

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATEUS HENRIQUE ANASTACIO

**MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE MOTORES ATRAVÉS DE
ENCODER INCREMENTAL**

VIÇOSA
2017

MATEUS HENRIQUE ANASTACIO

**MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE MOTORES ATRAVÉS DE
ENCODER INCREMENTAL**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof. Dr. Kétia Soares Moreira

VIÇOSA
2017

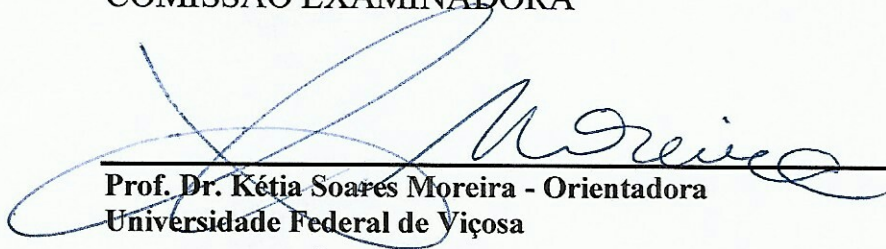
MATEUS HENRIQUE ANASTACIO

**MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE MOTORES ATRAVÉS DE
ENCODER INCREMENTAL**

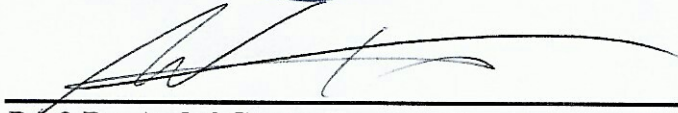
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de julho de 2017

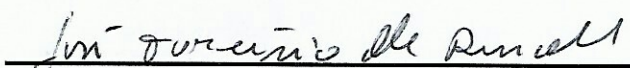
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Kétia Soares Moreira - Orientadora
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. André Gomes Torres - Coorientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

*"Fiquei sem meus peões, meu cavalo, minha torre, meu bispo...E até minha rainha...Mas
ainda é muito cedo para um XEQUE-MATE."
(Roy Mustang - FullMetal Alchemist)*

*Dedico a todos os meus amigos que estiveram comigo nesses mais de cinco anos
de jornada acadêmica*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, que me deu a oportunidade de viver cada momento desses últimos cinco anos. Um agradecimento especial a minha família e aos amigos por todo apoio. Agradeço a minha orientadora Kétia pela colaboração e o empenho. Por fim, um muito obrigado aos funcionários do Laboratório de Engenharia Elétrica (LEE) que tanto me auxiliaram para a realização desse trabalho.

Resumo

Após a Revolução Industrial, as tecnologias de produção passaram a se desenvolver com uma velocidade bem maior do que em períodos anteriores. Atualmente, todos os dias um produto novo é lançado e testado no mercado, que se aceita, em poucos anos pode se tornar uma febre mundial e ganhar milhares ou até milhões de consumidores. Assim, com essa possibilidade de que o lançamento de um produto possa gerar um grande impacto econômico, as empresas devem estar sempre preparadas para suprir o mercado consumidor, sempre buscando cada vez mais aumento da produtividade, da qualidade do produto e da padronização da produção. Entretanto para se chegar a esses objetivos, deve-se possuir o manejo total do processo de produção, e para isso certamente se faz necessário o controle e monitoramento de grandezas físicas dentro da planta industrial. A administração dessas grandezas permite segurança da produção, garante a qualidade do produto e ainda padroniza o método produtivo, o que possibilita que um mesmo bem em diversas partes do mundo possua as mesmas características ainda que sejam produzidos em lugares diferentes. Devido a esses inúmeros benefícios, a indústria investe cada vez mais em equipamentos como medidores, transdutores e controladores. E é através dos medidores que se conhece a fundo os eventos ocorridos durante o processo industrial, e é neste ponto que esse trabalho se torna importante. O trabalho propõe a construção de um protótipo de medidor de velocidade e sentido de rotação de motores elétricos, máquinas rotativas muito presentes no cenário fabril. O protótipo é simples e constituído de poucas peças de modo que ele se torne mais barato, e também flexível para adaptar-se futuramente a um possível trabalho de controle de velocidade, já que monitoramento e controle são duas ações que ocorrem simultaneamente. Para elaboração desse projeto, fez-se os experimentos no Laboratório de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa, onde foram usados: um motor, um sensor de velocidade, um inversor de frequência para

acionamento do motor, um microcontrolador para processamento dos dados, um computador para monitoramento das informações e um osciloscópio para estudo das características elétricas do protótipo. As medições executadas foram registradas e avaliadas com a finalidade de validação do trabalho proposto, no qual as primeiras medições de velocidade e sentido de rotação não foram satisfatórias devido às interferências elétricas internas. Então desenvolveu-se um filtro que eliminasse tais interferências para finalmente obter resultados mais precisos e confiáveis. Uma série de gráficos e testes foram elaborados de modo que pudéssemos atribuir ao medidor algumas características como classe de exatidão, faixa de medida, alcance, entre outros. Após o procedimento de avaliação dos dados, foi possível concluir que o medidor é capaz de oferecer resultados bastante confiáveis em relação a velocidade, porém ainda apresenta erro quanto ao sentido de rotação do motor.

Sumário

1 Introdução.....	12
1.1 Motores Elétricos	14
1.1.1 Motores de Indução.....	15
1.2 Instrumentação	18
1.2.1 Terminologia	19
1.2.2 Sensoriamento	20
1.2.3 Telemetria	20
1.2.4 Elemento Final de Controle	21
1.3 Objetivo Geral.....	21
2 Materiais e Métodos	22
2.1 Materiais	23
2.1.1 Motor de Indução	24
1.1.2 Inversor de Frequência.....	25
1.1.3 Encoder Incremental	28
1.1.4 Arduino	31
1.1.5 Computador.....	33
1.1.6 Osciloscópio.....	33
2.2 Métodos.....	33
3 Resultados e Discussões	41
Microprocessamento dos dados	41
Funções Pertinentes do Arduino	41
Plataforma de simulação	41
Validação do Protótipo	42
3.1 Medições sem Filtro.....	42
3.2 Medições com Filtro	46
4 Conclusões.....	53
Referências.....	55

Lista de Figuras

Figura 1 - Campos magnéticos do rotor e do estator (Chapman, 2013).....	16
Figura 2- Relação do torque com a velocidade no motor síncrono (Chapman, 2013).....	18
Figura 3 - Velocidade versus conjugado do motor de indução (Chapman, 2013).	18
Figura 4 - Processo de instrumentação.	19
Figura 5 - Diagrama de montagem do experimento.	23
Figura 6 - Montagem do experimento.	24
Figura 7 - Motor de indução trifásico utilizado.....	24
Figura 8 - Geração do sinal PWM no inversor de frequência.	26
Figura 9 - Circuito esquemático de um inversor de frequência (Filho, et al., 2010).....	26
Figura 10 - Inversor de frequência.	27
Figura 11 - Vista interna do sensor (Timóteo, 2013).	28
Figura 12 - Circuito gerador de impulsos (Timóteo, 2013).....	29
Figura 13 - Dispositivo de geração de pulsos do encoder (Timóteo, 2013).....	29
Figura 144 - Saídas A e B defasadas de 90° (Timóteo, 2013).	30
Figura 15 - Sensor de velocidade utilizado.	31
Figura 16 - Placa de desenvolvimento Arduino utilizada.....	33
Figura 17 - Sensor fixo ao eixo do motor.....	34
Figura 18 - Estrutura de programação.	35
Figura 19 - Vista interna do CI 7402 (Fairchild Semiconductor).....	38
Figura 20 - Composição do filtro.	39
Figura 21 - Fluxograma de montagem.	39
Figura 22 - Variação do erro sem filtragem de sinal.	43
Figura 23 - Onda gerada quando o rotor é girado manualmente.....	44
Figura 24 - Onda gerada quando o motor é acionado pelo inversor.	44
Figura 25 - Número de pulsos real e número de pulsos medidos.....	45
Figura 26 - Onda filtrada (superior) e onda não filtrada (inferior).....	46
Figura 27 - Onda duplamente filtrada e onda não filtrada.....	47
Figura 28 - Variação do erro com filtragem do sinal.	48
Figura 29 - Número de pulsos real e número de pulsos medidos com filtro.....	49
Figura 30 - Erro absoluto de cinco medições.	50
Figura 31 - Erro absoluto máximo.....	51
Figura 32 - Indicações errôneas de sentido de velocidade.	52

Lista de Tabelas

Tabela 1- Características do motor de indução.	25
Tabela 2 - Dados técnicos do inversor.	28
Tabela 3 - Especificações técnicas do encoder.....	30
Tabela 4 - Tabela verdade do latch NOR.	37

1 Introdução

Uma máquina elétrica é um dispositivo que pode converter tanto a energia mecânica em energia elétrica como a energia elétrica em energia mecânica. Quando converte energia mecânica em energia elétrica é denominada gerador, e quando converte a energia elétrica em energia mecânica, ela é denominada motor. Qualquer máquina elétrica é capaz de fazer ambas as conversões, logo elas podem funcionar como gerador ou como motor (Chapman, 2013).

Os motores elétricos estão muito presentes no cotidiano das pessoas, sendo possível encontrá-los em equipamentos elétricos em geral, nos carros, nas residências e também na indústria. Essas máquinas são basicamente compostas por uma armadura externa imóvel e um eixo interno móvel que geralmente é girante. São utilizados basicamente para movimentar objetos das mais variadas formas, seja através de esteiras, correias, rodas, polias, engrenagens ou ainda fazer a ventilação de ambientes. Assim, estão excessivamente presentes em processos industriais onde é absolutamente necessário controlar e manter constante algumas variáveis tais como: pressão, vazão, temperatura, nível, pH, velocidade e umidade.

Instrumentos de medição e controle permitem manter constante as variáveis do processo, objetivando melhoria em qualidade, o aumento da produtividade e a segurança (Gonçalves, 2003); obviamente o monitoramento e controle das grandezas das máquinas elétricas se faz necessário para alcançar esses objetivos. Entretanto, para isso é necessário primeiramente a aquisição de variáveis que ocorre através de sensores, “dispositivos responsáveis por “perceberem” o meio à sua volta; existe os mais variados tipos de sensores, podendo funcionar como chaves, dispositivos de acionamentos mecânicos ou até mesmo aqueles que convertem alguma grandeza física em uma grandeza elétrica. Os sensores captam a informação do meio e atuam através da ocorrência de um evento externo respondendo a um estímulo de maneira mensurável, de modo que seja executada alguma ação a partir da informação recebida” (Madeira, 2016).

A aquisição de dados de um sistema logicamente ocorre através de sensores, entretanto nem sempre é possível fazer o sensoriamento de um processo ou sistema. Porém, a partir do momento que se consegue fazer o acoplamento de um sensor a qualquer sistema, faz-se necessário o processamento de dados. O processamento é uma série de atividades que resultará em uma espécie de rearranjo de informações que passam por uma organização onde no final será transmitida para o usuário o dado pertinente a sua busca (Eliene, 2013). Esse procedimento

de aquisição, processamento e controle é definido como instrumentação, ciência que estuda dispositivos e técnicas de controle de processos com o objetivo de otimizar o desempenho da produção industrial, ou o aumento da segurança de equipamentos e pessoas (Ribeiro, 1999). Dentro da instrumentação vários outros mecanismos estão presentes até que a informação adquirida seja processada, alguns deles são transmissores, registradores, controladores, transdutores e indicadores; esses equipamentos se fazem necessários para que haja flexibilidade, facilidade, precisão e segurança no monitoramento e controle de processos industriais (Gonçalves, 2003).

No caso de processos executados com auxílio de motores, duas grandezas estão sempre presentes: a velocidade e o torque do motor. A velocidade representa o quão rápido o motor pode movimentar um objeto, enquanto o torque mostra o quanto de massa pode ser movido pelo eixo. As características de torque e velocidade depende muito do modelo do motor, já que podem ser lineares, de corrente contínua e também motores de corrente alternada síncronos ou assíncronos; todos apresentando características de velocidade e torque bastante peculiares o que faz certas atividades serem desenvolvidas por um modelo em particular (PAIXÃO, 2009). Devido a essa peculiaridade, o controle dessas duas grandezas varia bastante de motor para motor, logo, não é comum encontrar um método eficiente e universal de controle para todo tipo de motor (Toro, 1994). Por outro lado, o monitoramento dessas variáveis pode ser obtido de uma forma muito mais abrangente, por exemplo, para o monitoramento da velocidade de um eixo girante, existe um método praticamente universal para todos os motores.

No monitoramento da velocidade de um motor, o sensor utilizado pode ser o *encoder*, um tipo de sensor acoplado ao eixo da máquina. Se é possível o acoplamento do *encoder*, este permite a aquisição da velocidade em tempo real numa faixa suficientemente ampla, com excelente classe de exatidão e precisão (Timóteo, 2013). Esse tipo de sensor converte a variável velocidade em pulsos elétricos de forma que não é possível um usuário interpretá-los. A decodificação dos pulsos elétricos ocorre com o processamento dos dados, que neste caso pode ser feito por uma placa de desenvolvimento Arduino. O Arduino é um tipo de microcontrolador que consegue ler as saídas do sensor e interpretá-las facilmente. O microcontrolador também consegue se comunicar de forma simples com um computador, que faz o papel de registrador, indicador e interface homem-máquina.

1.1 Motores Elétricos

De fato, é quase impossível imaginar a vida sem as engenhocas elétricas que povoam a paisagem doméstica: liquidificadores, aspiradores, máquinas de lavar e secar, toca-discos, geladeiras, etc. Para além do restrito território de um apartamento, os elevadores são imprescindíveis, assim como os portões eletrônicos das garagens e as escadas rolantes de uma loja. Um pouco mais longe, nas indústrias, a evolução não foi muito diferente: para produzir todas essas máquinas, outros equipamentos foram criados. Embora enormes e muito diferentes em aparência de um pequeno secador de cabelos, por exemplo, a maioria deles utiliza o mesmo sistema básico de funcionamento: o de um motor elétrico. Ele transforma a energia elétrica em energia mecânica, como o girar das pás de um ventilador (Heymann, 1988).

Em 1820, o cientista dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) não imaginou que com uma singela experiência descobriria um princípio físico fundamental para o funcionamento desse tipo de motor. Oersted passou uma corrente elétrica, gerada por uma pilha, por um fio condutor e depois aproximou desse fio uma bússola; a agulha, que é um ímã (uma barra magnética), mexeu-se e alinhou-se perpendicularmente ao fio. Para o cientista, o fato só poderia dizer uma coisa: em volta do fio havia um campo magnético, que agiu sobre o outro campo, o da agulha.

Com isso, estabeleceu-se pela primeira vez a relação entre eletricidade e magnetismo. (Heymann, 1988).

Este é o princípio do funcionamento do motor elétrico. Para que o movimento aconteça, é preciso que haja uma interação entre os campos magnéticos do estator (parte fixa do sistema) e do rotor (parte móvel). Muitos cientistas participaram do aperfeiçoamento da tecnologia para o desenvolvimento do motor, como os físicos Michael Faraday (1791-1867) e André-Marie Ampere (1775-1836) (Heymann, 1988). “Mas foi só o físico e engenheiro croata Nikola Tesla que em 1883 apresentou o primeiro gerador de corrente alternada, cujos polos magnéticos se invertiam. A partir de então, era possível a geração de corrente alternada, no entanto essa inovação – que viria a ser a outra grande revolução na eletricidade – não causou o impacto esperado por Tesla na comunidade científica europeia da época. Isso obrigou o promissor engenheiro a procurar novas oportunidades nos Estados Unidos, onde vendeu os direitos de patente de suas invenções para o empresário George Westinghouse, dono de uma companhia elétrica que levava seu nome” (Heymann, 1988).

O sistema Tesla-Westinghouse, como viria a ser conhecido, foi utilizado pela primeira vez na iluminação da World's Columbian Exposition, uma feira montada em Chicago, em 1893, para celebrar o quarto centenário do descobrimento da América. O sucesso foi tanto que a companhia de Westinghouse acabou contratada meses depois para

instalar geradores elétricos pela primeira vez nas cataratas do Niágara. Depois da invenção da corrente alternada, muitos outros aperfeiçoamentos foram introduzidos nos motores elétricos. Por exemplo, em vez de apenas dois polos no estator, alguns novos motores têm uma sequência de vários ímãs muito próximos, o que aumenta a uniformidade do movimento. Em casos como o do toca-discos, o avanço melhora muito a qualidade do som. As pesquisas apontam agora para outra revolução: os supercondutores. Sem desperdiçar energia, esses fios de cerâmica tornariam os motores muito mais potentes. Mas isso faz parte do futuro. De qualquer forma, o princípio fundamental continua o mesmo – por sinal, algo muito simples, embora tenha modificado radicalmente a vida das pessoas (Heymann, 1988).

1.1.1 Motores de Indução

Ao longo do tempo, o aperfeiçoamento de novas tecnologias proporcionou uma variedade de modelos de motores elétricos, com diversos tamanhos, classes e características de funcionamento. Vale destacar os motores de corrente contínua e de corrente alternada síncronos e assíncronos, onde cada um desses possui características únicas que permitem a execução de tarefas específicas (Chapman, 2013).

Como motores muito comuns no meio industrial, existem os motores de indução, máquinas rotativas trifásicas e assíncronas que apresentam um campo girante no estator e outro no rotor gerado por indução magnética. O processo de indução é semelhante ao de um transformador, em que neste caso o estator funciona como primário e o rotor como secundário (A. E. Fitzgerald, 2006).

A alimentação trifásica nos enrolamentos de armadura produz um campo magnético B_s uniforme e girante no estator, enquanto a tensão induzida no rotor gera o campo B_R como ilustrado na Figura 1. Os campos giram com a chamada velocidade síncrona n_{sinc} , que está intimamente relacionada a frequência de alimentação do motor como pode ser observado na Equação 1.1 (Chapman, 2013).

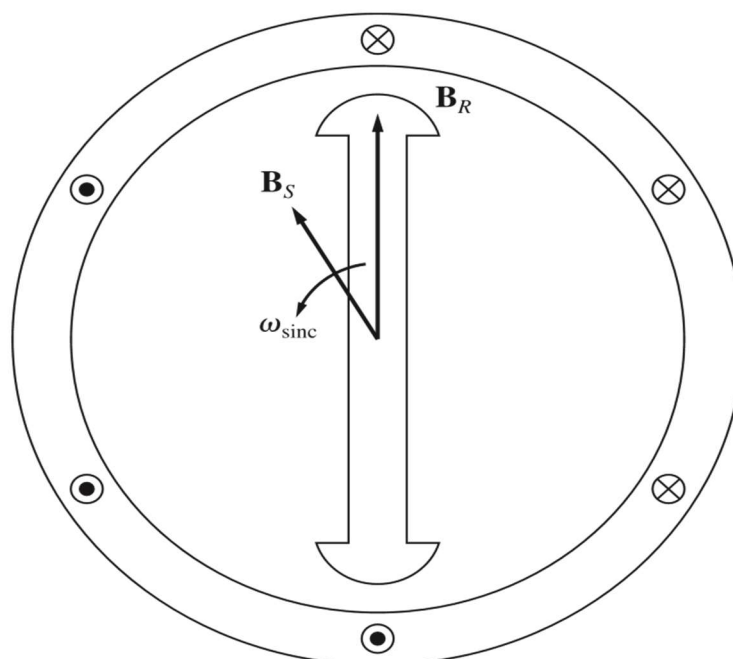


Figura 1 - Campos magnéticos do rotor e do estator (Chapman, 2013).

$$n_{sinc} = \frac{120f}{P} \quad (1.1)$$

n_{sinc} – velocidade do campo girante em rotações por minuto

f – frequência elétrica da alimentação em Hz

P – número de polos magnéticos da máquina

Os campos se interagem através de uma tentativa de alinhamento, exatamente como duas barras imantadas que se alinham quando colocadas próximas entre si. Assim, como B_S está girando, B_R também gira e com mesma velocidade, mas o eixo do motor se movimenta com velocidade diferente, pois para haver tensão induzida no rotor é necessária uma velocidade relativa entre o rotor e o campo girante do estator. Tal afirmação fica mais evidente através da Equação 1.2, que mostra que se o campo e o rotor estivessem na mesma velocidade, não haveria tensão induzida porque a velocidade relativa entre B_S e o eixo da máquina seria nula (Chapman, 2013).

$$e_{ind} = l(V \times B_s) \quad (1.2)$$

V – velocidade relativa entre o campo girante B_s e o rotor

e_{ind} – tensão induzida nos enrolamentos do rotor

l – comprimento do condutor

A necessidade dessa tensão induzida, parte do princípio que para a partida do motor é necessário um torque no eixo. Este torque é dado pela multiplicação de uma constante construtiva da máquina k com o produto vetorial entre a densidade de fluxo magnético do estator e do rotor como indicado na Equação 1.3. Logo, sem corrente circulando no rotor não surgiria B_R , e assim se B_R é zero não há torque e o eixo não se movimenta (Chapman, 2013).

$$\tau = k(B_s \times B_R) \quad (1.3)$$

A diferença entre a velocidade do campo girante e do eixo é dada por um fator chamado escorregamento s da máquina, ele representa o erro relativo entre a velocidade síncrona n_{sinc} e a velocidade do rotor n_m . O escorregamento é sempre menor que uma unidade no funcionamento do motor, sendo dado pela Equação 1.4. Enquanto a velocidade do rotor na máquina de indução está representada na Equação 1.5.

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad (1.4)$$

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad (1.5)$$

Como afirmado anteriormente, cada modelo de motor possui uma característica de funcionamento própria, por exemplo, na Figura 2 é observado a curva do torque com a velocidade de um motor síncrono cujo rotor se move na velocidade síncrona. Pela figura observa-se que não importa o torque induzido no eixo, o eixo se movimenta com mesma velocidade. Por outro lado na Figura 3, tem-se a mesma curva mas para o motor de indução trifásico, onde o torque varia de acordo a velocidade, sendo que se funcionando na velocidade síncrona, o torque é nulo.

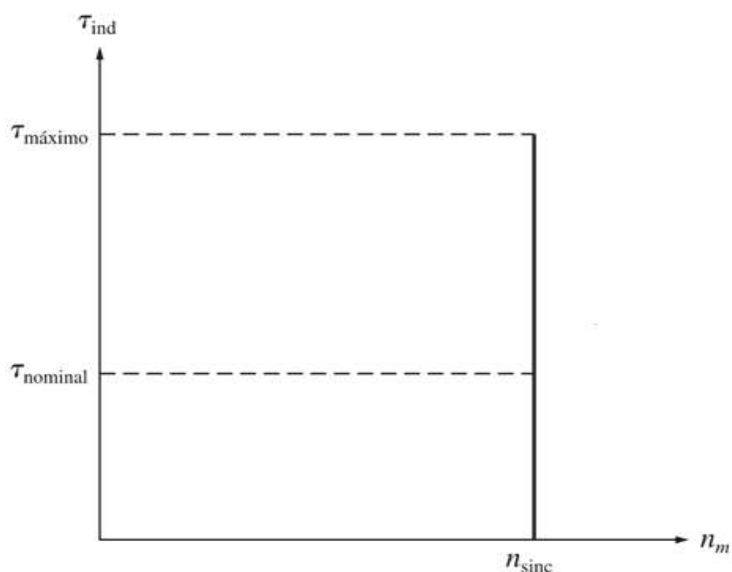


Figura 2- Relação do torque com a velocidade no motor síncrono (Chapman, 2013).

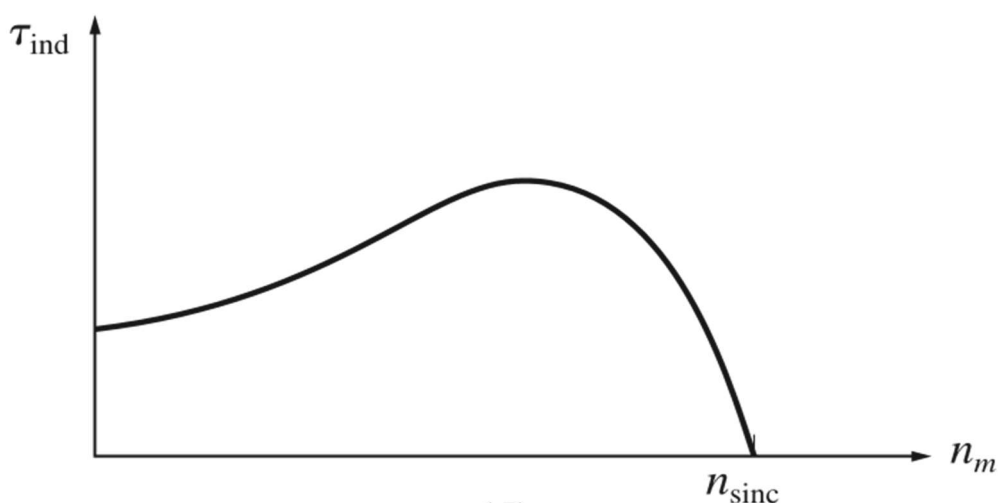


Figura 3 - Velocidade versus conjugado do motor de indução (Chapman, 2013).

1.2 Instrumentação

A instrumentação industrial é a ciência que desenvolve técnicas e aplicações para adequação de instrumentos de medição, transmissão, indicação, registro e controle de variáveis físicas em equipamentos nos processos. Inclui sensores primários, elementos finais de controle, dispositivos computacionais, dispositivos elétricos de alarme, chaves e botoeiras. Como mencionado anteriormente, a instrumentação industrial é de suma importância para a qualidade de produtos e aumento da produtividade, por exemplo, o refrigerante da Coca-Cola possui o mesmo sabor e valor nutricional em qualquer parte do mundo, mesmo sendo produzido por fábricas diferentes (Unip, s.d.).

Essa qualidade uniforme que o produto apresenta se deve principalmente a uma padronização e precisão dos instrumentos envolvidos na fabricação industrial da mercadoria. Em qualquer fábrica desse refrigerante pelo mundo a temperatura de preparado, as variáveis de pressão e nível dos tanques, a quantidade de ingredientes e vazão nos equipamentos será sempre a mesma, independente em qual fábrica o refrigerante for produzido (Unip, s.d.).

A instrumentação por completo pode ser observada no esquemático da Figura 4. Onde é mostrado do processo de aquisição de dados até o controle de variáveis.

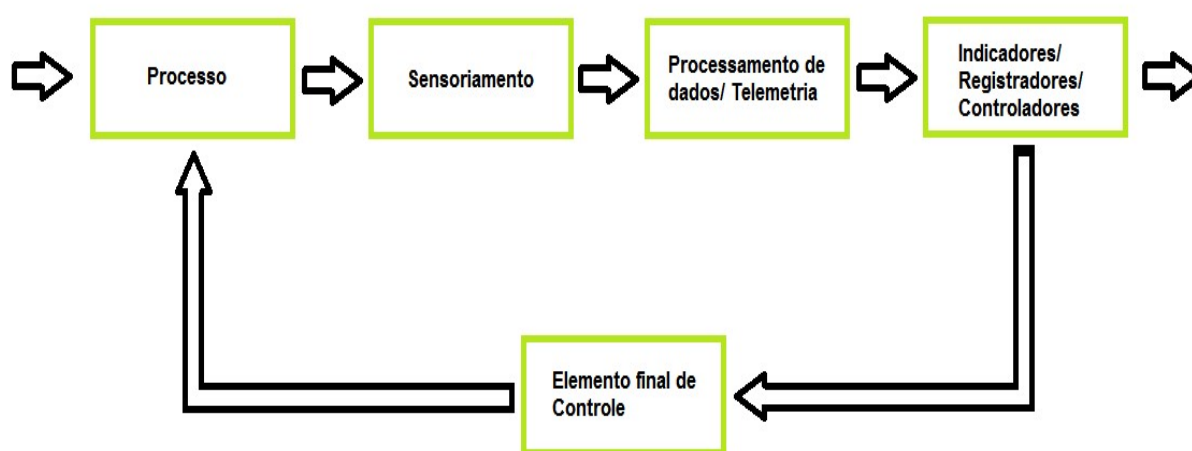


Figura 4 - Processo de instrumentação.

1.2.1 Terminologia

É uma parte da instrumentação que trata das características dos equipamentos usados para aquisição de dados de um processo (Gonçalves, 2003). As características desses instrumentos podem ser divididas como:

- **Faixa de medida:** Conjunto de valores da variável medida que estão compreendidos dentro do limite superior e inferior da capacidade de medida ou de transmissão do instrumento.
- **Alcance:** É a diferença algébrica entre o valor superior e o inferior da faixa de medida do instrumento.
- **Erro:** É a diferença entre o valor lido ou transmitido pelo instrumento em relação ao valor real da variável medida.

- **Classe de exatidão:** é a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro, ou seja, representa o erro máximo permitido pelo aparelho.
- **Sensibilidade:** é a mínima variação que a variável pode ter, provocando alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento.
- **Histerese:** é o erro máximo apresentado por um instrumento para um mesmo valor em qualquer ponto da faixa de trabalho, quando a variável percorre toda a escala nos sentidos ascendente e descendente.
- **Repetibilidade:** é a máxima diferença entre diversas medidas de um mesmo valor da variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação.
- **Discrepância:** representa a diferença medida por uma mesma grandeza.
- **Precisão:** indica o quanto várias medidas estão próximas umas das outras.
- **Resolução:** é a menor divisão na escala do instrumento.

A terminologia de um equipamento é de suma importância para que se consiga medir valores corretos com a precisão necessária para um determinado tipo de grandeza. Assim, observar todas essas características faz-se necessário para a escolha do melhor equipamento para monitoramento e controle de uma variável.

1.2.2 Sensoriamento

É a primeira etapa da instrumentação, onde estão presentes os mais diversos sensores para aquisição das mais variadas grandezas físicas. Os sensores são os elementos essenciais para aquisição de qualquer variável, assim antes da instalação desse equipamento num processo qualquer deve-se primeiramente descobrir se o sensor possui aquelas características da terminologia adequada para uma determinada atividade (Gonçalves, 2003). Vale lembrar que um sensor trabalhando fora das condições nominais implicam em erros e discrepâncias substanciais, levando a falta de confiabilidade do método de sensoriamento.

1.2.3 Telemetria

Chamamos de telemetria a técnica de transportar medições obtidas no processo a distância, em função de um instrumento transmissor. A telemetria ainda engloba o processamento de dados, porque ocorre a transmissão de dados úteis e na maioria das vezes os

sensores fornecem em sua saída informação bruta e sem utilidade imediata. Essa técnica se faz necessário porque muitas vezes os indicadores dos dados se apresentam muito distante do sensoriamento, assim a telemetria faz essa aproximação (Gonçalves, 2003). Isso permite fazer a observação e controle em lugares inóspito ou de acesso inviável.

Para haver essa conexão faz-se o uso de transmissores, equipamentos que transmitem a informação de um lugar para o outro. Essa transmissão apresenta três mecanismos importantes: o emissor, o canal e o receptor. Os emissores estão conectados a base de sensoriamento, enquanto os receptores estão em geral juntos aos indicadores e controladores. No mais, os métodos de transmissão se diferem significativamente apenas pelo canal, no qual é comum se encontrar transmissão analógica como a pneumática e eletrônica, e também existem as digitais que utilizam *Protocolo Hart*, *Fieldbus*, transmissão serial ou paralela (Gonçalves, 2003).

1.2.4 Elemento Final de Controle

Ele modifica diretamente o valor da variável manipulada de uma malha de controle pela comparação do valor medido com um valor de referência, de modo a minimizar o erro entre o valor desejado e o valor real (Gonçalves, 2003). Por exemplo: num controle de nível, o elemento de controle é uma válvula para entrada de líquido num tanque atuando com outra válvula para saída do líquido, as válvulas trabalham em conjunto para que o valor de referência seja obtido.

1.3 Objetivo Geral

Este trabalho visa a construção de um dispositivo de medição de velocidade e sentido de rotação de motores elétricos através de um sensor *encoder*, fazendo o processamento de dados através de uma placa de desenvolvimento Arduino e utiliza um computador para o monitoramento da variável. O dispositivo deve ser constituído de poucos equipamentos e de fácil conexão entre eles, criando maior praticidade, agilidade na montagem e respeitando as características de terminologia.

A meta também é ser flexível para adaptar-se futuramente como controlador de velocidade sem a necessidade de equipamentos extras, tornando-se um dispositivo de fácil construção, alta confiabilidade e baixo custo. Esse fator deseja estabelecer o projeto como tecnologia a ser aprimorada e adaptada a novos trabalhos.

2 *Materiais e Métodos*

Objetivando o monitoramento da velocidade de um motor usando um *encoder óptico incremental*, o primeiro passo foi definir uma sequência de tarefas para atacar o problema. Inicialmente, associou a velocidade de giro de um eixo com grandeza física mensurável que posteriormente foi convertida em um sinal elétrico para ser tratada computacionalmente. Para a realização desta tarefa, usou um transdutor conhecido como *encoder óptico incremental* que gera uma resposta em frequência como saída que tem relação com a velocidade do eixo acoplado a ele.

O segundo passo é tratar o sinal oriundo do *encoder* e condicioná-lo, ou seja, de alguma forma fazer com que esse sinal seja lido pelo Arduino. A implementação do algoritmo do circuito de monitoramento foi desenvolvida na Linguagem C de programação, por ser de mais simples entendimento. Para dar continuidade ao estudo das funções contidas dentro da placa de desenvolvimento, em especial o uso de temporizadores e interrupções, foi necessário confeccionar um fluxograma do problema com o intuito de simplificar a tarefa da implementação. Para a tarefa de temporização associa-se a interrupção externa aos pinos de entrada junto a um temporizador, para a leitura da resposta em frequência define-se uma função associada ao *clock* do microcontrolador.

A terceira etapa é compilar o código em um compilador de algoritmo em Linguagem C e em seguida imprimir em tela os dados desejados num monitor serial do próprio compilador. Como quarto passo, o teste de processamento da placa de desenvolvimento Arduino é indispensável para a validação do protótipo. Neste passo é desejável descobrir se o microcontrolador é capaz de fazer leituras dos dados previstos na primeira etapa, como mostrado na seção 2.2.

Com o resultado positivo, a quinta e última etapa é a montagem do modelo e a implementação do *software* desenvolvido.

2.1 Materiais

É válido lembrar que o modelo desenvolvido é um protótipo cuja ideia básica é adaptá-lo facilmente para qualquer máquina rotativa em que seja possível fazer o sensoriamento através do *encoder*. A Figura 5 mostra um diagrama que elucida o experimento realizado. Como pode ser observado foi utilizado um computador, uma placa de desenvolvimento Arduino, um motor, um inversor de frequência e um osciloscópio. As seções 2.1.1 até 2.1.6 explicam brevemente cada parte do diagrama. A Figura 6 mostra a montagem completa do experimento que foi realizado no Laboratório de Engenharia Elétrica (LEE), na sala 5 – Laboratório de Máquinas Elétricas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG.

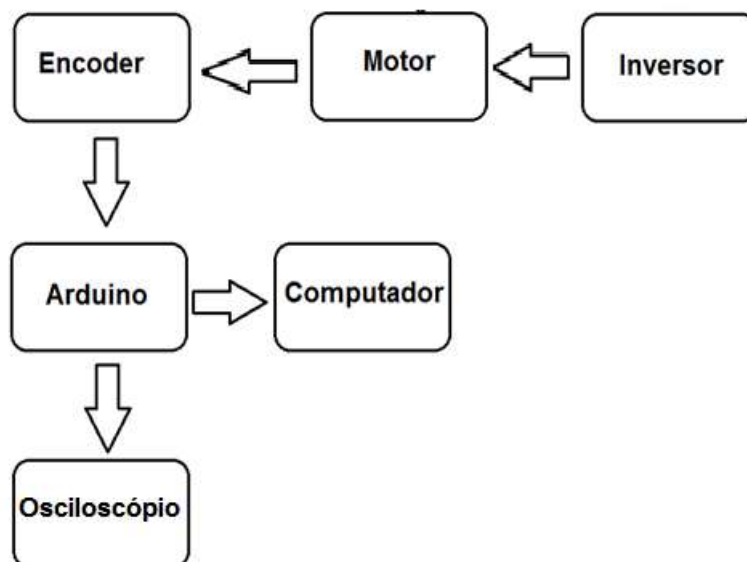


Figura 5 - Diagrama de montagem do experimento.

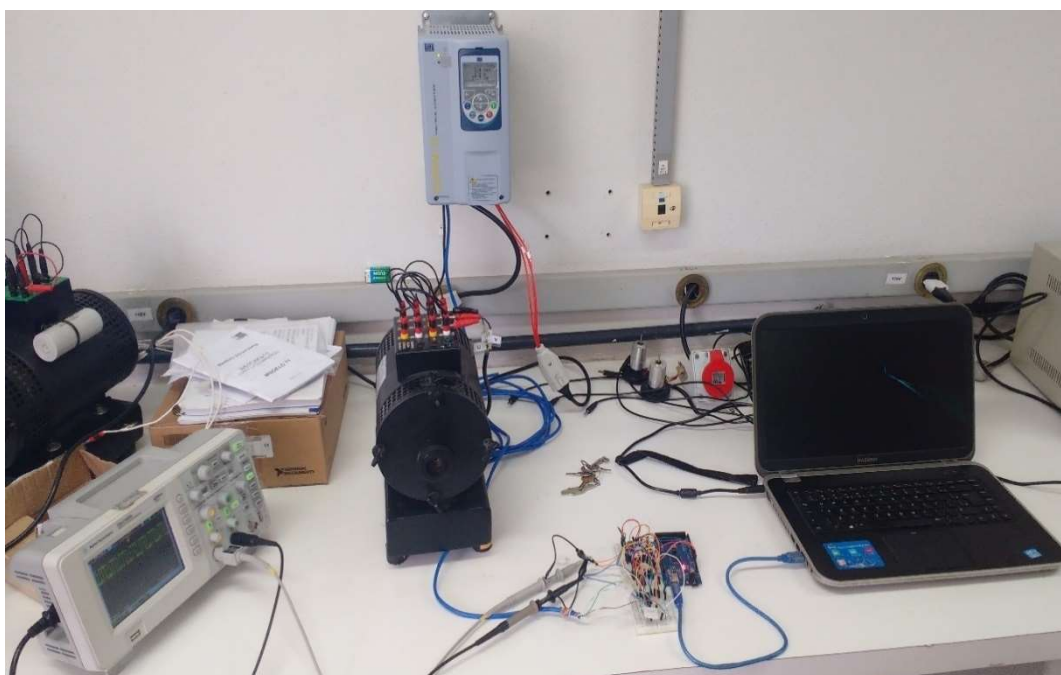


Figura 6 - Montagem do experimento.

2.1.1 Motor de Indução

Como máquina rotativa e sistema ao qual se deseja monitorar e controlar a velocidade fez-se o uso de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo. Esta é uma máquina assíncrona que possui suporte para o acoplamento do sensor óptico *encoder incremental*, analogamente qualquer máquina síncrona ou assíncrona ou de corrente contínua com tal capacidade poderia substituir o motor em questão, isso evidencia o quão universal é o sistema desenvolvido.



Figura 7 - Motor de indução trifásico utilizado.

Esse motor trifásico possui características que estão especificadas na Tabela 1.

Tabela 1- Características do motor de indução.

Fabricante	MOTRON
Tipo	Trifásico
Modelo	M 610-AC-1K7
Tensão	220 e 380 VAC
Polos	4
RPM	1700
Frequência	60 Hz
Potência	1 CV

A partir da Tabela 1 e da Equação 1.4 consegue-se verificar que o escorregamento s dessa máquina é 0,055, que representa um erro relativo entre a velocidade do campo girante e a velocidade do rotor nas condições nominais.

2.1.2 Inversor de Frequência

Para o acionamento do motor foi utilizado um inversor de frequência. O inversor de frequência é um equipamento capaz de variar a frequência de alimentação, sendo assim responsável pelo controle da velocidade do motor de acordo com a Equação 1.1.

O inversor de frequência é considerado um conversor de tensão CC em CA, onde ele opera com tensão e frequência variável para alimentar diferentes tipos de carga. A tensão CA trifásica é convertida em CC pelo retificador trifásico, daí a tensão CC passa por uma série de chaveamentos sincronizados executados por dispositivos semicondutores. Esse sincronismo de chaveamento é feito pelo controle por PWM (*Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso*), ou seja, a largura da onda define o tempo de chaveamento (Rashid, 1999).

A geração do PWM geralmente se faz comparando uma onda senoidal com uma onda dente-de-serra. No qual a largura do pulso de saída da lógica de controle é a mesma da parte inferior da dente-de-serra em relação a senoide (Rashid, 1999). A Figura 8 ilustra a geração de PWM a partir da comparação dessas duas ondas. É válido lembrar que existe diferentes tipos de geração de PWM ou mesmo lógicas de controle de inversores.

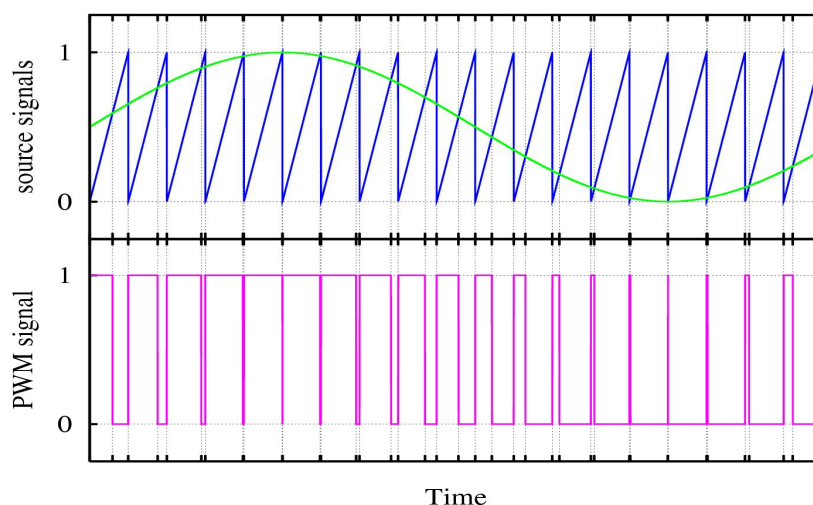


Figura 8 - Geração do sinal PWM no inversor de frequência.

A Figura 9 mostra o circuito completo do conversor, onde pode ser visto mais à esquerda o retificador trifásico e mais à direita o circuito de chaveamento onde é utilizado o dispositivo semicondutor IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor - Transistor Bipolar de Porta Isolada*). O IGBT possui uma porta chamada de *gate*, que opera como controle de chaveamento sendo acionada pelo sistema PWM (Rashid, 1999). Após essa sequência de chaveamentos, surgem três ondas defasadas de 120° no tempo, entretanto esta onda gerada não é uma senoide perfeita, apresentando uma série de componentes harmônicas e ruídos. Na figura ainda pode ser observado uma malha de controle responsável por minimizar o erro entre o valor desejado de velocidade e o valor medido (Filho, et al., 2010).

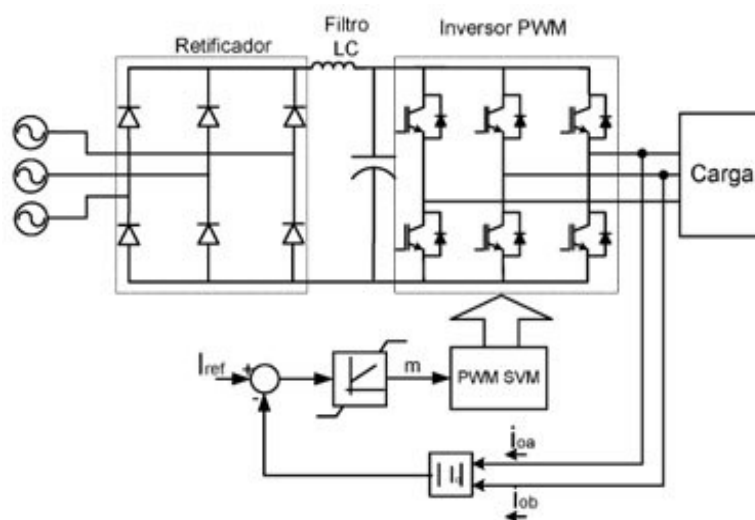


Figura 9 - Circuito esquemático de um inversor de frequência (Filho, et al., 2010).

No caso do experimento, o uso do inversor não serve apenas para o controle de velocidade, mas também para fazer a partida do motor. A corrente de partida de um motor de indução é extremamente elevada, o que gera sobrecorrente na rede de alimentação. Assim, utilizando o inversor este problema pode ser resolvido porque ele possui um circuito próprio de partida que inibe correntes elevadas.

O inversor utilizado é da marca WEG®, no qual neste caso não serviu apenas para o acionamento do motor, mas também de suporte para a alimentação do *encoder* através do módulo ENC1, que fornece além da alimentação, conectores para as saídas do sensor. A Figura 10 mostra o inversor utilizado no protótipo e a Tabela 2 suas especificações técnicas.



Figura 10 - Inversor de frequência.

Tabela 2 - Dados técnicos do inversor.

Marca	WEG
Modelo	CFW-11
Tecnologia de chaveamento	Vectrue
Tensão de entrada	200 a 480 V
Tensão de saída	0 a tensão de linha
Frequência de entrada	50-60 Hz
Frequência de saída	0 a 300 Hz

2.1.3 Encoder Incremental

O *encoder incremental* é um sensor que capta não só a velocidade, mas também é capaz de descobrir sentido de rotação e o posicionamento angular. É conhecido como codificador em quadratura ou codificador rotativo relativo, se tornando um dos mais simples sensores ópticos de posição conhecidos. Tem como saída uma série de impulsos de onda quadrada gerada por uma célula fotoelétrica que fica num espaço totalmente escuro. A célula é excitada pela luz gerada por um LED; essa luz atravessa um disco girante codificado com linhas transparentes ou com perfurações espaçadas uniformemente (Timóteo, 2013).

As partes construtivas do dispositivo podem ser observadas na Figura 11.



Figura 11 - Vista interna do sensor (Timóteo, 2013).

O *encoder* possui basicamente duas entradas, uma alimentação de 5V e um terra, de modo que o circuito é fechado apenas quando a célula está excitada pelo feixe de luz. Existe uma búscula Schmitt Trigger que converte os impulsos do fototransistor em ondas quadradas com amplitude de aproximadamente 5V, havendo geração de impulsos sempre que o feixe de luz incide sobre a célula, isto é, a célula conduz apenas na presença de luz (Timóteo, 2013). O circuito básico de geração de impulsos pode ser observado na Figura 12.

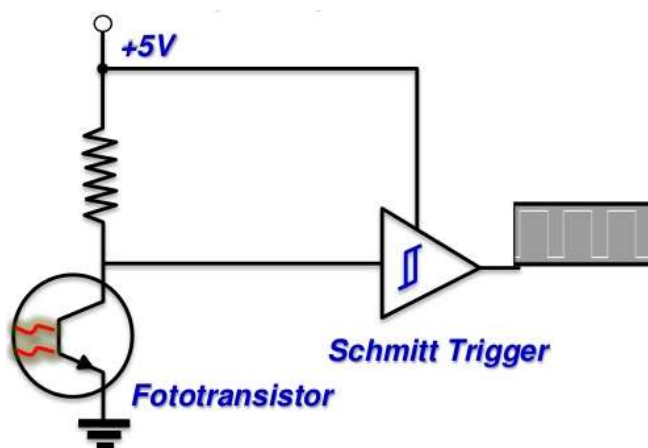


Figura 12 - Circuito gerador de impulsos (Timóteo, 2013).

Em relação ao disco, este gira com a mesma velocidade angular que o eixo do motor, logo em uma revolução do rotor haverá a incidência de um determinado número de feixes de luz sobre o dispositivo fotoelétrico. Esse número de impulsos é o mesmo que o número de orifícios ou linhas transparentes na superfície do disco, também chamado de resolução do *encoder*. Esse mecanismo é melhor observado na Figura 13.

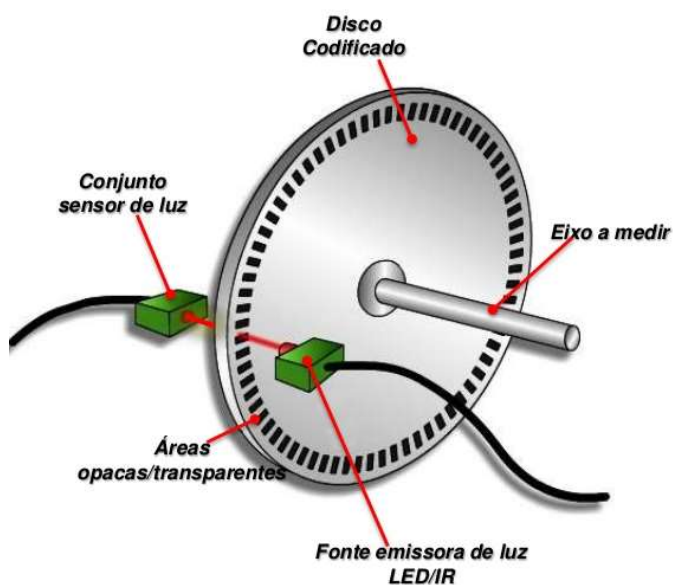


Figura 13 - Dispositivo de geração de pulsos do encoder (Timóteo, 2013).

No *encoder incremental*, há dois dispositivos de geração pulsos defasados de 90° , formando duas portas com sinais digitais A e B. Existem também uma porta digital NOT ligada a cada uma dessas saídas, formando mais dois sinais digitais opostos aos anteriores. Ainda há uma porta digital Z que funciona como referência angular 0° , assim surge um único pulso em Z por revolução do rotor no momento que a posição angular é 0° . Como nas anteriores, a saída Z também possui porta lógica NOT ligada, constituindo mais uma saída do sensor (Timóteo, 2013).

Tanto a saída A quanto a B podem servir para medição de velocidade, por isso a presença de ambas se deve ao desejo de descoberta de qual é o sentido de rotação. Se há mais pulsos em A do que em B, o sentido é horário, caso contrário o sentido de rotação é anti-horário. Isso pode ser verificado comparando o número de pulsos em cada saída, ou seja, se a porta A tiver um pulso a mais que B durante uma revolução então sentido é horário, por outro lado se B possuir um pulso a mais o sentido é anti-horário (Timóteo, 2013).

Na Figura 14 é possível ver duas ondas A e B defasadas de 90° que representam o modelo exato gerado nas saídas do *encoder*.

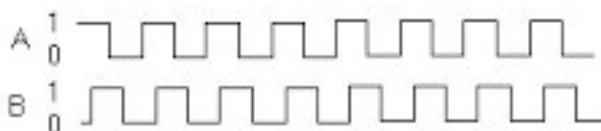


Figura 14 - Saídas A e B defasadas de 90° (Timóteo, 2013).

O sensor utilizado no experimento é da marca Hontko® com 1024 pulsos por rotação, isso significa uma resolução de $0,351^\circ$, isto é, a menor variação angular que pode ser captada pelo dispositivo. É uma resolução excelente para posicionamento e bastante sensível para qualquer movimento ocorrido no eixo do rotor. Na Figura 15, observa-se o sensor de velocidade utilizado e na Tabela 3 suas especificações técnicas.

Tabela 3 - Especificações técnicas do *encoder*.

Marca	Hontko
Modelo	HTR-W2
Tensão de entrada	5 V fixo ou 8-26 V variável
Resolução	1024 pulsos
Diâmetro externo	44 mm
Diâmetro do eixo	6 mm
Velocidade máxima	6000 rpm
Frequência máxima	10 KHz - 100 KHz



Figura 15 - Sensor de velocidade utilizado.

2.1.4 Arduino

A placa de desenvolvimento Arduino é um projeto que engloba *software* e *hardware* e tem como objetivo fornecer uma plataforma fácil para prototipação de projetos interativos, utilizando um microcontrolador. Esse tipo de placa faz parte do que é chamado de computação física: área da computação em que o *software* interage diretamente com o *hardware*, tornando possível integração com sensores, motores e outros dispositivos eletrônicos de baixa potência.

O Arduino compreende um *hardware* em uma placa que cabe na palma da mão, sendo assim um computador como qualquer outro. Possui microprocessador, memória RAM, memória *flash* (para gravar o *software*), temporizadores, contadores, dentre outras funcionalidades. A principal diferença entre um Arduino e um computador convencional é além da capacidade de processamento, o Arduino utiliza dispositivos diferentes para entrada e saída em geral. Por exemplo: em um PC são utilizados teclado e mouse como dispositivos de entrada e monitores e impressoras como dispositivos de saída; por outro lado o Arduino utiliza circuitos elétricos e eletrônicos em geral, motores e sensores (Justen, 2016).

As grandes vantagens do Arduino em relação a outros tipos de microcontroladores são *software*, *hardware* e documentação livre, isto é, o *software* é gratuito podendo-se fazer o *download* da interface de programação também de nome Arduino em diversos sites. O

hardware é especificado com uma série de periféricos adaptáveis para cada tipo de atividade e a documentação está disponível no site do fabricante para qualquer usuário, havendo tutoriais e métodos de programação (Justen, 2016). Outro ponto importante é a facilidade de programação em Linguagem C++, um tipo de linguagem bastante comum e de alto nível; também existe praticidade na conexão entre a placa e o computador via USB, sem necessidade de *drivers* ou conectores intermediários.

Há uma vasta gama de modelos de Arduino, sendo os principais: Uno, Mega, Mega 2560, Nano e Duemilanove. Todos possuem uma mesma base de programação, sendo a diferença principal a capacidade de processamento, o número de entradas e saídas e também algumas funcionalidades e suporte para periféricos que estão presentes em apenas alguns modelos.

O Arduino utilizado neste projeto é do modelo Mega 2560, uma das placas mais robustas em questão de processamento, funcionalidade e número de entradas e saídas. O Mega 2560 foi projetado para projetos mais complexos, compreendendo 54 pinos que funcionam como entradas ou saídas digitais, havendo 12 dessas com função PWM; há ainda 16 portas analógicas e outras entradas e saídas que servem de alimentação de dispositivos externos. Além disso possui um microcontrolador ATMEGA 2560 da Atmel® de 8 bits e um *clock* de 16 MHz, isto é, o microcontrolador é capaz de fazer leituras a cada 62,5 nanosegundos. Essas características tonam o Arduino Mega 2560 ideal para projetos de impressora 3D, manipuladores robóticos ou outras tarefas que necessitam de alta velocidade de processamento (ARDUINO & GENUINO, 2017).

A opção por essa placa não se deve a complexidade do experimento desenvolvido, mas sim pela disponibilidade da mesma. Porque no geral, foram usadas apenas as saídas de alimentação e duas portas digitais. A função do Arduino foi fazer a leitura dos pulsos enviados pelo sensor, fazer a contagem desses pulsos, transformá-los em velocidade e posteriormente enviar os dados para um computador. No mais ele fez o processamento de dados brutos e os transformou em informação útil.



Figura 16 - Placa de desenvolvimento Arduino utilizada.

2.1.5 Computador

Um computador foi utilizado para fazer a programação do Arduino e serviu como indicador para o monitoramento da velocidade do motor. Nele foi instalado o *software* de programação da placa de desenvolvimento diretamente conectado a mesma via USB.

2.1.6 Osciloscópio

O osciloscópio foi utilizado para monitoramento da onda quadrada enviada pelo *encoder*, de modo que fosse possível verificar possíveis distorções, amplitude e frequência. Os dados lidos pelo equipamento também serviram de base para aferição de valores medidos no processo de desenvolvimento do projeto.

2.2 Métodos

Todo projeto científico sério carece de um planejamento que visa prever futuros resultados e possíveis problemas que costumam surgir durante sua execução. Um desses problemas foram previstos na quarta etapa de planejamento, como descrito anteriormente. Nessa etapa deseja-se descobrir se o Arduino possui capacidade de processamento suficiente para compor o projeto, porque na etapa um, fazendo a associação entre a velocidade do motor e os pulsos gerados pelo sensor, previu-se uma resposta em frequência máxima de aproximadamente 35 KHz, estipulando uma velocidade de cerca de 2000 rpm para o motor. Para confirmar se microcontrolador seria capaz de fazer corretamente o processamento dos dados, seria necessário que o mesmo conseguisse fazer leituras numa taxa igual ou superior a 35 KHz. Assim, um teste foi feito com o auxílio de um gerador de sinais que emite uma onda

semelhante a resposta em frequência do *encoder*. Os resultados indicaram uma taxa de leitura de até 157 KHz, um valor mais que o suficiente para o desenvolvimento do projeto.

Com a confirmação das informações, a etapa de montagem e conexão dos materiais foi realizada. A montagem inicia-se com a fixação do sensor óptico ao eixo do motor de forma que a velocidade angular do disco interno do *encoder* seja a mesma do rotor. A fixação é mostrada na Figura 17.

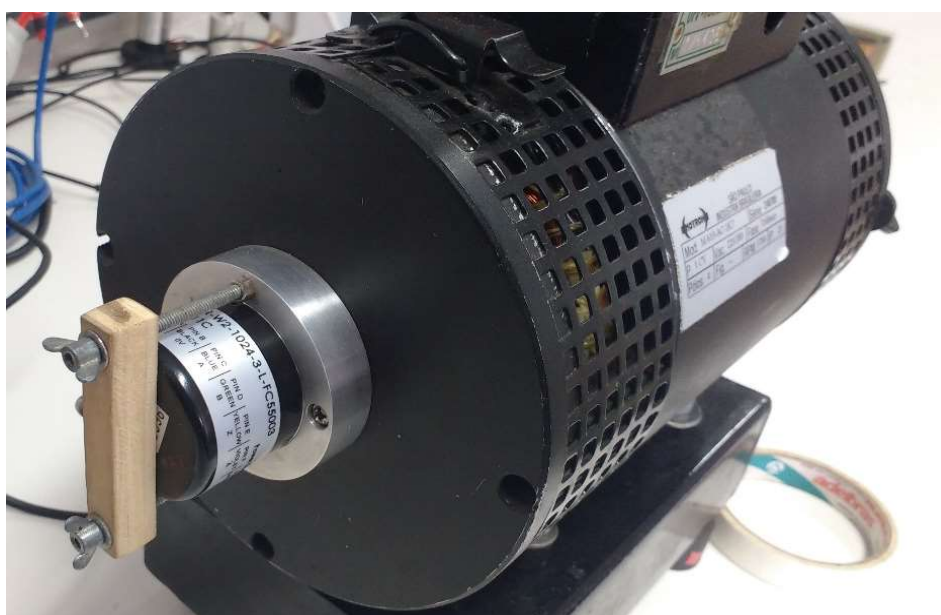


Figura 17 - Sensor fixo ao eixo do motor.

Com o acoplamento do sensor ao motor, já pode-se conectar as saídas do sensor aos bornes do adaptador ENC1 presente no inversor de frequência, o que permite que o próprio inversor faça tanto a alimentação trifásica do motor quanto a alimentação do *encoder*. A partir de então, *jumpers* foram colocados para ligar as saídas do *encoder* às entradas da placa Arduino.

Como descrito anteriormente, um *software* foi desenvolvido para fazer o processamento computacional dos sinais do sensor. A estratégia de programação se baseia em temporizadores e interrupções externas, de modo que o programa possa ser dividido em duas partes: estrutura base e *loop*. Essa divisão fica mais clara com a Figura 18.

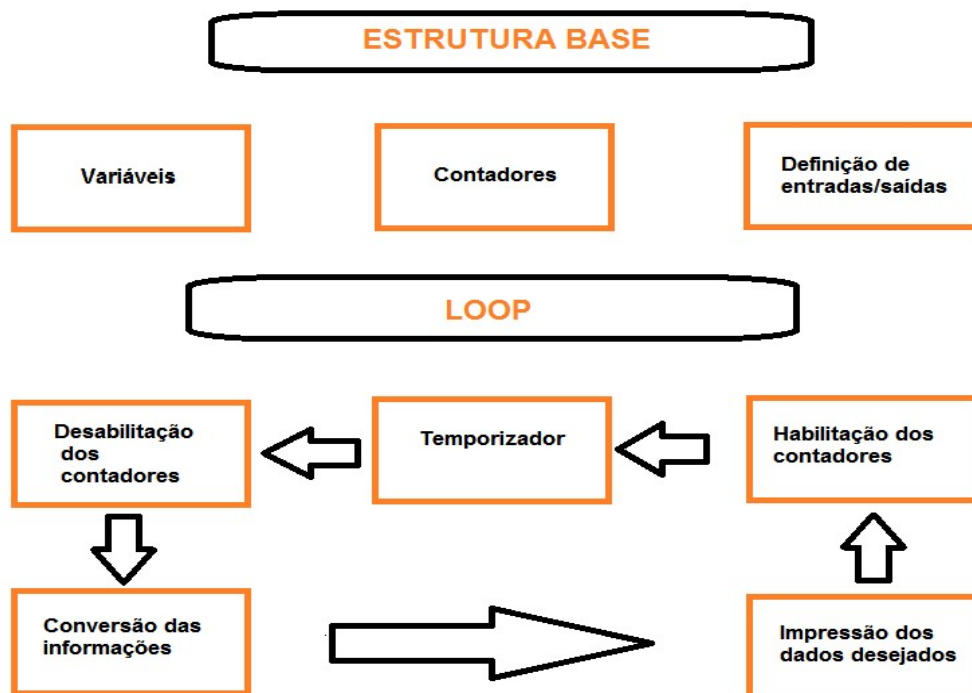


Figura 18 - Estrutura de programação.

Na estrutura base são nomeadas as variáveis de entrada e saída, implementada separadamente as funções de contagem dos pulsos A e B provenientes *encoder*, onde o processo de contagem ocorre através da leitura de bordas de descida no pino de entrada, que qualifica como borda de descida um sinal que se altera de 3,3 V para 1,5 V (Justen, 2016). Também são definidas as portas de entrada e saída do Arduino que são utilizadas no projeto, neste caso foram escolhidos os pinos digitais 2 (sinal A) e 3 (sinal B).

O *loop* é a função cíclica que se repete enquanto o microcontrolador estiver ligado, em que o período de um ciclo é definido pelo temporizador *millis* associado às interrupções externas *attachInterrupt* e *detachInterrupt*, que habilitam e desabilitam a função de contagem respectivamente.

O período estipulado para o *loop* foi de um segundo. Inicialmente, a contagem dos pulsos A e B está habilitada pela interrupção *attachInterrupt*, porém quando o temporizador bate um segundo, a contagem é desabilitada por *detachInterrupt*. A partir de então o processamento dos dados é feito e os pulsos são convertidos em velocidade através da Equação 2.1. Para análise do sentido de rotação do motor faz-se a comparação entre número de pulsos entre os sinais A e B, no qual o motor estará no sentido horário se o sinal A possuir mais pulsos

que B e no sentido anti-horário se o número de pulsos de B for maior que os de A (Timóteo, 2013). Já com as variáveis de interesse, a informação é enviada ao monitor serial do próprio compilador, onde a velocidade e o sentido de rotação são observados. Com isso a função *loop* é finalizada, a contagem é novamente habitada e o ciclo recomeça.

$$rpm = \frac{60p}{1024} \quad (2.1)$$

rpm – velocidade medida em rotações por minuto

p – número de pulsos contatos num intervalo de um segundo

1024 – resolução do *encoder incremental*

A montagem foi finalizada com a conexão do Arduino via USB ao computador, então o circuito foi ligado e os primeiros dados de medição puderam ser observados e comparados com valores indicados por um tacômetro. Contudo, os valores de velocidade medidos nem sequer chegaram perto do valor observado no tacômetro, apresentando valores seis, sete ou mesmo dez vezes mais que as medições do tacômetro.

Esses erros não haviam sido previstos, então não havia nenhuma ideia de onde seria a raiz do problema. O primeiro passo foi verificar a continuidade das conexões como também a montagem do circuito, mas nenhum erro significativo foi encontrado. Posteriormente, verificou-se a validade dos dados apresentados pelo programa através de uma análise do número de pulsos. O número de pulsos estava na mesma proporção das medições, apresentando valores até dez vezes maior do que o esperado, logo foi possível observar que o erro estava ocorrendo na função de contagem. Mas após uma análise profunda do programa, um novo teste de medição foi realizado, porém fazendo a rotação manual do eixo do motor. Nesse teste o monitor indicou uma velocidade pertinente ao valor esperado, o que desconsiderou o erro na estrutura interna do programa.

Novos testes foram realizados, um sendo com a rotação manual do eixo e o outro com o acionamento elétrico do motor. Todos os testes com partida manual tiveram resultados esperados, enquanto o outro mantinha a mesma discrepância nos dados, o que levou a concluir que a fonte de erro estava no acionamento elétrico do motor. Na busca de descobrir a fonte do problema, o osciloscópio foi colocado nas saídas do *encoder* para fazer o monitoramento das formas de onda, onde pôde ser observado de acordo com as imagens da seção 3.1 e 3.2, distorções quando inversor acionava o motor. Essa observação foi confirmada no próprio manual do usuário do equipamento que diz: “ inversores de frequência podem interferir em

outros equipamentos eletrônicos. ” O erro exageradamente alto, deve-se ao fato da ocorrência de ruído na onda quadrada que são interpretados como bordas de descida pelo microcontrolador, por isso o número de pulsos contados era muito superior ao real.

Na busca pela solução do problema, percebeu-se que sinais A e B observados no osciloscópio não sofriam com os mesmos ruídos simultaneamente, então era provável que as saídas opostas desses sinais também não sofriam as mesmas alterações, por exemplo, na influência de ruído se o sinal A é alto, não necessariamente NOT A seria baixo, o que evidencia que o ruído vigente não sofre inversão da porta lógica NOT, constituindo assim um sinal NOT A parcialmente independente do sinal A. Na ausência de ruído, os sinais NOT A e NOT B são totalmente dependentes de A e B, essa característica é importante para a criação de um mecanismo que diferencie o que é ruído e o que é um sinal limpo na saída do *encoder*.

A partir dessa característica, sabia-se que era possível a criação de um mecanismo que identificasse os verdadeiros sinais de saída do sensor e que esse mecanismo deveria trabalhar com A em conjunto com NOT A e B em conjunto com NOT B. A proposta era a construção de um filtro que eliminasse o ruído da onda quadrada, porém este filtro não poderia ser como os convencionais passa-faixa, passa-baixa ou passa-alta já que a resposta em frequência é variável, sem uma frequência de corte.

Como o sinal é digital, a primeira opção lembrada foi um filtro digital que trabalhe com duas entradas. O sistema digital mais simples certamente são as portas lógicas como AND, NOT ou OR, logo a ideia inicial foi a confecção de um filtro através de portas lógicas. Fazendo uma análise bibliográfica de configurações que possivelmente filtrariam o ruído, a primeira opção viável foi uma configuração de portas NOR. Essa configuração é denominada como *latch* NOR, que é um dispositivo de armazenamento temporário biestável, similar ao *flip-flop* porque pode permanecer em um dos dois estados estáveis usando uma configuração de realimentação, na qual as saídas são ligadas as entradas opostas (Tocci, 2011). A justificativa para a utilização desse sistema foi justamente sua tabela verdade que apresenta as características necessárias para eliminar os distúrbios ocorridos.

Tabela 4 - Tabela verdade do *latch* NOR.

A ou B	NOT A ou NOT B	Q	NOT Q
0	0	Não muda	Não muda
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	0	0

Como mencionado anteriormente, o ruído pode ser identificado quando o sinal A e NOT A ou B e NOT B não possuem níveis lógicos opostos. Observando a tabela verdade, há a ocorrência de ruído na configuração da linha um ou quatro e sinal limpo nas linhas dois e três. No caso da linha quatro, o *latch* NOR inibe que o ruído provoque erro de contagem, já que as saídas Q e NOT Q são de nível lógico baixo, em contrapartida um pulso é interpretado como a variação de nível alto para baixo. Assim uma das possibilidades de geração de erro já foi tratada com sucesso. Por outro lado, na linha um o sinal de saída é sequencial, ou seja, depende de uma ação anterior, mas mesmo assim existem apenas duas possibilidades: sinal alto ou baixo na saída. Ainda na configuração da linha um, admitindo-se a saída utilizada Q com sinal baixo, ocorre o mesmo caso que anterior, em que não existe possibilidade de borda de descida já que o sinal já está em baixo. Agora analisando que uma ação anterior provoque Q em alto, apenas há a possibilidade de contagem errônea de um pulso se houver a configuração da linha três ou quatro imediatamente depois. Essas sequências de configurações diminuem as possibilidades de ruído na entrada do microcontrolador.

Após a análise teórica do filtro, restou fazer a montagem física do mesmo para testar o funcionamento. O CI 7402 foi escolhido para funcionar como *latch* porque possuía um número mais que suficiente de portas lógicas NOR como ilustrado na Figura 19. Esse CI foi alimentado no pino VCC com tensão contínua de 5V proveniente da saída de alimentação do Arduino e o seu pino GND foi ligado ao GND do Arduino.

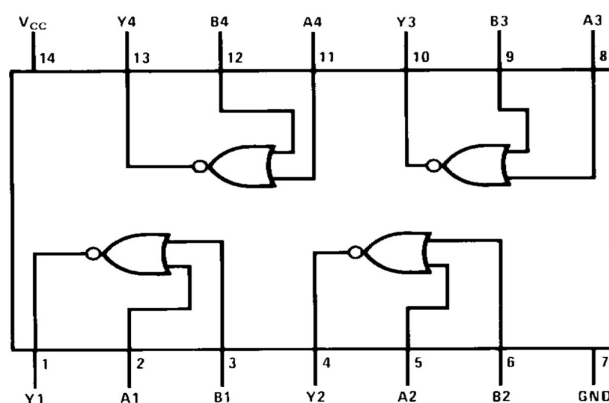


Figura 19 - Vista interna do CI 7402 (Fairchild Semiconductor).

Com a montagem do filtro era possível a análise da onda no osciloscópio, onde percebeu-se que ainda havia distorções visíveis que poderiam gerar contaminação da contagem (seção 3.1 e 3.2), logo, a ideia foi conectar mais um *latch* em cascata e observar novamente a forma de onda. Dessa vez o resultado gráfico foi expressivamente limpo de ruídos, com uma

forma muito semelhante da onda gerada com o acionamento manual do motor. Assim, o filtro escolhido foi composto por dois *latches* NOR em cascata como ilustrado na Figura 20, onde as entradas R e S são substituídas por A e NOT A ou B e NOT B, e a saída utilizada para contagem foi apenas a Q.

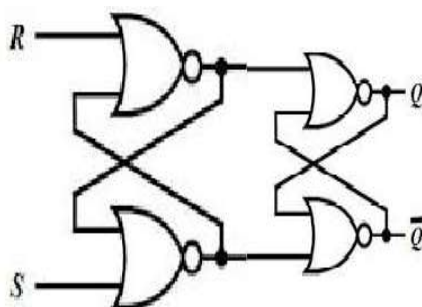


Figura 20 - Composição do filtro.

A Figura 21, mostra o esboço completo da montagem e o fluxo de informações que o ocorre durante o experimento.

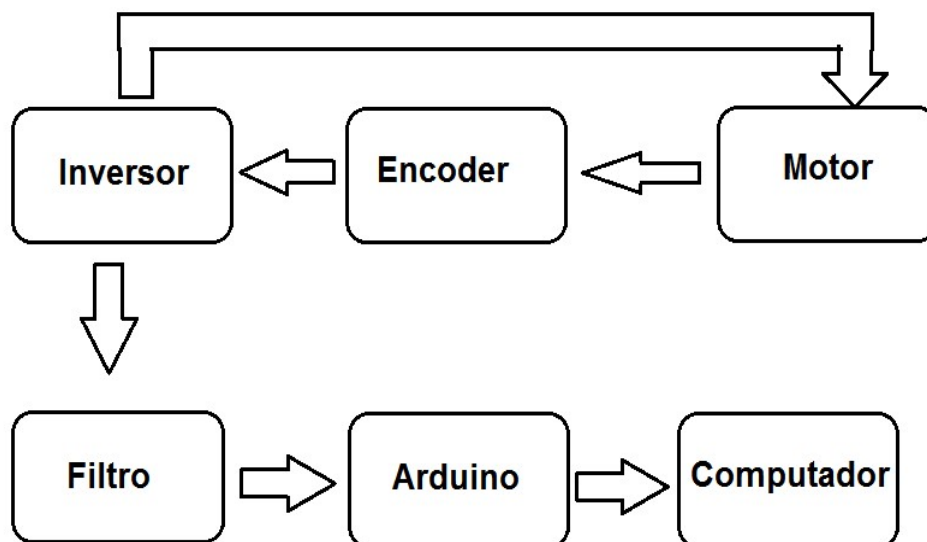


Figura 21 - Fluxograma de montagem.

Aqui está ilustrado o fluxo de informações da entrada a saída. No inversor de frequência ocorre a alimentação e o controle de velocidade do motor. Por este, a frequência é variada para que o motor trabalhe em diferentes velocidades. Com os giros do rotor, ocorre a geração de pulsos pelo *encoder* e estes pulsos por sua vez são enviados ao inversor e depois repassados ao

filtro. O filtro faz o corte de ruídos do sinal e envia um sinal limpo ao Arduino. Por fim, o Arduino faz o processamento dos dados recebidos e emite as informações desejadas ao computador onde elas podem ser lidas por um usuário.

Para qualificar melhor o protótipo foram feitas medições em ambos os sentidos de rotação e para diversas velocidades. Estas variavam de um valor mínimo de 90 rpm até 1800 rpm. No decorrer do experimento, várias medições foram incorporadas para descobrir características de exatidão, precisão e repetibilidade do instrumento projetado.

3 Resultados e Discussões

A primeira tarefa é de algum modo converter o movimento rotatório de uma peça em uma informação elétrica para ser processada e condicionada em informação útil pelo circuito de monitoramento. Para essa tarefa foi proposto a utilização de um *encoder óptico incremental* que, conforme explicado anteriormente, gera como saída um trem de pulsos digitais que fornecerá informação sobre velocidade rotatória da peça.

Devido à alta resolução desse transdutor pode-se obter leituras de velocidades muito baixas, ampliando a faixa de operação do tacômetro a ser desenvolvido. O nível CC de alimentação pode ser feito pelo módulo ENC1 do inversor, que é próprio para sensores como *encoder*, enquanto a placa Arduino é alimentada via USB pelo computador. A forma de onda e o nível de tensão do sinal de saída são análogos à pulsos digitais: ideais para serem lidos e microprocessados. Outro fato importante é que a resposta máxima do *encoder*, o trem de pulsos, respeita a capacidade de leitura do Arduino, em que o sinal alto do sensor está acima dos 3,3 V definidos como nível lógico 1 pelo microcontrolador e o sinal baixo está abaixo de 1,5 V definido como sinal lógico 0.

Microprocessamento dos dados

Funções pertinentes do Arduino

A segunda tarefa seria microprocessar o sinal oriundo do *encoder* e convertê-lo em informação a ser trabalhada através de programação em Linguagem C. O microcontrolador escolhido para rodar o *software* foi uma placa de desenvolvimento Arduino MEGA 2560. Que dentre suas inúmeras funções e periféricos, um importante recurso desse microchip são os suas interrupções externas *attachInterrupt* e *detachInterrupt* e seu temporizador *millis* com resolução de milissegundos.

Plataforma de simulação

O ambiente de simulação usado para compilação do algoritmo em Linguagem C em um código de máquina (sequência lógica de endereços de memória e instruções internas próprias do microcontrolador) foi o compilador Arduino 1.0.6 cuja licença é livre. Essa versão possui

todos os mecanismos necessário para desenvolvimento de projetos em Arduino, como configuração da ligação direta entre o computador e o monitor serial, menu de ajuda e programas pré-elaborados. É importante salientar que o compilador acusa erros de sintaxe dentro do código (erros de digitação ou uso incorreto de comandos), mas não identifica erros de semântica. Os erros de semântica são difíceis de identificar e dependem de conhecimentos profundos da linguagem de programação, do funcionamento dos periféricos internos do microcontrolador e da lógica do problema.

Validação do Protótipo

Enfim a última tarefa, fazer a montagem do protótipo como planejado e então testar seu funcionamento com base nos resultados. No primeiro teste do protótipo, obteve-se um sinal ruidoso como já explicitado. Para solucionar este problema um filtro foi usado como mostrou a seção 2.2. Assim, duas formas de medida foram feitas, a primeira sem o sinal do sensor filtrado e a segunda com o sinal filtrado. O objetivo do filtro não era só minimizar os erros, mas também descobrir o quão eficaz foi seu uso e quanto de interferência o inversor foi capaz de causar.

3.1 Medições sem filtro

Sem o uso do filtro digital, as saídas do *encoder* eram ligadas diretamente às entradas da placa de desenvolvimento e os resultados lidos no computador. A princípio as medições apresentaram um erro expressivamente alto, chegando a um máximo de aproximadamente 1400%, ou seja, 15 vezes o valor real para a velocidade de 90 rpm. Por outro lado, o erro caiu à medida que a velocidade crescia chegando a um valor mínimo de 400%. A provável diminuição do erro foi o fato da frequência máxima de leitura do Arduino (157 KHz) ter sido atingida como está na Figura 26, assim nem mesmo o ruído pôde ser lido.

O gráfico da Figura 22 esboça o erro relativo para as medições sem filtragem de sinal, mostrando a diminuição do erro à medida que a velocidade cresce.

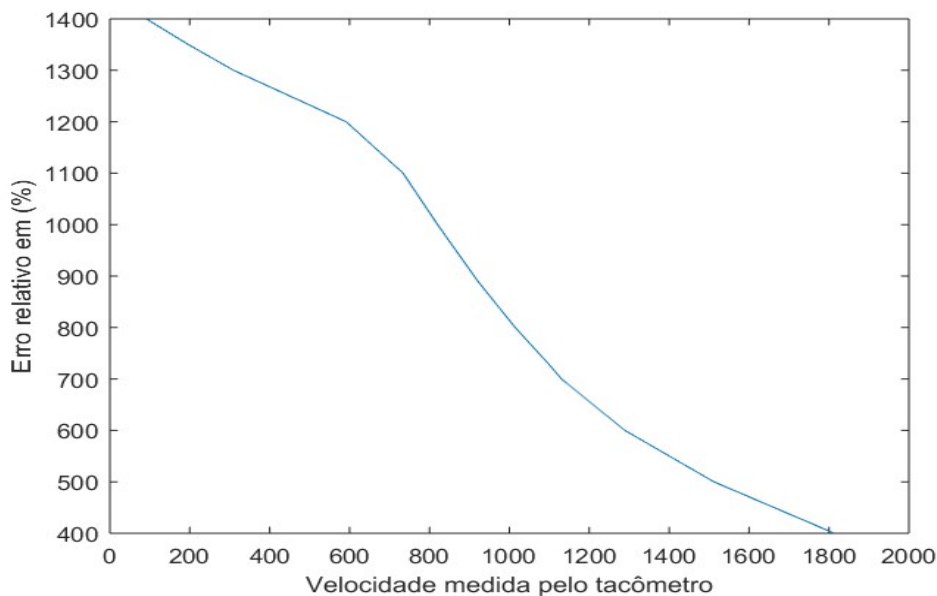


Figura 22 - Variação do erro sem filtragem de sinal.

O erro relativo presente na figura anterior foi calculado tomando como se a velocidade de um tacômetro fosse a real. Esse erro pode ser calculado pela Equação 3.1.

$$erro = \frac{valor\ real - valor\ medido}{valor\ real} * 100\% \quad (3.1)$$

Como pode ser observado na Figura 22, o erro apresentado é assustador de forma que não gera nenhuma confiabilidade ao instrumento de medição projetado. Durante o experimento a interrogação pertinente foi quem era a fonte do erro vigente, sendo a primeira opção o Arduino que não conseguiria fazer a contagem correta dos pulsos. Contudo, essa hipótese foi refutada pelo teste com gerador de onda quadrada que mostrava uma taxa máxima de até 157 KHz, que se convertido para velocidade de acordo com a Equação 2.1 se torna pouco mais 9000 rpm. Isto é, o Arduino é capaz de fazer leituras de motores com velocidade até este valor, que por sua vez é totalmente incoerente com a velocidade de trabalho apresentada durante o experimento.

Como dito anteriormente, através de uma série de testes verificou-se que a fonte do erro era o inversor de frequência que causava ruído na onda do *encoder*. A evidência que os ruídos eram gerados pelo inversor é observada na Figura 23 e 24, onde na primeira vemos a onda

gerada quando o rotor é girado manualmente, com o inversor desligado. Na Figura 24 tem-se a onda quando o motor está ligado e sendo alimentado pelo inversor de frequência.



Figura 23 - Onda gerada quando o rotor é girado manualmente.

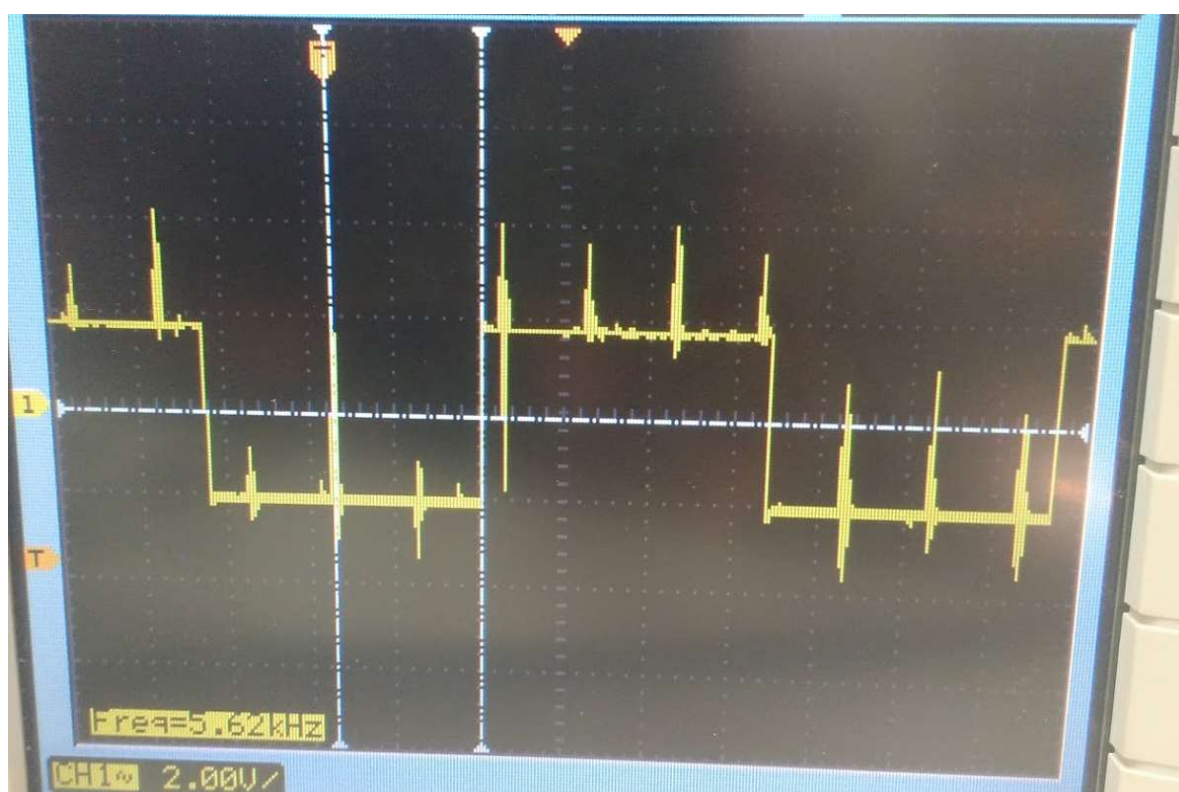


Figura 24 - Onda gerada quando o motor é acionado pelo inversor.

Pelas imagens anteriores percebe-se a filtragem do primeiro sinal, sem ruído e com forma de onda praticamente perfeita. No segundo sinal vê-se uma imensa quantidade de pequenos impulsos num mesmo comprimento de onda e é devido a estes impulsos que podemos justificar os elevados erros de medição. O Arduino faz a contagem de pulsos através de bordas de descida, que é caracterizada no microcontrolador como um sinal que altera de 3,3 V para 1,5 V, assim quando um ruído varia nesse intervalo um pulso é contado, o que acarreta um elevadíssimo valor medido de velocidade.

A Figura 25 consegue mostrar essa contagem errônea dos pulsos, onde na curva contínua o número de pulsos cresce linearmente a medida que a velocidade aumenta. Na curva pontilhada observa-se um crescimento linear elevado inicialmente até chegar próximo a capacidade máxima de contagem do microcontrolador, onde ocorre a estabilização dos pulsos. Essa estabilização justifica a decadência do erro presente na Figura 22 à medida que a velocidade cresce.

Com os dados apresentados é fácil afirmar que o método utilizado não apresenta nenhuma confiabilidade, fugindo totalmente do escopo de equipamento de medição, sem exatidão ou repetibilidade.

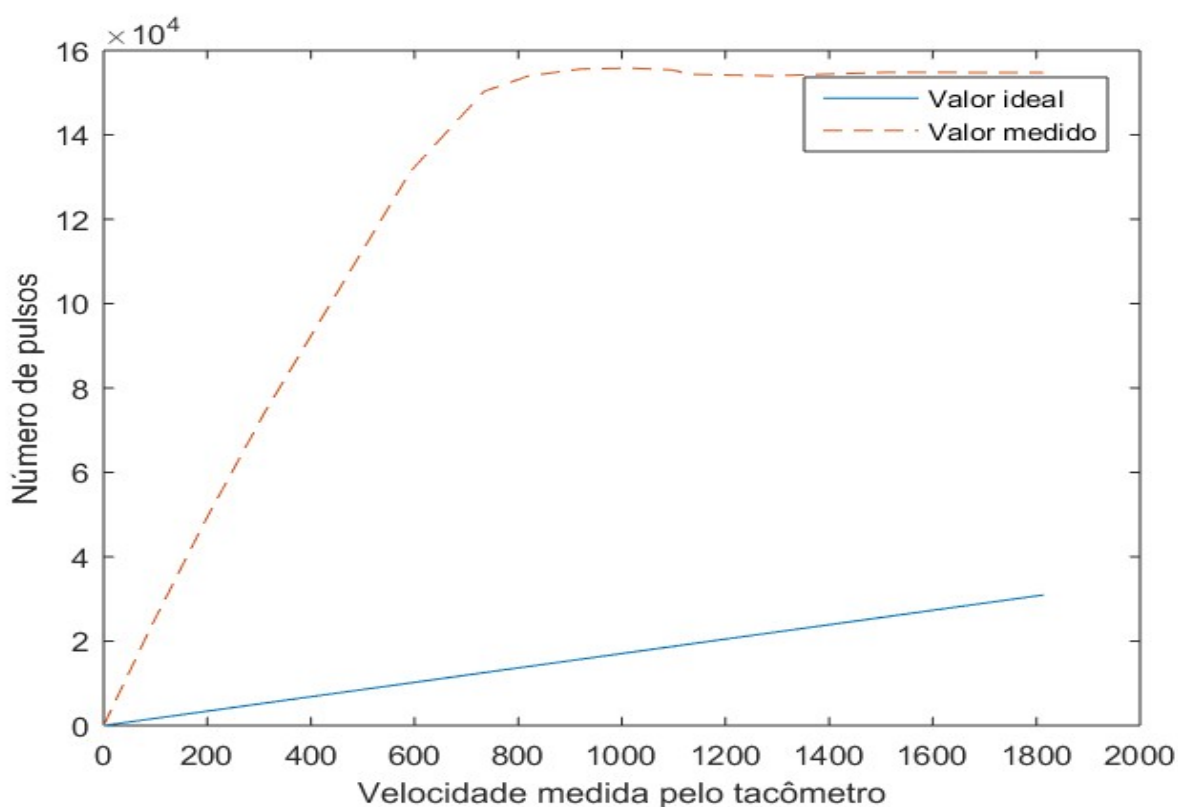


Figura 25 - Número de pulsos real e número de pulsos medidos.

Em relação ao sentido de rotação do motor, os resultados foram semelhantes aos da velocidade em que não se pode confirmar a confiabilidade dos dados. Num mesmo sentido de rotação o indicador mostrou sucessivas mudanças no sentido. Isso se deve ao fato do ruído não agir de forma igual no sinal A e B, então ora A possuía mais pulsos e ora B possuía mais pulsos.

3.2 Medições com filtro

Após o fracasso das medições sem a filtragem do sinal, foi proposto um filtro entre o inversor e o Arduino. A opção foi um filtro que conseguisse identificar e eliminar o ruído, então optou-se pela utilização de *latches* NOR em cascata composto por um CI 7402.

A escolha desse filtro ocorreu devido à sua tabela verdade que conseguia limitar as possibilidades de ocorrência de ruído na saída Q e essa análise teórica foi confirmada com as formas de onda apresentadas no osciloscópio. Primeiramente utilizou apenas um *latch* para o sinal A e NOT A, e B e NOT B, então se obteve as formas de onda da Figura 26 onde a onda superior está filtrada por apenas um *latch* e a segunda não passou pelo processo de filtragem. É visível na onda superior que o ruído diminuiu consideravelmente, mas ainda apresenta distorções que podem ser interpretadas como borda de descida pelo microcontrolador e então acarretar em erro de medição.

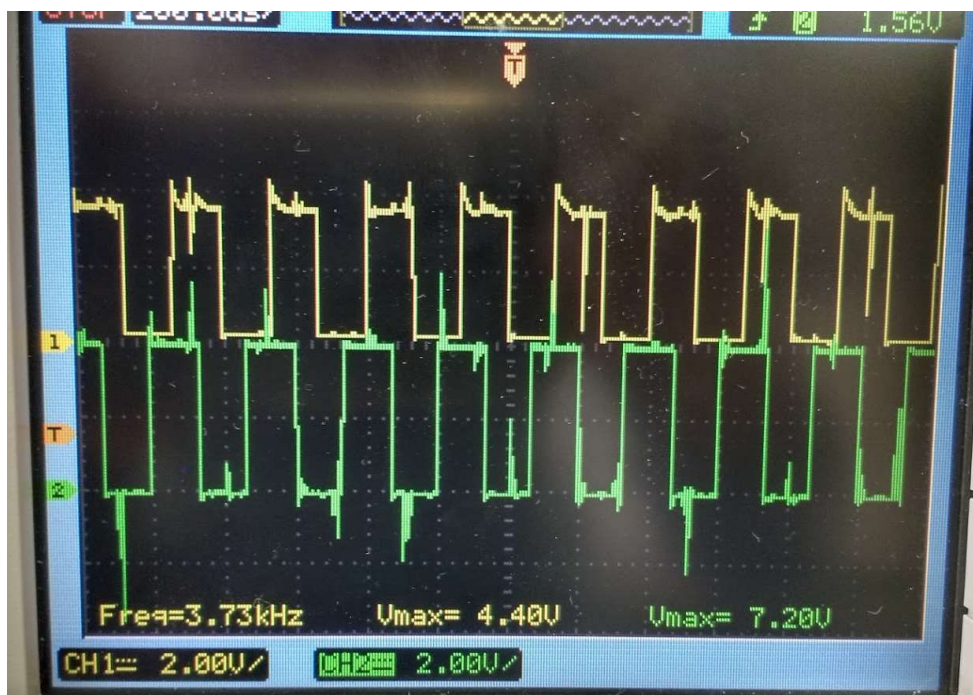


Figura 26 - Onda filtrada (superior) e onda não filtrada (inferior).

Os resultados obtidos na Figura 26 ainda não são o suficiente para que o objetivo do trabalho seja alcançado. Então para minimizar ainda mais os ruídos, uma conexão em cascata de dois *latches* NOR foi montada e a porta de saída Q foi monitorada pelo osciloscópio. Pela Figura 27 observa-se que o ruído some completamente e as distorções tornam-se pequenas na onda superior que foi filtrada. Em comparação com a onda não filtrada inferior, é nítido que houve melhora e agora é possível fazer uma leitura sem que haja erros significativos nas medições.

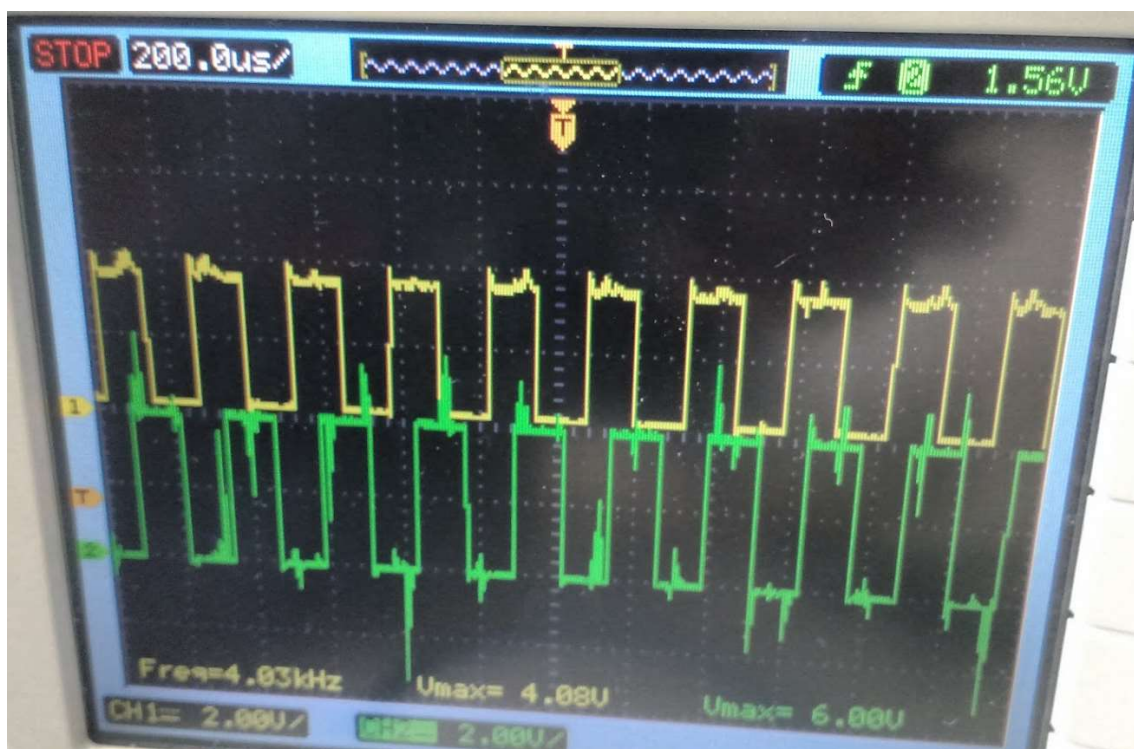


Figura 27 - Onda duplamente filtrada e onda não filtrada.

No intuito de se fazer uma comparação com gráficos anteriores, tem-se a Figura 28. O gráfico da figura mostra o erro relativo do protótipo de medição em relação as medidas de um tacômetro. No mais é possível verificar que o erro máximo foi de aproximadamente 1,5% e este reduz à medida que a velocidade cresce. Se comparado ao gráfico da Figura 22, o erro apresentado aqui é simplesmente desprezível.

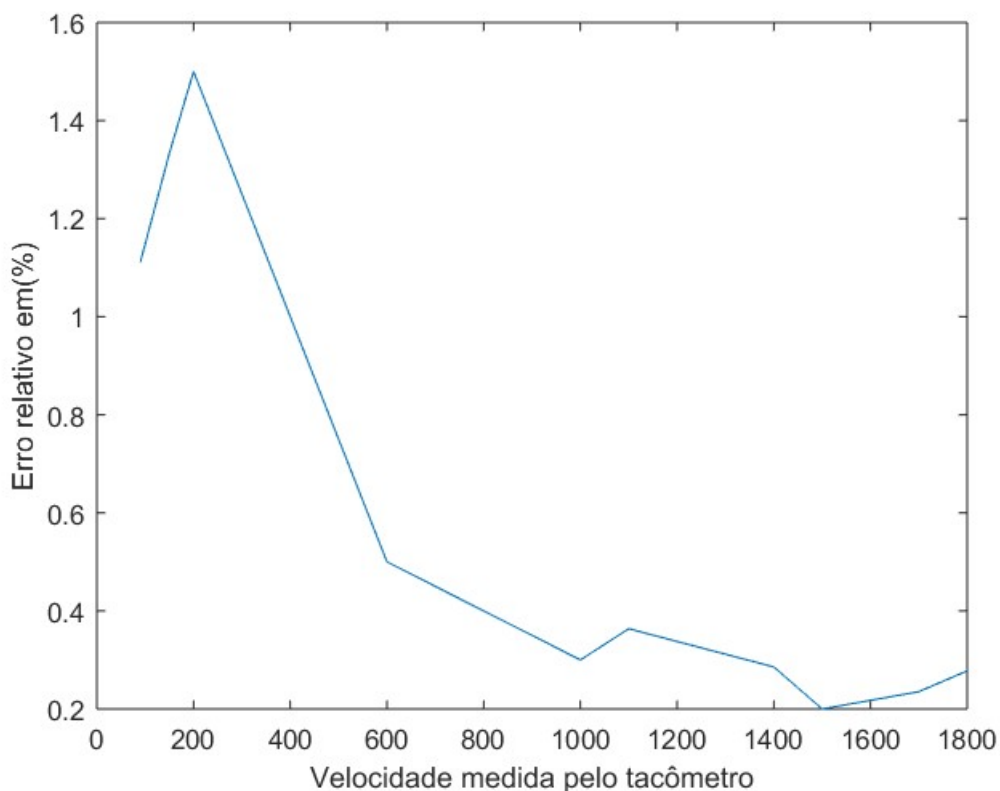


Figura 28 - Variação do erro com filtragem do sinal.

De toda forma, através dos dados apresentados é possível observar que os erros de velocidade encontrados estão dentro de uma classe de exatidão aceitável para um equipamento de medição, já que uma boa classe de exatidão seria de até 3% (Filho, 1994).

Em relação a contagem dos pulsos pelo microcontrolador, a Figura 29 mostra uma discrepância quase imperceptível. Nessa figura vemos em pontilhado o que seria a contagem ideal de pulsos no caso se a velocidade fosse medida por um tacômetro, na curva contínua

observa-se a variação linear dos pulsos contabilizados pelo Arduino. Fazendo a comparação com Figura 26 vê-se o tamanho da discrepância entre as curvas.

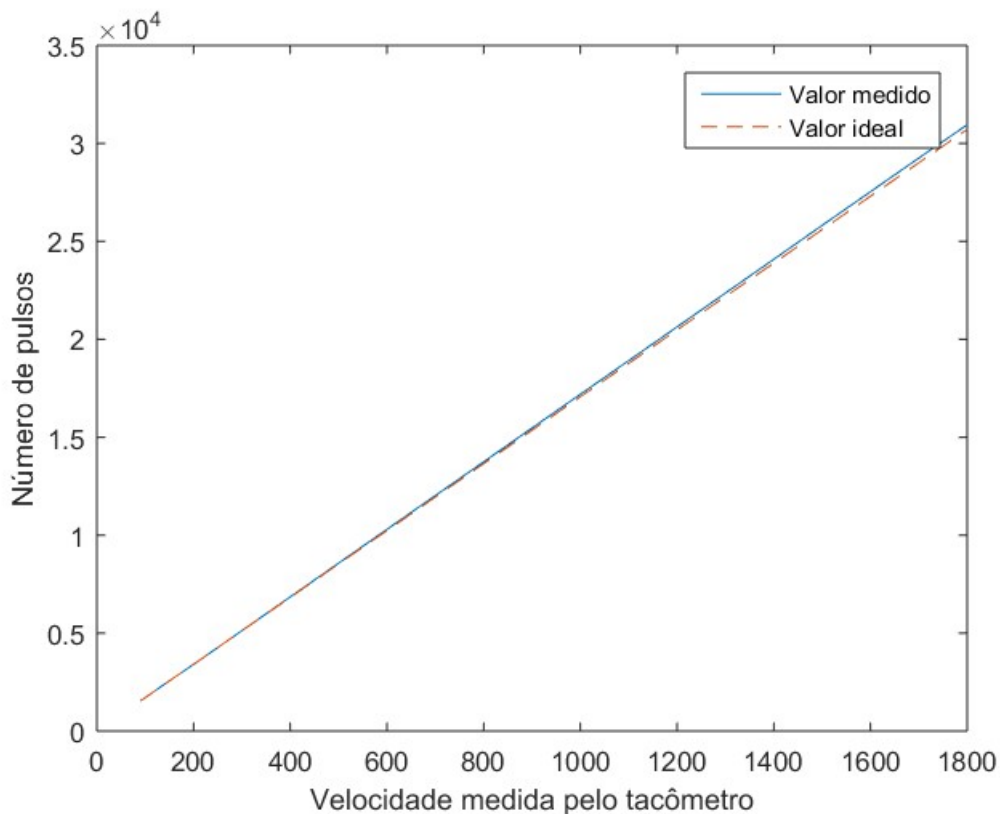


Figura 29 - Número de pulsos real e número de pulsos medidos com filtro.

É importante analisar o erro absoluto do sistema, ou seja, a diferença entre o valor real e o medido. Na Figura 30 observa-se o erro absoluto para cinco medições diferentes de determinadas velocidades (apresentada por cores diferentes). Nela vê-se a característica de repetibilidade do medidor que apresenta algumas discrepâncias com alguns valores bastante diferentes. Por outro lado, verifica-se a existência de uma faixa de valores entre 600 e 900 rpm em que essa discrepância é nula e então uma medida se sobrepõe a outra. Mesmo assim, essas diferenças são bastante insignificantes em relação a grandeza medida, de modo que não afeta a confiabilidade do protótipo.

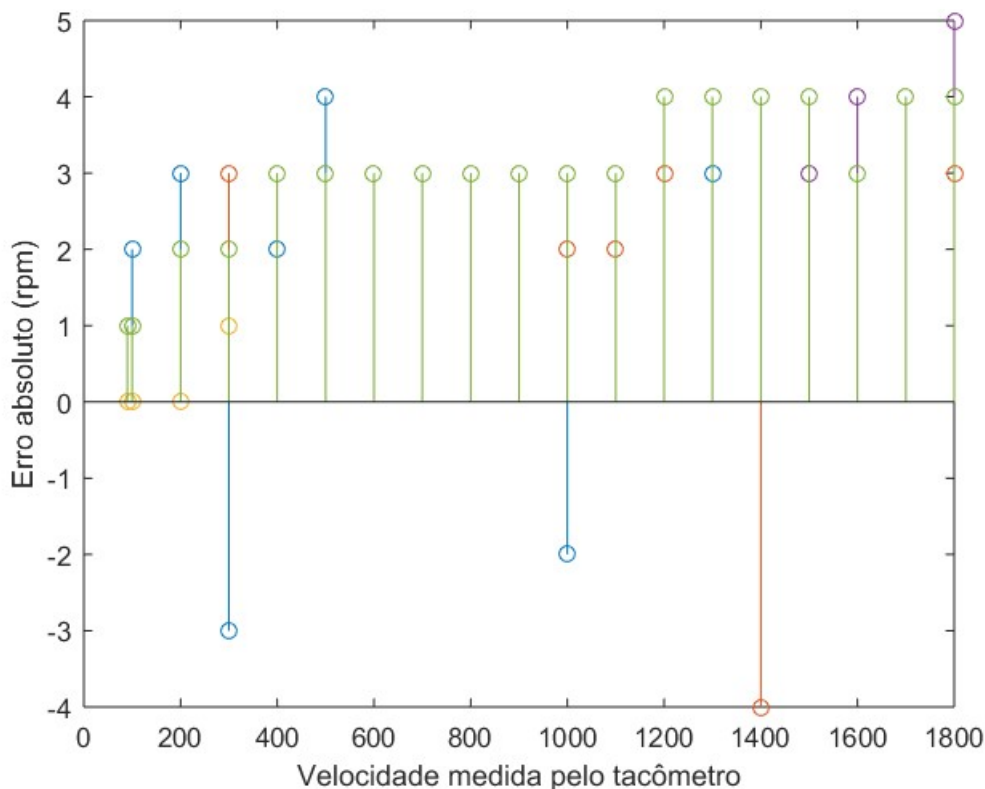


Figura 30 - Erro absoluto de cinco medições.

A variação do erro absoluto máximo para as medições da Figura 30, estão apresentadas na Figura 31. Esse dado indica o quanto está diferente o valor real do valor medido. Então para certas velocidades há uma faixa aceitável de variação, que costuma se tornar maior para velocidades mais altas e menor para as mais baixas. O erro parece se comportar em forma de uma escada. Isto leva a crer que para velocidades bem superiores a nominal essa característica tenderia a aumentar.

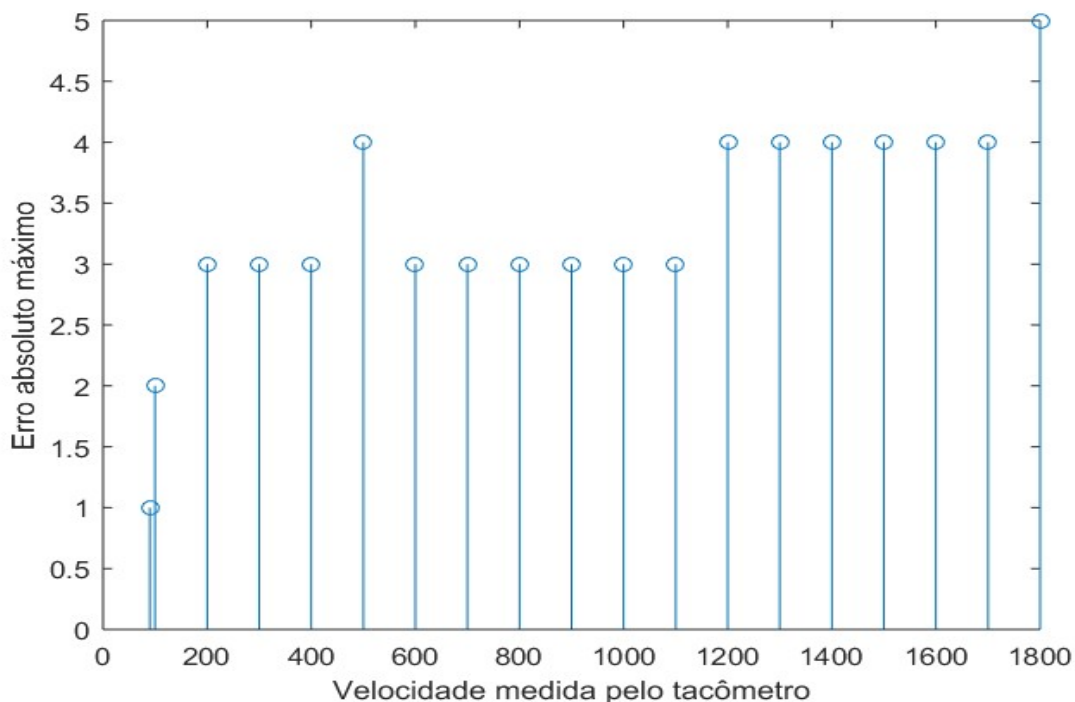


Figura 31 - Erro absoluto máximo.

A Figura 30 ilustra a ideia de precisão e repetibilidade do protótipo, no qual as medições apresentam valores próximos um dos outros e por diversas vezes possuem o mesmo valor. A repetibilidade não aparenta ser totalmente uniforme a medida que a velocidade varia, contudo está dentro de uma faixa totalmente aceitável.

Em relação as indicações do sentido de rotação, os resultados não apresentaram o mesmo sucesso que a velocidade, em que para velocidades mais elevadas a quantidade de indicações erradas do sentido de rotação chegou a 14%, enquanto para velocidades mais baixas ficou em 0,06%. De certa forma, acredita-se que esse erro elevado deve-se a possíveis ruídos transmitidos e também ao não sincronismo de contagem dos pulsos A e B. Na Figura 32 está apresentado a variação da quantidade de indicações erradas de sentido de velocidade.

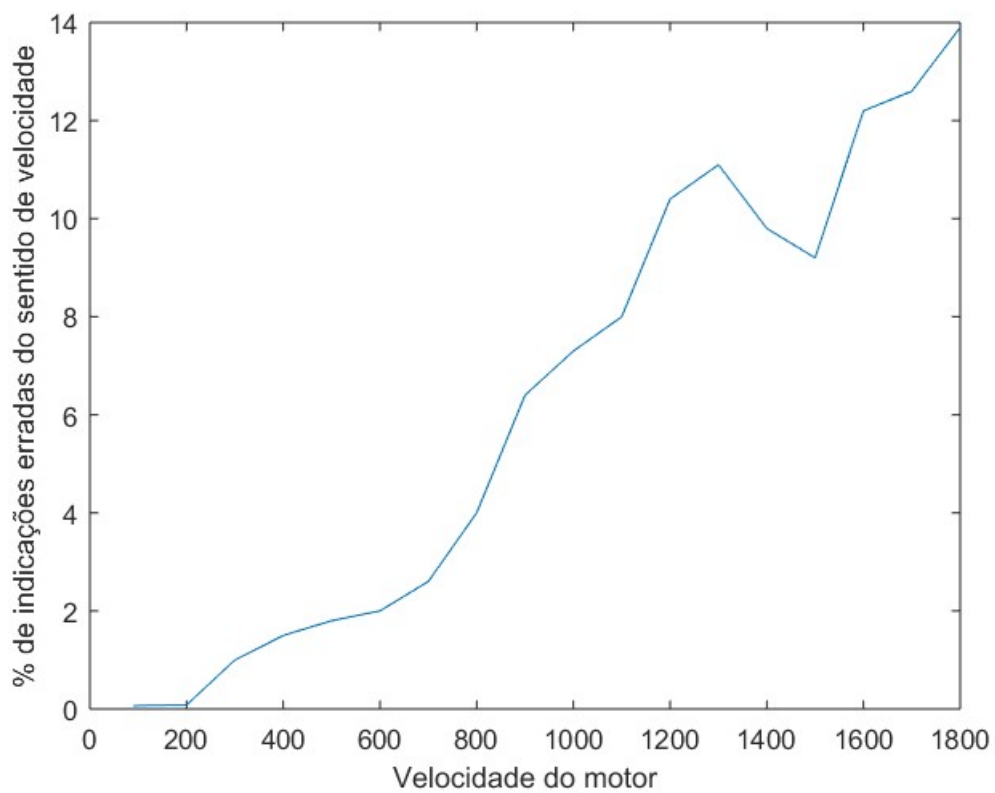


Figura 32 - Indicações errôneas de sentido de velocidade.

4 Conclusões

Durante o desenvolvimento do trabalho proposto e com a utilização da metodologia escolhida, viu-se que alguns problemas de medição acarretaram num erro bastante elevado, de modo que equipamento não demonstrava confiabilidade em seus resultados. E que esses erros ocorreriam devido às interferências do inversor de frequência, já que tais interferências não estavam presentes como pôde ser visto na Figura 24. A interferência provocava ruídos na onda quadrada gerada pelo *encoder* e muitas vezes esses ruídos eram interpretados como borda de descida na entrada do Arduino. Essa interpretação gerava contagens a mais e assim valores absurdos de velocidade eram indicados.

Por outro lado, com a implementação dos *latches* funcionando como um filtro de sinal digital, os ruídos foram quase que erradicados, implicando em contagens de pulso muito mais confiáveis. A partir de então consegue-se medir a velocidade dentro de faixas de exatidão aceitáveis para um equipamento de medição. Essas medições, além da boa classe de exatidão mostraram que o projeto também foi preciso e com bom nível de repetibilidade, de modo que não gerou desconfiança nos resultados e mostrou que trabalho possui boas características quanto a sua terminologia.

Outro ponto importante foi que todas as medidas de velocidade do motor, de desligado até nominal, foram concretizadas. Isso demonstrou que o trabalho possui um alcance ideal para todas as faixas de velocidade do motor e além disso, pôde ser observado pelos testes com o gerador de sinais que leituras de até 9000 rpm poderiam ser executadas, uma velocidade muito acima do que se costuma encontrar em motores convencionais. De toda forma, as principais características de um equipamento de medição como alcance, exatidão, precisão e repetibilidade foram adquiridas de forma satisfatória, oferecendo qualidade e confiabilidade ao usuário.

Vale lembrar também que em relação a adaptação do projeto para controle de velocidade é interessante, já que poucas portas da placa de desenvolvimento Arduino foram utilizadas. As portas que sobraram podem funcionar para acionamento de motores por intermédio de amplificadores de sinais por exemplo. Como o dispositivo possui além de saídas digitais, saídas com sinal PWM e de sinais analógicos, o futuro projeto de controle não se limita às

características do microcontrolador, que por sinal possui capacidade de processamento para realizar tarefas complexas.

Em relação as indicações do sentido de rotação, os erros foram bastante elevados de forma que não gerariam confiança a um possível usuário do projeto. Esse erro deve-se muito à possíveis ruídos que contaminaram o sinal e até mesmo a metodologia de programação utilizada para indicar se a direção é horária ou anti-horária.

Referências

- A. E. Fitzgerald, C. K. J. S. D. U., 2006. *Máquinas Elétricas*. 6 ed. Porto Alegre: Bookman.
- Anon., 2006. *Guia do Usuário do Inversor de Frequência CFW-11*. s.l.:s.n.
- Anon., 2017. *Datasheet Encoder Incremental Hontko- HTR-W2*. s.l.:s.n.
- ARDUINO & GENUINO, P., 2017. *Arduino*. [Online]
Available at: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560#>
[Acesso em 14 06 2017].
- Chapman, S. J., 2013. *Funadamentos de Máquinas Elétricas*. 5 ed. Nova York: The McGraw-Hill Companies.
- Eliene, 2013. *Mundo e Educação*. [Online]
Available at: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/informatica/processamento-dados.htm>
[Acesso em 07 06 2017].
- Filho, M. E. O., Filho, A. J. S., Gazoli, J. R. & Ruppert, E., 2010. Um controlador de corrente de carga para o conversor em matriz trifásico para trifásico e para o inversor de frequência sem capacitor do elo de corrente contínua.
- Filho, S. d. M., 1994. *Fundamentos de Medidas Eléteicas*. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara.
- Gonçalves, M. G., 2003. *Monitoramento e Controle de Processos*. Brasília: s.n.
- Heymann, G., 1988. O Motor Elétrico. *Superinteressante*.
- Justen, Á., 2016. *Curso de Arduino*. [Online]
Available at: <http://cursodearduino.com.br/>
[Acesso em 14 06 2016].
- Madeira, D., 2016. *Embarcados*. [Online]
Available at: <https://www.embarcados.com.br/instrumentacao-industrial-sensores/>
[Acesso em 06 06 2017].
- Mamede, J. F., 2007. *Instalações Elétricas Industriais*. s.l.:LTC.
- PAIXÃO, J. P., 2009. CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES ELÉTRICOS. 10 11, p. 7.
- Rashid, M. H., 1999. *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. São Paulo: Makron Books.
- Ribeiro, M. A., 1999. *Instrumentação*. Salvador: Tek Treinamentos LTDA.
- Timóteo, L., 2013. *Codificadores Ópticos Rotativos*. [Online]
Available at: <https://pt.slideshare.net/MarioTimotius/automao-industrial-encoders-pticos-rotativos>
[Acesso em 07 06 2017].
- Tocci, R. J. G. L. M. N. S. W., 2011. *Sistemas digitais: princípios e aplicações*. 11 ed. s.l.:Pearson.
- Toro, V. D., 1994. *Funadamentode Máquinas Elétricas*. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Unip, s.d. *Introdução a Instrumentação Industrial*. s.l.:s.n.