervo da autora (2018).

O gráfico que relaciona a velocidade do motor de indução trifásico com a tensão na entrada analógica do inversor de frequência ao utilizar o potenciômetro acoplado ao *kit* utilizado nos testes é apresentado na Figura 56.

Figura 56- Gráfico obtido para o teste com o potenciômetro acoplado ao kit utilizado nos testes



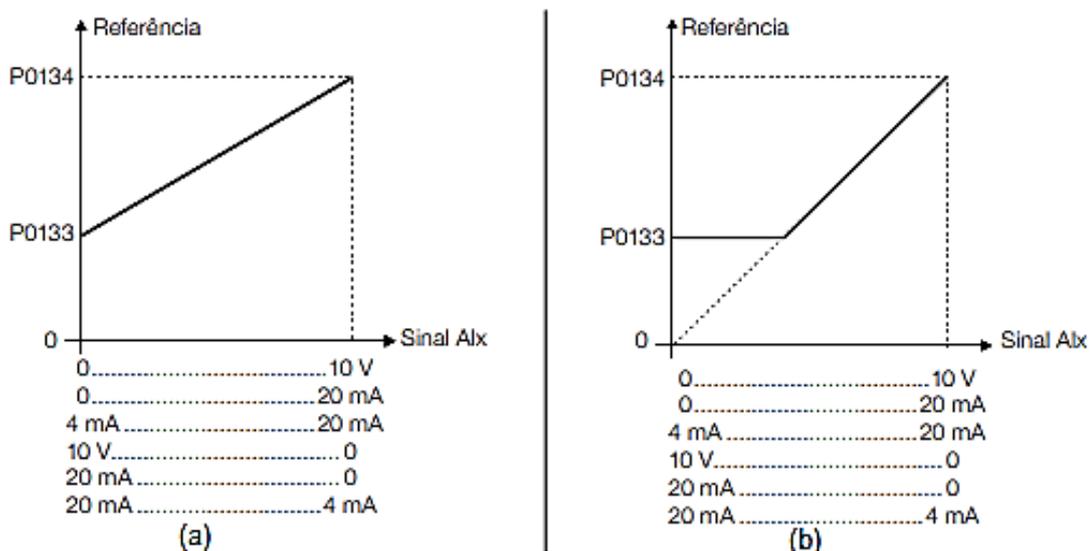
Fonte: Acervo da autora (2018).

Os gráficos obtidos nas Figuras 55 e 56 apresentam características semelhantes e os pontos em que o motor começa a acelerar e atinge a velocidade máxima são próximos, o que comprova que o circuito implementado no protótipo funcionou da mesma forma que o próprio circuito acoplado ao *kit* utilizado nos testes. A diferença observada no começo da aceleração, pode ser ocasionado erro de interpolação que é realizada para a construção da curva.

Dessa forma, por meio das Figuras 55 e 56 é possível observar que há uma faixa de operação em que o motor de indução trifásico permanece na velocidade mínima parametrizada, de 100 rpm. Isso ocorre devido a zona morta do inversor de frequência.

A zona morta é habilitada ou desabilitada por meio do parâmetro P0230 do inversor. Quando a zona morta está inativa (P0230=0), o motor começa a acelerar no instante em que o sinal da entrada analógica aplicado ao inversor começa a aumentar. Porém, quando a zona morta é ativa (P0230=1), o motor permanece girando em sua velocidade mínima, mesmo com a alteração do sinal aplicado na entrada analógica do inversor, como pode ser observado na Figura 57.

Figura 57- (a) Zona morta inativa; (b) Zona morta ativa



Fonte: WEG (2011).

Por meio da comparação das Figuras 55 e 56 com a Figura 57, observa-se que para os testes realizados a zona morta do inversor de frequência estava ativa, pois os gráficos das Figuras 55 e 56 possuem comportamento semelhante ao gráfico apresentado na Figura 57 (b), retirado do manual de programação do inversor utilizado (WEG, 2011). Portanto, o motor se comportou conforme esperado ao ser controlado pelo sinal obtido no protótipo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo elaborado no presente trabalho mostrou a possibilidade de inovar em aplicações no setor industrial, pois permite agregar técnicas de baixo custo em aplicações indispensáveis em plantas automatizadas.

Além disso, é demonstrada a possibilidade de implementar o controle de velocidade do motor de indução rotor gaiola de esquilo, por meio de comunicação sem fio com a utilização de sistema embarcado. O que implica na possibilidade de controlar o processo por acesso remoto, sem a necessidade do operador estar próximo à máquina, proporcionando flexibilidade, comodidade e eficiência nas aplicações.

A aplicação com o módulo utilizado no projeto é de curto alcance, uma WPAM- *Wireless Personal Area Network* (Rede de área pessoal sem fios), com um alcance máximo observado em torno de 2,5m. Para uma aplicação num processo industrial real, o alcance deve ser um problema tratado, o que poderia ser solucionado por meio de módulos de comunicação que trabalham com as redes LPWANs (*Low Power Long Area Networks*), que operam com baixo consumo de energia e em áreas extensas.

É interessante ressaltar que, por meio da parametrização do inversor de frequência é possível limitar as condições de operação do motor, como a ativação da zona morta para o sinal de controle, configuração da velocidade máxima e mínima do motor, que podem ser ajustadas de acordo com a aplicação. A parametrização do inversor pode ser modificada conforme as exigências do processo, características nominais do motor utilizado, velocidade da carga acionada, torque resistente, entre outros.

Dessa forma, conclui-se que o presente trabalho atendeu aos objetivos propostos e que o protótipo desenvolvido pode ser empregado para realizar o controle da velocidade dos motores de indução trifásicos acionados por inversores de frequência, por meio de circuito microcontrolado e comunicação sem fio, desde que a aplicação obedeça aos limites operacionais dos componentes utilizados.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como forma de desenvolver a técnica abordada e ampliar as possibilidades de aplicação, as sugestões para continuidade da pesquisa são:

- Estudar as LPWANs para a implementação da técnica abordada, com a substituição dos módulos de comunicação por componentes mais eficientes, que possibilitem uma distância maior de comunicação;
- Construir uma estrutura física para a realização de testes em campo, com a finalidade de validar o protótipo em outros ambientes além de laboratórios de ensino;
- Substituir a fonte de alimentação utilizada na etapa de amplificação do projeto por uma bateria recarregável, para aumentar a flexibilidade do protótipo;
- Testar outras formas de controle por meio da modificação da parametrização do inversor de frequência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIAA OC ROCKETRY. *Datasheet Arduino Uno*. 2014. Disponível em: <<http://aiaacrocketry.org>>. Acesso em: 07 de outubro de 2018.

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. São Paulo. Prentice Hall. 2000.

ARAUJO, A. A.; SANTANA, L. F. M. **Plataforma Móvel com Detecção de Obstáculos**. Universidade de Brasília. 2015.

ARAUJO, H. A. B.; BRAGA, M. L. **Ensino de ciências da natureza e Arduino: Uma proposta de interface para facilitar práticas experimentais**. 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/325153063_Ensino_de_Ciencias_da_Natureza_e_Arduino_Uma_Proposta_de_Interface_Para_Facilitar_Praticas_Experimentais>. Acesso em: 13 de setembro de 2018.

ARDUINO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>>. Acesso em: 04 de outubro de 2018.

ATMEL. *Atmel 8-bit Microcontroller*. 2013.

AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. **Redes wifi na comunicação industrial**. 2017. Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/redes-wi-fi-na-automacao-industrial/>>. Acesso em: 16 de outubro de 2018.

BLUM, Jeremy. **Explorando o Arduino- Técnicas e Ferramentas Mágicas de Engenharia**. Alta Books. Rio de Janeiro. 2016.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8ª Ed. Pearson. Prentice Hall. São Paulo. 2004.

BRANQUINHO, O. C.; REGGIANI, N.; ANDREOLLO, A. G. **Redes de comunicação de dados sem fio – uma análise de desempenho**. 2005. Disponível em: <<http://www.homexpert.com.br/areaservada/wp-content/uploads/2011/06/Redes-de->

comunica%C3%A7%C3%A3o-sem-fio-Uma-an%C3%A1lise-de-desempenho.pdf >. Acesso em: 13 de setembro de 2018.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª Edição. Bookman. 2013.

ALEXANDER Charles K., SADIKU Matthew N.O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. Porto Alegre. 5ª Ed. 2013.

DO VAL, João Pedro Ribeiro. **Indústria 4.0 no Brasil: conheça a situação atual e perspectivas de futuro**. 2016. Disponível em: < <https://blog.geofusion.com.br/industria-40-brasil>>. Acesso em: 13 de setembro de 2018.

ESTES, Clark Adam. **Como começou essa história de transmitir informações sem fio**. 2018. Disponível em: <<https://gizmodo.uol.com.br/como-comecou-essa-historia-de-transmitir-informacoes-sem-fio/>>. Acesso em: 13 de setembro de 2018.

FITZGERALD, A. E., et al. **Máquinas elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6ª Edição. Bookman. 2006.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. 4ª Edição. São Paulo. Editora Érika, 2008. 250 p.

FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de frequência: Teoria e aplicações**. 2ª Edição. São Paulo. Editora Érika. 2009. 192p.

FRITZENLAB. **Criando uma saída analógica (0-5V) com Arduino**. Disponível em: < <https://fritzenlab.com.br/2016/01/criando-uma-saida-analogica-0-5v-com-arduino/>>. Acesso em: 14 de outubro de 2018.

GOOGLE ACADÊMICO. Disponível em: < <https://scholar.google.com.br/> >. Acesso em: 25 de novembro de 2018.

GUANGZHOU HC INFORMATION TECHNOLOGY CO. **HC-06 datasheet**. 2011. Disponível em: <<https://www.olimex.com/Products/Components/RF/BLUETOOTH-SERIAL-HC-06/resources/hc06.pdf>>. Acesso em: 04 de outubro de 2018.

GUEDES, Sersan D. **Projeto de Inversor Trifásico Aplicado ao Acionamento de Motor de Indução**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Rio de Janeiro. 2015.

LINOTUX. **Hc-03/05 Embedded Bluetooth Serial Communication Module. At Command Set**. 2011. Disponível em: <http://www.linotux.ch/arduino/Hc-0305_serial_module_AT_command_set_201104_revised.pdf>. Acesso em: 04 de outubro de 2018.

INFOWESTER. **Tecnologia Bluetooth: o que é e como funciona?** 2018. Disponível em: <<https://www.infowester.com/bluetooth.php>>. Acesso em: 20 de outubro de 2018.

ITEAD STUDIO. **HC-05 Bluetooth to Serial port module**. 2010. Disponível em: <<http://www.electronicaestudio.com/docs/istd016A.pdf>>. Acesso em: 10 de outubro de 2018.

JUNIOR, Celso Denardi. **Sistema de simulação de cargas mecânicas para motor de indução acionado por inversor de frequência**. Monografia (Engenharia Industrial Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do paraná. Curitiba. 2013.

LIMA, Débora, et al.. **Smart Box**. Monografia (Curso Técnico em Mecatrônica). São Paulo: São Caetano do Sul, 2014.

MAGNUS, Tiago. **Indústria 4.0: A Quarta Revolução Industrial**. 2018. Disponível em: <<https://transformacaodigital.com/industria-4-0/>>. Acesso em: 13 de setembro de 2018.

MCROBERTS, **Arduino Básico**. Novatec Editora Ltda. 2011.

PAIXÃO, Jaqueline P. **Controle de Velocidade de Motores Elétricos**. 2009. Disponível em: <<http://www.ct.utfpr.edu.br/deptos/ceaut/monografias/ControledeVelocidadedeMotoresEletricos.pdf>>. Acesso em: 21 de agosto de 2018.

PEIXOTO, T. M.; MACHADO, T.; CHAVES, L. J.; JULIO, E. P. **Sistemas embarcados: Explore sua criatividade construindo Hardware e Software**. 2012. Disponível em: <<http://www.lrc.ic.unicamp.br/~luciano/publications/smc12.pdf>>. Acesso em: 13 de setembro de 2018.

PEIXOTO, Thiago Moratori et al. **Sistemas embarcados: explore sua criatividade construindo Hardware e Software**. Simpósio Mineiro De Computação Da VII Escola Regional De Informática De Minas Gerais. Juiz de Fora. 2012.

PILON, Valcir Antonio. **Estudo para aplicação de redes sem fio no ambiente industrial**. Monografia (Especialização em Automação Industrial). Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. Curitiba. 2009.

PORTANTE, A. L. F.; FRESATTI, W. N. **Veículo controlado por Arduino através do sistema operacional Android**. Unipar. Paraná: Paranavaí. 2015.

REIS, Jucele. **Os motores de baixa tensão de alto rendimento no Brasil**. 2018 Disponível em: <http://www.arandanet.com.br/revista/em/materia/2018/05/20/moteres_de_baixa.html>. Acesso em: 12 de setembro de 2018.

RIEDEL, Nilson. **Circuitos Elétricos**. 8ª Ed. Pearson. São Paulo. 2008.

ROCHA, F. B., SILVA, R. S., AVELINO, A. M., COSTA, C. M. **Plataforma de Comunicação sem fio aplicada a sistemas de irrigação**. Rio Grande do Norte. Holos. 2014.

RODRIGUES et al., 2013. **Sistemas embarcados e sua aplicação na indústria**. *Workshop em sistemas e processos industriais*. Santa Cruz do Sul. 2013.

ROHDE & SCHWARZ. **Smart Factories and industrial IoT**. 2018. Disponível em: <https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/test-and-measurement/wireless-communication/iot-m2m/smart-factories/overview/smart-factories-overview_233886.html>. Acesso em: 16 de outubro de 2018.

SANTOS, Eduardo Aparecido José dos et al.. **Princípio de funcionamento de motores de indução trifásico.** Disponível em: <http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_13704maquinas_pyonto_pdf_MAQUINAS_PRONTO.pdf>. Acesso em: 04 de setembro de 2018.

SILVA, Davidson Felipe. **Sistema de Comunicação Bluetooth utilizando microcontrolador.** Monografia (Graduação em Engenharia da Computação). Pernambuco: Recife. 2009.

SIQUEIRA, Thiago Senador. **Bluetooth- Características, protocolo e funcionamento.** Universidade Estadual de Campinas. 2006.

STEFANUTO, Iago Muriel. **Evolução das redes sem fio: comparativo entre Wifi e Bluetooth.** Faculdade de tecnologia de Bauru. 2016.

TEIXEIRA, Ivair. **Interconexão sem fio de equipamentos usando microcontroladores: Aplicação na zootecnia de precisão.** Faculdade de Valinhos. 2005.

TEXAS INSTRUMENTS. **LMx53-N datasheet.** 2004. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>> Acesso em: 10 de outubro de 2018.

TT ELETRONICS. **Rotary potentiometer Model P160.** 2007. Disponível em: <<https://edoc.site/potenciometro-rotatorio-datasheet-pdf-free.html>>. Acesso em: 09 de outubro de 2018.

WEG. **Automação- Inversores de frequência.** 2014. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-inversores-de-frequencia-10525554-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 22 de agosto de 2018.

WEG. **Inversor de frequência CFW-11:** manual do usuário. Documento: 10000062964/03. 2016.

WEG. **Manual do inversor de frequência CFW-11.** Manual do usuário. Documento 10000062964/03. 2008.

WEG. **Inversor de frequência CFW-11**: manual de programação e manutenção. Documento: 10000796176/01. 2011.

WIKIEAM. **O que há de errado com a comunicação industrial?** 2018. Disponível em <<http://wikieam.com/br/o-que-ha-de-errado-com-a-comunicacao-industrial/>>. Acesso em: 16 de setembro de 2018.

ANEXO I

```
//Trabalho de Conclusão de Curso
//SISTEMA EMBARCADO COM COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA CONTROLE ANALÓGICO DA
VELOCIDADE DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ACIONADO
//POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA
//Aluna: Thuanny Reis Neves
//Orientadora: Ana Paula Lima dos Santos
//Código embarcado no Arduino trabalhando em modo mestre

#include <SoftwareSerial.h>
//Define os pinos para a serial
SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX
// --- Variáveis Globais ---
int adc = 0;
byte aux;
void setup()
{
  //Inicializa a serial nas portas 10 e 11
  mySerial.begin(38400);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  adc = analogRead(A0); //A variável recebe a grandeza analógica da entrada A0 e converte em
valores de 0 a 1023
  adc = map(adc,0,1023,1,100); //O valor recebido é convertido de 0 a 1023 para 1 a 100
  aux=adc;
  Serial.println(aux); //Plota no monitor serial o valor enviado pelo Arduino mestre
  delay(2000);
  mySerial.write(aux); //Envia o valor da variável aux do Arduino mestre para o escravo
}
```

ANEXO II

```

//Trabalho de Conclusão de Curso

//SISTEMA EMBARCADO COM COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA CONTROLE ANALÓGICO DA
VELOCIDADE DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ACIONADO

//POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

//Aluna: Thuanny Reis Neves

//Orientadora: Ana Paula Lima dos Santos

//Código embarcado no Arduino trabalhando em modo escravo

int recebe;

void setDuty_pin03(float value); //Seleciona o duty cycle na saída digital 3
void setFrequency(char option); //Seleciona a frequência de operação do PWM
void setup()
{
    //Define o pino 3 como saída
    pinMode(3, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);

    TCCR2A = 0xA3; //Configura operação em fast PWM, utilizando registradores OCR2x para
comparação

    //setFrequency(2); //Seleciona opção 2 para frequência PWM (aprox 7.8kHz)
}

void loop()
{
    setFrequency(2); //Seleciona a frequência de operação do PWM
    if(Serial.available())
    {
        recebe = Serial.read(); //Lendo o valor recebido pela porta serial
        setDuty_pin03(recebe); //Seleciona o duty cycle do PWM
        Serial.println(recebe); //Plotando no monitor serial os valores recebidos pelo Arduino slave
        delay(100);
    }
}

```

```
}  
//Função para definir o duty cycle do PWM  
void setDuty_pin03(float value)  
{  
    int duty;  
    value = value/100;  
    duty = (value * 256) - 1;  
    OCR2B = duty;  
} //end setDuty_pin3  
//Função para definir a frequência de operação do PWM  
void setFrequency(char option)  
{  
    /*  
    TABLE:  
    option frequency  
    1 62.5 kHz  
    2 7.81 kHz  
    3 1.95 kHz  
    4 976.56 Hz  
    5 488.28 Hz  
    6 244.14 Hz  
    7 61.03 Hz  
    */  
    TCCR2B = option;  
} //end setFrequency
```

ANEXO III

```
//Trabalho de Conclusão de Curso
//SISTEMA EMBARCADO COM COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA CONTROLE ANALÓGICO DA
VELOCIDADE DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ACIONADO
//POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA
//Aluna: Thuanny Reis Neves
//Orientadora: Ana Paula Lima dos Santos
//Código utilizado para realizar o pareamento dos módulos HC-05 e HC-06

//Carregando a biblioteca SoftwareSerial
#include <SoftwareSerial.h>
//Definindo os pinos para a serial
SoftwareSerial mySerial(10, 11); //Configurando a serial nas portas 10 e 11
String command = "";
void setup()
{
  //Inicia a serial
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Digite os comandos AT :");
  mySerial.begin(38400);
}
void loop()
{
  if (mySerial.available())
  {
    while(mySerial.available())
    {
      command += (char)mySerial.read();
    }
    Serial.println(command);
    command = "";
  }
}
```

```
}  
  if (Serial.available())  
  {  
    delay(10);  
    mySerial.write(Serial.read());  
  }  
}
```