

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**  
**BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MICHEL MOACIR ARANTES GONÇALVES**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PARA MOTORES  
DE CORRENTE CONTÍNUA SEM ESCOVAS UTILIZANDO ARDUINO**

**FORMIGA - MG**

**2016**

**MICHEL MOACIR ARANTES GONÇALVES**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PARA MOTORES  
DE CORRENTE CONTÍNUA SEM ESCOVAS UTILIZANDO ARDUINO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Elétrica do IFMG-  
Formiga, como requisito parcial para obtenção  
do título de bacharel em Engenharia Elétrica

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Msc. Mariana Guimarães  
dos Santos.

**FORMIGA - MG**

**2016**

621.3  
G635p

Gonçalves, Michel Moacir Arantes  
Projeto e desenvolvimento Sistema de um controlador para motores de corrente contínua sem escovas usando arduino / Michel Moacir Arantes Gonçalves – Formiga : IFMG, 2016.  
55p. : il.

Orientador: Profa Msc, Mariana Guimarães dos Santos  
Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Controle de velocidade de motores. 2. Motores CC sem escova  
3. Método de controle sem escova. I. Título.

CDD 621.3

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Msc. Naliana Dias Leandro

**MICHEL MOACIR ARANTES GONÇALVES**

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PARA MOTORES  
DE CORRENTE CONTÍNUA SEM ESCOVAS UTILIZANDO ARDUINO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal Campus Formiga, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Nota: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>ª</sup>. Msc. Mariana Guimarães dos Santos - Orientadora**

---

**Prof.<sup>º</sup> Msc. Gustavo Lobato Campos - Membro**

---

**Prof.<sup>º</sup> Frederico Luiz Fernandes Marcelino - Membro**

## RESUMO

Os motores sem escovas (*brushless*) são amplamente utilizados em diversas áreas, tais como: veículos elétricos, informática, aerodelismo, eletrodomésticos, dentre outros. A natureza diversificada das aplicações de tais motores exige formas de controle de velocidade eficientes, normalmente baseadas em dispositivos eletrônicos.

O controle eletrônico dos motores *brushless* pode ser realizado de diversas formas, utilizando-se ou não sensores. O método que não utiliza sensores, denominado *sensorless*, utiliza um processo de comutação a seis passos para a energização dos enrolamentos do motor. Cada passo, ou setor, é equivalente a 60 graus elétricos, logo seis setores compõem 360 graus, ou uma revolução elétrica completa.

Apesar de este motor ser considerado um motor síncrono trifásico, o avanço da eletrônica permite através de um sistema PWM (modulação por largura de pulso), o chaveamento de uma tensão CC (corrente contínua) permitindo que o motor *brushless* opere com alta eficiência.

Neste trabalho é apresentado o projeto de um controlador para motores CC, sem escovas, utilizando Arduino e outros componentes eletrônicos externos.

Pretende-se avaliar o funcionamento de diversos motores utilizando-se o controlador desenvolvido neste trabalho. Além disso, são realizadas simulações computacionais para condições distintas de carga.

**Palavras-chave:** Controle de velocidade de motores, motores CC sem escovas, método de controle sem sensores.

## ABSTRACT

Brushless motors are widely used in various fields, such as electric vehicles, computers, model airplanes, appliances, among others. The diverse nature of the applications of such motors requires forms of efficient speed control, usually based on electronic devices.

The electronic control of the brushless motors can be accomplished in several ways, using sensors or not. The method using no sensors, called sensorless uses a switching process to six steps for energizing the motor windings. Each step or sector is equivalent to 60 electrical degrees, then 360 degrees six sectors compose or a complete electrical revolution.

Although this engine is considered a three-phase synchronous motor, drive electronics allows through a PWM system (pulse width modulation) switching a DC voltage allowing the brushless motor to operate with high efficiency.

This paper presents the design of a controller for DC brushless motors using Arduino addition to external electronic components.

It is intended to evaluate the operation of several motors using the controller developed in this work. In addition, computer simulations for different load conditions will be performed.

**Keywords:** AC Motors. Lifetime estimation. Computational analysis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama simplificado motor BLDC.....	14
Figura 2 - Estator de um motor BLDC .....	15
Figura 3 - Forma trapezoidal para o <i>back EMF</i> .....	16
Figura 4 - Forma sinusoidal para o <i>back EMF</i> .....	16
Figura 5 - Rotor de um motor BLDC .....	17
Figura 6 - Motor de corrente contínua sem escovas.....	18
Figura 7 - Características de torque X velocidade .....	19
Figura 8 - Esquema de funcionamento de um motor BLDC com sensores .....	20
Figura 9 - Relação sensor X tempo de chaveamento.....	21
Figura 10 - Sentido de energização das fases para detecção da indutância variável .....	23
Figura 11 - Posição do rotor a 60° .....	23
Figura 12 - Diagrama de blocos microcontrolador .....	24
Figura 13 - Arduino Mega 2560 .....	25
Figura 14 - ESC de aeromodelismo .....	26
Figura 15 – Representação simplificada da ponte trifásica.....	27
Figura 16 - Driver ir2110 em sua conexão típica.....	28
Figura 17 - Ponte trifásica conectada ao estator do motor .....	29
Figura 18 - Diagrama de blocos dos componentes do controlador .....	30
Figura 19 - Sinal PPM.....	31
Figura 20 - Fundo da placa com o Arduino acoplado.....	32
Figura 21 - Placa do ESC.....	33
Figura 22 - Bloco funcional opto-acoplador.....	33
Figura 23 - Placa de interface dos opto acopladores .....	34
Figura 24 - Ponte trifásica conectada ao estator do motor .....	36
Figura 25 - Ponte trifásica montada na placa .....	36
Figura 26 - Driver ir2110 em sua conexão típica.....	36
Figura 27 - Face frontal com os drivers devidamente soldados na placa.....	37
Figura 28 - Regulador LDO para normalização das tensões do sistema.....	37
Figura 29 - Osciloscópio em simulação para o motor a um ciclo de trabalho de 50% ....	39
Figura 30 - Osciloscópio em simulação para o motor a um ciclo de trabalho de 100%.....	39



<b>Figura 31 - Tensão do enrolamento A do motor para velocidade média e máxima no teste prático. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 32 - Sinal dos enrolamentos do motor encontrado na literatura, para velocidade média e máxima. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 33 - Gráfico de velocidade X corrente para simulação.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 34 - Relação corrente X velocidade para o motor dos testes práticos .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 35 - Relação corrente X velocidade para o motor encontrado na literatura .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 36 - Curva de torque X velocidade para simulação .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 37 - Relação torque X velocidade para o motor teste sem carga .....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 38 - Relação torque X velocidade para o motor teste com carga.....</b>	<b>45</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Cronograma de atividades.....</b>	<b>13</b>
<b>Tabela 2 - Características dos motores.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 3 - Tabela de valores referente a corrente e velocidade e para o motor encontrado na literatura. ....</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 4 - Custos estimados para montagem do controlador. ....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 5 - Tabela comparativa entre os valores do controlador proposto e um controlador encontrado no mercado. ....</b>	<b>48</b>

# SUMÁRIO

1 VISÃO GERAL DO TRABALHO .....	10
1.1 Introdução .....	10
1.2 Tema e problema .....	10
1.3 Justificativa.....	11
1.4 Objetivos.....	11
1.4.1 Objetivo geral.....	11
1.4.2 Objetivos específicos.....	11
1.5 Metodologia.....	12
1.6 Cronograma de atividades .....	13
2 REVISÃO TEÓRICA .....	14
2.1 Motores de corrente contínua sem escovas ( <i>brushless</i> ).....	14
2.2 Controle .....	20
2.2.1 Sensor de efeito <i>Hall</i> .....	20
2.2.2 Sistema sem sensores ( <i>sensorless</i> ) .....	21
2.2.2.1 Método da rampa.....	22
2.2.2.2 Método de sensoriamento de indutância variável.....	22
2.2.3 Microcontroladores.....	24
2.2.3.1 Arduino.....	24
2.2.3.2 Eletronic Speed Control .....	25
2.3 Potência ( <i>brushless</i> ).....	14
2.3.1 Drivers .....	27
2.3.2 Mosfets .....	28
3 METODOLOGIA.....	30
3.1 Controle .....	31
3.1.1 Arduino.....	31
3.1.2 ESC ( <i>Eletronic speed Control</i> ) .....	32
3.1.3 Sensores e <i>feedback</i> .....	33
3.2 Potência .....	34
3.3 Drivers .....	36
3.4 Conversor Buck DC ou regulador de tensão .....	37
4 RESULTADOS .....	38
4.1 Avaliações da forma de onda trapezoidal nos enrolamentos do motor .....	38

4.2 Avaliação de curvas características de motores: Torque X Velocidade e Corrente de Armadura X Velocidade.....	41
4.3 Análises de mercado.....	46
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	49
6 REFERÊNCIAS .....	51
APENDICE A – Esquemático da parte de potência do simulador.....	53
APENDICE B – Esquemático da parte de controle do simulador .....	54
APENDICE C – Motor utilizado nos testes práticos.....	55

# 1 VISÃO GERAL DO TRABALHO

## 1.1 Introdução

Motores BLDC são motores de corrente contínua sem escovas e possuem aplicações em vários segmentos do mercado como: automóveis, eletrodomésticos, controles industriais, automação, aviação, dentre outros. O motor que em sua forma geral é predominantemente trifásico, possui controle de comutação entre as fases de forma sincronizada com a posição do rotor. Essa sincronização pode ser conseguida de duas maneiras diferentes (ATMEL, 2013) utilizando-se sensores (Modo *Sensored*) e sem a utilização de sensores (*Sensorless* que não utiliza sensores Hall).

A utilização do método *Sensored* para o controle de velocidade apresenta inconvenientes tais como o custo dos sensores de efeito Hall, fiações e conectores além de falhas em potencial. Por estas razões, o controle sem sensores reduz os custos de motor e do sistema. Além disso, esse controle é apropriado para aplicações onde um motor gira em uma determinada velocidade, como ventiladores ou Bombas, que são equipamentos nos quais a carga mecânica não muda abruptamente.

O desenvolvimento de um controlador para esta aplicação requer conhecimento amplo do princípio de funcionamento do motor a ser controlado e dos componentes envolvidos no processo de controle, quais sejam, microcontroladores, transistores de potência, sensores e isoladores.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um controlador para motores cc sem escovas de baixa tensão visando um controle de velocidade para aplicações cotidianas. O protótipo de controlador desenvolvido tem sua sensibilidade avaliada para diferentes motores em diferentes velocidades. Além disso, o custo para elaboração do projeto é avaliado e comparado com controladores existentes no mercado.

## 1.2 Tema e problema

Os motores de corrente contínua sem escovas são largamente utilizados, especialmente em aplicações domésticas e em ambientes de baixos níveis de tensão. Assim, tendo em vista a importância desses motores para a sociedade moderna, faz-se necessário um estudo a respeito do seu funcionamento e sobre suas formas de controle de velocidade. Diante do exposto, um controle eficiente e de baixo custo é fundamental, principalmente porque a tecnologia de

controle desse tipo de motor é, atualmente, quase exclusivamente de outros países, o que demonstra uma grande carência de estudos e desenvolvimento de tecnologias nacionais nessa área.

### **1.3 Justificativa**

Existem hoje em dia diversos estudos de tipos de controladores para motores cc sem escovas sendo desenvolvidos no exterior, porém, no Brasil, embora tais motores sejam largamente utilizados nas mais diversas aplicações, não se verifica um avanço considerável dos estudos envolvendo as formas de controle dos mesmos. Normalmente, quando é necessária a utilização de motores BLDC, a tecnologia necessária para o controle de velocidade e torque do mesmo é adquirida junto com o motor, e nestes casos, tais controladores possuem tecnologia estrangeira.

Esse trabalho vem justamente propor um estudo de um protótipo controlador que pode ser desenvolvido nacionalmente, reduzindo os custos e a dependência de equipamentos produzidos no exterior.

### **1.4 Objetivos**

Apresenta-se aqui o objetivo geral do trabalho e os objetivos específicos, os quais definem o escopo deste trabalho.

#### **1.4.1 Objetivo geral**

Desenvolver um protótipo de controlador para motores do tipo BLDC eficiente e de baixo custo para aplicações cotidianas utilizando microcontrolador de plataforma aberta, Arduino.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

O desenvolvimento de um controlador desta natureza exige um conhecimento amplo de diversos componentes e para que tal objetivo seja alcançado são necessários os seguintes objetivos específicos:

- Conhecimento detalhado do princípio de funcionamento dos motores CC sem escovas.
- Escolha do tipo de sensor para detecção de campo a ser utilizado.
- Definição dos componentes a serem utilizados conforme níveis de potência, tensão e correntes e operação do controlador.
- Realização de simulações no software PROTEUS para avaliação viabilidade de implementação prática do controlador.
- Desenvolvimento um algoritmo em C para o controlador utilizando o arduino.
- Desenvolvimento uma placa protótipo utilizando software PROTEUS para alocar os componentes do controlador.
- Comparação dos resultados obtidos com projeto desenvolvido e com as simulações e resultados encontrados na literatura.
- Montagem física do protótipo e análises e medições pertinentes ao seu estudo.

## 1.5 Metodologia

Primeiramente é realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de compreender o princípio de funcionamento dos motores de corrente contínua (CC) sem escovas, bem como seus métodos de controle e suas aplicações. Além disso, são definidos todos os componentes a serem utilizados para a fabricação do controlador. Tais componentes são dimensionados de acordo com suas respectivas folhas de dados analisando-se as principais grandezas pertinentes ao seu estudo, como potências, tensões e níveis de correntes, por exemplo. Todos os cálculos pertinentes são apresentados com detalhes no capítulo de metodologia.

Em seguida é realizada uma simulação para avaliar as informações oriundas do referencial teórico como, por exemplo, os passos necessários para controle destes motores, comportamento da tensão nos enrolamentos do motor torque e velocidade. Através da análise de forma de onda de entrada e saída do controlador e informações básicas como tensão e corrente, todos os dados são devidamente coletados e armazenados para comparação posterior a montagem prática.

Na sequência é desenvolvido um algoritmo, em linguagem C, para utilização no Arduino para controle do ESC (eletronic speed control). O Arduino o ESC e os demais componentes externos do projeto foram agrupados por meio de uma placa de circuito

impresso desenvolvida no software PROTEUS, cujos detalhes construtivos são descritos no Capítulo 3.

Finalmente, são realizados testes de bancada pertinentes que são comparados com os resultados obtidos pela simulação e resultados obtidos encontrados na literatura.

## 1.6 Cronograma de atividades

A seguir temos a Tabela 2 com o cronograma de atividades desenvolvidas no trabalho.

Tabela 1 - Cronograma das atividades

		Atividades	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>TCC – CRONOGRAMA</b>	<b>Pesquisa bibliográfica</b>	X	X	X				
	<b>Simulação e coleta de dados referentes a simulação</b>		X	X				
	<b>Estudo sobre linguagem C voltada para arduino</b>		X	X				
	<b>Desenvolvimento do algoritmo em C</b>		X	X				
	<b>Montagem prática</b>			X				
	<b>Avaliação dos dados coletados</b>				X			
	<b>Revisão e Formatação</b>						X	
	<b>Defesa do projeto</b>							X

Fonte: Próprio Autor



## 2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo é realizada uma revisão teórica dos principais componentes necessários para o desenvolvimento do controlador proposto: motores *brushless*, controle e potência.

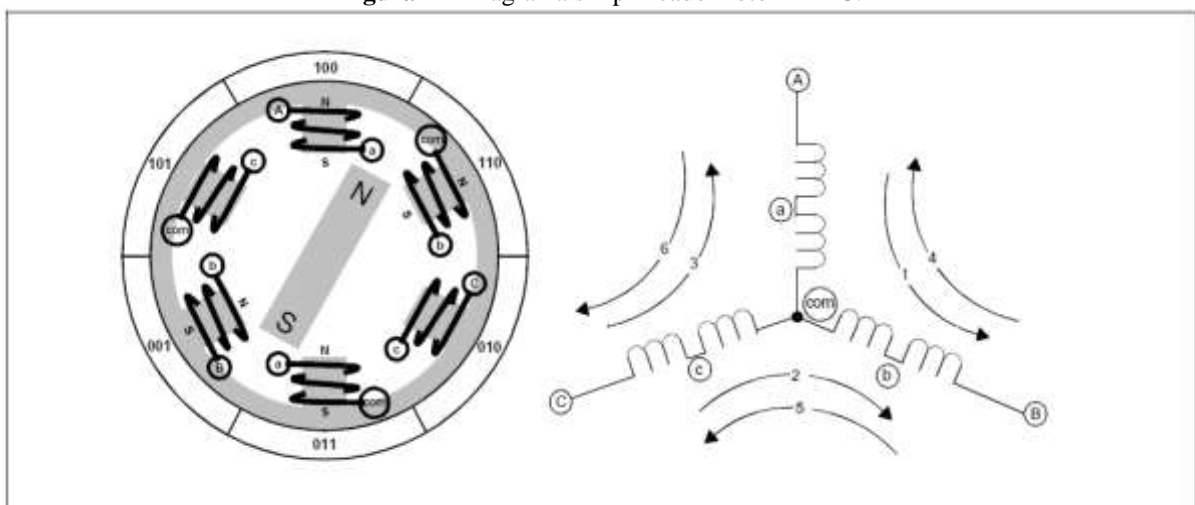
### 2.1 Motores de corrente contínua sem escovas (*brushless*)

O motor *brushless* ou BLDC é um tipo de motor síncrono, isto significa que o campo magnético gerado pelo estator e o campo magnético gerado pelo rotor giram na mesma frequência (PADMARAJA YEDAMALE, 2003).

Um motor *brushless* é construído com rotor magnético de imã permanente e o estator de fios enrolados em seus polos. A energia elétrica é convertida em energia mecânica através das forças de atração magnética entre o campo permanente do rotor e um campo magnético rotativo induzido no estator (WARD BROWN, 2011).

Como o nome indica, motores *brushless* não utilizam escovas para a comutação mecânica como os motores de corrente contínua tradicionais, o processo de comutação é realizado eletronicamente. Motores BLDC têm muitas vantagens quando comparados aos motores de corrente contínua e aos motores de indução como, por exemplo, melhor característica de velocidade versus torque, resposta dinâmica, alta eficiência, longa vida útil e operação silenciosa (PADMARAJA YEDAMALE, 2003). A figura 1 apresenta um diagrama simplificado do motor BLDC.

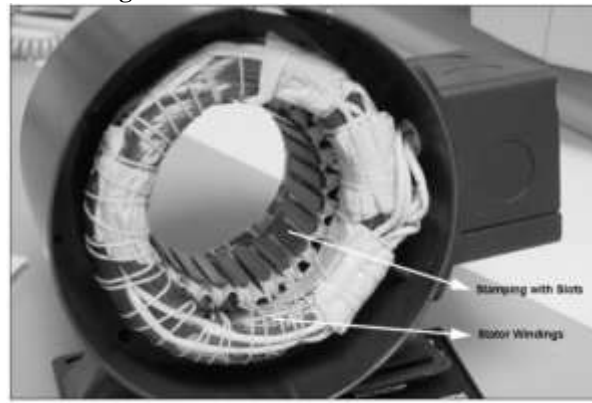
**Figura 1** – Diagrama simplificado motor BLDC.



Fonte: WARD BROWN, 2011.

O estator consiste de laminações de aço devidamente empilhadas com enrolamentos colocados sobre as ranhuras que se formam através de cortes axiais ao longo da periferia interna, como ilustrado na Figura 2.

**Figura 2** – Estator de um motor BLDC.

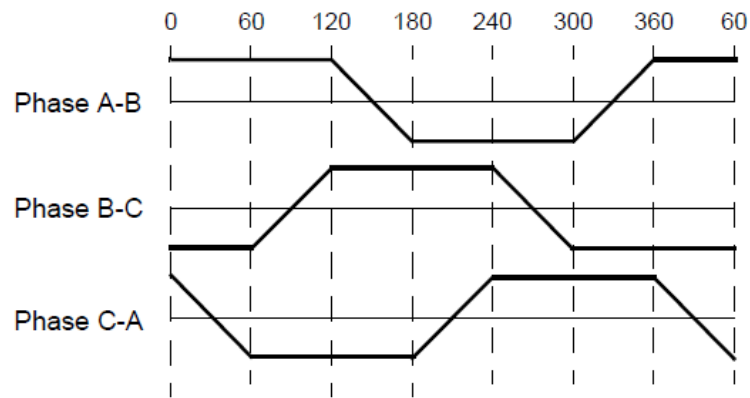


**Fonte:** PADMARAJA YEDAMALE, 2003.

Tradicionalmente, o estator se assemelha ao de um motor de indução, no entanto, os enrolamentos são distribuídos de um modo diferente. A maioria dos motores BLDC tem três enrolamentos do estator ligados em estrela e cada um dos enrolamentos é construído com várias bobinas interligadas para formar um enrolamento. Uma ou mais bobinas são colocadas nas ranhuras e interligadas para fazer um enrolamento e cada um destes enrolamentos por sua vez, é distribuído ao longo da periferia do estator para formar um mesmo número de polos (PADMARAJA YEDAMALE, 2003).

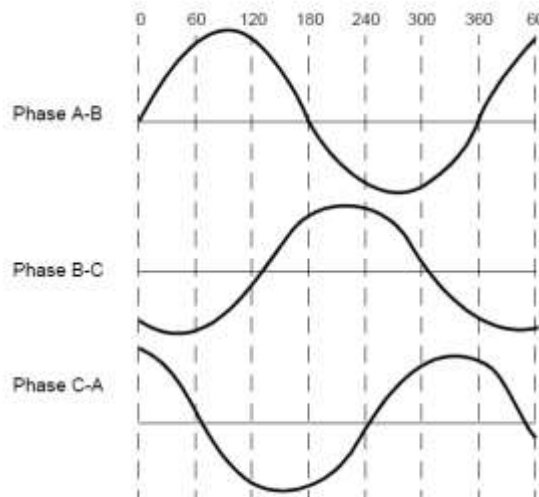
Existem dois tipos de variantes para as bobinas do estator: trapezoidal e sinusoidal. Esta diferenciação é feita na base da interligação das bobinas no enrolamento do estator para obter os diferentes tipos de retorno para força contra eletromotriz (*back EMF*). O motor trapezoidal retorna para a força contra eletromotriz de forma trapezoidal já o sinusoidal de forma sinusoidal, conforme Figuras 3 e 4, a seguir respectivamente.

**Figura 3** – Forma trapezoidal para o back EMF.



**Fonte:** PADMARAJA YEDAMALE, 2003.

**Figura 4** – Forma sinusoidal para o back EMF.



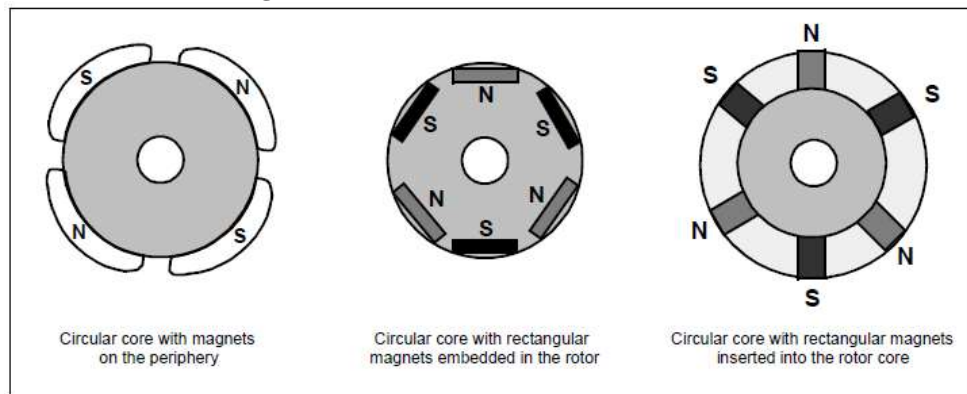
**Fonte:** PADMARAJA YEDAMALE, 2003.

O binário de saída (torque desenvolvido pelo motor) para um motor sinusoidal é mais suave do que o de um motor trapezoidal, no entanto, este vem com um custo extra, pois, como os motores senoidais tem um enrolamento extra de interligações nas bobinas sobre a periferia do estator, aumenta desse modo o cobre gasto no enrolamento do estator (PADMARAJA YEDAMALE, 2003).

O rotor é normalmente formado por ímãs permanentes, no entanto em alguns casos, pode ser um rotor bobinado formando um eletroímã com possibilidade de variação de dois a oito pares de polos. O material magnético adequado para o rotor deve ser escolhido com base da densidade de campo magnético necessária para o funcionamento do motor. Para os rotores de ímãs permanentes normalmente o ferrite é utilizado.

A Figura 5 a seguir, apresenta cortes transversais de diferentes arranjos de ímãs em um rotor (PADMARAJA YEDAMALE, 2003).

**Figura 5** – Rotor de um motor BLDC.



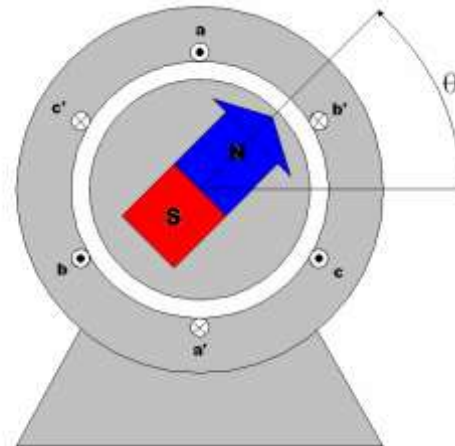
**Fonte:** PADMARAJA YEDAMALE, 2003.

Como o motor é trifásico cada sequência de comutação tem um dos enrolamentos energizado positivamente (corrente entra no enrolamento), o segundo enrolamento negativamente (corrente sai pelo enrolamento) e o terceiro estará em uma condição não energizada. O torque é produzido devido à interação entre o campo magnético gerado pelas bobinas do estator e o rotor de ímãs permanentes.

O ímã permanente é responsável pelo estabelecimento de campo magnético principal da máquina. O motor pode ser entendido a partir do princípio da tendência de alinhamento dos campos magnéticos, onde o fluxo magnético gerado pelo ímã permanente reage com o fluxo criado pelas correntes do estator resultando num conjugado eletromecânico, esse conjugado age na máquina no sentido de alinhar esses dois campos (SOUTO SIQUEIRA, 2008). No instante do alinhamento há a inversão do sentido da corrente através de um circuito eletrônico de chaveamento, mantendo a rotação indefinidamente.

Observa-se que o fluxo magnético criado pelas correntes do estator gira a frente do fluxo magnético criado pelo ímã permanente, assim, ocorre o movimento de arraste e conseqüentemente, o rotor produz trabalho. A figura 6 a seguir, mostra um esquema típico de um motor de corrente contínua sem escovas de 2 pólos (SOUTO SIQUEIRA, 2008).

**Figura 6** – Motor de corrente contínua sem escovas.



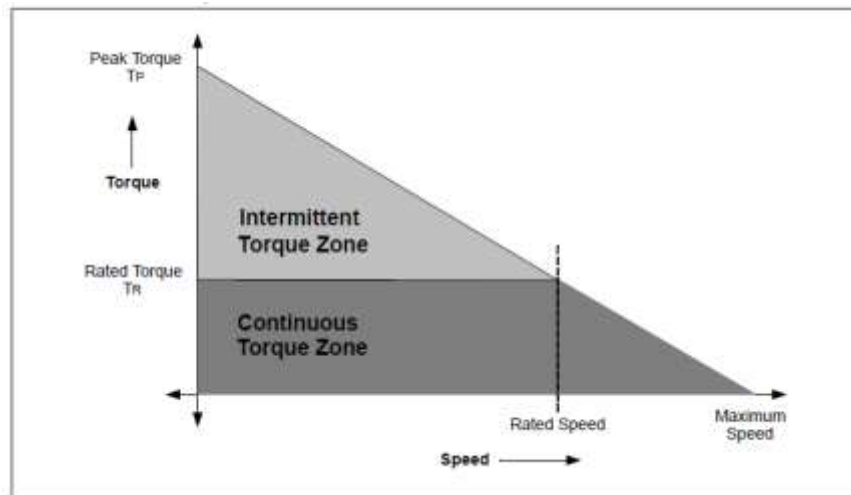
**Fonte:** SOUTO SIQUEIRA, 2008.

Na figura 6 quando  $\theta$  é igual a zero, temos que fluxo magnético do ímã está atravessando a bobina e neste instante o fluxo concatenado nessa bobina é máximo e onde se verifica o pico de torque. À medida que o rotor movimentar-se e o ângulo  $\theta$  aumenta, o fluxo magnético concatenado pela bobina diminui até atingir o valor zero em  $90^\circ$  e ocorre o ponto de torque mínimo. A partir deste, ocorre à inversão do fluxo concatenado (SOUTO SIQUEIRA, 2008).

Para manter o motor em funcionamento, o campo magnético produzido pelos enrolamentos do estator deve mudar de posição, à medida que o rotor se move tentando acompanhar o campo do mesmo. O que será mostrado como "comutação a seis passos" define a sequência de energização dos enrolamentos, sequência esta que deve obedecer à posição do dipolo magnético do rotor (PADMARAJA YEDAMALE, 2003).

O conjugado produzido por uma bobina não é constante e existem regiões onde este conjugado é nulo. O motor é projetado de tal forma que possua enrolamento trifásico, com três bobinas defasadas de  $120^\circ$ . Consequentemente, o conjugado produzido também ficará defasado de  $120^\circ$  e a soma resulta em um conjugado constante (SOUTO SIQUEIRA, 2008).

A Figura 7 a seguir, apresenta um exemplo de características de torque X velocidade. Existem dois parâmetros de torque usados para definir um motor BLDC, pico de torque (PT) e torque nominal (TR).

**Figura 7** – Características de torque X velocidade

Fonte: PADMARAJA YEDAMALE, 2003.

Durante operações contínuas, o motor pode ser levado ao torque nominal. Uma característica do motor BLDC é que o binário permanece constante para uma gama de velocidades. O motor pode ser acionado até a velocidade máxima, que pode ser de até 150% da velocidade nominal, nesta condição o torque sofre uma redução.

Aplicações que têm arranques frequentes e reversões de rotação com a carga do motor exigem um torque superior ao nominal. Esta exigência ocorre especialmente na partida quando o binário adicional necessário para superar a inércia da carga e o próprio rotor é elevado. O motor pode entregar um torque mais elevado, no máximo até o pico binário, enquanto segue a curva de torque velocidade.

O controle de comutação entre as fases do estator tem de estar sincronizado com a posição do rotor. Essa sincronização ficará a cargo da parte de controle que será discutido a seguir.

## 2.2 Controle

A corrente fornecida às bobinas do motor tem sua polaridade invertida ao longo de sua operação e obedecem a uma ordem sequencial, determinada pela posição do rotor que é de responsabilidade da parte de controle do projeto.

A determinação da posição do rotor fica a cargo dos sensores que captam essa informação e enviam ao controlador para tomada de decisão.

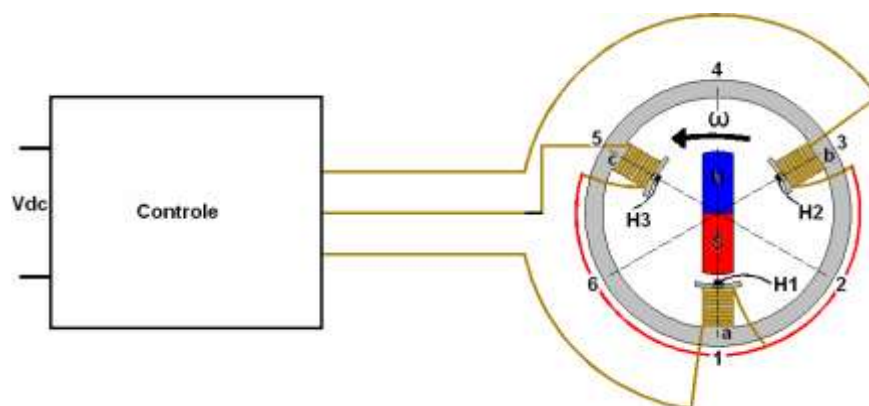
A seguir temos a descrição dos componentes utilizados na parte de determinação de posição (sensores) e de controle (microcontrolador).

### 2.2.1 Sensor de efeito *Hall*

Uma das principais preocupações da gestão de um motor BLDC é a sua operação de inicialização. A posição do rotor inicial deve ser conhecida de modo que as fases do motor correspondentes são energizadas. Se as fases energizadas estão incorretas, o rotor não será capaz de partir.

A maneira mais fácil de saber o momento correto para comutar as correntes de enrolamento é por meio de um sensor de posição. Muitos motores BLDC utilizados em automóveis possuem sensores de posição de efeito hall como na figura 8 a seguir.

**Figura 8** – Esquema de funcionamento de um motor BLDC com sensores.



Fonte: SOUTO SIQUEIRA, 2008.

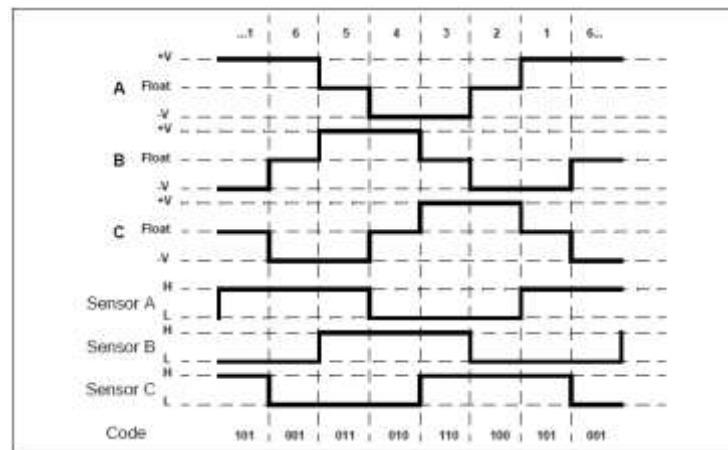
Edwin Herbert Hall em 1879 observou que se uma placa fina de ouro for colocada em um campo magnético perpendicular à sua superfície, uma corrente elétrica fluindo ao longo da placa podia causar uma diferença de potencial em uma direção perpendicular tanto ao campo magnético quanto à corrente. Este fenômeno, posteriormente chamado de efeito *Hall*,

acontece porque as partículas eletricamente carregadas, neste caso os elétrons, movendo-se em um campo magnético são influenciadas por uma força e defletidas lateralmente (D. HALLIDAY).

Cada elemento sensor emite um sinal digital de nível alto para 180 graus de rotação elétrica, e um nível baixo para os 180 graus elétricos restantes. Os três sensores estão desfasados entre si em 60 graus elétricos.

Um diagrama de tempos que mostra a relação entre as saídas do sensor e as tensões de acionamento é apresentado na Figura 9 a seguir.

**Figura 9** – Relação sensor X tempo de chaveamento.



Fonte: WARD BROWN, 2011.

Observa-se por meio da Figura 9 que as três saídas do sensor sobrepõem-se de tal forma a criar seis códigos de três bits correspondentes (seis passos) para cada uma das fases de acionamento. Os números mostrados em torno da periferia do diagrama do motor na figura 8 representam o código de posição do sensor. O polo norte do rotor aponta para o código que determina a posição do rotor. Os números são os níveis lógicos de sensor onde o bit mais significativo é o sensor C e menos significativo é o sensor A. Cada unidade de fase consiste de uma saída em nível alto, outra em nível baixo, e a restante flutuante (desligada).

### 2.2.2 Sistema sem sensores (*sensorless*)

Existem várias maneiras para o arranque de um motor BLDC sem utilizar sensores sendo as principais: o método da rampa e o método de indutância variável (INFINEON TECHNOLOGIES, 2010).



A seguir serão discutidas as duas maneiras mais comuns de se utilizar o sistema de detecção de posição sem sensores (*Sensorless*).

### 2.2.2.1 Método da rampa

O método da rampa consiste em energizar um par de fases à espera do rotor alinhar-se com o fluxo criado no estator. As fases do motor são então energizadas de acordo com certo padrão de energização. A velocidade do motor é aumentada gradualmente, diminuindo lentamente o período de comutação. Os valores utilizados para o período de comutação são armazenados em uma tabela que é caracterizada por uma rampa ascendente. Os valores da rampa devem ser ajustados de acordo com as variáveis: inércia, constante de força contra eletromotriz (*back EMF*), velocidade constante, a tensão aplicada e carga inicial do motor. (STMMICROELETRÔNICS, 2010).

Quando o motor atingir a velocidade em que o *back EMF* pode ser detectado, o funcionamento muda para o modo sem sensores (*sensorless*) via detecção de *back EMF* em cruzamento de zero. O período de comutação vai agora depender do tempo entre os cruzamentos de zero (STMMICROELETRÔNICS, 2010).

Embora os sensores Hall não sejam necessários para este método de arranque, o uso da rampa torna o sistema ineficaz uma vez que uma mudança nas características do motor como a carga inicial, irá dificultar a partida correta do motor.

### 2.2.2.2 - Método de sensoriamento de indutância variável

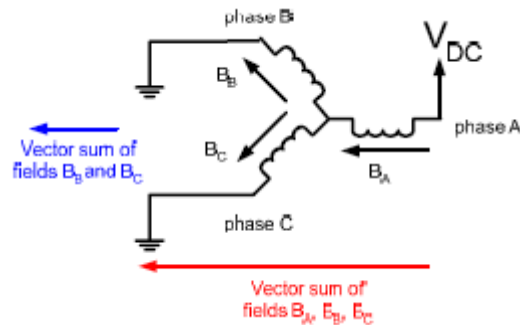
Um método muito mais eficaz usa a indutância variável para detectar a posição inicial do rotor. Como a indutância não depende das características específicas do motor é possível trabalhar em qualquer motor BLDC.

O método baseia-se no fato de que, se a tensão é aplicada através de um indutor, a corrente resultante vai adicionar ou subtrair o campo externo criado pelo ímã permanente, o que conduz a uma diminuição ou aumento da indutância. No caso de um motor BLDC, o indutor é o estator, enquanto o ímã permanente é o rotor (INFINEON TECHNOLOGIES, 2010).

A implementação do presente método requer que uma tensão seja aplicada durante um tempo fixo de modo a criar um campo magnético na direção de apenas um enrolamento. Dois campos magnéticos de direções opostas devem ser criados para cada enrolamento, para isso,

duas fases são jogadas ao negativo e uma é comutada para nível alto, criando um campo magnético para frente. Em seguida, dois enrolamentos são comutados para nível alto e um é aterrado, criando um campo magnético oposto ou para trás. Este procedimento é mostrado na Figura 10 a seguir, em que a fase A é energizada para frente (INFINEON TECHNOLOGIES, 2010).

**Figura 10** – Sentido de energização das fases para detecção da indutância variável.

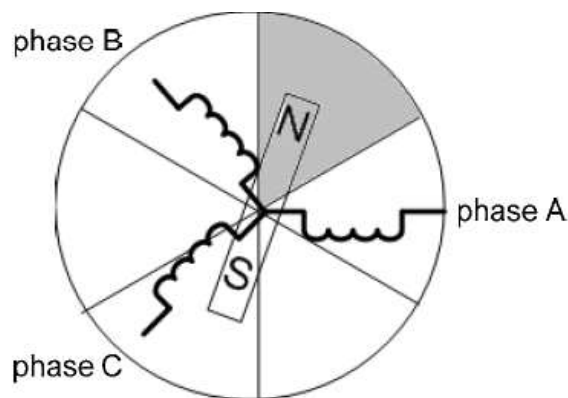


Fonte: INFINEON TECHNOLOGIES, 2006.

As duas correntes de pico criadas a partir dos dois campos magnéticos opostos são então medidos e comparados. O pico maior indicará a corrente que está na mesma direção que o campo magnético gerado pelo ímã permanente (rotor). Portanto, pode ser obtida a polaridade do ímã permanente, isto é, a posição do rotor encontra-se dentro de 180 graus (INFINEON TECHNOLOGIES, 2010).

Na repetição do procedimento para as outras duas fases, a posição do rotor pode ser reduzida dentro de um ângulo de 60 graus, que é suficiente para a comutação adequada como mostrado na Figura 11 a seguir.

**Figura 11** – Posição do rotor a 60°.



Fonte: INFINEON TECHNOLOGIES, 2006

### 2.2.3 Microcontroladores

São componentes responsáveis por armazenar instruções lógicas, aritméticas e de tomada de decisão.

A parte intitulada de controle é gravada no microcontrolador onde informações são recebidas por meio das entradas. O microcontrolador realiza as tomadas de decisão e encaminha essas decisões através das conexões de saída (BANZI, 2006).

Os microcontroladores são muito populares atualmente devido ao avanço da microeletrônica que disponibiliza rapidamente componentes cada vez mais poderosos. Além disto, os programas que implementam estas aplicações estão se tornando cada vez mais complexos e necessários nos dias atuais. O elemento central dos microcontroladores é o microprocessador (CPU). Adicionando-se memórias (RAM e ROM), interfaces de entrada/saída (E/S), conversores e timers (BANZI, 2006). A arquitetura básica de um microcontroladores comercial é ilustrada na Figura 12 a seguir.

**Figura 12** – Diagrama de blocos microcontrolador.



**Fonte:** Próprio autor, 2016.

#### 2.2.3.1 Arduino

Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open source* baseada em *hardware e software* flexíveis e de fácil utilização, sendo destinada aos artistas, designers, hobbistas, e qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos (BANZI, 2006).

O Arduino conta com uma linguagem de programação própria, ambiente de desenvolvimento próprio e pode ser fabricado manualmente ou comprado (BANZI, 2006).

O Mega 2560 é uma placa de microcontrolador baseada no ATmega2560. Possui 54 pinos de entrada/saída digitais, 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de *hardware*), oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, uma tomada de alimentação, um cabeçalho ICSP e um botão de reinicialização. Esse Arduino contém tudo o necessário para suportar o microcontrolador, basta conectá-lo a um computador com um cabo USB, ou adaptador AC-DC, ou bateria para iniciar (BANZI, 2006).

A placa Mega 2560 é compatível com a maioria dos escudos projetados para o Arduino Uno e as placas anteriores Duemilanove ou Diecimila e esta placa foi a escolhida para utilização no projeto. A Figura 13 a seguir, apresenta uma foto do Arduino Mega 2560.

**Figura 13** – Arduino Mega 2560.



Fonte: BANZI, 2016.

### ***2.2.3.2 Electronic Speed Control***

Um controle eletrônico de velocidade ou ESC (*Electronic Speed Control*) é um circuito eletrônico com o objetivo de controlar um motor BLDC através da técnica de sensoriamento e detecção do rotor (ZENDESK, 2015). Os ESCs são frequentemente utilizados em aeromodelismo. A Figura 14 a seguir, ilustra um ESC utilizado em aeromodelismo.

**Figura 14** – ESC de aeromodelismo.



Fonte: ALIEXPRESS, 2016.

O ESC possui internamente um microprocessador (Atmel), que é responsável pelo algoritmo de detecção da posição do rotor e tomada de decisão. Ele trabalha com um sinal de saída do tipo PPM (modulação por posição de pulso). Essa técnica consiste no posicionamento de um pulso retangular de amplitude e duração fixas dentro do intervalo de amostragem, de forma que a posição relativa seja proporcional ao sinal analógico (ARTUZI, 2001).

Essa técnica é semelhante ao PWM (modulação por largura de pulso), porém ao invés de trabalhar com uma gama de faixas de frequências, ela opera em uma faixa específica como, por exemplo, em servo motores (variação angular de 0 a 180°).

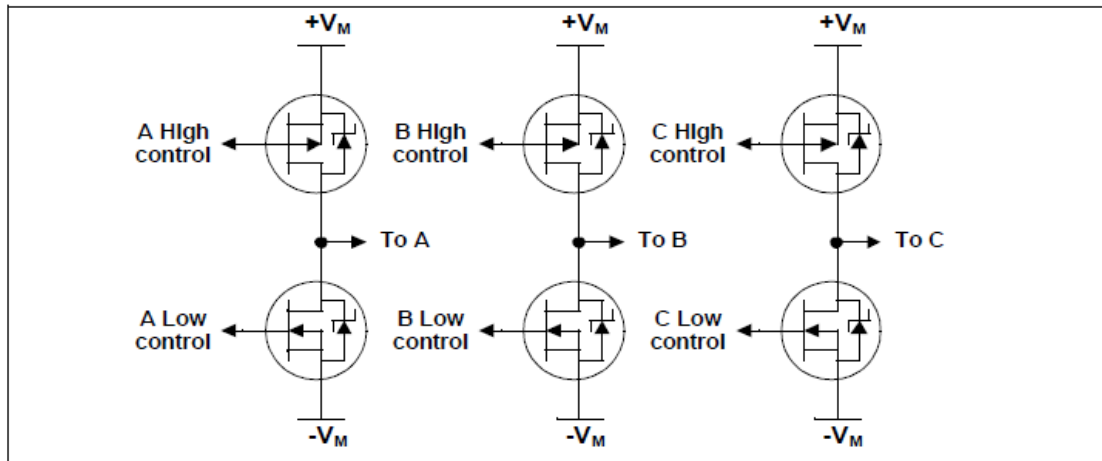
O sinal PPM recebido pelo ESC é capaz de inicializar o motor além de alterar sua velocidade ou até mesmo imobilizar o motor quando necessário.

Apesar de este item ser considerado uma caixa preta (inacessível seu código interno) ele foi integrado ao projeto pela necessidade de ser conseguir utilizar o sistema *sensorless* (sem sensores), cujo tempo necessário para implementação própria não seria possível.

### **2.3 Potência**

A unidade de potência simplificada é apresentada na Figura 15 a seguir.

**Figura 15** – Representação simplificada da ponte trifásica.



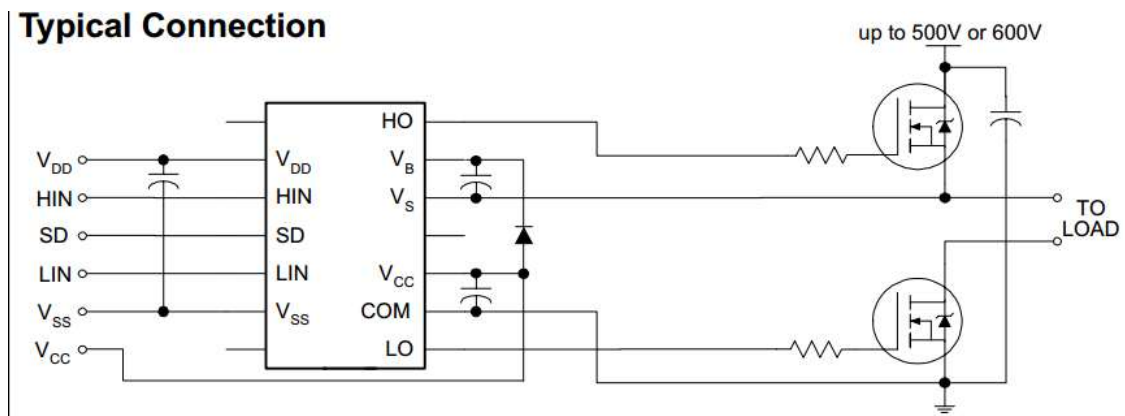
Fonte: WARD BROWN, 2011.

Cada uma das meia-pontes possui duas entradas (*High* e *Low*) que recebem o sinal de controle e uma saída que fica entre os dois transistores. O Papel de um driver de lógica digital é fazer a comunicação com o microcontrolador, e proteger este componente contra transientes, ou seja, proteger a etapa de potência contra um comando errado do microcontrolador. Este driver é descrito detalhado a seguir bem como os transistores utilizados na saída.

### 2.3.1 Drivers

Um driver é um amplificador de potência que aceita uma entrada de baixa potência a partir de um controlador (microcontrolador) e produz uma entrada de alta corrente para o *gate* de um transistor de alta potência, como um IGBT ou MOSFET de potência por exemplo. Os drivers de *gate* podem ser fornecidos no chip ou como um módulo discreto. Em essência, um controlador de *gate* consiste em um deslocador de nível em combinação com um amplificador. A Figura 16 a seguir, apresenta o circuito do driver ir2110.

**Figura 16**– Driver ir2110 em sua conexão típica



Fonte: INFINEON TECHNOLOGIES, 2016.

Existe uma precaução contra acionamento simultâneo de ambos os lados, chamado controle em tempo morto. Quando ocorre a transição de saída do estado de alta para a baixa, é necessário um tempo extra para que o lado de alta desligue e permita que o lado de baixa seja ativado. Drivers levam mais tempo para desligar do que para ligar, deste modo o tempo extra deve ser permitido para contra balancear essa característica. O controle de tempo morto em questão é proveniente da parte de controle.

### 2.3.2 Mosfets

Em transistores de Efeito de Campo (FETS) como o TBJ (transistor bipolar de junção), por exemplo, a tensão entre dois terminais do FET (*field-effect transistor*) controla a corrente que circula pelo terceiro terminal. Correspondentemente o FET pode ser usado tanto como amplificador quanto como uma chave (UNICAMP, 2011).

O nome do dispositivo origina-se de seu princípio de operação. O controle é baseado no campo elétrico estabelecido pela tensão aplicada no terminal de controle. O transistor mosfet (acrônimo de *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, ou transistor de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico), é, de longe, o tipo mais comum de transistores de efeito de campo em circuitos tanto digitais quanto analógicos (UNICAMP, 2011).

A operação de um mosfet pode ser dividida em três diferentes regiões, dependendo das tensões aplicadas sobre seus terminais:

Região de Corte: quando  $V_{GS} < V_t$ , onde  $V_{GS}$  é a tensão entre a porta (gate) e a fonte (*source*). O transistor permanece desligado, e não há condução entre o dreno e a fonte.

Enquanto a corrente entre o dreno e fonte deve idealmente ser zero devido à chave estar desligada, há uma fraca corrente invertida (UNICAMP, 2011).

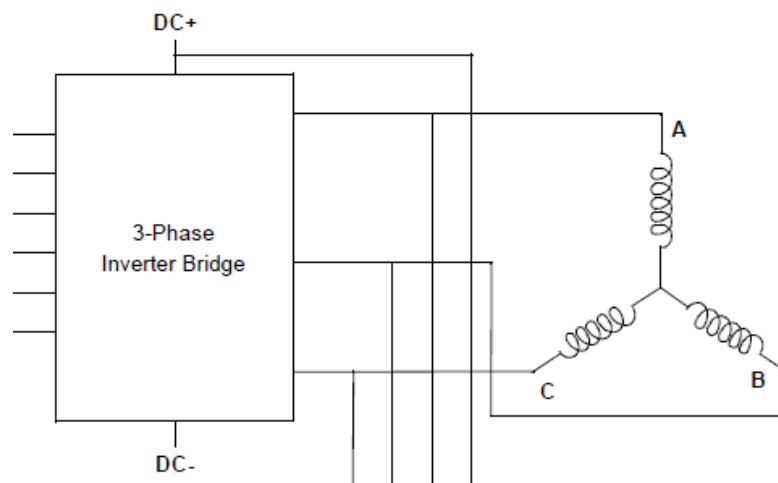
Região de Triodo (ou região linear): quando  $V_{GS} > V_t$  e  $V_{ds} < V_{GS} - V_t$  onde  $V_{ds}$  é a tensão entre dreno e fonte. O transistor é ligado, e o canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e fonte. O mosfet opera como um resistor, controlado pela tensão na porta (UNICAMP, 2011).

Região de Saturação: quando  $V_{GS} > V_t$  e  $V_{ds} > V_{GS} - V_t$ . O transistor fica ligado, e um canal que é criado permite o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Como a tensão de dreno é maior do que a tensão na porta, uma parte do canal é desligado. A criação dessa região é chamada de *pinch-off*. A corrente de dreno é agora relativamente independente da tensão de dreno (numa primeira aproximação) e é controlada somente pela tensão da porta (UNICAMP, 2011).

O circuito realizado no projeto necessita que o transistor opere como uma chave.

A Figura 17 a seguir ilustra o diagrama da ponte trifásica conectada aos enrolamentos do motor.

**Figura 17** – Ponte trifásica conectada ao estator do motor.



Fonte: PADMARAJA YEDAMALE, 2003.

Como o transistor será projetado para operar na região de saturação e a tensão entre dreno e fonte será a de alimentação, os fatores que foram determinantes na escolha do mosfet utilizado no projeto foram a corrente que flui entre o dreno e fonte e a tensão suportada entre esses terminais. Essa escolha será discutida no capítulo 3.



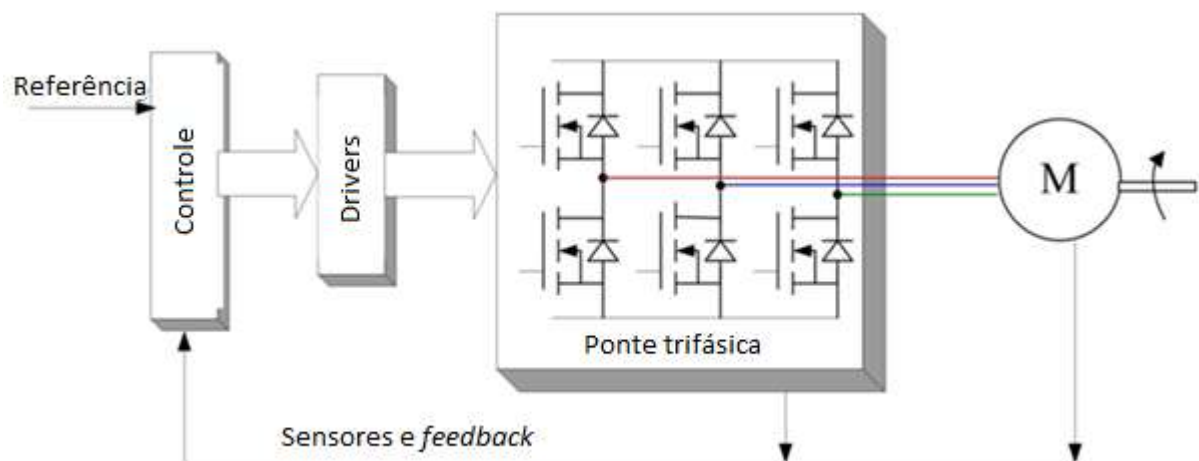
### 3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados todos os passos para desenvolvimento do projeto tais como: o desenvolvimento do algoritmo do Arduino, a montagem da placa de circuito eletrônico de controle, a montagem e escolha dos componentes da parte de potência.

São utilizadas três placas de circuito impresso: uma para os drivers de mosfet de potência e acoplamento do Arduino, uma para os mosfets e uma para fixar os opto-acopladores.

Para facilitar a compreensão sobre o papel de cada componente no funcionamento do controlador, a Figura 18 a seguir, apresenta um diagrama em blocos simplificado das etapas do processo de controle.

**Figura 18** – Diagrama de blocos dos componentes do controlador



**Fonte:** Próprio autor, 2016.

Cada um dos blocos apresentados no diagrama da Figura 18 é discutido com detalhes nos tópicos a seguir.

Os códigos de programação não estarão disponíveis no trabalho, uma vez que trata-se de um protótipo com condições de tornar-se um produto comercializável.

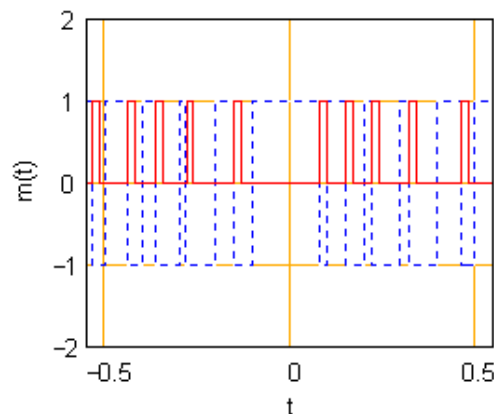
### 3.1 Controle

Para o projeto em questão a parte de controle é dividida em duas partes e é desempenhada pelo Arduino e pelo ESC (*Electronic speed control*).

#### 3.1.1 Arduino

O algoritmo do Arduino é utilizado para realizar a tarefa de controle do ESC e utiliza um sinal de saída do tipo PPM (modulação por posição de pulso). Essa técnica consiste no posicionamento de um pulso retangular de amplitude e duração fixas dentro do intervalo de amostragem, de forma que a posição relativa seja proporcional ao sinal analógico (ARTUZI, 2001). A Figura 19 a seguir, apresenta uma forma de onda típica do sinal PPM que também é o mesmo sinal utilizado em servo motores.

**Figura 19** – Sinal PPM

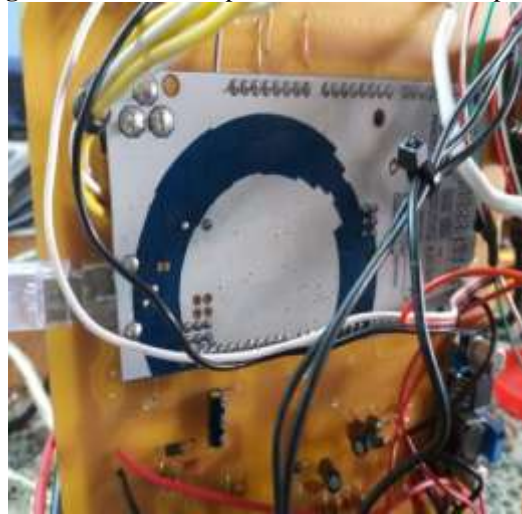


Fonte: ARTUZI, 2001.

Além de PPM o algoritmo também possui uma parte do código dedicada ao controle de velocidade do motor que é realizado por meio de uma tensão variável nas portas de entrada analógica do Arduino, mediante potenciômetro conectado a porta A0. Essa entrada analógica está representada como referência no diagrama de blocos.

Toda programação é realizada utilizando-se o IDE que é o *software* original de programação e gravação do Arduino. A compilação do programa é feita em um Arduino do tipo mega 2560 através de um cabo USB interligado a um *notebook*. A Figura 20 a seguir apresenta a conexão destes componentes.

**Figura 20** – Fundo da placa com o Arduino acoplado.



**Fonte:** Próprio autor, 2016.

Resumindo o arduino será responsável por:

- Partir o motor.
- Controle de velocidade.
- Comunicação com ESC.

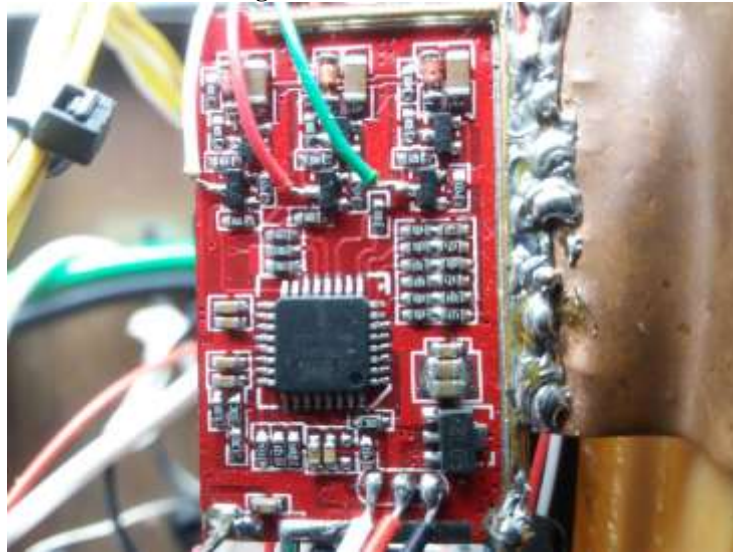
### **3.1.2 ESC (*Electronic speed Control*)**

O ESC é responsável por trabalhar a parte sem sensores do projeto e faz essa função em forma de caixa preta (funcionamento interno desconhecido) e também recebe as informações da placa de interface e do Arduino e controla os drivers da ponte trifásica.

No projeto é utilizado um ESC de aeromodelo que possui em seu microprocessador interno (Atmel), um algoritmo de comando para motores *brushless* do tipo *Sensorless*.

A parte de sensoriamento utilizada pelo ESC, na lógica de comando, é conectada por meio de cabos conectados à placa de interface.

A Figura 21 a seguir, apresenta o ESC conectado, com componentes externos e as conexões feitas utilizando cabos.

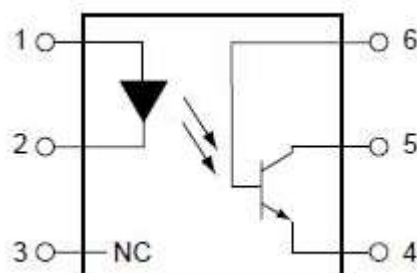
**Figura 21** – Placa do ESC

Fonte: Próprio autor, 2016.

### 3.1.3 Sensores e *feedback*

Para proteção e comunicação dos níveis de tensão entre comando e motor, é montada uma placa com opto-acopladores para garantir isolamento elétrico entre a parte de comando e a parte de potência.

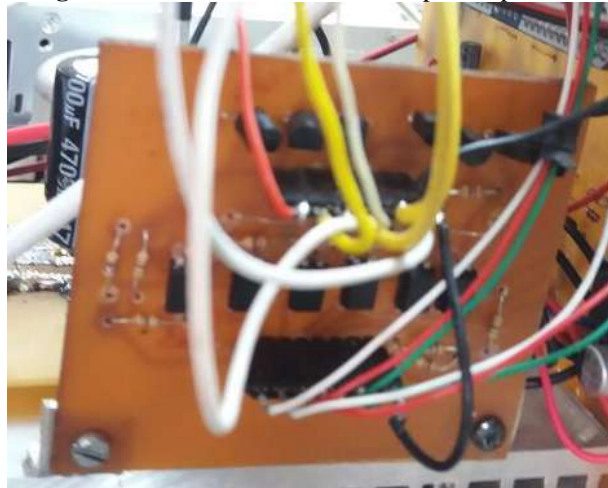
Na Figura 22 a seguir temos a representação interna do opto-acoplador e suas conexões.

**Figura 22** – Bloco funcional opto-acoplador

Fonte: VISHAY, 2016.

Como existem seis mosfets na ponte trifásica a placa de interface é montada com seis opto-acopladores, que fazem a ligação entre o motor e os componentes digitais para que ocorra o sensoreamento e a deteção de *back EMF*, que é vital para o funcionamento do controlador *sensorless*. Na Figura 23 a seguir tem-se a placa montada e seus respectivos componentes externos.

**Figura 23** – Placa de interface dos opto acopladores



Fonte: Próprio autor, 2016.

### 3.2 Potência

Nesta parte do projeto utilizaram-se os mosfets de potência do tipo irfp 4004 com características de tensão máxima entre dreno e fonte  $V_{dss} = 40 \text{ V}$ , resistência entre dreno e fonte de  $R_{ds} = 1,35 \text{ m}\Omega$  e corrente máxima de condução no dreno de  $I_d = 195 \text{ A}$ .

Esse mosfet é escolhido, pelo fato da sua resistência entre *drain* e *source* ser baixa (com relação à aplicação se comparado a outros modelos semelhantes), além de suportar uma alta corrente de *drain*.

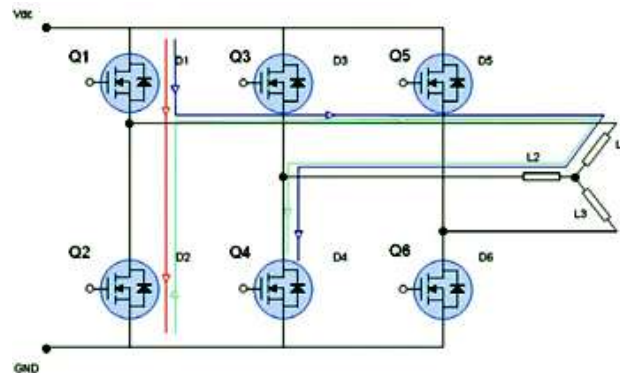
Para aplicações industriais cuja tensão seja maior que  $40 \text{ V}$  esse mosfet não poderia ser utilizado, no entanto esse fator não foi levado em consideração por se tratar de um protótipo que trabalha com aplicações em baixa tensão.

Apesar de utilizar dissipador de calor acoplado aos mosfets, não foi feito um projeto térmico, pois demandaria um estudo cujo tempo de entrega era insuficiente.

O Software utilizado para confecção desta e das demais placas de circuito impresso foi o PROTEUS ARES.

O arranjo formado pelos mosfets forma uma ponte trifásica na qual cada fase é obtida pelo chaveamento de dois mosfets por vez. A Figura 24 a seguir, demonstra as conexões entre eles e o motor.

**Figura 24** – Ponte trifásica conectada ao estator do motor



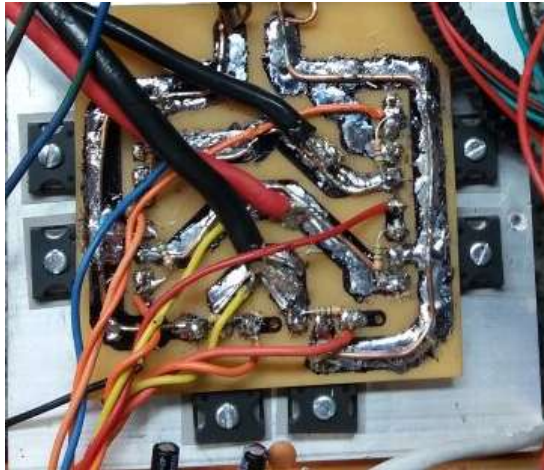
**Fonte:** STEFANO FINOCCHIARO, 2016.

Por meio da Figura 24 pode-se perceber que a corrente flui do positivo da fonte ou VDC para o dreno no mosfet Q1, que funciona como uma chave aberta. Em seguida, a corrente percorre uma das bobinas do motor para então, através do neutro virtual, passar para outra bobina conectada à *source* do mosfet Q4, e chegar finalmente ao seu destino que é o GND.

A ativação de cada um desses mosfets fica responsável pela porta ou *gate* que recebe o sinal dos drivers.

A Figura 25 a seguir apresenta a placa montada com os componentes apresentados nesta seção.

**Figura 25**– Ponte trifásica montada na placa



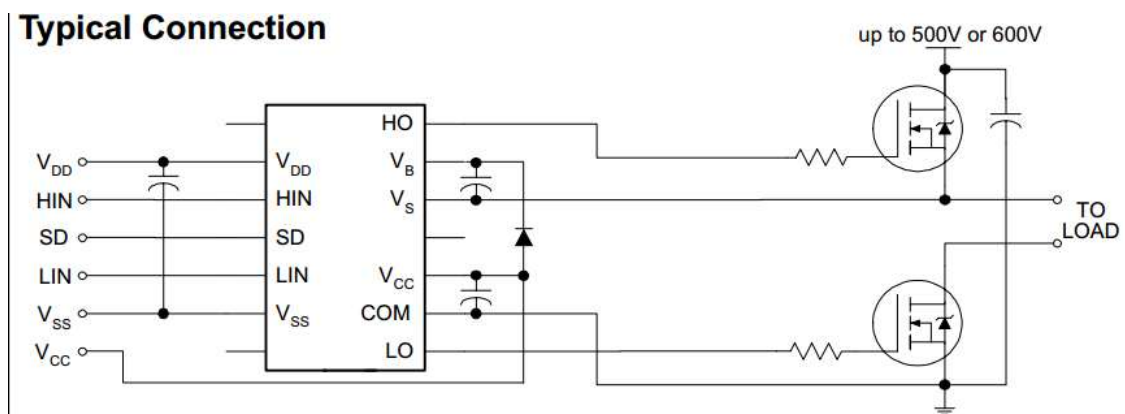
Fonte: Próprio autor, 2016.

### 3.3 Drivers

A ligação entre a parte de controle e de potência deve ser feita de maneira a isolar as duas partes para proteção, além de assegurar os níveis adequados de tensão e corrente para ambas as partes do circuito. Essa função é realizada por drivers do tipo ir 2110 que recebem o sinal de comando digital do ESC e fazem a transformação de sinal para níveis de chaveamento do *gate* dos mosfets.

A Figura 26 a seguir, ilustra o esquemático sugerido pelo fabricante para montagem do driver em sua configuração em ponte.

**Figura 26**– Driver ir2110 em sua conexão típica



Fonte: INFINEON TECHNOLOGIES, 2016.

A Figura 27 a seguir, apresenta a placa montada com os drivers em seu encapsulamento SMD, os componentes externos utilizados pelos drivers, o Arduino acoplado através de pinos e os respectivos cabos e fios de conexão.

**Figura 27** – Face frontal com os drivers devidamente soldados na placa.



**Fonte:** Próprio autor, 2016.

### 3.4 Conversor Buck DC ou regulador de tensão

O conversor Buck utilizado no projeto regula a tensão de alimentação de 40 V que é comum para todo sistema, para um valor de 12 volts, tensão que é utilizada para alimentar componentes como, os drivers, Arduino, placa de interface, e o ESC. Dessa forma apenas uma fonte de alimentação é utilizada tanto para a ponte trifásica, quanto para o controle, com tensões na faixa de 12 a 40 V na entrada. A Figura 28 a seguir mostra o regulador utilizado no projeto.

**Figura 28** – Regulador LDO para normalização das tensões do sistema.



**Fonte:** Próprio autor, 2016.



## 4 RESULTADOS

Após a montagem do controlador proposto foram feitas simulações computacionais e medições práticas utilizando o motor que está representado no apêndice C. Tais resultados foram comparados entre si e com resultados encontrados na literatura para validação do controlador desenvolvido. Os principais testes realizados foram:

- Avaliação da forma de onda gerada nos enrolamentos do motor.
- Gráficos que relacionam consumo de energia, velocidade e torque e inserção de cargas no eixo do motor para avaliação da relação torque velocidade.
- Análises de mercado.

A Tabela 2 a seguir, apresenta as características dos motores utilizados na simulação, nos testes práticos e na comparação com a literatura.

**Tabela 2** - Características dos motores

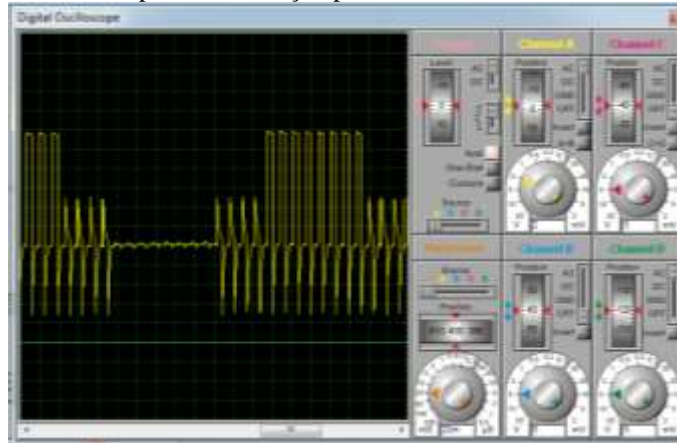
	<b>Motor simulação</b>	<b>Motor Prático</b>	<b>Motor encontrado na literatura</b>
<b>Tensão nominal</b>	12 V	12 V	12 V
<b>Velocidade nominal</b>	1200 rpm	10000 rpm	8000 rpm
<b>Resistência dos enrolamentos</b>	5 ohm	-	-
<b>Indutância dos enrolamentos</b>	1 mH	-	-
<b>Numero de polos</b>	-	4	12

**Fonte:** Próprio Autor, 2016.

### 4.1 Avaliações da forma de onda trapezoidal nos enrolamentos do motor

Para simulação da forma de onda dos enrolamentos do motor é utilizado o *software* PROTEUS ISIS e a ferramenta osciloscópio virtual que estão representados nos esquemáticos dos apêndices A e B. Para esta análise considera-se os dados do motor para simulação apresentados na Tabela 2 o ciclo de trabalho de PWM do controlador ajustado em 50%. A forma de onda obtida é apresentada na Figura 29 a seguir.

**Figura 29** – Osciloscópio em simulação para o motor a um ciclo de trabalho de 50%



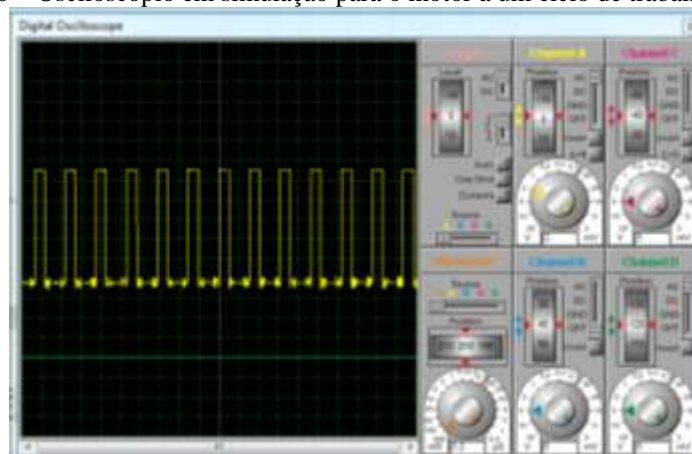
**Fonte:** Próprio autor, 2016.

Observa-se por meio da Figura 29 que a tensão de pico em um dos enrolamentos do motor é de 6 V. Esse resultado é esperado uma vez que a ponte trifásica recebe uma fonte de 12 V, e cada ciclo de trabalho possui dois enrolamentos do motor sendo energizados por vez, totalizando 6 V em cada um.

Destaca-se também que o comportamento obtido é uma característica comum em circuitos que utilizam controle por PWM.

Conforme esperado, a resposta da forma de onda para velocidade máxima torna-se mais contínua, pois neste caso, ao tornar o ciclo de trabalho do sinal próximo de 100%, a energia entregue ao enrolamento do motor se torna máxima. Esta característica é ilustrada por meio da Figura 30 a seguir.

**Figura 30** – Osciloscópio em simulação para o motor a um ciclo de trabalho de 100%

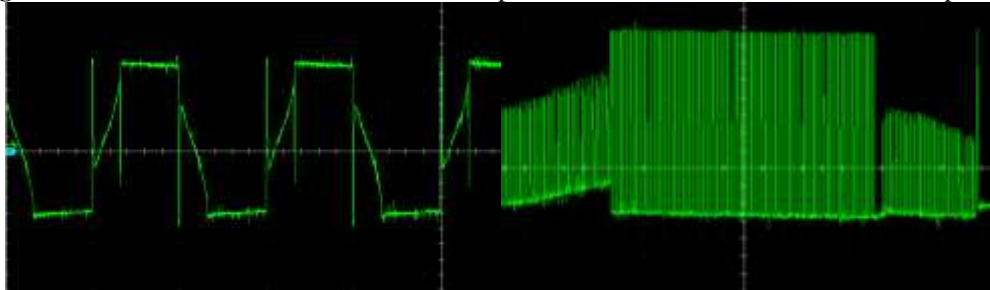


**Fonte:** Próprio autor, 2016.

A Figura 30 também permite evidenciar que alguns fatores limitam a velocidade desse tipo de motor tais como: a tensão de alimentação; o ciclo de trabalho do PWM; e a frequência de chaveamento dos mosfets.

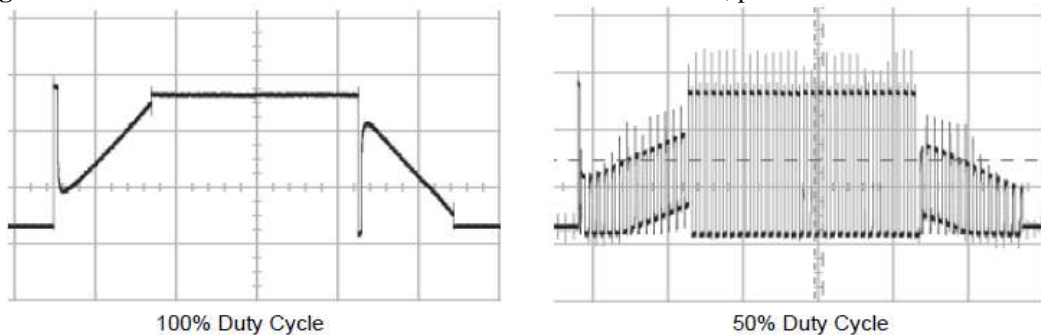
As Figuras 31 e 32 apresentam, respectivamente, as formas de onda dos resultados dos testes práticos e resultados encontrados na literatura para facilitar a comparação de tais resultados, onde a esquerda temos a velocidade regulada para seu valor máximo (ciclo de trabalho do PWM em 100%) e a direita uma velocidade média (ciclo de trabalho do PWM em 50%).

**Figura 31** – Tensão do enrolamento A do motor para velocidade média e máxima no teste prático.



**Fonte:** Próprio autor, 2016.

**Figura 32** – Sinal dos enrolamentos do motor encontrado na literatura, para velocidade média e máxima.



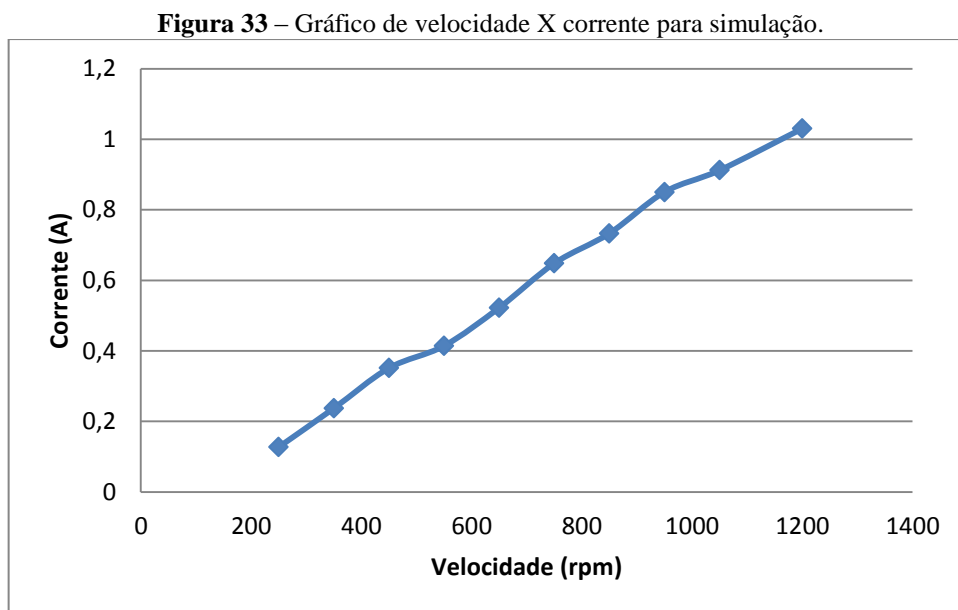
**Fonte:** WARD BROWN, 2011.

Observa-se que, em sistemas reais, diferentemente do que acontece no simulador, o sinal visualizado nos enrolamentos do motor não é tão uniforme e sofre distorções em sua forma de onda. Além disso, percebe-se que, apesar de serem motores diferentes, instrumentos de medição diferentes e controladores diferentes, os sinais são semelhantes validando a qualidade de sinal do controlador proposto.

Os níveis de tensão de pico observados no controlador proposto e na literatura se mostraram ligeiramente diferentes pelo fato do simulador desprezar algumas perdas que estão presentes em sistemas reais, tornando-se irrelevante a sua consideração.

## 4.2 Avaliação de curvas características de motores: Torque X Velocidade e Corrente de Armadura X Velocidade.

O consumo de corrente do motor de simulação é avaliado para uma variação da velocidade do motor em uma faixa entre 250 e 1020 rpm, cujo resultado é apresentado na Figura 33 a seguir.



Fonte: WARD BROWN,2011.

Observa-se que o gráfico de velocidade X corrente de armadura apresenta um comportamento aproximadamente linear, o que está em conformidade com as equações 2 e 3, apresentadas a seguir.

$$V_{perdas} = I_{entrada} * R_m \quad (1)$$

Na qual:

$I_{entrada}$  = Corrente de consumo do motor [A];

$R_m$  = Resistencia interna do motor em [ $\Omega$ ]

$$W_m = K_v * (V_{entrada} - V_{perdas}) \quad (2)$$

Na qual:

$W_m$  = Velocidade do motor [rad/seg];

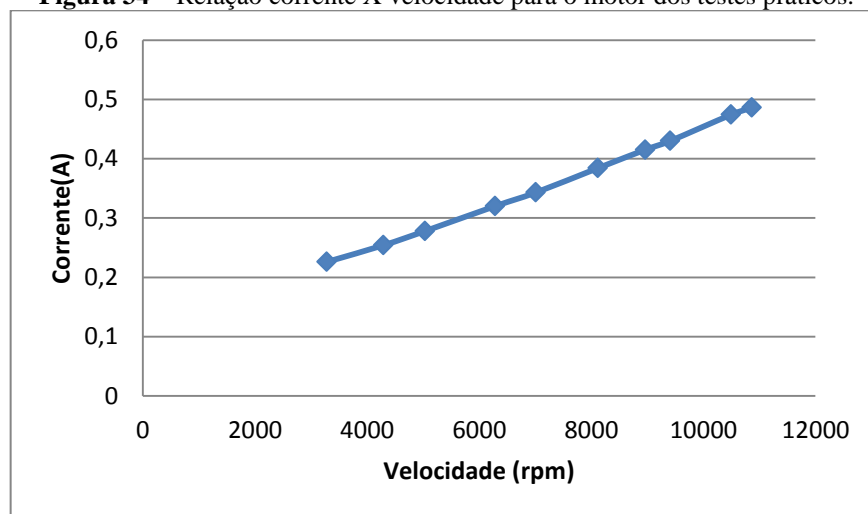
$K_v$  = Constante do motor [adimensional];

$V_{entrada}$  = Tensão de entrada [V];

$V_{perdas}$  = Tensão das perdas [V];

Esse comportamento também é observado nos resultados dos testes práticos conforme a Figuras 34 a seguir.

**Figura 34** – Relação corrente X velocidade para o motor dos testes práticos.



**Fonte:** Próprio autor.

Para os resultados obtidos na literatura não foram encontrados gráficos para análise, porém, foi encontrada uma tabela que foi representada na Tabela 3 a seguir, que apresenta valores que possibilitaram a geração do gráfico como podemos ver na Figura 34 que procede a tabela 3.

**Tabela 3** – Tabela de valores referente a corrente e velocidade e para o motor encontrado na literatura.

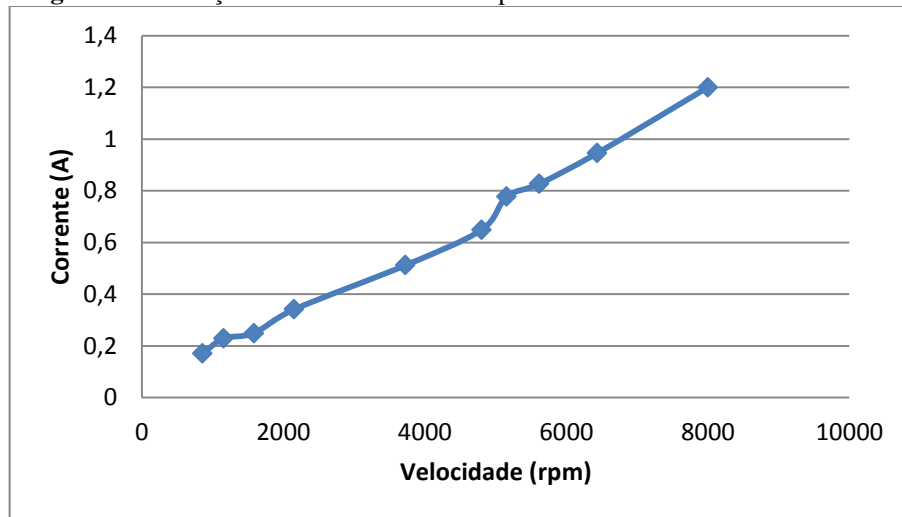
Velocidade (rpm)	Corrente (A)
857,14	0,171
1153,85	0,229
1583,11	0,249
2150,54	0,341
3726,71	0,512
4800	0,649
5154,64	0,777
5617,98	0,827

(Continuação)

Velocidade (rpm)	Corrente (A)
6437,77	0,946
8000	1,2

Fonte: WARD BROWN, 2011.

**Figura 35** – Relação corrente X velocidade para o motor encontrado na literatura.



Fonte: Próprio autor.

A similaridade do comportamento dos controladores, apesar das condições em cada teste realizado serem ligeiramente diferentes, deixa claro a confiabilidade do controlador proposto no trabalho, e também demonstram estar de acordo com as equações 1 e 2.

Como não é possível medir a potência mecânica para determinar o torque desenvolvido, admite-se 5% de perdas com relação a potência de entrada, para estimação do torque por meio da equação 3.

$$T_{saída} = \frac{P_{saída}}{W_M} \quad (3)$$

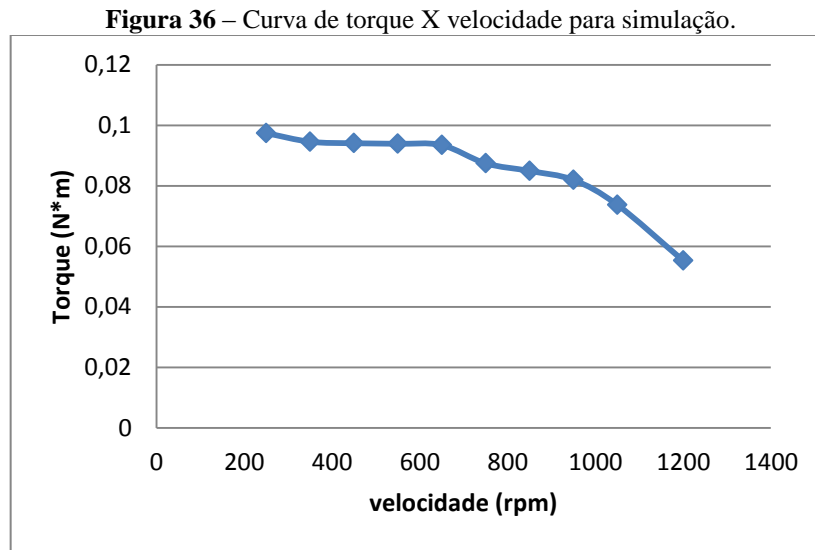
Na qual:

$T_{saída}$  = Torque desenvolvido pelo motor em [N\*m];

$P_{saída}$  = Potência de saída do motor em Watts [W];

$W_M$  = Velocidade angular do motor em radianos/segundo [Rad/seg];

A característica de torque e velocidade das simulações é apresentada na figura 36 a seguir.

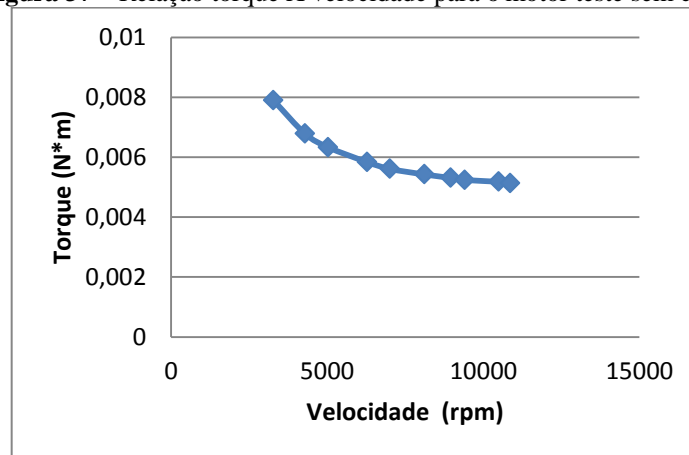


**Fonte:** Próprio autor, 2016.

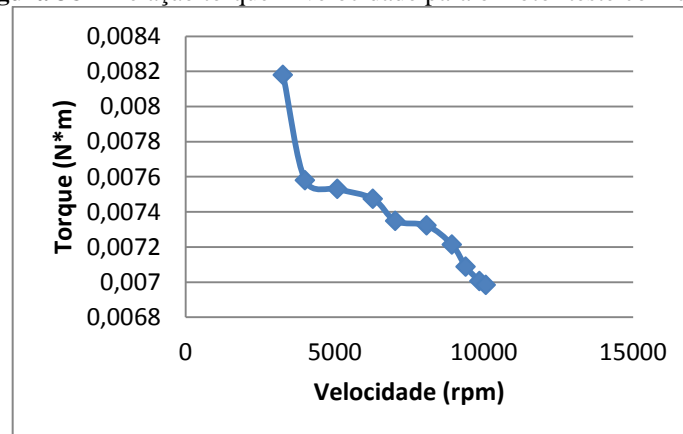
Observa-se que a Figura 36 está de acordo com o que foi dito na parte de revisão teórica sobre motores BLDC, e evidencia uma queda no torque com o aumento da velocidade e, uma diminuição da velocidade com o crescimento do torque. Essa relação deixa clara a necessidade de motores que sejam capazes de manter o torque para uma gama de velocidades.

Para o comparativo entre torque e velocidade no caso dos testes práticos, adicionou-se uma carga (peso ao eixo do motor) para realização de testes a vazio, quanto em uma condição de carga para o controlador proposto.

A seguir as Figuras 37 e 38 apresentam respectivamente, o torque desenvolvido a vazio, assim como o torque com a utilização de carga. A carga adicionada ao eixo do motor foi um disco de metal de aproximadamente 100 gramas.

**Figura 37** – Relação torque X velocidade para o motor teste sem carga

Fonte: Próprio autor, 2016.

**Figura 38** – Relação torque X velocidade para o motor teste com carga.

Fonte: Próprio autor, 2016.

Percebe-se que adicionar uma carga ao eixo do motor provoca um aumento na corrente consumida, isso ocorre devido as características do motor que mediante uma tentativa de diminuição da velocidade por meio da adição da carga, faz com que o motor solicite uma corrente maior para reestabelecer a velocidade anterior.

Além do aumento da corrente, percebe-se também um pico de torque ao iniciar o desenvolvimento da velocidade o que também é esperado já que ao sair do estado de repouso com uma carga acoplada ao eixo o motor solicita um torque mais acentuado.

Vale ressaltar também que para o motor com carga a velocidade final atingida é inferior a velocidade máxima do motor sem carga, o que comprova a não existência de uma relação diretamente proporcional entre torque e velocidade.



### **4.3 Análises de mercado**

A viabilidade econômica de um sistema é um dos parâmetros mais importantes em qualquer projeto de engenharia. Deste modo, torna-se pertinente estimar o custo de produção das partes elétrica e eletrônica do controlador como opção de tomada de decisão.

A escolha dos fornecedores e distribuidores utilizados é realizada com base em alguns critérios bem definidos, sendo o custo dos componentes o principal. Vale ressaltar que todos os preços de componentes apresentados são atuais, sendo coletados entre os dias 13 e 14 de novembro de 2016.

A Tabela 4 apresenta todos os componentes utilizados para a implementação prática do controlador desenvolvido, a quantidade empregada, assim como o custo estimado.

**Tabela 4** – Custos estimados para montagem do controlador.

<b>Componente</b>	<b>Tipo</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Preço Unidade (R\$)</b>	<b>Total (R\$)</b>
<b>Ir2110</b>	Driver de mosfets	3	Mercado livre	10,00	30,00
<b>Irfp4004</b>	mosfet	6	Mercado livre	12,00	72,00
<b>Arduino R3 Atmega Mega 2560</b>	Arduino	1	Mercado livre	54,00	54,00
<b>Esc 30a</b>	ESC	1	Mercado livre	28,99	28,99
<b>Regulador Dc-dc Step Down Lm2596</b>	Regulador de tensão	1	Mercado livre	6,79	6,79
<b>Placas De Fenolite Cobreada 40x30</b>	Placas	2	Mercado livre	16,80	33,60
<b>Percloroeto De Ferro</b>	Percloroeto de ferro	1	Mercado livre	R\$7,80	7,80
<b>Componentes discretos</b>	Resistor, capacitor, indutor, diodos	20	Mercado livre	-	15,00
<b>Opto acopladores</b>	Opto eletrônicos	6	Mercado livre	0,50	3,00
<b>Total</b>	-	41	-	-	251,18

**Fonte:** Próprio autor, 2016.

A seguir na tabela 5, temos o comparativo entre o custo do controlador proposto e um controlador encontrado para compra no mercado nacional (site Mercado livre), apesar do mesmo ser importado.

**Tabela 5** – Tabela comparativa entre os valores do controlador proposto e um controlador encontrado no mercado.

<b>Características</b>	<b>Custo do controlador proposto</b>	<b>Controlador encontrado no mercado</b>
<b>Custo do controlador</b>	R\$251,18	R\$390,00
<b>Tensão de operação</b>	12 a 40V	36V
<b>Potência máxima</b>	5000W	600W

**Fonte:** Próprio autor,2016.

Não foram encontrados controladores produzidos no Brasil, e mesmo o controlador importado encontrado no site possui seu custo elevado devido as taxas de importação que mesmo não explícitos agregam valor ao custo final.

O controlador desenvolvido possui a vantagem de operar em uma gama extensa de motores, sendo capaz de acionar e controlar a velocidade de motores com potências que variam entre 1 KW até 5 KW. Vale ressaltar que os controladores encontrados no mercado são fabricados para uma tensão e potência específica. Além disso, o controlador contou com o superdimensionamento de alguns componentes por se tratar de um protótipo, que causaram gastos desnecessários, gastos esses que posteriormente poderiam ser eliminados aumentando a vantagem de preço do controlador proposto.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho possibilitou o desenvolvimento de um controlador eficiente e de baixo custo para controle de velocidades de motores BLDC, capaz de ser aplicado a uma vasta gama de motores (de 1 KW até 5 KW). Apesar de o controlador ser o objetivo final do trabalho, o seu desenvolvimento permite o entendimento sobre o funcionamento de motores BLDC, bem como dos componentes eletrônicos presentes no sistema. É possível ter uma visão geral dos vários módulos que constituem o controlador e entender as suas vantagens e desvantagens.

As análises e medições realizadas permitem a avaliação de curvas típicas fundamentais para a especificação de motores. O desenvolvimento prático do projeto, proporcionou comprovar equações e relações já descritas no estudo da arte, como por exemplo, a relação de não proporcionalidade entre torque e velocidade.

Ao adicionar carga ao eixo do motor, a evidente distorção causada na curva de desenvolvimento de torque e velocidade próximo a sua partida, comprova a necessidade de se considerar um fator muito importante a análise e o dimensionamento correto dos componentes utilizados no transitório desse motor, já que ao serem levados a situações extremas e de limiar esses componentes podem ser danificados causando mau funcionamento do controlador.

Comparando-se o controlar desenvolvido com os controladores existentes no mercado, observa-se que, o projeto desenvolvido possui a vantagem de permitir a operação para uma ampla faixa de potências. Além disso, é possível uma redução de custo de produção com um dimensionamento mais criterioso dos componentes do projeto. Assim, de posse de todas as informações técnicas desenvolvidas é possível idealizar um protótipo de controlador eficiente e de baixo custo capaz de concorrer com os controladores disponíveis no mercado.

Esse trabalho evidencia a importância do controle de velocidade de motores BLDC e apresenta detalhadamente as etapas e os componentes necessários para o desenvolvimento um controlador de velocidades real. Contudo, apesar do controlador cumprir com eficiência o propósito para o qual foi criado, é possível implementar melhorias e inovações no projeto. Assim, como propostas para trabalhos futuros destacam-se: (i) incorporação da frenagem regenerativa ao projeto, uma vez que a maioria das aplicações atuais para o controlador utilizam baterias como fonte de energia, e na frenagem regenerativa o próprio motor é capaz de carregar as baterias, (ii) utilização de sensores *hall* em substituição a lógica *sensorless*, especialmente para aplicações cujo torque de partida é muito alto ou a velocidade de operação

do motor é muito baixa e (iii) utilização do arduíno para fazer toda a parte de controle e lógica, eliminado a necessidade do ESC.

## 6 REFERÊNCIAS

ALIEXPRESS.ESC - **eletronic speed control**. 2016. Disponível em: <[https://pt.aliexpress.com/store/product/AutoQuad-ESC32-30A-ESC-72MHz-32bit-ARM-electronic-speed-controller-7-4-18-5V-2S-5S/1494213\\_32262966152.html?detailNewVersion=&categoryId=200001407](https://pt.aliexpress.com/store/product/AutoQuad-ESC32-30A-ESC-72MHz-32bit-ARM-electronic-speed-controller-7-4-18-5V-2S-5S/1494213_32262966152.html?detailNewVersion=&categoryId=200001407)>. Acesso em: 8 novembro. 2016.

ARTUZI. **Técnicas de Modulação** - 23.02.2001. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/artuzi/apostila/cap4/pg07.html>>. Acesso em: 22 out. 2016.

ATMEL. **Scalar Sensorless Methods to Drive BLDC Motors**.2013. Disponível em: <[http://www.atmel.com/Images/Atmel-8305-AVR928-Scalar-Sensorless-Methods-to-Drive-BLDC-Motors\\_Application-Note.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8305-AVR928-Scalar-Sensorless-Methods-to-Drive-BLDC-Motors_Application-Note.pdf)>. Acesso em: 15 set. 2016.

ATMEL CORPORATION. **AVR444: Sensorless controle of 3-phase brushless DC motors**. 2014. Disponível em: <<http://www.atmel.com/images/doc8012.pdf>> Acesso em: 02 de outubro 2016.

BANZI, M. et al. **ARDUÍNO**. 2006. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>Acesso em: 10 de Novembro de 2016.

D. HALLIDAY. **Fundamentos de Física**, Vols. 3 e 4, LTC, 4 a ed., Rio de Janeiro, 1993.

INFINEON TECHNOLOGIES. **Start-up Control Algorithm for Sensorless and Variable Load BLDC Control Using Variable Inductance Sensing Method**. 2010. Disponível em:<[http://www.infineon.com/dgdl/ap0801810\\_Sensorless\\_Variable\\_Inductance\\_Sensing.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40c7c150b39](http://www.infineon.com/dgdl/ap0801810_Sensorless_Variable_Inductance_Sensing.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40c7c150b39)>. Acesso em: 4 out. 2016.

INFINEON TECHNOLOGIES . **IR2110 datasheet**. 2011. Disponível em: <<http://www.infineon.com/dgdl/ir2110.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e>>. Acesso em: 25 out. 2016.

PADMARAJA YEDAMALE (Usa). **Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals**. Atlanta: Microchip Technology Inc, 2003. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2016.

SOUTO SIQUEIRA. **Projeto e Simulação da Operação de um Motor de Corrente Contínua Sem Escovas**.2008. In: XII Seminário de Iniciação Científica. Uberlândia, 2008. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: < <http://docplayer.com.br/8332503-Projeto-e-simulacao-da-operacao-de-um-motor-de-corrente-continua-sem-escovas.html>>. Acesso em: 07 set. 2016.

STEFANO FINOCCHIARO. **Using fast-recover MOSFETs for current commutation in brushless DC motors**. Disponível em: <<http://www.embedded.com/design/other/4007109/Using-fast-recover-MOSFETs-for-current-commutation-in-brushless-DC-motors>>. Acesso em: 24 out. 2016.

STMMICROELETRÔNICS. **Sensorless bldc motor control and bemf sampling methods.**

2010. Disponível em:

<[http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/aa/b4/69/3f/75/58/4a/a1/CD00020086.pdf/files/CD00020086.pdf/jcr:content/translations/en.CD00020086.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/aa/b4/69/3f/75/58/4a/a1/CD00020086.pdf/files/CD00020086.pdf/jcr:content/translations/en.CD00020086.pdf)>. Acesso em: 5 novembro. 2016.

UNICAMP. **Transistores de efeito de campo.** 2011. Disponível em:

<<http://www.demic.fee.unicamp.br/~elnatan/ee640/aula%20mosfet.pdf>>. Acesso em: 10 novembro de 2016.

VISHAY. **datasheet 4n25.** Disponível em: <<http://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>>.

Acesso em: 31 out. 2016.

WARD BROWN (Usa). **Brushless DC Motor Control Made Easy.** Atlanta: Microchip Technology Inc, 2011. Disponível em:

<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857B.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2016.

WEG MOTORS. **Motores elétricos Guia de especificação.** Disponível em:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2016.

WEG MOTORS. **Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão:**

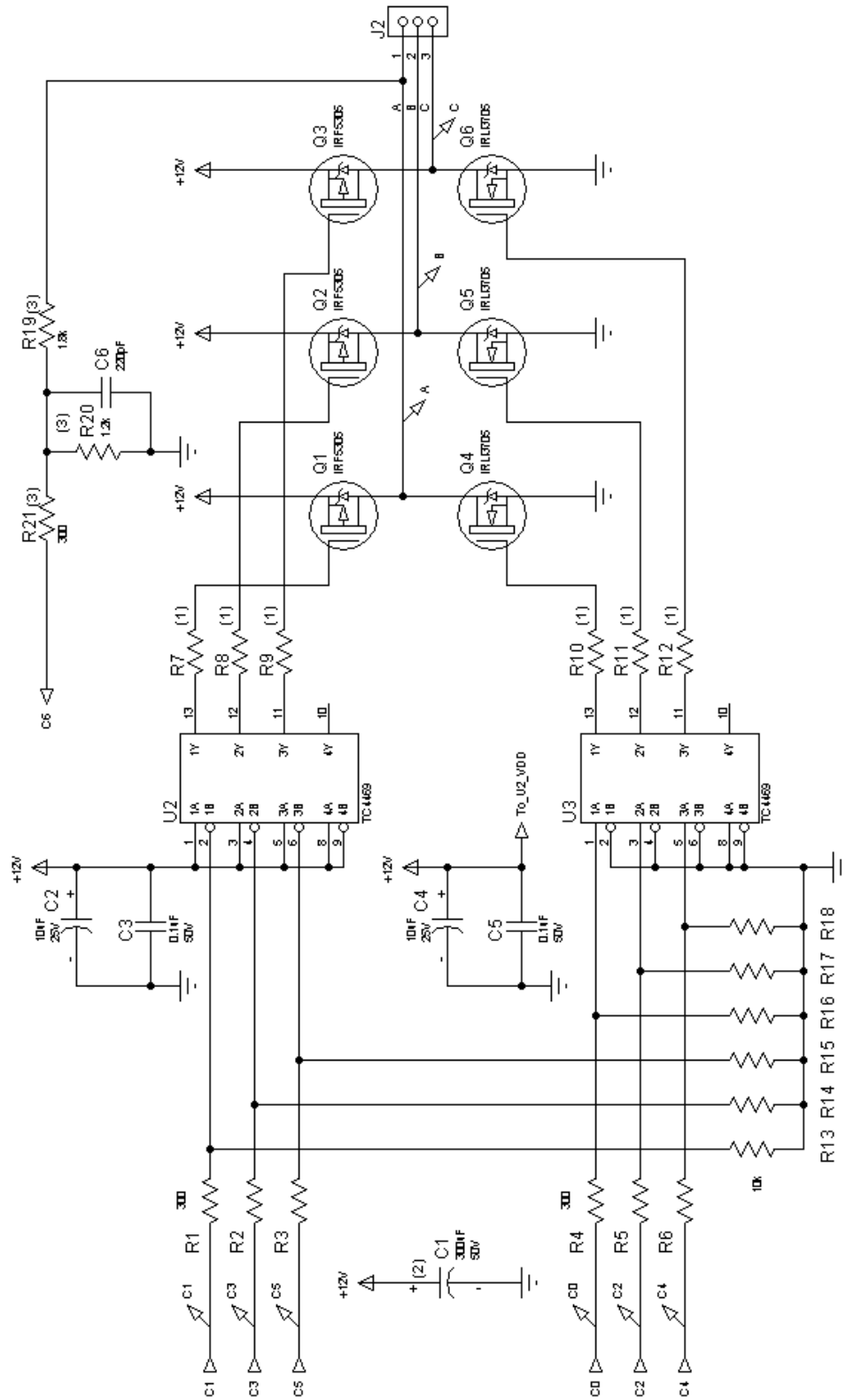
**especificação, características e manutenção.** Disponível em:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-6-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. 02 de outubro 2016.

ZENDESK. **ESC - Electronic Speed Controller.** 2015. Disponível em:

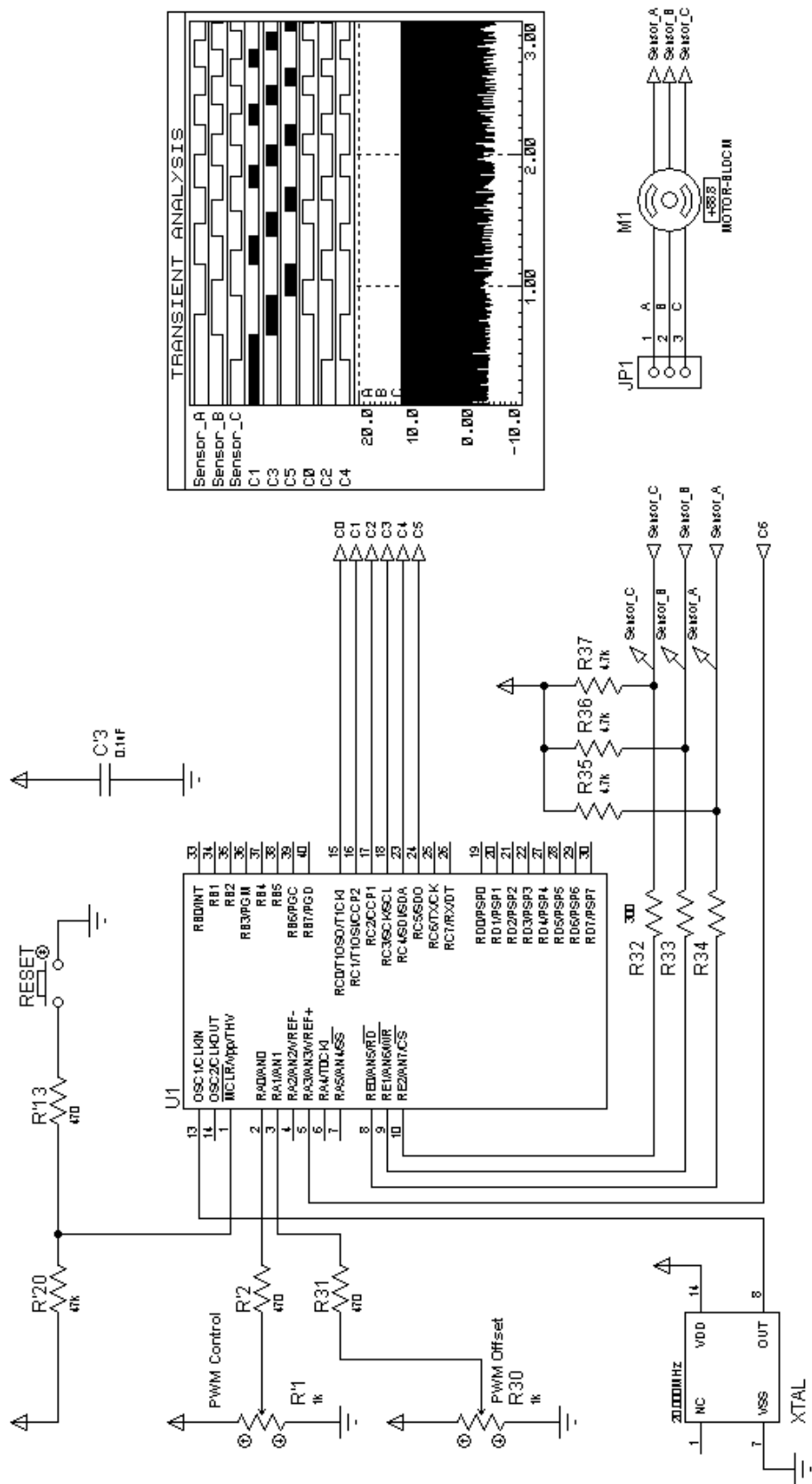
<<https://hoverflytech.zendesk.com/hc/en-us/articles/201992993-ESC-Electronic-Speed-Controller>> Acesso em: 10 dezembro. 2016.

APENDICE A – Esquemático da parte de potência do simulador





APENDICE B – Esquemático da parte de controle do simulador



**APENDICE C – Motor utilizado nos testes práticos**

