

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA SANTO ANDRÉ

CAIO ANDRADE ROCHA
RENAN DE OLIVEIRA MANZI

PROJETO DE CONTROLE E INTERFACE DE UM SISTEMA
DE DIREÇÃO ELÉTRICA ASSISTIDA

SANTO ANDRÉ – SÃO PAULO
2017

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA SANTO ANDRÉ

CAIO ANDRADE ROCHA
RENAN DE OLIVEIRA MANZI

PROJETO DE CONTROLE E INTERFACE DE UM SISTEMA
DE DIREÇÃO ELÉTRICA ASSISTIDA

Monografia apresentada ao Curso de
Tecnologia em Eletrônica Automotiva da
FATEC Santo André, como requisito
parcial para conclusão do curso em
Tecnologia em Eletrônica Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Delatore

SANTO ANDRÉ – SÃO PAULO

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

R672p

Rocha, Caio Andrade

Projeto de controle e interface de um sistema de direção elétrica assistida / Caio Andrade Rocha, Renan de Oliveira Manzi. - Santo André, 2017. – 95f. il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Delatore

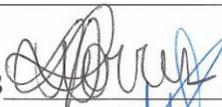
1. Eletrônica automotiva. 2. Sistema elétrico de direção. 3. Esterçamento. 4. Veículos. 5. Motor. 6. BLDC. 7. Sensor de torque. I. Manzi, Renan de Oliveira. II. Projeto de controle e interface de um sistema de direção elétrica assistida.

621.389

LISTA DE PRESENÇA

SANTO ANDRÉ, 19 de Dezembro de 2017

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA
“PROJETO DE CONTROLE E INTERFACE DE UM SISTEMA DE
DIREÇÃO ELÉTRICA ASSISTIDA” DOS ALUNOS DO 6º
SEMESTRE DESTA U.E.

BANCAPRESIDENTE:
PROF. DR. FÁBIO DELATORE _____MEMBROS:
PROF. WESLLEY MEDEIROS TORRES _____

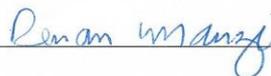
PROF. FERNANDO GARUP DALBO _____

**ALUNO:**

Caio Andrade Rocha _____



Renan de Oliveira Manzi _____



DEDICATÓRIA

A Deus, que nos concedeu discernimento, sabedoria e conhecimento para realizar este projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos todo corpo docente da Faculdade de Tecnologia Santo André pelo grande auxílio nas pesquisas deste trabalho. Agradecemos especialmente os professores Dr. Fábio Delatore e Fernando Garup que nos auxiliaram fortemente a realizar a elaboração deste trabalho, demonstrando paciência, dedicação e compreensão. Agradecemos a Instituição por disponibilizar todas as ferramentas disponíveis para realizar o desenvolvimento e estudo deste projeto.

Agradecemos também todos os familiares e amigos, que nos incentivaram, apoiaram, e participaram de todo o ciclo desta Graduação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE ABREVIATURAS	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	12
1.1 – Apresentação do Trabalho	12
1.2 – Justificativa.....	13
1.3 – Objetivos	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 – Simulação de Direção Elétrica com Motor Síncrono de Ímãs Permanentes.....	14
2.2 – Estudos em Sistemas de Direção Veicular	15
2.3 – Estudo de Máquinas Elétricas Não-Convencionais: Motor <i>Brushless DC</i>	16
2.4 – O Sistema de Direção Elétrica Como Medida de Melhoria de Eficiência Para o Veículo.....	16
3. INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1 – Principais Sistemas de Direção Veicular	18
– Direção Mecânica por Pinhão & Cremalheira	18
– Direção com Assistência Hidráulica por Pinhão & Cremalheira	19
– Direção Eletro-Hidráulica.....	22
– Direção Elétrica por Coluna.....	25
– Direção Dinâmica	28
3.2 – Princípios de Magnetismo	32
3.3 – Motor Sem Escovas DC (BLDC).....	36
– Características Gerais de um BLDC	37
– Configurações de Montagem do Motor	39
– Métodos de Acionamento	41
– Indicação de Posição por Sensor <i>Hall</i>	44
– Indicação de Posição por <i>Encoder</i>	46
– Sistemas <i>Sensorless</i>	50
3.4 – Microcontrolador PIC18F4550	52
3.5 – Sensor de Torque Óptico.....	53
3.6 – <i>Driver</i> IRS2334.....	58
3.7 – Circuitos de Bootstrap	61

4. RESULTADOS OBTIDOS	65
4.1 – Resultados Preliminares	65
4.2 – Análise do Módulo de Controle	66
4.3 – Análise do Sensor de Torque	69
– Simulação dos Sinais	75
4.4 – Funcionamento do Motor BLDC.....	78
5. PRÓXIMOS PASSOS.....	85
6. CONCLUSÃO.....	86
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Diagrama de blocos para um sistema de direção elétrica.
- Figura 2:** Sistema de pinhão e cremalheira.
- Figura 3:** Sistema de pinhão e cremalheira.
- Figura 4:** Sistema de pinhão e cremalheira com assistência hidráulica.
- Figura 5:** Diagrama de uma bomba hidráulica.
- Figura 6:** Sistema hidráulico com legendas.
- Figura 7:** Sistema EPHS
- Figura 8:** Desenho 3D de um Sistema EPHS.
- Figura 9:** Sistema de direção por coluna elétrica.
- Figura 10:** Diagrama de interligação dos sistemas presentes na direção por coluna elétrica.
- Figura 11:** Aplicação do sistema de direção dinâmica em baixa velocidade.
- Figura 12:** Aplicação do sistema de direção dinâmica em alta velocidade.
- Figura 13:** Conjunto eletromecânico da direção dinâmica por atuação por planetário.
- Figura 14:** Conjunto de engrenagem harmônica.
- Figura 15:** Conjunto de engrenagem harmônica.
- Figura 16:** Campo Magnético em volta de um ímã.
- Figura 17:** Métodos de atração e repulsão de dois ímãs.
- Figura 18:** Susceptibilidade magnética em materiais com distintas características magnéticas.
- Figura 19:** Geração de campo magnético através da corrente elétrica.
- Figura 20:** Vista explodida de um motor BLDC.
- Figura 21:** Componentes de um motor BLDC.
- Figura 22:** Polaridade alternada no rotor.
- Figura 23:** Motor *inrunner* e *outrunner*.
- Figura 24:** Rotor de entreferro axial.
- Figura 25:** Diagrama de blocos de um motor BLDC.
- Figura 26:** Forma de onda e esquema de ligação do motor BLDC.
- Figura 27:** Princípio de funcionamento do sensor Hall.
- Figura 28:** Aplicação de tensão sobre o sensor Hall.
- Figura 29:** Diagrama de blocos do sensor Hall com amplificador.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 30:** Sensores Hall posicionados com uma defasagem de 120° entre si.
- Figura 31:** Sensores Hall posicionados com uma defasagem de 60° entre si.
- Figura 32:** Ilustração explodida de um encoder.
- Figura 33:** Desenho de um disco de um encoder absoluto.
- Figura 34:** Forma de onda característica de um encoder do tipo absoluto.
- Figura 35:** Desenho de um disco de um encoder incremental.
- Figura 36:** Forma de onda característica de um encoder do tipo incremental.
- Figura 37:** Configuração da interligação das bobinas.
- Figura 38:** Processamento do sinal na bobina desenergizada.
- Figura 39:** Pinagem do microcontrolador PIC18F4550.
- Figura 40:** Duty Cycle controlado pelo TMR2.
- Figura 41:** Princípio de funcionamento do sensor de torque óptico.
- Figura 42:** Defasagem dos dois discos resulta no torque imposto.
- Figura 43:** Forma de onda resultante dos fotodetectores.
- Figura 44:** Diagrama de blocos do processamento de sinais do sensor de torque.
- Figura 45:** Forma de onda do sinal de saída do sensor de torque.
- Figura 46:** Pinagem IRS2334.
- Figura 47:** Aplicação típica do IRS2334.
- Figura 48:** Circuito que utiliza técnica de bootstrap.
- Figura 49:** Forma de onda do ripple do capacitor de bootstrap.
- Figura 50:** Forma de onda do ripple do capacitor de bootstrap, quando $V_{drop} = \Delta V_{BS}$.
- Figura 51:** LEDs do sensor de torque acionados.
- Figura 52:** Módulo de controle do sistema.
- Figura 53:** Desenho do módulo de controle do sistema.
- Figura 54:** Pinagem do Conector Externo.
- Figura 55:** Configuração dos pinos de saída do módulo de controle.
- Figura 56:** Configuração dos pinos de saída do módulo de controle.
- Figura 57:** Sinal do pino LA_CLK_LSD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 58: Sinal do pino LED_DRV

Figura 59: Sinal do pino LA_SI_CLK.

Figura 60: Sinal do pino LA_CHAN_A (CH1) e LA_CHAN_B (CH2).

Figura 61: Bancada de testes do conjunto de direção.

Figura 62: Sincronismo dos sinais do conector 'A'.

Figura 63: Sincronismo dos sinais do conector 'A' em escala de tempo maior.

Figura 64: Oscilador 555 em modo astável.

Figura 65: Circuito simulador do LA_CLK_LSD para pulsos de 2us.

Figura 66: Circuito simulador do LA_CLK_LSD para pulsos de 1us.

Figura 67: Circuito simulador do LED_DRV.

Figura 68: Resultado da aplicação dos circuitos simuladores do Conector A.

Figura 69: Configuração de pinos do módulo de controle para o conjunto do motor.

Figura 70: Exemplo da aplicação das fases de acionamento do motor BLDC – *driver* meia ponte.

Figura 71: Sinais encontrados nos pinos 2 e 3 do Conector C.

Figura 72: Componentes da placa do conjunto do motor BLDC.

Figura 73: Interligação das bobinas no motor BLDC do conjunto.

Figura 74: Sinais de resposta dos sensores Hall.

Figura 75: Sinais dos pinos sensor de posição angular com o motor parado.

Figura 76: Sinais dos pinos sensor de posição angular com o motor com pouca movimentação.

Figura 77: Sinais dos pinos sensor de posição angular com o motor com maior movimentação.

Figura 78: Sinais dos pinos sensor de posição angular com o motor com rotação próxima a 0.

Figura 79: Forma do sinal presente no pino V_STAR.

Figura 80: Diagrama de blocos do funcionamento do sistema de direção elétrica.

LISTA DE ABREVIATURAS

BLAC – Brushless Alternate Current

BLDC – Brushless Direct Current

MCI – Motor de Combustão Interna

CAN – Controller Area Network

CC – Corrente Continua

DC – Direct Current

ECU – Electronic Control Unit

EPHS – Electric Powered Hydraulic Steering

ESP – Electronic Stability Program

FEM – Força Eletromotriz

FET – Field Effect Transistor

LED – Light Emmiting Diode

PMSC – Permanent-Magnet Synchronous Motor

TBJ – Transistor Bipolar de Junção

RESUMO

O esforço gerado para realizar o esterçamento do veículo foi se tornando um problema conforme novas tecnologias na área automotiva são desenvolvidas. Dentre estas, podemos citar a utilização de fluidos hidráulicos para realizar a assistência do esterçamento. Porém, quando em alta velocidade, a direção tende a ser sensível e mais leve, podendo causar acidentes. Tendo de vista deste problema, foram desenvolvidos sistemas de direção que possui algum tipo de controle elétrico, retirando o problema da sensibilidade em alta velocidade. Este projeto visa o desenvolvimento de um sistema de controle e interface de uma coluna elétrica de direção, a partir da leitura de sinais provenientes de um sensor de torque óptico, e realizar o acionamento de um motor BLDC (*Brushless Direct Current*) para executar o auxílio da força aplicada do motorista no volante.

Keywords: BLDC, Coluna Elétrica, EPAS, Sensor de Torque.

ABSTRACT

The effort generated to realize the vehicle's steering has become a problem as new technologies in the automotive area are developed. Among these, we can mention the use of hydraulic fluids to perform the assistance of the steering. However, when at high speed, the steering tends to be sensitive and softer, and can cause accidents. Having in view of this problem, were developed steering systems that have some type of electrical control, removing the problem of the sensitivity at high speed. This project aims to develop a control and interface system of a Electronic Power Assist Steering, from the processing of signals coming from a optical torque sensor, which will trigger a BLDC (*Brushless Direct Current*) motor to execute the assistance of the force imposed on the steering wheel.

Keywords: BLDC, Electronic Power Assist Steering, EPAS, Torque Sensor

1. INTRODUÇÃO

1.1 – Apresentação do Trabalho

Nos dias atuais, uns dos principais fatores que o homem busca no desenvolvimento de novas tecnologias são: conforto, segurança e eficiência energética.

Os sistemas de direção veiculares atuais estão passando por um processo de mudança de tecnologias, em que está se deixando de utilizar sistemas com assistência hidráulica, para sistemas que possuem assistência eletro-hidráulica, ou então, puramente elétrica.

A direção com assistência hidráulica está caindo em desuso pelo fato de “roubar” energia no motor à combustão, utilização de fluidos inflamáveis, a exigência de um maior cuidado para realizar manutenção, e falta de estabilidade ao conduzir o veículo em altas velocidades.

Por outro lado, os sistemas elétricos consistem em utilizar apenas um motor de corrente contínua para realizar a devida assistência. Este motor não é acoplado no motor de combustão, eliminando as perdas da energia gerada pelo veículo.

É importante citar que, estes sistemas possuem uma quantidade menor de fluidos inflamáveis devido a maior simplicidade da engenharia mecânica embarcada, comparado com a direção com assistência hidráulica. Com isto, a necessidade de manutenção é menor.

Os sistemas elétricos possuem conexão com a rede de comunicação veicular (CAN). Desta forma, o acionamento do motor elétrico é programado em função da velocidade do veículo e da força aplicada no volante. Assim, a assistência a ser entregue nas rodas será mais segura e precisa, eliminando a falta de estabilidade presente nos sistemas de direção hidráulicos.

O projeto visa criar um sistema de controle de coluna de direção elétrica, através do processamento de sinais provenientes de um sensor de torque óptico, que após ser decodificado, irá acionar o motor sem escovas, realizando a devida assistência para condução do veículo.

1.2 – Justificativa

Um dos primeiros problemas enfrentados desde a criação do automóvel seria a sua dirigibilidade. Era necessário um sistema que exercesse esta atividade que oferecesse segurança e conforto. A primeira solução seria um sistema utilizado semelhante aos de barcos, em que uma haste giraria a roda que estaria apoiada no chão, como utilizado no *Benz Patent-Motorwagen* (ARRONILLAS, 2005).

A próxima fase desta evolução será a utilização de um volante para transmitir a força imposta pelo motorista para realizar o movimento das rodas, através de um sistema puramente mecânico. A força necessária para rotacionar o volante depende diretamente do peso de veículo e sua velocidade.

Desta forma, foi criada a direção hidráulica, que fornece um auxílio para realizar esta atividade através de fluidos hidráulicos. Porém, este sistema necessita de utilizar uma parcela considerável da energia movida pelo motor para acionar a bomba hidráulica e pressurizar o óleo.

O sistema de direção elétrica visa corrigir sensibilidade de esterçamento em alta e baixa velocidade, tornando a condução do veículo mais confortável, segura e eficiente.

1.3 – Objetivos

Analisar todo o sistema embarcado presente no conjunto de direção elétrica do Hyundai I30 2008. Verificar todos os sinais de entrada e saída, estudar o acionamento do motor *Brushless* e o comportamento do sensor de torque óptico do conjunto.

Com a finalidade de auxiliar nos estudos dos sinais do sistema, projetar uma plataforma com todos os conectores externados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

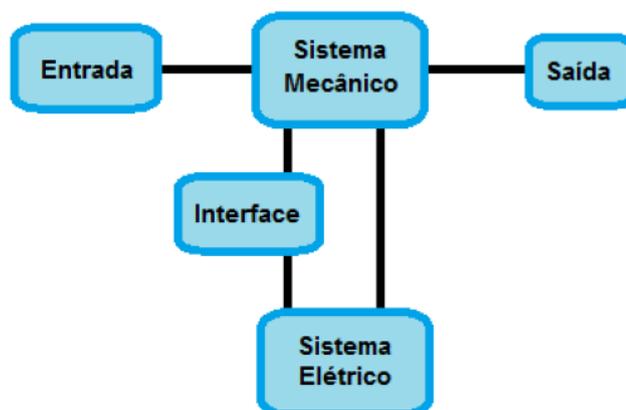
É necessário o conhecimento e estudo de obras que complementam a ideia e que irão auxiliar o desenvolvimento e entendimento do projeto. Para isto, neste capítulo serão expostos artigos, monografias e dissertações que possuem alguma relação com o tema deste trabalho.

2.1 – Simulação de Direção Elétrica com Motor Síncrono de Imãs Permanentes

Consiste num trabalho de conclusão de curso dissertado por Douglas Pereira Barbosa, pela Universidade São Paulo, apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma simulação de um sistema de direção similar ao que será utilizado neste projeto, que é o esterçamento das rodas através de uma força aplicada no volante, com auxílio de um motor de imãs permanentes. A similaridade entre os projetos pode ser vista no diagrama de blocos.

Figura 1 – Diagrama de blocos para um sistema de direção elétrica.



Fonte: Simulação de Direção Elétrica com Motor Síncrono de Imãs Permanentes (BARBOSA, 2010).

Barbosa utilizou o *Simulink* e o *Matlab* para realização de seu projeto. Através destes *Softwares* de simulação, foi possível analisar o acionamento do motor elétrico para realizar a assistência ao esterçar as rodas, o comportamento do sistema desenvolvido com diferentes movimentações no volante, a fim de averiguar a velocidade da resposta, e sua estabilidade.

Todo o sistema foi desenvolvido através de diagramas de blocos, encontrado os valores teóricos deste sistema. Foi aplicado sistema de realimentação proporcional-integral-derivativo, juntamente com o processamento de sinais proveniente de sensores e atuadores, e modulação da frequência de correção do sistema de realimentação por PWM.

Por fim, foi concluído que o sistema desenvolvido atendeu as expectativas, e pode ser implementado, em termos práticos, em algum ambiente específico.

2.2 – Estudos em Sistemas de Direção Veicular

Trata-se de uma dissertação desenvolvida por Marcelo Arronilas Fernandes, pela Universidade São Paulo, apresentada à Escola Politécnica.

Nesta obra, foram desenvolvidos modelos geométricos para o sistema de direção de um FIAT Palio, através de formulações e dissertações de “*Fundamentals of Vehicle Dynamics*” de Gillespie. Também foram simulados sistemas de direção via *Software*, e comparado com dados reais.

De acordo com Arronilas, foi possível obter a função de transferência do volante do veículo para as rodas dianteiras esquerda e direita, a correlação do ângulo do volante para inscrição em curva de raio constante.

E, através de simulações, os resultados de ângulo de esterçamento de rodas e do volante, as forças verticais e horizontais atuantes, os raios de curva, a aceleração lateral do veículo e os ângulos de deriva, foram obtidos.

Foi também estudado a eficiência que este sistema modelado de direção hidráulica pinhão & cremalheira traria. Através de um experimento, em que ao aplicar uma força constante na cremalheira, que estará em uma baixa velocidade de deslocamento, poderia ser obtido uma eficiência de 85%, em dados puramente teóricos.

2.3 – Estudo de Máquinas Elétricas Não-Convencionais: Motor Brushless DC

Trata-se de um trabalho de conclusão de curso escrito por Rafael Henrique Trindade, pela Universidade São Paulo, apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos.

Foram estudados os princípios de funcionamento de um motor *Brushless DC*, principais configurações, eficiência, e estratégia de controle, com a sua devida modelagem matemática, juntamente com ensaios realizados em um protótipo de um *BLDC*.

Este trabalho utiliza diversos dados da obra “*Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*” de Hendershot e Miller, que possui diversos dados e informações de um motor BLDC.

Foi concluído que o motor sem escovas consegue unir pontos positivos de um motor de indução, com um de corrente contínua com comutadores. Desta forma, o *Brushless* possui um rendimento maior e, além disto, uma baixa manutenção, pelo fato de não utilizar o conjunto comutador-escova.

Os resultados práticos não se distanciaram dos valores calculados, de acordo com a condição de operação projetado.

2.4 – O Sistema de Direção Elétrica Como Medida de Melhoria de Eficiência para o Veículo

Dissertação realizada por Fabrício de Almeida Gonçalves e por Rafael Iuliano Sambiase, pelo Centro Universitário FEI, dentro do curso de pós-graduação em Mecânica Automobilística.

O trabalho apresenta o sistema de direção elétrica aplicado em veículos de passeio, a fim de indicar as principais configurações e variantes deste sistema, descrevendo seu funcionamento, juntamente com seu sistema eletrônico projetado, modelamento matemático das grandezas presentes no sistema, e comparações com sistemas de assistência hidráulica convencionais.

Foi concluído que o sistema de direção com assistência elétrica traz uma maior performance e rendimento para o veículo, através do funcionamento dos componentes presentes, e do conceito do funcionamento, em que ocorrerá a

assistência de direção apenas quando for necessário, evitando gasto de energia desnecessário, e, maior segurança e conforto ao dirigir o veículo em baixa ou alta velocidade.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados alguns temas que são necessários para o conhecimento e melhor entendimento do projeto em desenvolvimento.

3.1 – Principais Sistemas da Direção Veicular

De acordo com Gillespie, o sistema de direção veicular possui a função de gerar ângulos em suas rodas, para que haja o esterçamento do veículo desejado pelo motorista.

Para o desenvolvimento de um sistema de direção veicular, deve-se levar em consideração toda a irregularidade existente numa pista. Então, o sistema de direção deve ter um comportamento seguro e eficaz independentemente de sua situação. E também, é importante levar em consideração o esforço gerado em esterçar o volante em casos em que o veículo está em baixa velocidade.

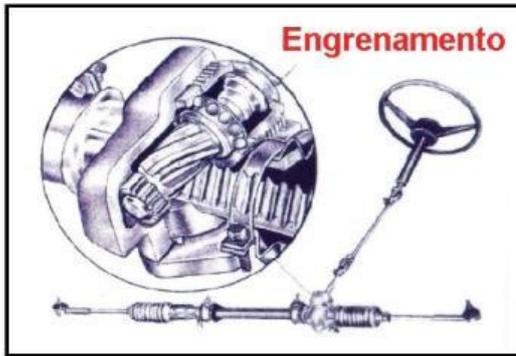
Serão abordados três tipos de direção mais comuns: Mecânica (Pinhão & Cremalheira), Hidráulica e Elétrica. Todos estes sistemas possuem volantes, eixos, mancais e juntas. E todos estes sistemas possuem o mesmo princípio: com a aplicação de movimento no volante, ocorrerá a movimentação das rodas.

– Direção Mecânica por Pinhão & Cremalheira

De acordo com Gillespie, neste tipo de direção, o mecanismo pode ser fixado à frente ou atrás das rodas. O movimento realizado no volante é transmitido para a rotação do pinhão, e que será transformado em movimento de translação da cremalheira, resultando em sua principal característica: a redução de torque aplicado no volante necessário para girar as rodas.

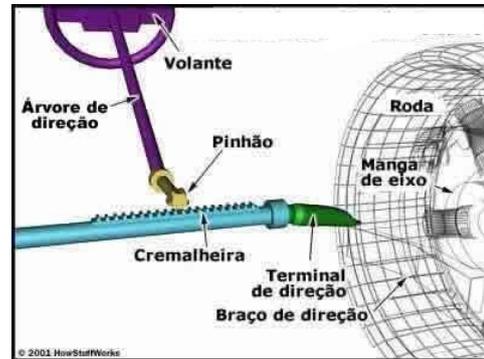
A figura 1 e 2 ilustra este sistema. O pinhão é fixado na árvore de direção. Com o movimento do volante, irá causar a movimentação do conjunto. A cremalheira possui movimentação horizontal, que são conectadas em suas extremidades barras articuladas, que irão realizar a movimentação das rodas através das mangas do eixo.

Figura 2. Sistema de pinhão e cremalheira.



Fonte: Fundamentals of Vehicle Dynamics (GILLESPIE, 1993 – Editado).

Figura 3. Sistema de pinhão e cremalheira.



Fonte: How Car Steering Works (NICE, 2001 - Editado).

– Direção com Assistência Hidráulica por Pinhão & Cremalheira

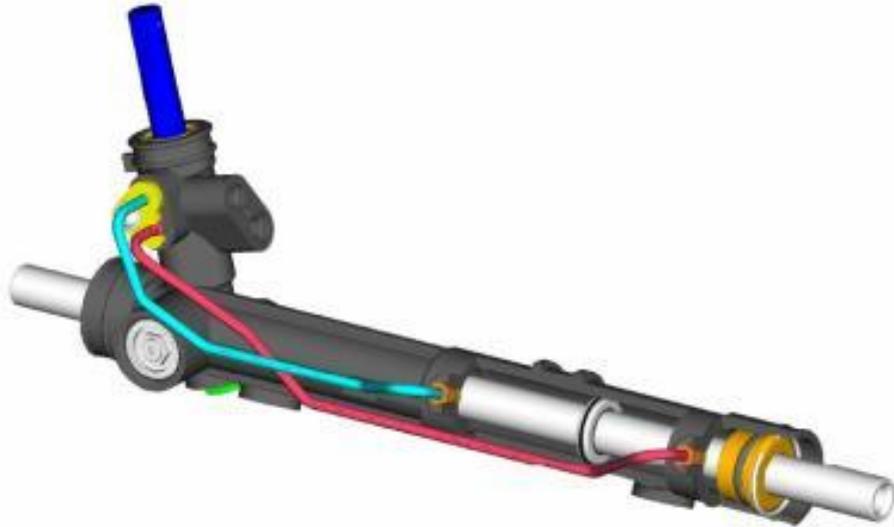
O esforço excessivo gerado em rotacionar o volante têm sido um problema para os motoristas, principalmente quando é necessário realizar manobras. Este é o principal problema de um sistema de direção puramente mecânico sem algum tipo de assistência.

Com o intuito de fornecer maior conforto ao usuário, foram desenvolvidas técnicas que utilizam fluidos hidráulicos para obter uma assistência no ato de virar o volante, reduzindo esforço gerado em até 80% quando comparado com a direção puramente mecânica (ARRONILLAS, 2005).

O sistema hidráulico convencional possui um tubo de pressão que fica sujeito à variação do curso do óleo. Quando o motorista gira o volante, e ocorre a movimentação do pinhão sob a cremalheira, uma válvula que orienta o curso do óleo é acionada. Este curso possui dois compartimentos, que estão divididos em um tubo de pressão.

De acordo com a figura seguinte, quando se quer esterçar para a direita, o tubo é pressurizado com óleo em seu lado direito. Assim ocorre quando se deseja esterçar para a esquerda. O tubo é pressurizado com o óleo no lado esquerdo. Isto implica em um auxílio na força aplicada no volante, tornando uma direção mais suave, macia e leve (GILLESPIE, 1993).

Figura 4. Sistema de pinhão e cremalheira com assistência hidráulica.

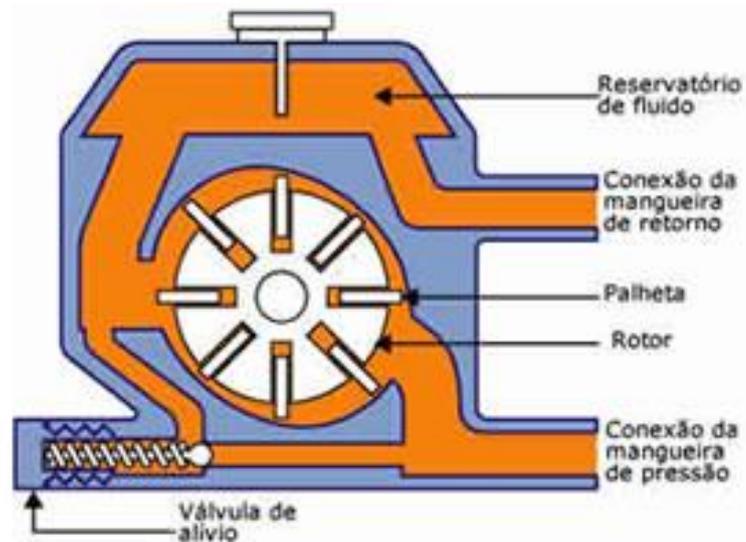


Fonte: Fundamentals of Vehicle Dynamics (GILLESPIE, 1993)

A energia hidráulica que realiza a assistência na direção é causada por uma bomba rotativa de palhetas, que está ligada diretamente ao motor do veículo, através de polia e correia. Por conta de utilizar a energia gerada pelo MCI (motor de combustão interna), o veículo perde seu rendimento de potência e energia. As palhetas são retráteis, elas giram em seu interior junto com o rotor, aumentando a pressão do fluido hidráulico.

O problema do sistema de direção hidráulico é justamente a sensibilidade da direção quando o veículo estiver em alta velocidade. E isto se torna um problema maior quando o motor está em alta rotação, que conseqüentemente irá aumentar a movimentação do fluido hidráulico no sistema. Para reduzir este impacto, é instalada uma válvula de alívio de pressão, como visto na imagem a seguir.

Figura 5. Diagrama de uma bomba hidráulica.



Fonte: How Car Steering Works (NICE, 2001 - Editado).

O sistema hidráulico possui o seguinte esquema de montagem:

Figura 6. Sistema hidráulico com legendas.



Fonte: K2 Direção Hidráulica.

– Direção Eletro-Hidráulica

Uns dos problemas enfrentados no sistema hidráulico seriam a instabilidade e alta sensibilidade de condução do veículo em alta velocidade e a bomba de direção, que é ligada diretamente no motor do veículo, causando consumo adicional de combustível e uma perda de 1 a 3 cavalos de potência cedidos.

O sistema de direção eletro-hidráulico, também conhecido como ou EPHS (*Electric Powered Hydraulic Steering*) é uma tecnologia que deu entrada aos sistemas de direção puramente elétricos. Este sistema possui uma bomba hidráulica comum, porém, seu acionamento é através de um motor elétrico feita por uma unidade de controle. Dessa forma, disponibiliza uma assistência hidráulica para a caixa de direção com sistema pinhão e cremalheira.

Os primeiros veículos com sistema EPHS não tinham progressividade no seu sistema de direção, assim como o puramente mecânico ou com assistência hidráulica (característica do sistema para deixar a direção mais leve ou pesada, dependendo da solicitação do condutor ou da velocidade do veículo). Os sistemas sem um controle eletrônico de progressividade dependem da geometria da suspensão para tornar a direção mais leve ou pesada, em função da velocidade.

O sistema inicia seu funcionamento após receber da unidade de controle um sinal de rotação do motor e tensão da bateria. É uma de suas estratégias para economia de corrente.

De acordo com Arronilas, este sistema oferece muitas vantagens em relação ao sistema hidráulico convencional, no qual é utilizado uma polia e uma correia para o acionamento da bomba hidráulica utilizando o torque e rotação do motor do veículo. A figura 5 indica a montagem de um sistema de direção eletro-hidráulico.

Figura 7. Sistema EPHS



Fonte: Estudos em Sistemas de Direção Veicular (ARRONILLAS, 2005).

O sistema EPHS com progressividade possui uma eletrônica embarcada mais complexa em sua unidade de controle. Ela conta com uma rede em protocolo CAN (*Controller Area Network*), e troca informações com outras unidades de controle para identificar, a velocidade do veículo, o atual estado do sistema *Cruise Control* e posição angular da caixa de direção (ARRONILLAS, 2005).

A ECU está integrada no conjunto da bomba hidráulica, reservatório de fluido hidráulico e o motor elétrico. A unidade de controle irá realizar os sinais para acionamento da bomba hidráulica, dependendo da taxa de ângulo de direção e da velocidade do veículo.

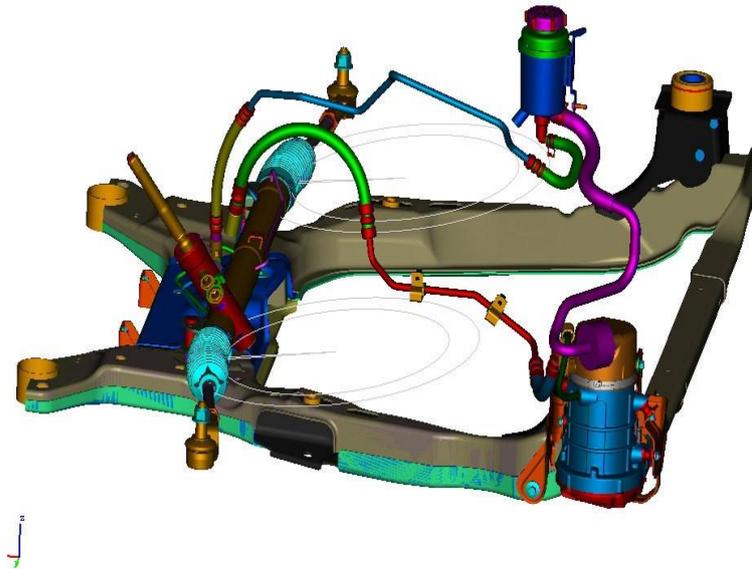
A entrega da assistência requerida pelo condutor é obtida a partir de um mapa armazenado na unidade de controle.

A ECU armazena e detecta também avarias que podem ocorrer durante a sua operação. É implementado um sistema de segurança que, por exemplo, em caso de superaquecimento do conjunto, a ECU é desligada para preservar a integridade dos

componentes, e transformando fazendo com que o sistema fique puramente mecânico. Esta estratégia é conhecida como *safe-mode*.

A figura a seguir indica um sistema de direção eletro-hidráulico, em um quadro de suspensão.

Figura 8. Desenho 3D de um Sistema EPHS.



Fonte: Estudos em Sistemas de Direção Veicular (ARRONILAS, 2005).

Abaixo estão listadas algumas vantagens de um sistema EPHS.

- Melhoria do conforto ao conduzir o veículo;
- Facilidade ao estacionar;
- Rigidez e maior segurança quando o veículo estiver em altas velocidades;
- Economia de combustível, por conta de o sistema não utilizar energia do motor do veículo;
- Melhor aproveitamento da potência efetiva do veículo;
- Funciona em conjunto com o controle de estabilidade do veículo (ESP).

– Direção Elétrica por Coluna

O sistema que é utilizado por coluna de direção é uma das variantes das novas tecnologias de direção elétrica desenvolvidas. Trata-se de um conjunto composto por um motor sem escovas (*Brushless* ou *BLDC*), um sensor de torque óptico e um módulo de controle. O motor BLDC é acoplado ao sem-fim, que é engrenado a uma coroa solidária ao eixo da coluna de direção.

O módulo de controle do sistema irá acionar o motor BLDC para realizar a devida assistência na direção no veículo. O motor entrará em ação ao receber o sinal do sensor de torque, que irá identificar a força imposta pelo motorista no volante. A força exercida irá variar em função com a velocidade do veículo. A assistência será maior quando o veículo estiver em menor velocidade, tornando a força para esterçar o carro menor, enquanto ocorrerá o contrário quando em alta velocidade, em que o motor irá oferecer uma assistência menor, tornando uma direção mais rígida e firme. A figura a seguir ilustrará o esquema mecânico do sistema, junto com a identificação dos componentes.

Figura 9. Sistema de direção por coluna elétrica.



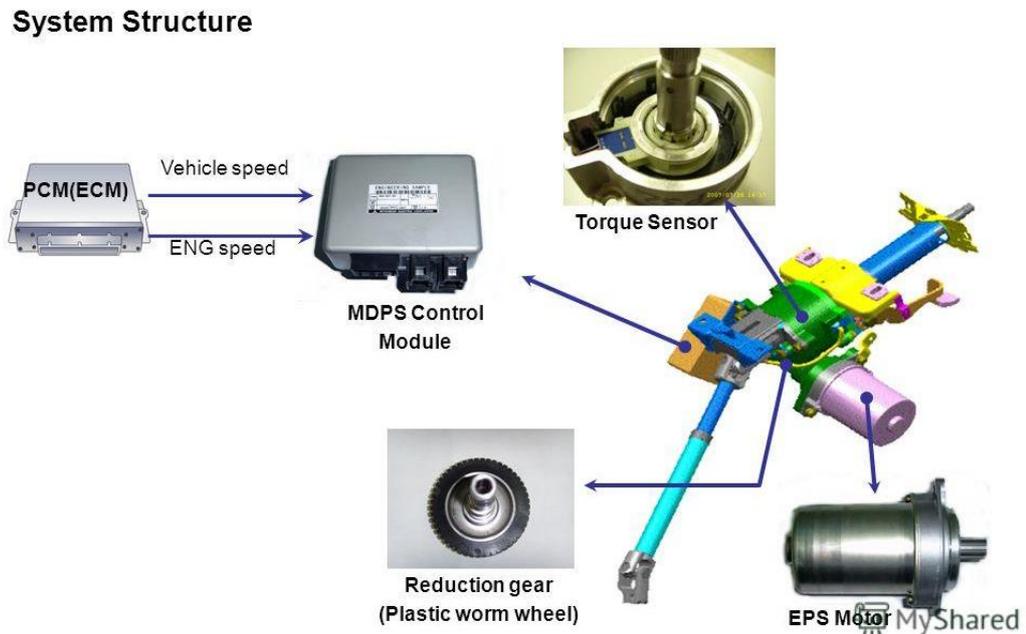
Fonte: Electromechanical Steering System (BOSCH, 2015).

Tabela 1 – Identificação dos componentes presentes no sistema de direção por coluna elétrica.

Número	Descrição
1	Coluna de direção superior
2	Suporte para fixação do volante
3	Cabo do sensor
4	Sensor de torque óptico
5	Sistema de engrenamento
6	Junta da árvore de entrada
7	Sistema mecânico de pinhão e cremalheira
8	Árvore intermediária de direção
9	Módulo de controle
10	Motor <i>Brushless</i>

A seguir, está ilustrado o esquema de interligação dos sistemas presentes na coluna elétrica.

Figura 10. Diagrama de interligação dos sistemas presentes na direção por coluna elétrica.



Fonte: Manual Técnico Hyundai.

Este sistema de direção não utiliza a energia mecânica cedida pelo motor do veículo, realiza comunicação entre outros módulos através do protocolo CAN, e, assim como o sistema EPHS, necessita de sinais da posição angular da caixa de direção e velocidade do veículo.

É importante lembrar que este sistema não utiliza o fluido hidráulico presente, que é um material inflamável e agressor ao meio ambiente. É um sistema puramente eletrônico.

– Direção Dinâmica

O sistema de direção dinâmica, ou também conhecido como sistema de direção ativa, tem como objetivo de conceder ao condutor do veículo um conforto maior em baixa velocidade e segurança em alta velocidade. O conceito deste sistema se baseia na alteração do ângulo de giro aplicado no volante em relação ao ângulo de esterçamento das rodas do veículo, que pode ser aumentado ou diminuído dependendo das condições de uso, como por exemplo, velocidade do veículo e velocidade de giro do volante.

Com o veículo parado ou em baixa velocidade, o ângulo de esterçamento das rodas é acentuado para um determinado ângulo de giro aplicado no volante, assim facilitando uma manobra ou a realização de uma curva, por exemplo.

Figura 11. Aplicação do sistema de direção dinâmica em baixa velocidade.



Fonte: Dynamic Steering Wheel (AUDI, 2011).

Na figura anterior, é representado em azul, o ângulo de giro do volante com sistema dinâmico atuando para realizar a curva. Já o volante em laranja, indica o ângulo que seria necessário para realizar a curva sem o sistema dinâmico. Nota-se que o condutor precisa esterçar menos o volante para realizar a manobra.

O ângulo de esterçamento depende também da velocidade que o volante é girado. Desta forma, obter-se-ia um aumento da velocidade de resposta do sistema.

Ou seja, quanto maior for a velocidade de giro do volante, maior será o incremento de resposta do sistema.

Em alta velocidade, a relação de transmissão de resposta é reduzida se comparado a um sistema convencional. Neste caso, o sistema dinâmico trabalha de forma reversamente proporcional como um sistema de redução do ângulo aplicado.

Figura 12. Aplicação do sistema de direção dinâmica em alta velocidade.



Fonte: Dynamic Steering Wheel (AUDI, 2011).

Na figura anterior, representa o sistema dinâmico atuando em alta velocidade. Nota-se que o sistema diminui a resposta nas rodas em relação ao ângulo de giro do volante. Desta forma, é possível obter um controle maior dos movimentos do veículo, diminuindo a chance de acidentes, caso um movimento brusco errado seja aplicado no volante.

Outra vantagem deste sistema é a possibilidade de trabalhar em conjunto com o controle de estabilidade. Desta forma, não irá depender apenas do sistema de frenagem, mas também, do sistema de direção do veículo.

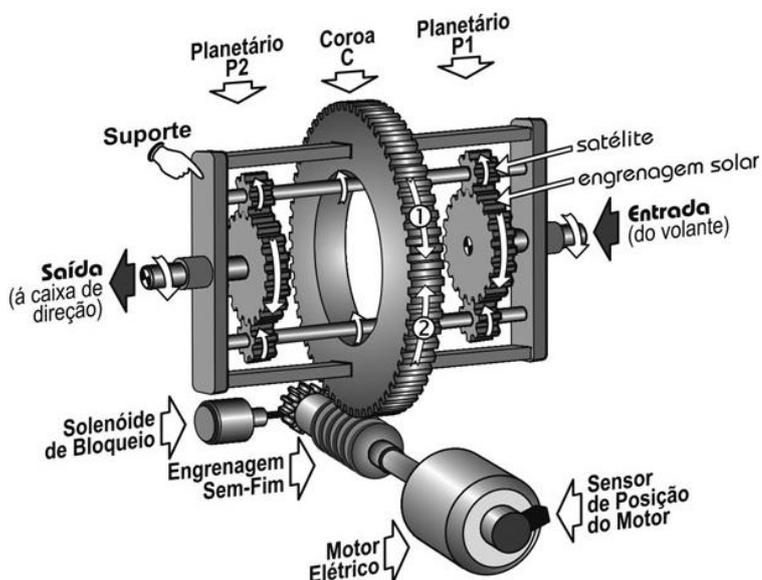
– Formas de Atuação da Direção Dinâmica

Atualmente existem duas formas de realizar o controle deste sistema, aos quais são por atuação por conjunto planetário e com engrenagem harmônica.

– Atuação por Planetário

O sistema que possui atuação com conjunto planetário é composto por um atuador eletromecânico, controlado por uma unidade eletrônica. Este atuador controla a quantidade de alteração de resposta do volante, através da posição da coroa, dois conjuntos planetários conectados por eixos e solidários e coroa, um motor DC sem escovas e uma válvula solenoide de bloqueio. Caso o sistema seja desativado, uma mola interna trava a engrenagem, impedindo a movimentação do suporte.

Figura 13. Conjunto eletromecânico da direção dinâmica por atuação por planetário.



Fonte: Estabilidade Veicular – Direção Dinâmica (MANAVELLA, Humberto José).

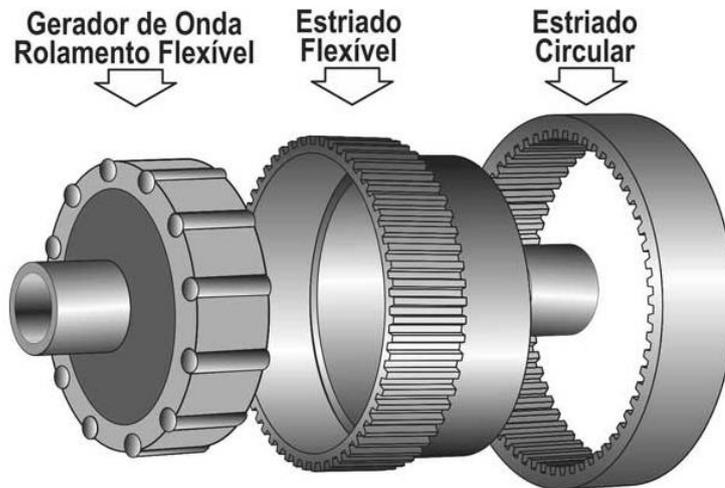
– Atuação por Engrenagem Harmônica

O sistema que trabalha com engrenagem harmônica possui um atuador eletromecânico para adicionar ou subtrair o ângulo aplicado no volante. Sua principal diferença é o conjunto de engrenagem, que possuem as seguintes características:

- Alta relação torque e peso;
- Elevada relação de transmissão;
- Elimina a possibilidade de folgas de engrenagem como no conjunto planetário.

A próxima figura indica o conjunto que forma a engrenagem harmônica:

Figura 14. Conjunto de engrenagem harmônica.



Fonte: Estabilidade Veicular – Direção Dinâmica (MANAVELLA, Humberto José).

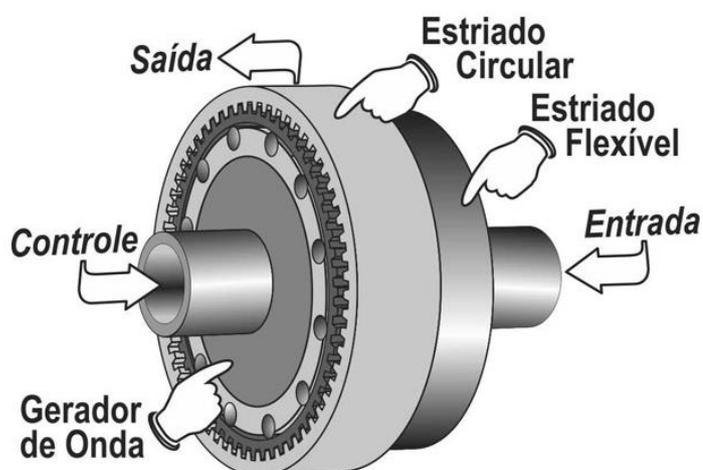
De acordo com Manavella, na figura acima, temos:

- **Gerador de onda** - É um disco dotado de uma forma elíptica que é circundado por um rolamento também dotado de uma forma elíptica.
- **Estriado flexível** - Componente onde o gerador de onda será acoplado possuindo também uma forma elíptica, seus dentes externos são projetados para girar o estriado circular com alta rigidez torcional.
- **Estriado circular** - É um anel de aço rígido com dentes internos dentro do qual é encaixado o conjunto gerador de onda/estriado flexível. Os dentes do estriado flexível engrenam com os correspondentes do estriado circular, nos pontos extremos do eixo maior (R-R) da elipse. Em função dos dentes terem certa altura, o contato se dá, não só em dois pontos, mas, entre os dentes em torno dos extremos do eixo maior da elipse. Na realidade, até 30% dos dentes em torno do eixo maior, estão engrenados constantemente. Ao mesmo tempo, em torno do eixo menor (r-r) não há contato entre o estriado circular e o flexível. Na aplicação prática deste princípio, o estriado flexível possui 2 dentes a menos que o estriado circular.

Ainda segundo Manavella, ao girar, o gerador de onda aplica ao estriado flexível um perfil elíptico ou oval, que se movimenta de forma circular. Como resultado, os pontos de engrenamento entre os estriados flexível e circular (extremos do eixo

maior R-R da elipse) vão se deslocando de forma rotativa. Ao mesmo tempo, se produz o desengrenamento dos dentes em torno do eixo menor r-r da elipse do gerador de onda. Sendo que o estriado flexível possui 2 dentes a menos que o estriado circular e, em função do total desengrenamento possibilitado pela forma elíptica do gerador de onda, cada revolução completa deste provoca o deslocamento de 2 dentes do estriado flexível com relação ao estriado circular, supondo este último estacionário (fixo). Este deslocamento é no sentido contrário ao de rotação do gerador de onda.

Figura 15. Conjunto de engrenagem harmônica.



Fonte: Estabilidade Veicular – Direção Dinâmica (MANAVELLA, Humberto José).

Os dois sistemas possuem suas peculiaridades, porém possuem os mesmos objetivos. É possível trabalhar em conjunto com o sistema de direção hidráulica, ou sistemas com assistência elétrica, desde que possuam um sensor de posição angular da coluna de direção.

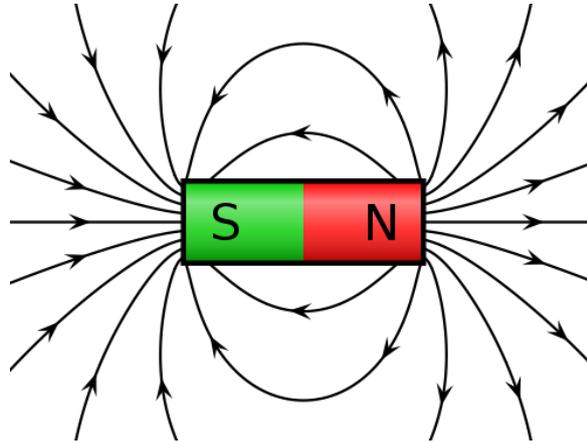
3.2 – Princípios de Magnetismo

Para melhor compreensão do modo de operação do motor que será utilizado no projeto, será descrito a seguir uma explanação sobre magnetismo.

A atração e repulsão de objetos é a principal característica do magnetismo. Estes materiais que possuem estas propriedades magnéticas podem ser representados por um ímã.

Os fenômenos da atração e repulsão é causado por campos magnéticos que ficam em torno deste imã. A imagem a seguir ilustra como é a área de um campo magnético.

Figura 16. Campo Magnético em volta de um imã.



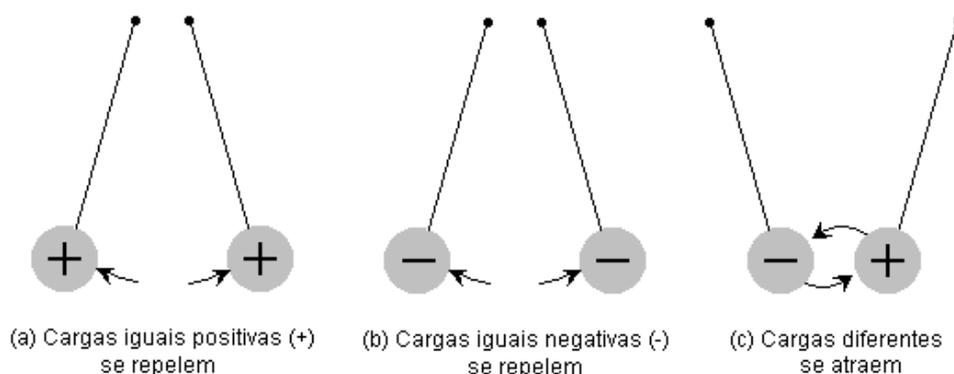
Fonte: Campo Magnético (ESTUDO PRÁTICO, 2014).

O polo sul é identificado como S, o polo norte como N, e os campos magnéticos são as linhas em torno do imã. Os vetores que estão nas linhas de campo indicam o sentido do percurso do elétron. É possível notar que estes átomos viajam do polo Norte para o Sul.

O imã possui algumas propriedades específicas:

- Polos Magnéticos: São superfícies equivalentes magnéticas com cargas elétricas opostas uma da outra.
- Inseparabilidade: Um imã sempre terá dois polos, independentemente se for quebrado ou dividido.
- Atração e Repulsão: Quando se aproximam duas placas com polaridades iguais, os imãs tendem a se repelirem. Porém, a atração ocorrerá quando são aproximados os imãs com polaridade opostas, como visto na ilustração a seguir:

Figura 17. Métodos de atração e repulsão de dois ímãs.



Fonte: Eletricidade e Eletromagnetismo (OLIVEIRA, 2016).

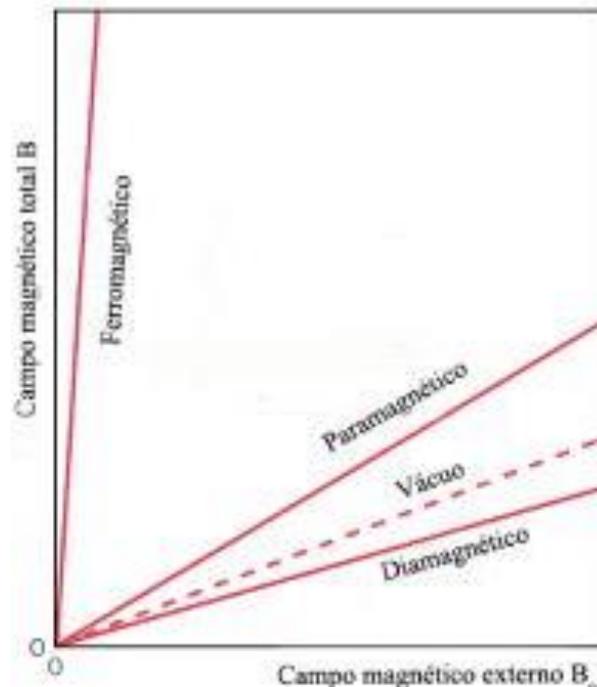
- Campo Magnético: Área em que ocorre atuação das forças em torno de um material magnético.

Existem diferentes materiais que possuem diferentes características ao entrar em contato com um campo magnético. São estes:

- Paramagnéticos: São materiais que possuem a característica de seus elétrons se alinharem quando existe a presença de um campo magnético externo. Estes possuem as mesmas características de atração e repulsão como ímãs normais. Quando o campo magnético é removido, os átomos se desalinham.
- Diamagnéticos: São substâncias que possuem a característica de se repelirem levemente quando estão na presença de campos magnéticos. Desta forma, os materiais se magnetizam em sentido oposto ao da força magnética aplicada.
- Ferromagnéticos: São materiais que se magnetizam facilmente, quando em contato com um campo magnético. Possuem a propriedade de aumentar o campo resultante.

Estas informações definem a susceptibilidade magnética dos materiais. A susceptibilidade magnética mensura a capacidade que a substância possui em magnetizar sobre excitação de um campo magnético, como visto no gráfico a seguir.

Figura 18. Susceptibilidade magnética em materiais com distintas características magnéticas.



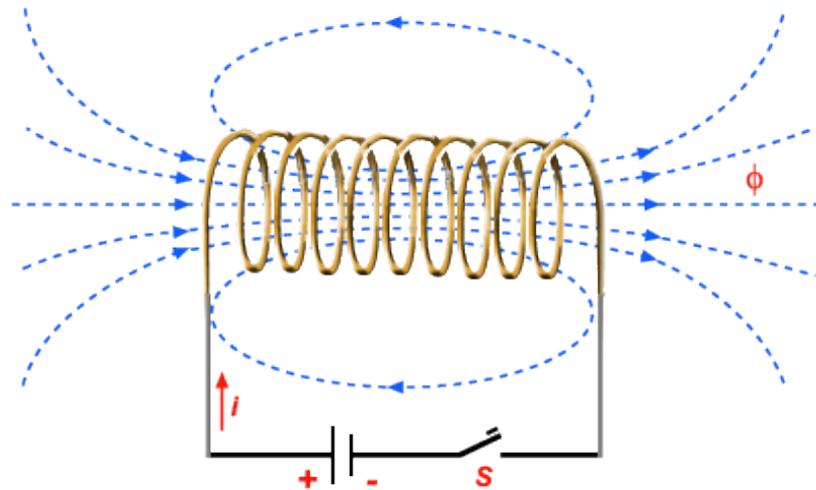
Fonte: Conversão de Energia – Características dos Materiais Magnéticos (RAMOS, 2015).

Os ímãs podem ser divididos entre naturais, que são elementos que são encontrados na natureza e que já possuem um campo magnético (magnetita), e os ímãs artificiais, que são materiais que adquirem propriedades magnéticas por condução de corrente elétrica, mais conhecido como eletroímã.

Hans Christian Oersted (1777-1851) foi um físico dinamarquês que contribuiu com os estudos sobre magnetismo. Um de seus experimentos foi posicionar uma agulha próximo a um fio condutor de corrente elétrica de um circuito fechado. Foi observado que a agulha sofreu uma leve deflexão, concluindo que sempre que haverá passagem de corrente elétrica, será criado um campo magnético em volta do fio condutor.

Este é o princípio do eletromagnetismo. A criação de propriedades magnéticas em um fio condutor através de corrente elétrica, como visto na imagem a seguir.

Figura 19. Geração de campo magnético através da corrente elétrica.



Fonte: Eletricidade e Magnetismo (SALMERON, 2007).

Na figura acima, temos que fluxo de campo magnético [Φ] gerado pela corrente elétrica indica o conjunto de todas as linhas de campo magnético que emergem de um ou mais polos de um ou mais ímãs. O solenoide ilustrado acima, quando possui uma corrente sendo conduzida, produz polos Norte (+) e Sul (-), como um ímã natural.

Desta forma, o magnetismo pode ser aplicado em um largo campo no setor industrial. Em específico, é responsável pelo principal aparelho que realiza a conversão de energia elétrica para mecânica: motor de corrente contínua ou alternada.

3.2– Motor Sem Escovas DC (BLDC)

O motor CC convencional possui custo reduzido comparado com um BLDC. Ele também pode ser empregado como um servomotor, e suas características podem originar uma extensa gama de aplicações no setor industrial.

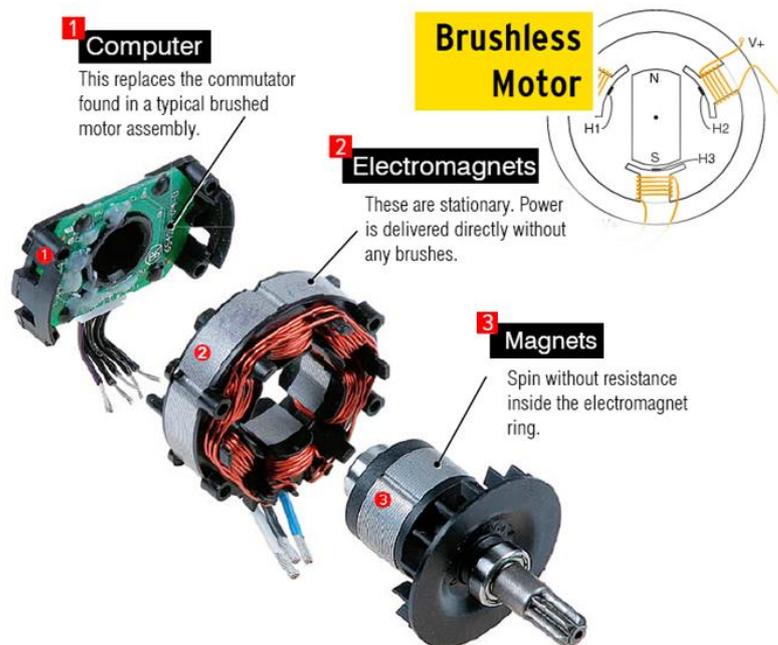
Porém, a maior diferença física entre eles seria que o BLDC teria a ausência de escovas e o comutador. Com isto, a falta destes itens dá ao motor *Brushless* a característica de fornecer melhor eficiência, menor índice de manutenção e a dissipação de calor mais uniforme, por exemplo.

Neste tópico iremos abordar as principais características de um motor sem escovas, estudar seu funcionamento e comparar com um motor CC convencional.

– Características Gerais de um BLDC

A figura a seguir ilustra uma vista explodida do motor BLDC.

Figura 20. Vista explodida de um motor BLDC.



Fonte: What is a Brushless Motor and How Does It Work? (Chainsaw Journal, 2015 – Editado).

Na figura anterior temos:

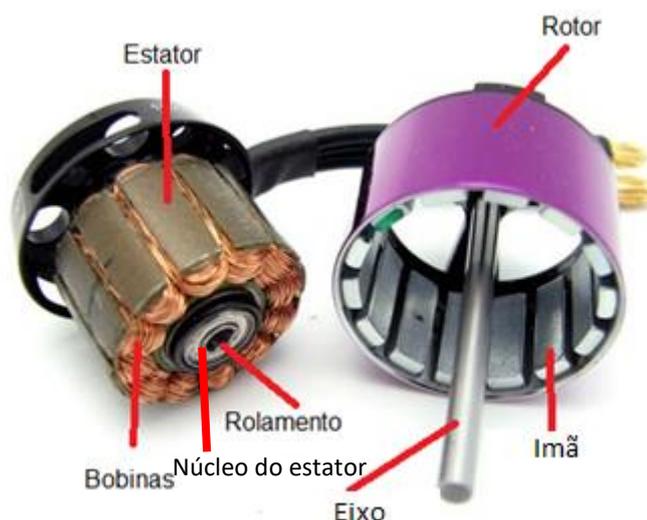
1 – O sinal de acionamento do motor é processado por um circuito de potência e controle. Serão utilizadas três fases para ligar os eletroímãs. Este circuito substitui as escovas e o comutador de um motor comum.

2 – Os eletroímãs são fixos, e são acionados de acordo com a lógica proveniente do circuito acionador. Na imagem é possível ver três fios, cada um corresponde a um eletroímã.

3 – Com o acionamento das bobinas e o campo gerado, irá ocorrer a movimentação do ímã permanente que está por dentro do anel eletromagnético, realizando a

movimentação do eixo. Sendo assim, o ímã é o próprio rotor do aparelho. A imagem a seguir indica os componentes deste motor.

Figura 21. Componentes de um motor BLDC.



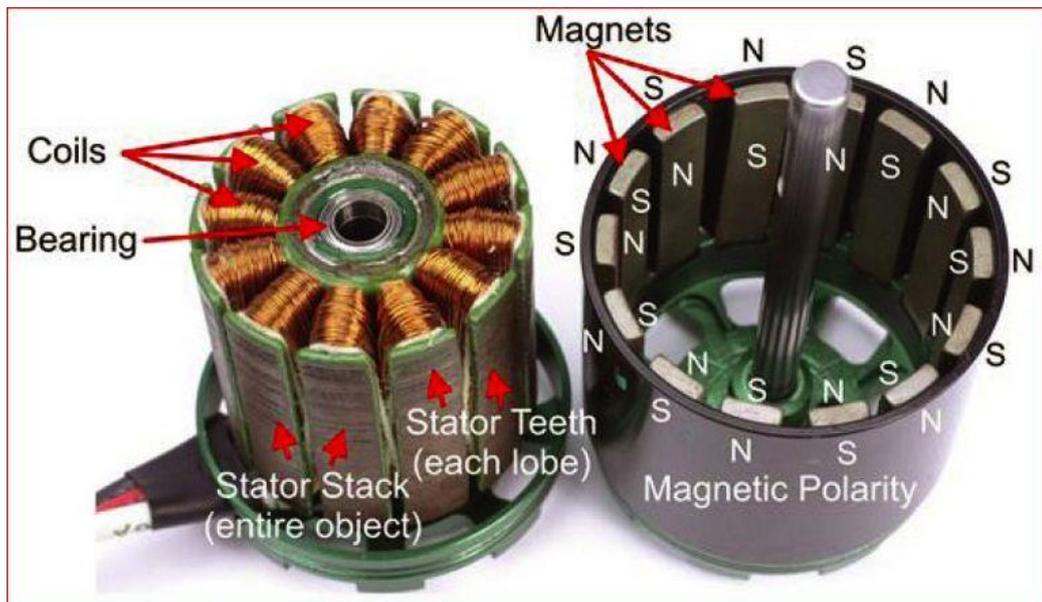
Fonte: Brushless DC Motor: Construction and Working Principle & Applications (Electrical Technology, 2016 – Editado).

Lenz dizia que o núcleo do estator é a estrutura de aço que está compreendida entre as bobinas. Trata-se de um conjunto de anéis finos que irão concentrar todas as linhas de força do campo magnético gerado.

As bobinas consistem em um aglomerado de fios esmaltados. Elas irão concentrar um campo magnético denso quando estão em condução. Geralmente o número de bobinas presentes é de um número divisível por três, que indicará que é um motor trifásico. A distribuição dos enrolamentos é feita pelas cavidades presentes no estator, e a ligação das bobinas podem ser de arranjo Y ou Δ , dependendo da aplicação necessária

No BLDC, seu rotor é constituído por um número par de ímãs permanentes. Para se obter melhor torque, a orientação instalada é de um par de polos é definido em ordem magnética inversa, como na imagem a seguir.

Figura 22. Polaridade alternada no rotor.



Fonte: Brushless DC Motor: Construction and Working Principle & Applications (Electrical Technology, 2016 – Editado).

– Configurações de Montagem do Motor

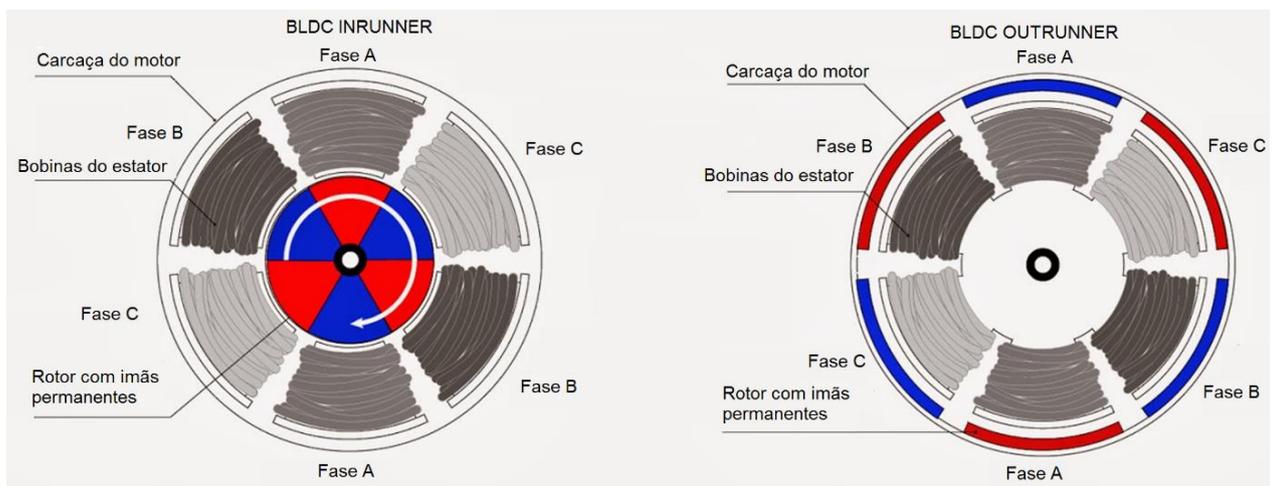
De acordo com Monteiro, o motor BLDC entra no grupo dos motores síncronos de ímã permanente (PMSC – *Permanent-Magnet Synchronous Motor*), junto com o motor BLAC (*Brushless AC*). Seus circuitos e configurações são semelhantes, tendo em vista que nos dois motores o enrolamento de armadura é localizado nas ranhuras do estator, e seu ímã permanente funciona como um sistema de excitação. A diferença entre estes aparelhos é a forma de onda aplicada no enrolamento da armadura e o fluxo magnético gerado.

É mais costumeiro e eficiente utilizar três fases para realizar o acionamento do motor. Diferentemente do motor DC comum, a corrente de armadura é conduzida através de fios, e não por escovas e comutadores. Isto traz uma vantagem considerável, tendo em vista que, cerca de 90% das manutenções do motor DC convencional é dado por seus contatos deslizantes. Outro fator positivo do BLDC é a sua dissipação de calor, que é feita pelo seu próprio estator/carcaça (TRINDADE, 2009).

Existem diferentes tipos de configuração de montagem de um motor BLDC. Cada uma possui sua específica ideal aplicação. Serão descritos: *inrunner*, *outrunner* e rotor de entreferro axial.

- Motor *Brushless* com rotor interno, ou *inrunner*. As bobinas do estator cercam o rotor e são fixas na carcaça do motor. Desta forma, o BLDC de rotor interno possui a vantagem de dissipar calor e, o rotor possui uma menor inércia.
- Motor *Brushless* com rotor externo, ou *outrunner*: Os enrolamentos das bobinas são localizados no núcleo do motor, e os ímãs permanentes rodeiam a parte externa do estator (LENZ, 2015). A imagem a seguir indica a diferença construtiva dos dois motores.

Figura 23. Motor *inrunner* e *outrunner*.

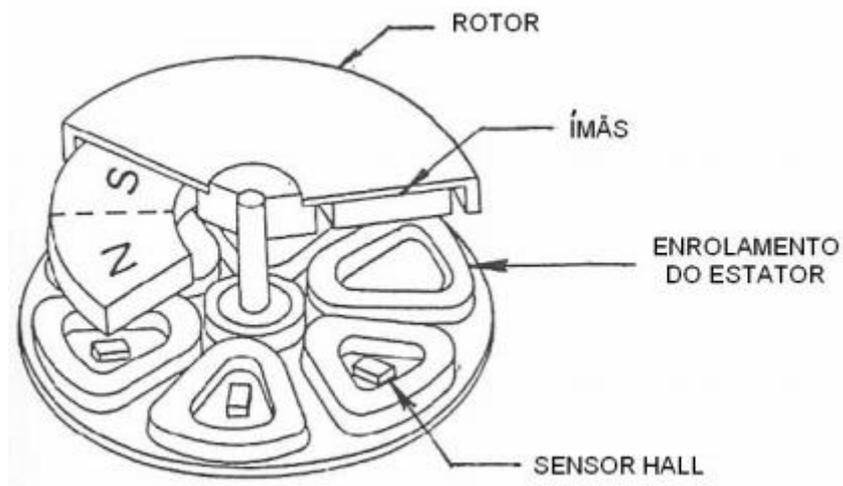


Fonte: The Basics of Electric Power – Brushless Motors (RCLAB, 2014 – Editado)

De acordo com o livro *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*, em linhas gerais, o *inrunner* é ideal para quando se necessita obter alto torque em baixas rotações. Porém, quando se necessita alta e constante velocidade, o motor de rotor externo é a melhor opção.

- Rotor de entreferro axial: Ideal para projetos que utilizam uma velocidade baixa e constante, com um torque com baixa variação. Sua potência de saída é baixa, em torno de 1000RPM. Sua montagem está ilustrada a seguir.

Figura 24. Rotor de entreferro axial.



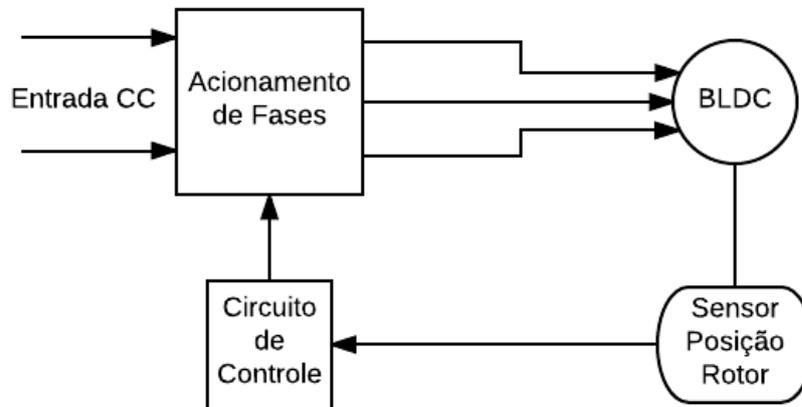
Fonte: Design of Brushless Permanent-Magnet Motors (HENDERSHOT; MILLER, 1994 - Editado).

– Métodos de Acionamento

O *Brushless DC* necessita de uma realimentação direta vinda da posição angular do rotor. Desta forma, a corrente de armadura será comutada entre as fases do motor. Esta sincronização pode ser chamada de comutação eletrônica. Esta estratégia é gerada pelo circuito de potência e controle (TRINDADE, 2009).

A seguir temos um diagrama de blocos de um sistema de acionamento e controle de um motor *Brushless DC*.

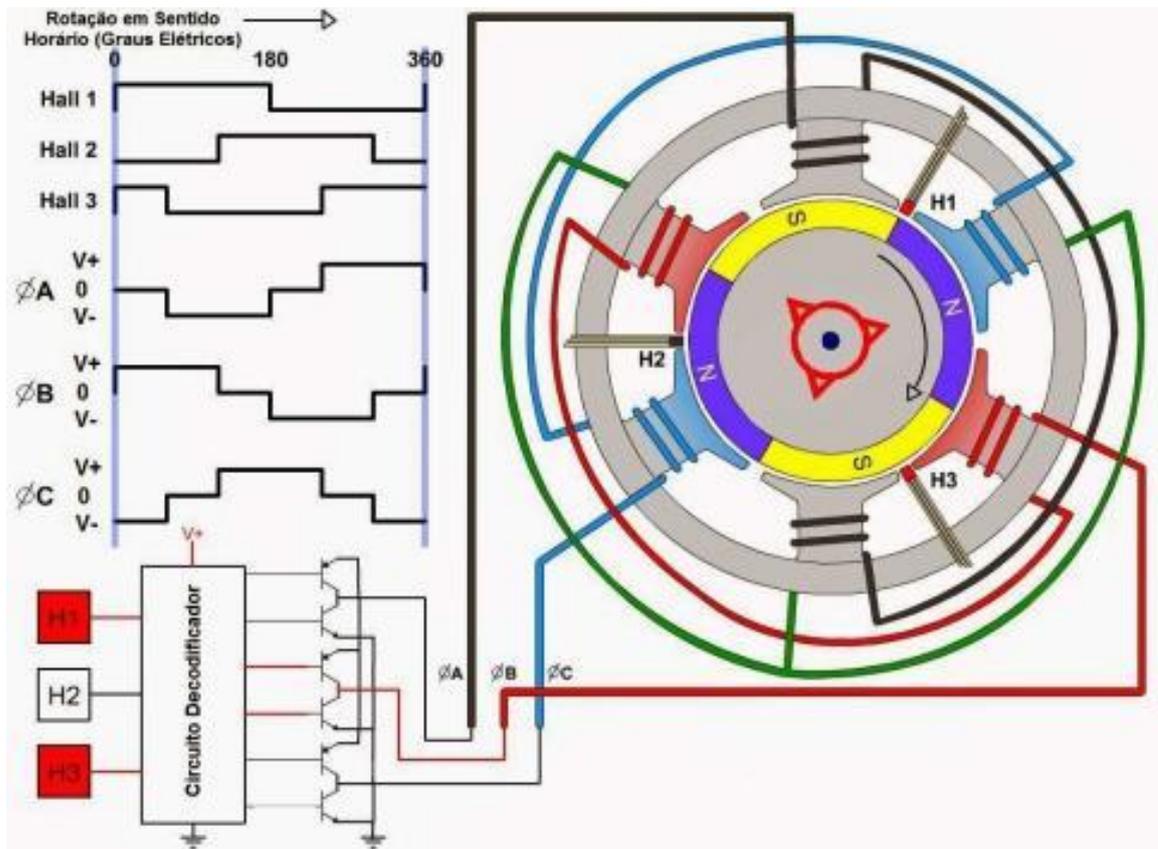
Figura 25. Diagrama de blocos de um motor BLDC.



Fonte: Acervo dos autores.

As comutações feitas por um motor *Brushless* são realizadas por transistores bipolares (TBJ), transistores de efeito de campo (FET) ou por tiristores, que são semicondutores de três junções (PNPN). O acionamento das bobinas são programados pela detecção da posição angular do rotor, através de um sensor Hall, ou por *encoders* ou sistemas sem sensores (*sensorless*). Com isto, o sistema de controle terá uma realimentação (malha fechada) e administrará os disparos dos comutadores (TRINDADE, 2009). A figura a seguir ilustrará a forma de onda de um sistema de detecção de posição por sensor Hall, com o esquema de acionamento e chaveamento dos transistores com suas respectivas fases.

Figura 26. Forma de onda e esquema de ligação do motor BLDC.



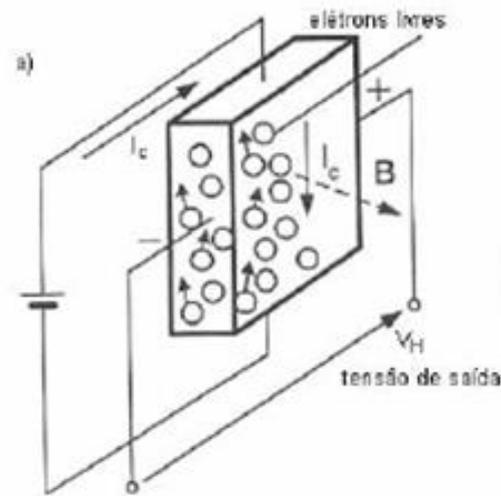
Fonte: Como se Constituem e Operam os Motores BLDC (LENZ, 2015).

Como visto, o motor BLDC necessita de tensões retangulares para realizar a sua movimentação ordenada. O torque e aceleração do motor são definidos pela interação do fluxo magnético do estator e do rotor. Desta forma, como visto no exemplo, o sensor Hall irá indicar para o circuito controlador qual a posição do rotor (LENZ, 2015).

– Indicação de Posição por Sensor *Hall*

Os sensores de efeito Hall são transdutores que quando alimentados com uma corrente contínua e exposto a um campo magnético, responde em sua saída variação de tensão.

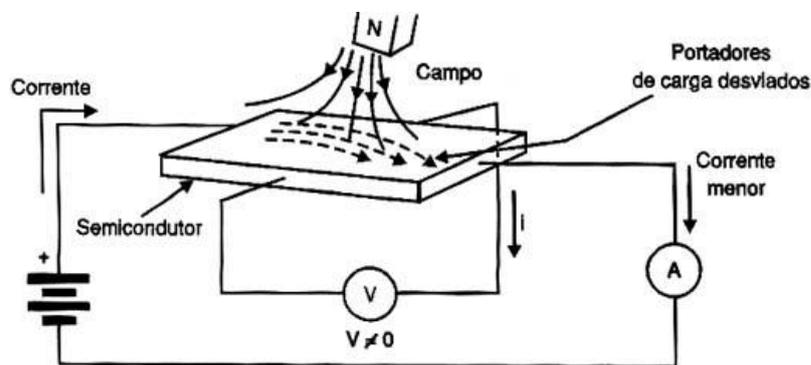
Figura 27. Princípio de funcionamento do sensor Hall.



Fonte: Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications (GIERAS; WING, 2002 - Editado).

Na figura anterior, é possível analisar que é ligado os terminais de alimentação e referência no eixo longitudinal do semicondutor, enquanto é posto os terminais de saída no eixo transversal. A tensão de saída ocorrerá apenas quando for imposto algum campo magnético próximo ao sensor, como visto na imagem a seguir.

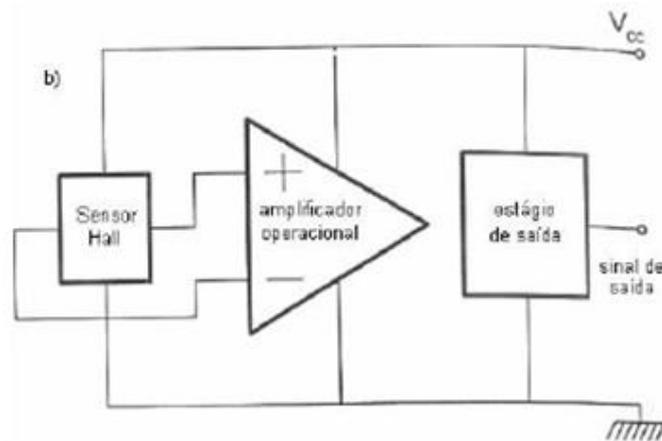
Figura 28. Aplicação de tensão sobre o sensor Hall.



Fonte: Como Funcionam os Sensores de Efeito Hall (Instituto Newton Braga).

A tensão de saída do sensor é um sinal de baixa amplitude, em torno de 20 a 30 milivolts [mV], sendo exposto a um campo magnético de 1 gauss [G]. Um sinal desta amplitude necessita de um amplificador operacional para aumento de ganho, tendo características de uma alta impedância na entrada, ganho de tensão considerável e baixo ruído.

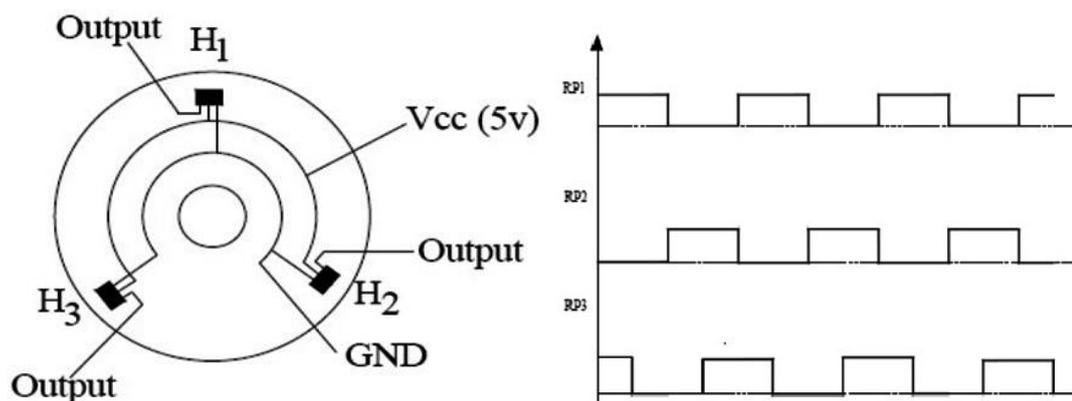
Figura 29. Diagrama de blocos do sensor Hall com amplificador.



Fonte: Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications (GIERAS; WING, 2002 - Editado).

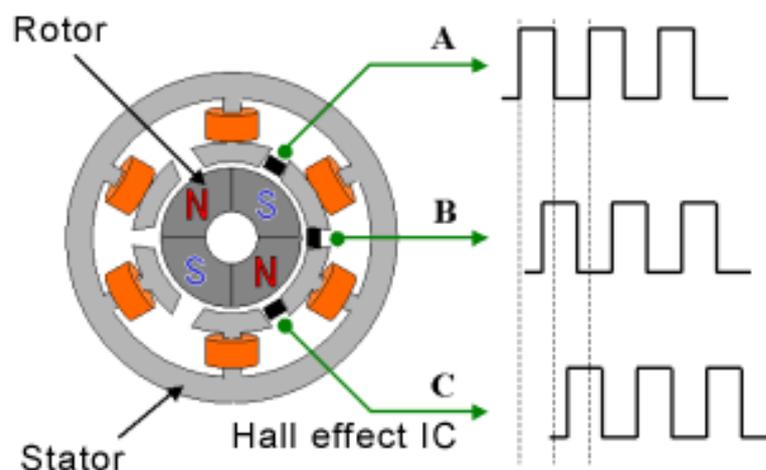
Para que a ECU possa detectar a posição angular do rotor do motor BLDC, utilizando o método por sensor Hall, é necessário que sejam utilizados três sensores com uma determinada configuração geométrica. Pode ser com um intervalo de 120° , ou dois estarem com um intervalo de 60° . Os sensores são montados nessa configuração geométrica para que sejam gerados uma forma de onda quadrada com uma defasagem de 120° entre elas, como visto a seguir.

Figura 30. Sensores Hall posicionados com uma defasagem de 120° entre si.



Fonte: User Manual for Speed Control of BLDC Motor using DSPIC (Pantech Solutions).

Figura 31. Sensores Hall posicionados com uma defasagem de 60° entre si.

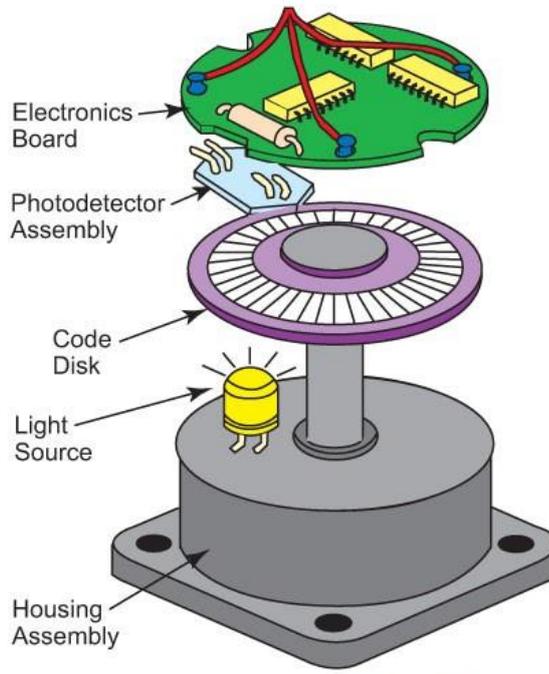


Fonte: Detection of Brushless Motor Rotation (AKM Corporation).

– Indicação de Posição por *Encoder*

A transformação de uma detectada variação de posição para sinais eletrônicos é a característica de funcionamento de um transdutor do tipo *encoder*. A partir da luz emitida de um LED (*Light Emmiting Diode*), da variação da posição do eixo do *encoder* e da recepção dos fótons pelo fotodetector, é realizada a transformação de grandezas. É a partir deste princípio que é uma das formas de se obter a posição do rotor num motor BLDC. Na imagem a seguir, irá demonstrar como é feito o procedimento de captação do feixe de luz.

Figura 32. Ilustração explodida de um encoder.



Fonte: What is an Encoder? (Encoder Products Company, 2016).

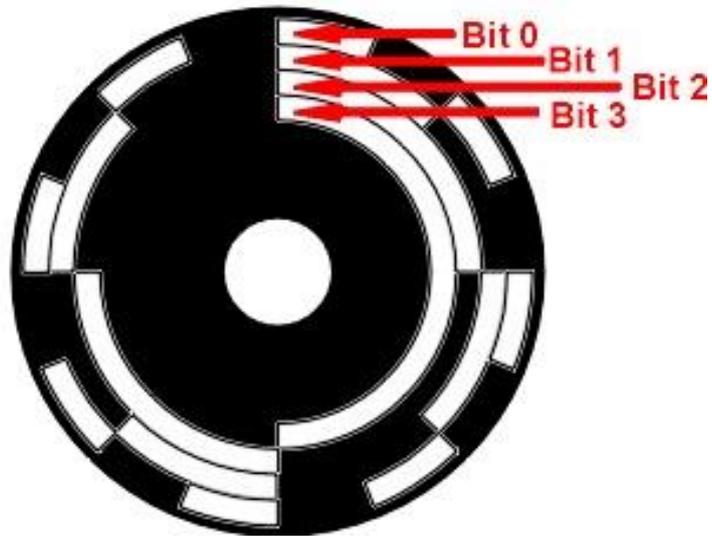
Na figura acima, temos:

- Placa eletrônica: Realiza o processamento dos sinais provenientes do fotodetector e alimentação geral do circuito.
- Fotodetectores: Responsável por captar o feixe de luz transmitido pelo LED.
- Disco codificado: Um disco com trilhas opacas que, com a variação de sua posição no eixo, irá interferir na luz transmitida pelo LED e recebida pelo fotodetector.
- Fonte de luz ou LED: Componente que irá transmitir para o fotodetector o feixe de luz.
- Carcaça.

Os tipos de *encoders* disponíveis no mercado são absoluto e incremental (exemplo da ilustração acima).

O *encoder* absoluto gera um código binário específico para cada deslocamento detectado. Possui trilhas opacas ou transparentes em seu disco, como visto na imagem à seguir.

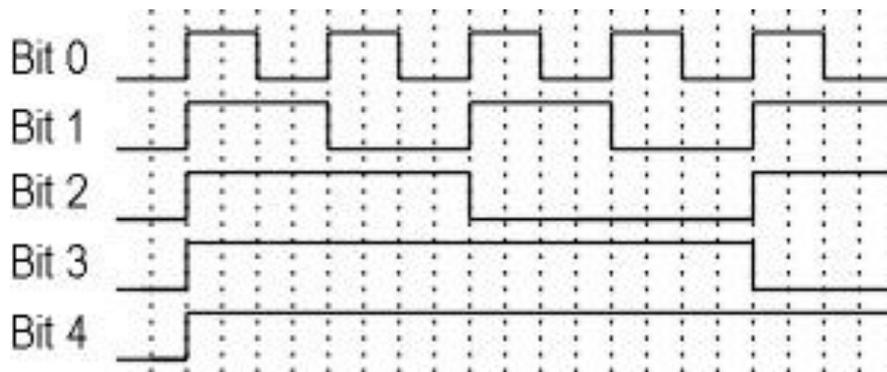
Figura 33. Desenho de um disco de um *encoder* absoluto.



Fonte: Using Shaft Encoders in Motion Control (Automated Motion Systems, 2015).

Na imagem, considerando o corpo do disco na cor preta e a parte codificada na cor branca, vemos que o código binário transmitido será quando a parte em branco passar pelo LED, e será realizada a leitura pelo fotodiodo. Em uma volta do eixo, é possível mensurar sua posição. A forma de onda característica desta configuração de encoder é:

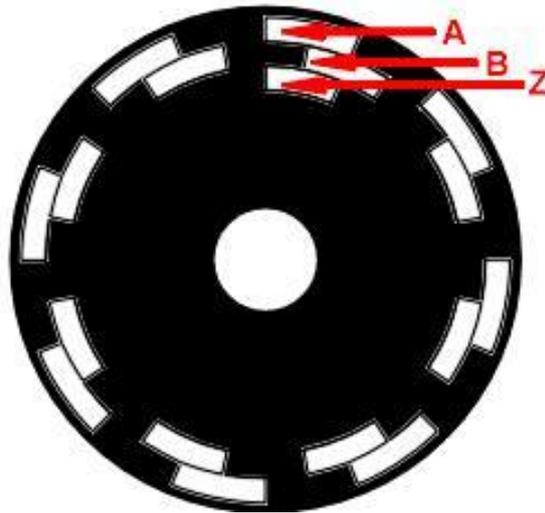
Figura 34. Forma de onda característica de um *encoder* do tipo absoluto.



Fonte: Using Shaft Encoders in Motion Control (Automated Motion Systems, 2015).

O *encoder* do tipo incremental possui a característica de fornecer o sinal resultante quando o disco do transdutor gira, de acordo com o movimento que deve ser mensurado. As suas trilhas são semelhantes a de um aro de bicicleta.

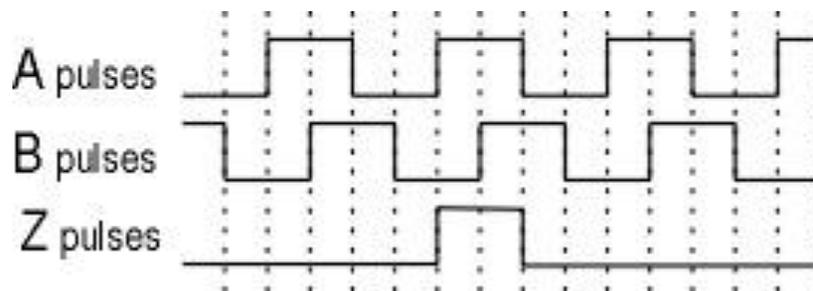
Figura 35. Desenho de um disco de um *encoder* incremental.



Fonte: Using Shaft Encoders in Motion Control (Automated Motion Systems, 2015).

A posição do eixo ou a velocidade angular é detectada através da contagem dos pulsos, ou medindo sua largura através de um sinal de clock. Porém, é necessário o uso de um segundo disco fixo, com a mesma codificação, para ser utilizado como uma referência para o móvel.

Figura 36. Forma de onda característica de um *encoder* do tipo incremental.



Fonte: Using Shaft Encoders in Motion Control (Automated Motion Systems, 2015).

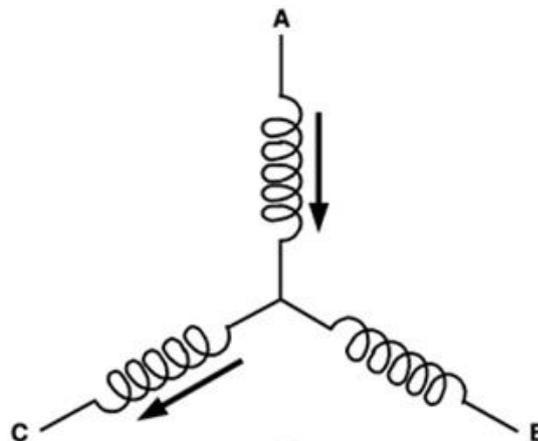
– Sistemas *Sensorless*

Os sistemas com controle por sensor de posição angular vistos anteriormente, seja do tipo Hall ou *encoder* possuem bons resultados, e oferecem precisão quanto à detecção da posição do rotor. Porém, dependendo da aplicação na qual o motor BLDC será utilizado, o custo e a confiabilidade requerida no sistema fizeram com que se tornasse inviável a utilização de sensores. Por exemplo:

- O sensor Hall possui uma temperatura limitada de operação, podendo queimar o conjunto do motor;
- Custo para produção do conjunto;
- Ruídos causados por sujeira ou oxidação nos conectores dos sensores;
- Redução no espaço físico do motor.

Desta forma, o controle da posição angular do motor BLDC será feita através do acionamento das bobinas, de forma sequencial. Enquanto duas bobinas são energizadas, uma é desligada. O enrolamento desta última age como um gerador através das linhas do campo magnético. A tensão é medida neste enrolamento, e ocorrerá a chamada Força Eletromotriz (FEM). De acordo com a lei de Lenz, esta FEM dá origem a um campo magnético secundário, que se opõe à mudança original no fluxo magnético que conduz a rotação do motor.

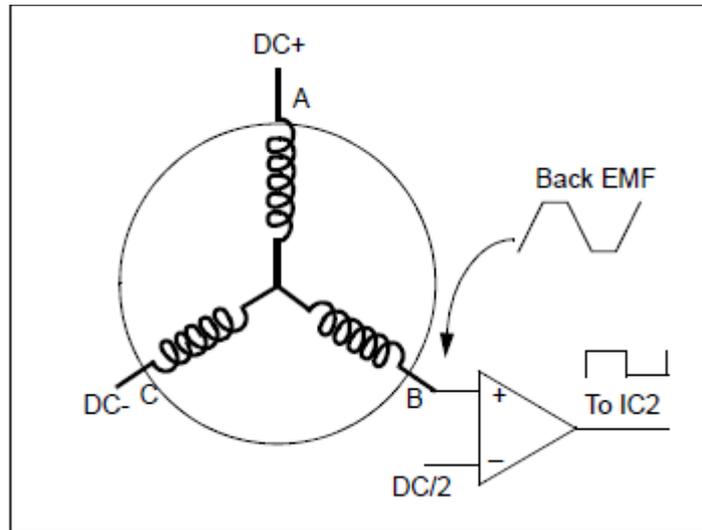
Figura 37. Configuração da interligação das bobinas.



Fonte: Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 (YEDAMALE, 2004).

A figura acima indica o acionamento das bobinas impulsoras, sempre deixando uma em aberto. Desta forma, será possível realizar a leitura da FEM da bobina B, como na figura abaixo:

Figura 38. Processamento do sinal na bobina desenergizada.



Fonte: Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 (YEDAMALE, 2004).

A grande desvantagem na utilização do sistema sem sensores se dá quando o motor é desligado, logo, não terá mais a FEM na bobina que antes era desenergizada. Desta forma, a ECU perde a referência de posição do rotor, tendo que realizar um acionamento de algumas bobinas impulsoras. Desta forma, o motor irá girar sem ter algum fator de correção ou controle.

Desta forma, a utilização deste sistema se torna inviável para um conjunto de direção com assistência elétrica, que é necessário o controle do motor BLDC, para que se obtenha a posição exata do rotor, mesmo depois de desligado.

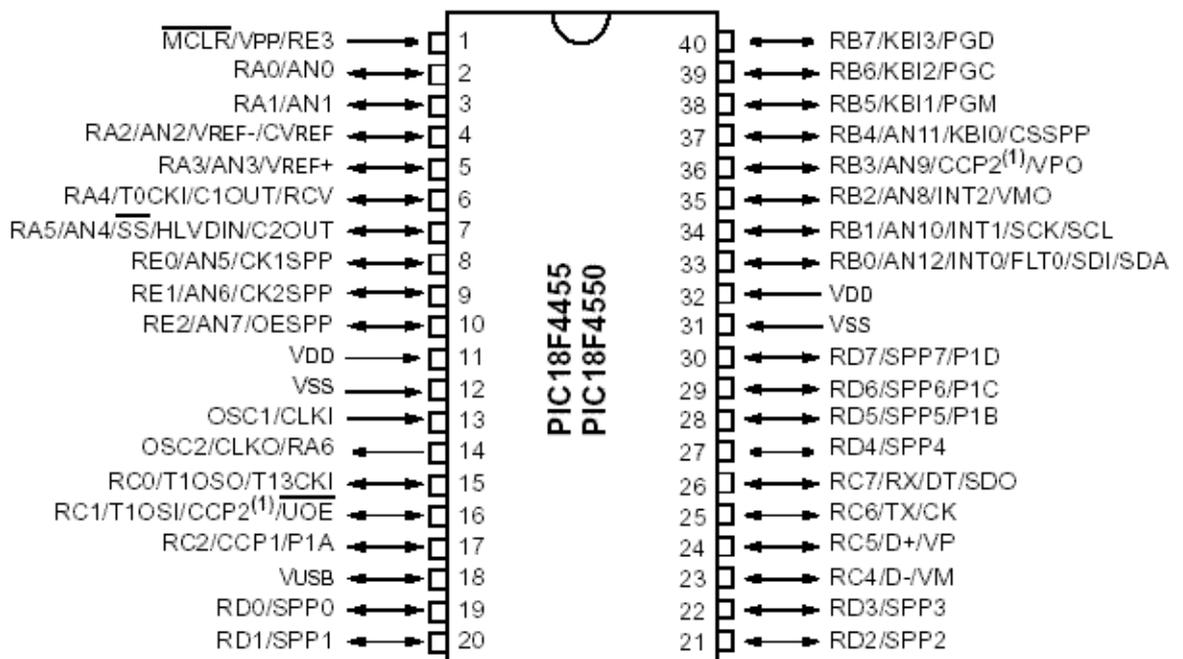
3.4 – Microcontrolador PIC18F4550

O controle do motor BLDC será realizado pelo microcontrolador PIC 18F4550. Este microcontrolador foi escolhido pelo seu baixo custo, e por atender as necessidades requeridas para um controle eficiente no projeto.

Características técnicas do microcontrolador:

- Memória FLASH, para armazenamento de programa: 32 kB;
- Memória SRAM, para armazenamento de dados: 2 kB;
- Memória EEPROM de dados: 256 B;
- Portas de entradas ou saídas digitais: 35;
- Portas de entrada analógica: 13;
- Módulo CCP (Capture, Compare, PWM);
- Temporizador de Watchdog;
- Frequência de operação de até 48 MHz;
- *Stack* de 31 níveis;
- Pinos para *Clock* externo;
- Portas de comunicação via USB e Serial.

Figura 39. Pinagem do microcontrolador PIC18F4550.

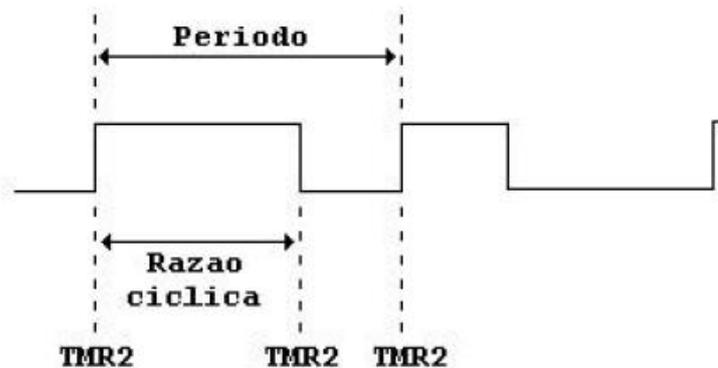


Fonte: PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet (MICROCHIP, 2009).

O PIC receberá o sinal do sensor de torque óptico, e os sinais Hall de referência de posição do rotor, para que, possa gerar os sinais PWM (*Pulse Width Modulation*) das bobinas impulsoras do motor.

Este microcontrolador possui saídas PWM que podem ser configuradas através de um algoritmo para alimentar as bobinas do motor utilizando o contador TMR2, para que seja definido seu *duty cycle*, ou razão cíclica.

Figura 40. *Duty Cycle* controlado pelo TMR2.



Fonte: Generating PWM with PIC Microcontroller – MPLAB XC8 (ELECTROSOME, 2016 - Editado.)

O módulo CCP poderá ser utilizado para realizar a modulação de largura de onda também, de acordo com o seu funcionamento:

- Capture – O registrador captura o valor do Timer1, quando ocorrido um evento.
- Compare - O módulo fica comparando seu registrador com o valor do Timer1. Quando o valor se iguala, gera interrupções ou altera pinos de entrada.
- PWM - O módulo gera um sinal com a largura de onda ajustável, com base no tempo do TMR2.

3.5 – Sensor de Torque Óptico

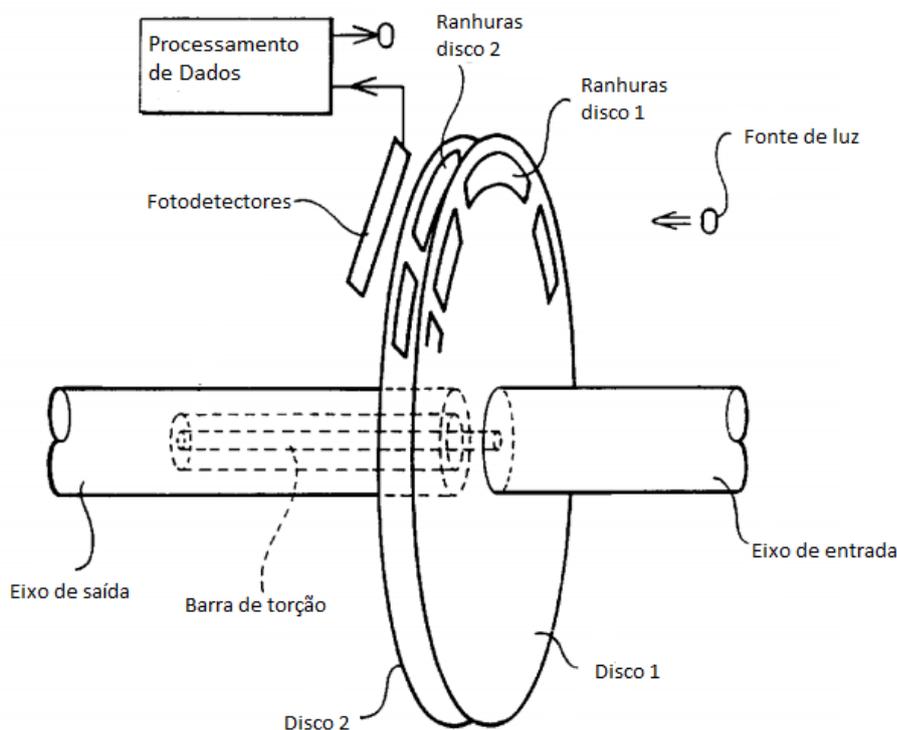
A estratégia de assistência de esterçamento existente no sistema de direção consiste na utilização de um sensor de torque acoplado entre o eixo do volante. De acordo com a movimentação e imposição de uma força sobre o volante, este sensor irá detectar qual é o sentido de rotação, e quantidade de força imposta. Estes dados

serão enviados para o módulo do sistema de direção, que irá processar os devidos sinais, e, por fim, realizar a movimentação do motor.

Um sensor de deslocamento óptico é usado para medir o deslocamento rotativo entre dois eixos que rodam em conjunto. Ao conectar os eixos juntos por meio de uma barra de torção, o sensor pode ser usado para medir o torque transmitido.

O sensor compreende dois discos. Um *Led* emite a luz através de uma peça de acrílico transparente para uma matriz de fotodetectores, e um processador de dados determina o deslocamento e o torque, a partir da imagem da luz refletida dos discos sobre o fotodetector.

Figura 41. Princípio de funcionamento do sensor de torque óptico.



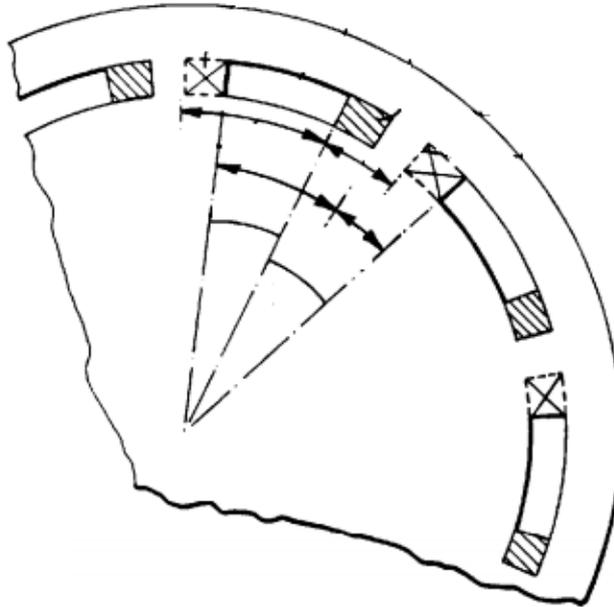
Fonte: Optical Displacement Sensor and Torque Sensor Employing Relatively Movable Slit Patterns (HORTON, Steven John; TRACE, Adrian Leslie; REES, David, 1998 – Editado.)

A figura acima ilustra o sistema de sensor de torque óptico. O eixo de entrada possui uma extremidade conectada mecanicamente no volante do veículo, e a outra conectada a uma barra de torção, juntamente com o eixo de saída.

Os discos são acoplados juntamente com seus respectivos eixos (disco 1 – eixo de entrada; disco 2 – eixo de saída). Eles estão separados por um pequeno espaço, e os discos possuem diversas ranhuras simétricas, e com desenhos semelhantes.

Os discos irão movimentar juntamente com o eixo, e o torque é determinado pela defasagem da luz emitida entre um disco e outro, como visto na figura a seguir.

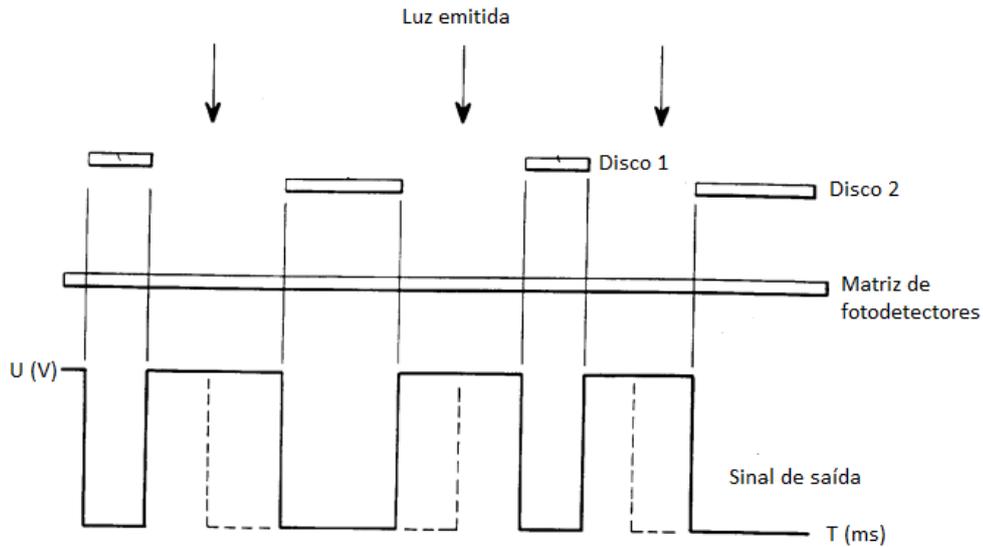
Figura 42. Defasagem dos dois discos resulta no torque imposto.



Fonte: Optical Displacement Sensor and Torque Sensor Employing Relatively Movable Slit Patterns (HORTON, Steven John; TRACE, Adrian Leslie; REES, David, 1998 – Editado.)

O sinal de saída da matriz de fotodetectores é quadrado, com variação de largura. O tempo de retorno da defasagem para a posição inicial dos discos também deve ser considerado, tendo uma melhor referência de força imposta no volante. A forma de onda resultante dos fotodetectores pode ser vista na imagem a seguir.

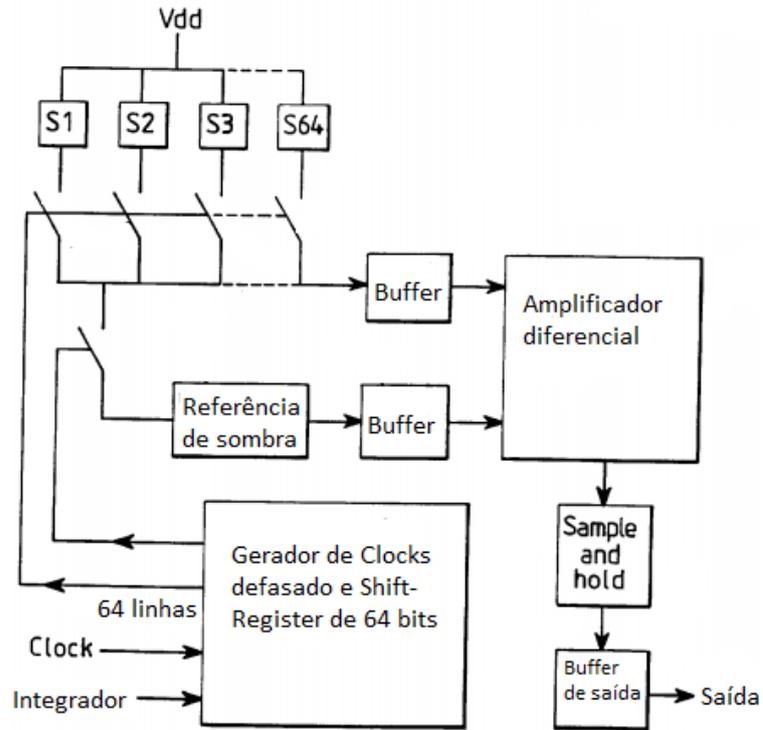
Figura 43. Forma de onda resultante dos fotodetectores.



Fonte: Optical Displacement Sensor and Torque Sensor Employing Relatively Movable Slit Patterns (HORTON, Steven John; TRACE, Adrian Leslie; REES, David, 1998 – Editado.)

São utilizados 64 fotodetectores em uma matriz. A saída desta matriz é conectada a um *buffer*, que será resultante de acordo com o acionamento sequencial de micro chaves, em que cada fotodetector possui uma. Existe ainda um segundo *buffer* para referência dos fotodetectores que não receberam a luz incidida – referência de sombra. Com os dois sinais dos *buffers*, estes sinais serão encaminhados para a entrada inversora e não-inversora de um amplificador diferencial, em que sua resultante é a diferença entre os sinais, e que irá acionar um circuito de *sample and hold*, que, por fim, irá conectar a um último *buffer* de saída. Todos os processos são controlados via *clocks* defasados entre si (*non-overlapping clock generator*), e um *shift-register* de 64 bits. O diagrama de blocos a seguir irá representar todo este sistema.

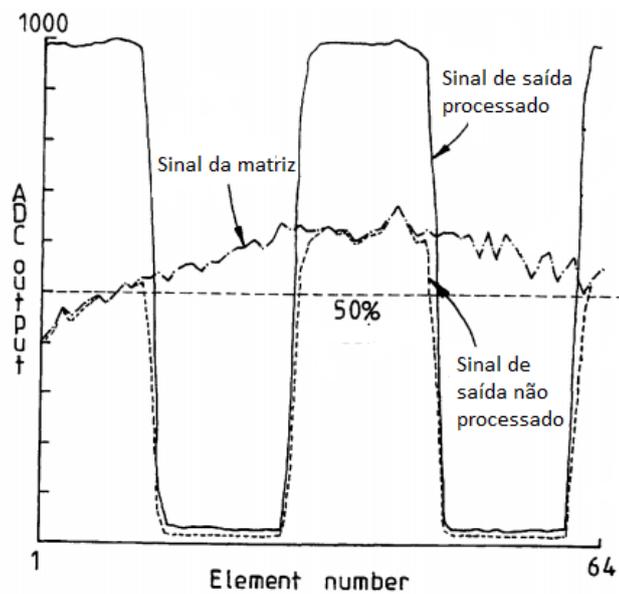
Figura 44. Diagrama de blocos do processamento de sinais do sensor de torque.



Fonte: Optical Displacement Sensor and Torque Sensor Employing Relatively Movable Slit Patterns (HORTON, Steven John; TRACE, Adrian Leslie; REES, David, 1998 – Editado.)

O sinal de saída do sensor de torque pode ser visto no gráfico a seguir:

Figura 45. Forma de onda do sinal de saída do sensor de torque.



Fonte: Optical Displacement Sensor and Torque Sensor Employing Relatively Movable Slit Patterns (HORTON, Steven John; TRACE, Adrian Leslie; REES, David, 1998 – Editado.)

3.6 – Driver IRS2334

Para a comutação dos MOSFETs no acionamento do motor BLDC, será utilizado um circuito *Driver* de potência voltado para chaveamento de sistemas trifásicos, o IRS2334. É um sistema que suporta alta tensão e velocidade de comutação de MOSFETs ou IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

Na saída, para realizar o chaveamento dos MOSFETs ou IGBTs, o IRS2334 dispõe de três pinos destinados para chaveamento em nível lógico alto, três em nível lógico baixo e seis pinos destinados para os pontos flutuantes de cada fase. Na entrada, possui pinos destinados ao controle lógico do chaveamento dos MOSFETs ou IGBTs.

Tabela 2. Relação de pinagens IRS2334.

Símbolo	Descrição
VCC	Tensão de alimentação para o IRS2334
VB1	Alimentação do ponto flutuante em nível alto (fase 1)
VB2	Alimentação do ponto flutuante em nível alto (fase 2)
VB3	Alimentação do ponto flutuante em nível alto (fase 3)
VS1	Retorno do ponto flutuante nível alto (fase 1)
VS2	Retorno do ponto flutuante nível alto (fase 2)
VS3	Retorno do ponto flutuante nível alto (fase 3)
HIN1	Entrada lógica para nível alto do <i>gate</i> da saída HO1.
HIN2	Entrada lógica para nível alto do <i>gate</i> da saída HO2.
HIN3	Entrada lógica para nível alto do <i>gate</i> da saída HO3.
LIN1	Entrada lógica para nível baixo do <i>gate</i> da saída LO1.

LIN2	Entrada l3gica para n3vel baixo do <i>gate</i> da sa3da LO2.
LIN3	Entrada l3gica para n3vel baixo do <i>gate</i> da sa3da LO3.
HO1	Sa3da n3vel alto para o <i>gate</i> (fase 1)
HO2	Sa3da n3vel alto para o <i>gate</i> (fase 2)
HO3	Sa3da n3vel alto para o <i>gate</i> (fase 3)
LO1	Sa3da n3vel baixo para o <i>gate</i> (fase 1)
LO2	Sa3da n3vel baixo para o <i>gate</i> (fase 2)
LO3	Sa3da n3vel baixo para o <i>gate</i> (fase 3)
COM	Retorno do n3vel baixo.

Figura 46. Pinagem IRS2334.



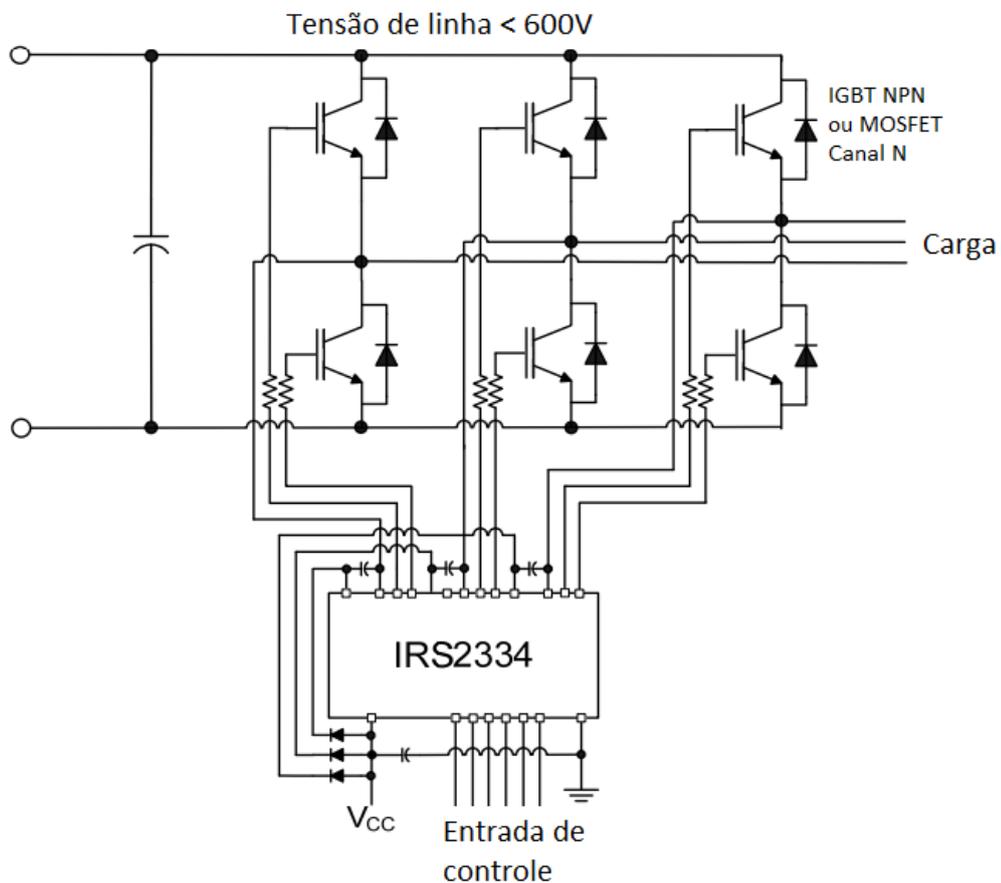
Fonte: Datasheet IRS2334SPbF/IRS2334MPbF. (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2011.)

Características técnicas do IRS2334:

- Permite a utilização de técnica *bootstrap*, através de um canal flutuante;
- Totalmente operacional em 600V;
- Tolerância em tensões transientes negativas;
- Tensão de alimentação do *Gate* entre 10V a 20V;
- Lógica de prevenção de corrente parasita;
- Três *drivers* de meia ponte independentes;
- Compatível com circuitos de controle de entrada a 3.3V;
- Filtro de entrada avançado;
- *Delay* combinado nos canais de comutação;
- Saídas são faseadas com as entradas.

A aplicação típica deste *driver* pode ser representado no circuito abaixo:

Figura 47. Aplicação típica do IRS2334.



Para o cálculo do resistor de *bootstrap*, temos que calcular a carga total que deve ser fornecida para o Vcc, durante o tempo de chaveamento (T_s):

$$Q_{tot} = Q_G + I_{leak} * T_s$$

Em que a variável Q_G é definida pelo total de carga necessária para realizar o chaveamento do *gate* no *driver*, e I_{leak} é a corrente de fuga do *gate*.

Considerando que o chaveamento irá ocorrer apenas em nível alto (T_{ON}), e a carga irá passar pelo resistor apenas durante este momento, pode-se calcular a corrente que passará por ele, através da equação:

$$I = \frac{Q_G + I_{leak} * T_s}{T_{ON}} = \frac{Q_G * f + I_{leak}}{D}$$

$$f = \frac{1}{T_s}; D = \frac{T_{ON}}{T_s}$$

A queda de tensão sobre o resistor de *bootstrap* é dada por:

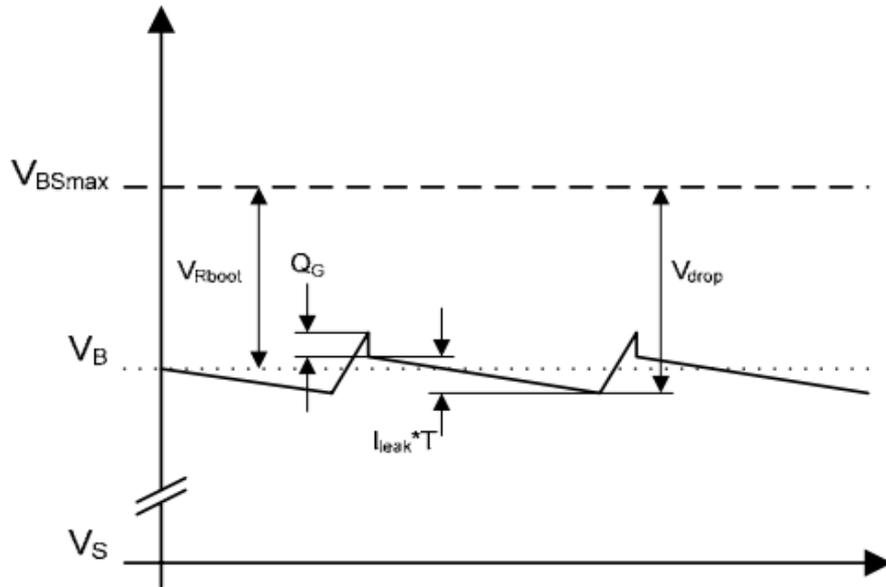
$$V_{Rboot} = \frac{Q_G * f + I_{leak}}{D} * R_{boot}$$

Para o cálculo do capacitor de *bootstrap*, devemos encontrar a sua carga total, dado pela equação:

$$Q_{tot} = Q_G + I_{leak} * T_{off} = Q_G + I_{leak} * (1 - D) * T_s$$

Porém, existe o problema do *ripple*. Trata-se de uma ondulação em corrente alternada que sobrepõe ao valor médio de uma fonte de corrente contínua. Isto é causado por uma tensão residual, que não mantém a corrente com um valor constante. Esta ondulação comprometerá o funcionamento ideal do chaveamento dos *gates*.

Figura 49. Forma de onda do *ripple* do capacitor de *bootstrap*.



Fonte: Application Note AN-1123 -Bootstrap Network Analysis: Focusing on the Integrated Bootstrap Funcionalidade. (MERELO, Andrea – International Rectifier).

A amplitude do *ripple* encontrado em V_{BS} é determinado através da seguinte equação:

$$\Delta V_{BS} = \frac{Q_{tot}}{C_{boot}}$$

Para o cálculo de V_{drop} , temos:

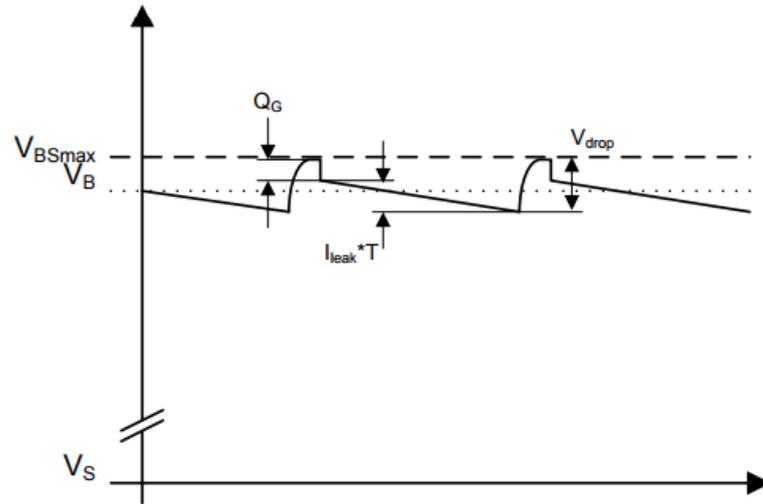
$$V_{drop} = V_{Rboot} + \frac{\Delta V_{BS}}{2}$$

A fórmula anterior é válida apenas quando o *duty cycle* é baixo o suficiente em que V_{Rboot} seja maior que $\frac{\Delta V_{BS}}{2}$. Isto ocorre devido tempo de recarga for suficiente para o capacitor carregar completamente. Assumindo que o capacitor recarrega em 4 unidades de tempo, podemos representar o tempo limite do *duty cycle* na seguinte fórmula:

$$D < \frac{4 * R_{boot} * C_{boot}}{T_S}$$

Quando o *duty cycle* for maior que a equação acima, a fórmula de V_{drop} não é mais válida, pelo fato de V_{drop} for igual a ΔV_{BS} , com a seguinte forma de onda:

Figura 50. Forma de onda do *ripple* do capacitor de *bootstrap*, quando $V_{drop} = \Delta V_{BS}$.



Fonte: Application Note AN-1123 -Bootstrap Network Analysis: Focusing on the Integrated Bootstrap Functionality. (MERELO, Andrea – International Rectifier).

É importante levar em consideração que o *ripple* encontrado em V_{BS} depende diretamente do valor do capacitor de *bootstrap*, e a queda de tensão máxima de V_{BS} , que é V_{drop} , depende apenas do resistor de *bootstrap*.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 – Resultados Preliminares

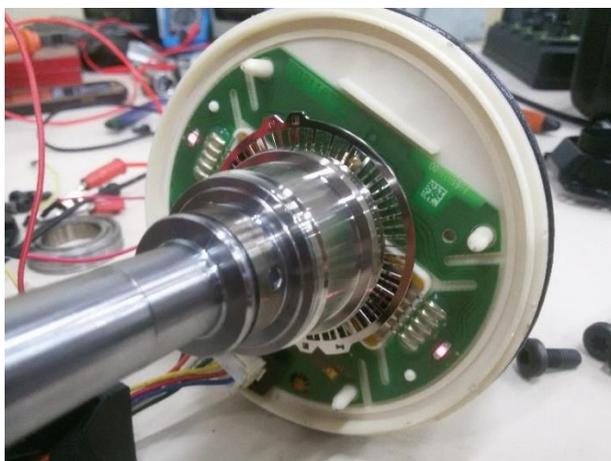
Na primeira fase do projeto, foram realizadas pesquisas em monografias, livros, artigos relacionados aos sistemas de direção disponíveis no mercado automotivo atual, controle de um motor BLDC, sensores de posição angular, *encoders*, sensores de torque para aplicação na área automotiva e drivers de acionamento do motor BLDC.

A primeira orientação prática consistiu em conhecer o módulo de direção obtido. Foi realizada a desmontagem da caixa, identificação das fases do motor BLDC e sensores Hall para determinar a atual posição do rotor.

Foi realizada também a identificação e conhecimento do funcionamento do sensor de torque, como a identificação dos fotodetectores, e do encoder presente no sistema. Depois, foi realizada uma tentativa de localizar os sinais do encoder, e também, entender o funcionamento da placa-mãe do módulo.

Foi obtido o resultado em que os LEDs presentes na placa do sensor de torque foram acionados, como esperado. Com a luz dos LEDs, e a movimentação dos encoders com uma força aplicada no eixo, deveria ser transmitido uma forma de onda quadrada, que posteriormente iria ser processada na placa do módulo principal. Porém, ao movimentar o eixo, não foi obtida a forma de onda esperada, apenas sinais contínuos de 3.5V a 5 V.

Figura 51. LEDs do sensor de torque acionados.

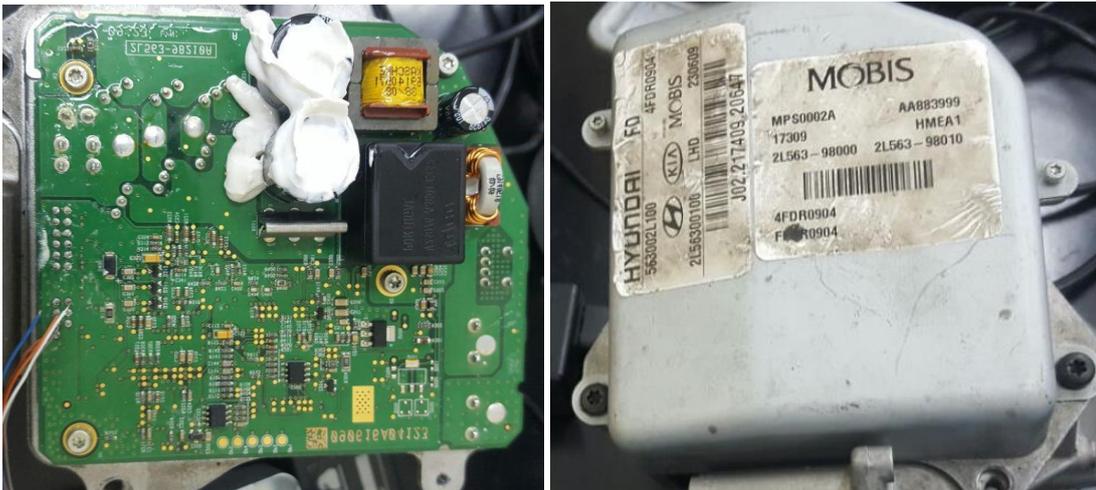


Fonte: Acervo dos autores.

4.2 – Análise do Módulo de Controle

Foram realizadas medições e testes em um conjunto do sistema de direção totalmente funcional, com o intuito de se obter todos resultados corretos do módulo, sensor de torque e motor.

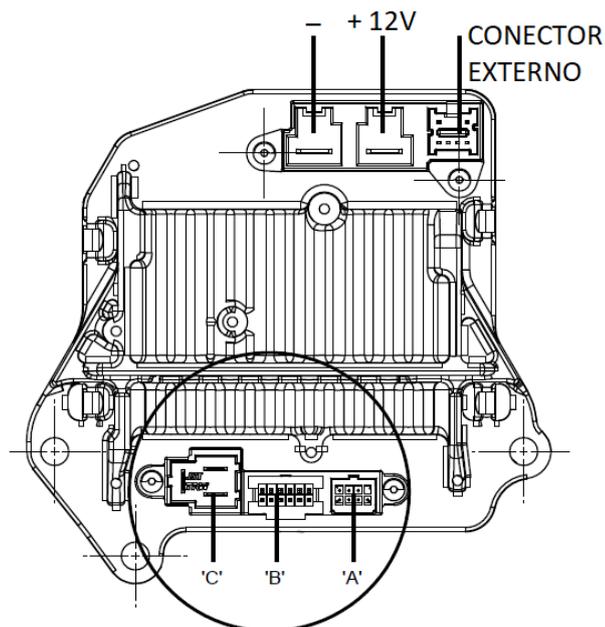
Figura 52. Módulo de controle do sistema.



Fonte: Acervo dos autores.

O módulo possui três conectores de entrada e outros três de saída, como visto da imagem a seguir:

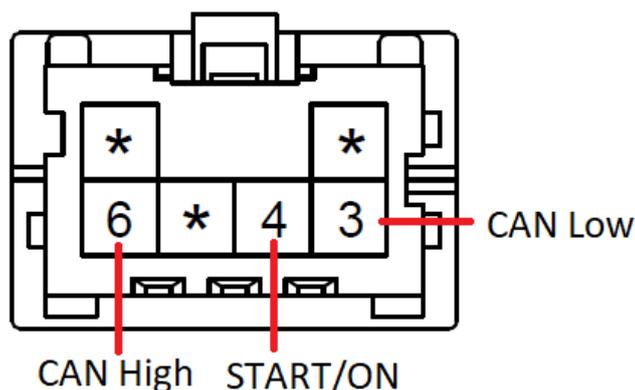
Figura 53. Desenho do módulo de controle do sistema.



Fonte: Diagrama Esquemático Elétrico I30 (HYUNDAI, 2010 – Editado).

Os conectores de entrada são os +12V, -, e o CONECTOR EXTERNO. É necessário que alimente o módulo com uma fonte que possua um limite de corrente alto, por conta do motor BLDC necessitar de um elevado consumo no conjunto, que seria em ordem de 80 A. No CONECTOR EXTERNO, encontra-se os pinos de CAN High, CAN Low e ON/START.

Figura 54. Pinagem do Conector Externo.

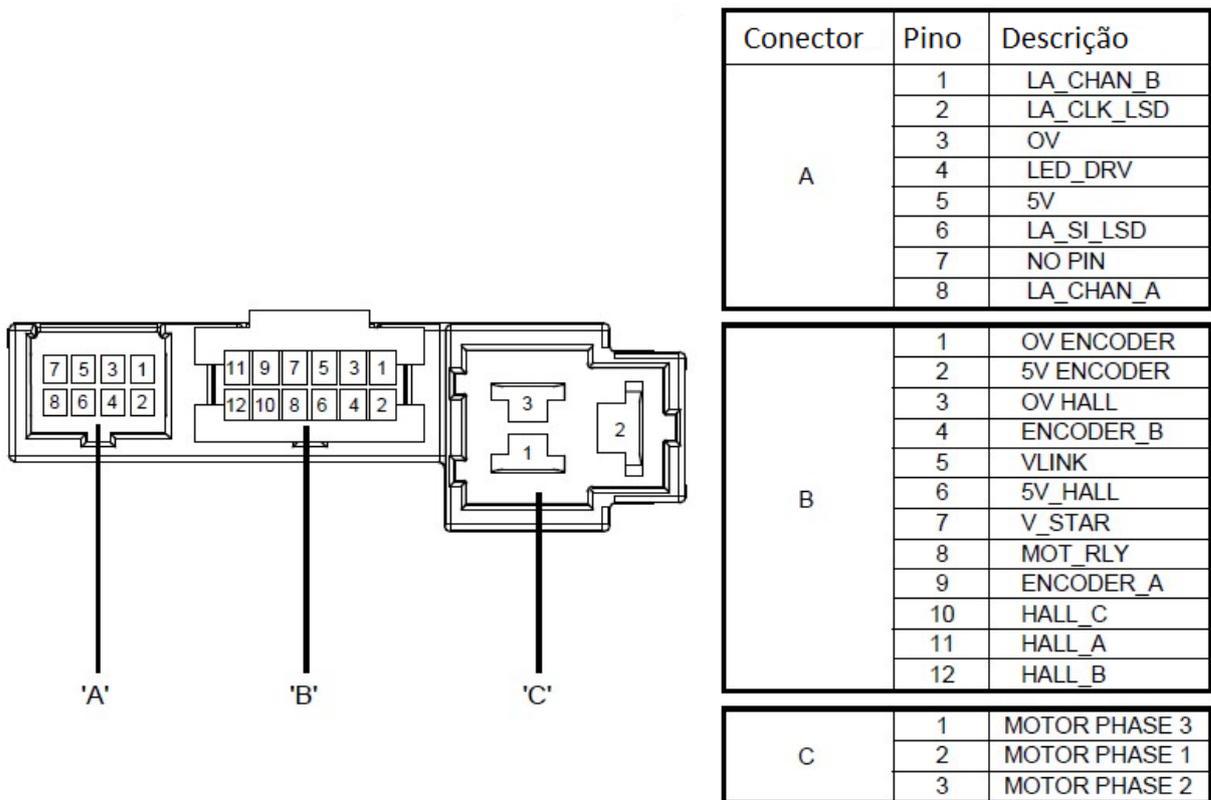


Fonte: Diagrama Esquemático Elétrico I30 (HYUNDAI, 2010 – Editado).

O pino de START/ON possui a função de dar o pulso de habilitação para que o conjunto inteiro entre em funcionamento. Para realizar este procedimento, basta aplicar os mesmos 12V de alimentação do módulo para este pino. Com isto, um relé irá acionar por volta de 6 segundos, e o sistema de direção entrará em funcionamento, energizando toda a parte de sensoriamento de torque, controle e do motor.

Os sistemas de sensoriamento de torque e de acionamento do motor BLDC possuem três conectores distintos, em que irão trocar informações com o módulo de controle. São os conectores 'A', 'B' e 'C'.

Figura 55. Configuração dos pinos de saída do módulo de controle.



Fonte: Diagrama Esquemático Elétrico I30 (HYUNDAI, 2010 – Editado).

Desta forma, temos:

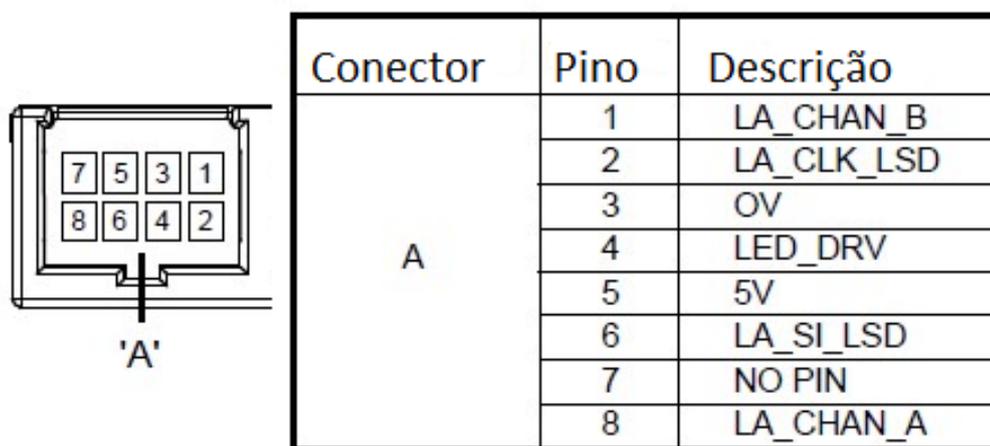
- **Conector 'A'** – Responsável pelo acionamento e controle do sistema do sensor de torque.
- **Conector 'B'** – Responsável pelo acionamento e controle de sistemas periféricos do motor BLDC.
- **Conector 'C'** – Responsável pelo acionamento do motor BLDC.

4.3 – Análise do Sensor de Toque

– Funcionamento no Conjunto Original

O sensor de torque realiza a medição de força imposta pelo motorista no volante e o sentido de sua rotação. Esta medição é feita através de um *encoder*, em que a luz transmitida pelo LED será recebida por um conjunto de fotodetectores, conhecido como *Linear Array* (Matriz Linear). Em seu conector, encontramos os seguintes pinos:

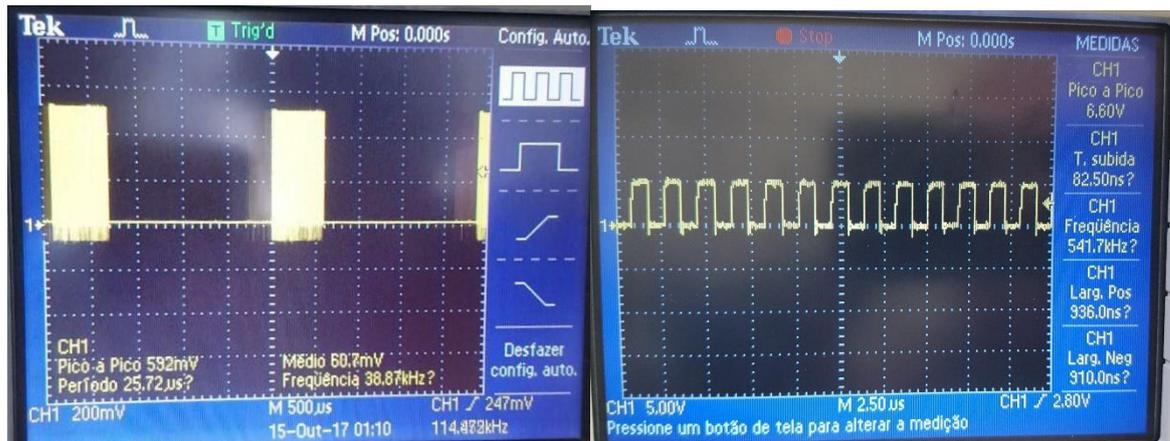
Figura 56. Configuração dos pinos de saída do módulo de controle.



Fonte: Diagrama Esquemático Elétrico I30 (HYUNDAI, 2010 – Editado).

O sistema de sensoriamento de torque requer uma alimentação de 5V, e alguns sinais pré-processados para que o sensor tenha referência de tempo, e realize a leitura e processamento dos sinais obtidos do *Linear Array* (LA). São estes sinais de entrada:

Figura 57. Sinal do pino LA_CLK_LSD



Fonte: Acervo dos autores.

O pino LA_CLK_LSD (pino 2) possui a função de fornecer uma referência de tempo no sistema do sensor de torque. É constituído por um sinal pulsante de 600us no total, com dois períodos distintos – inicia o ciclo com um sinal com período 2us durante 300us – é transmitido uma breve sequência lógica – e então é transmitido uma sequência de pulsos de 1us, com 300us de duração. Após o envio deste sinal para o sistema de sensoriamento, este pino permanece em nível lógico '0' durante 1,8ms, e, volta a transmitir o mesmo protocolo pulsante de 600us.

A seguir, o pino LED_DRV (pino 4) possui a função de realizar o acionamento dos LEDs do sensor de torque. Para isto, é enviado um sinal com tempo em baixa de 32us, e um tempo em alta de 2,32ms.

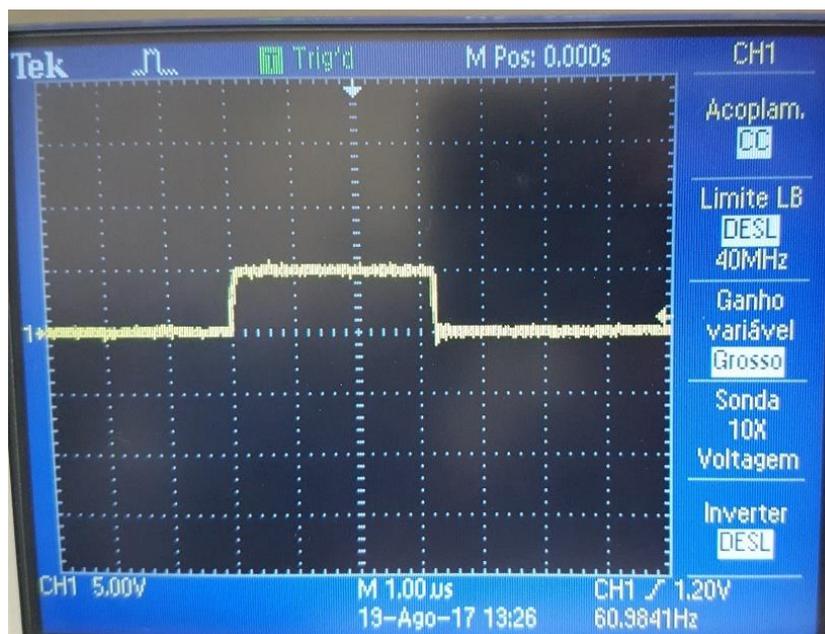
Figura 58. Sinal do pino LED_DRV



Fonte: Acervo dos autores.

Para o pino LA_SI_LSD (pino 6), trata-se se um sinal de nível lógico '1' com duração de 1µs. É uma amostragem proveniente do pino 2, em que irá realizar a transmissão do início e do fim do sinal do primeiro período, que possui 2µs, que foi anteriormente citado.

Figura 59. Sinal do pino LA_SI_CLK.



Fonte: Acervo dos autores.

A resposta do sensor de torque é transmitida nos pinos LA_CHAN_A (pino 8) e LA_CHAN_B (pino 1). Toda a imposição de torque e movimentação do volante/eixo é recebida e processada neste sinal.

Figura 60. Sinal do pino LA_CHAN_A (CH1) e LA_CHAN_B (CH2).



Fonte: Acervo dos autores.

A rotação do volante é detectada através da movimentação do sinal nos canais A e B. Quando o eixo gira para o lado esquerdo, o sinal desloca para este mesmo sentido, e assim ocorre quando o eixo é movimentado para o lado direito. Ao aplicar uma força sobre o volante, os sinais diminuem o seu tempo em alto. Isto ocorre devido ao procedimento anteriormente citado, em que os discos se movimentam, e alteram a luz incidida sobre a matriz de fotodetectores. O tempo de retorno do disco para a sua posição central é quem irá determinar o torque exercido no eixo.

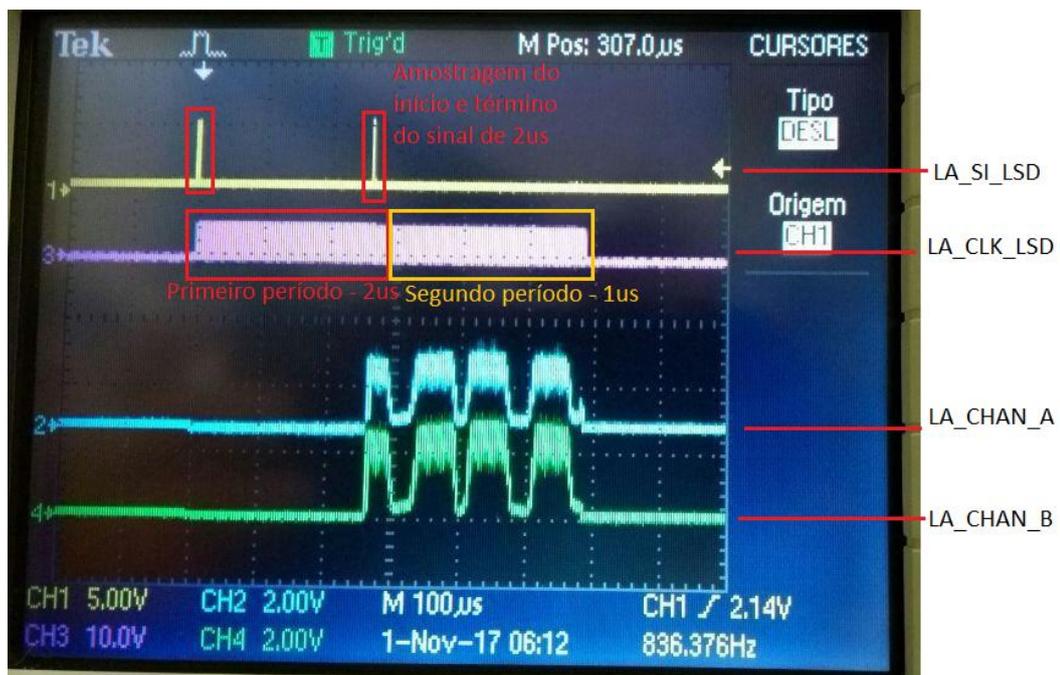
Figura 61. Bancada de testes do conjunto de direção.



Fonte: Acervo dos autores.

No conector 'A', existe uma sincronia precisa entre o acionamento de cada sinal. A resposta do sensor de torque depende do sinal proveniente do LA_CLK_LSD, como visto nas imagens a seguir.

Figura 62. Sincronismo dos sinais do conector 'A'.



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 63. Sincronismo dos sinais do conector 'A' em escala de tempo maior.



Fonte: Acervo dos autores.

Nota-se que o início da resposta do sensor de torque parte da amostragem da sequência lógica do pino LA_SI_LSD. O pino LED_DRV não possui nenhum sincronismo com demais entradas do conector 'A', e as respostas do sensor de torque do canal A e B são os únicos sinais que variam com a imposição de força e rotação do eixo. Sendo assim, concluindo que os pinos 4 e 6 do conector servem de sincronismo de tempo e habilitação de amostragem de sinais.

Uma outra aplicação importante deste sensor é a necessidade da calibração do sistema de direção, e a referência de posição angular transmitida para o sistema de estabilidade (ESP).

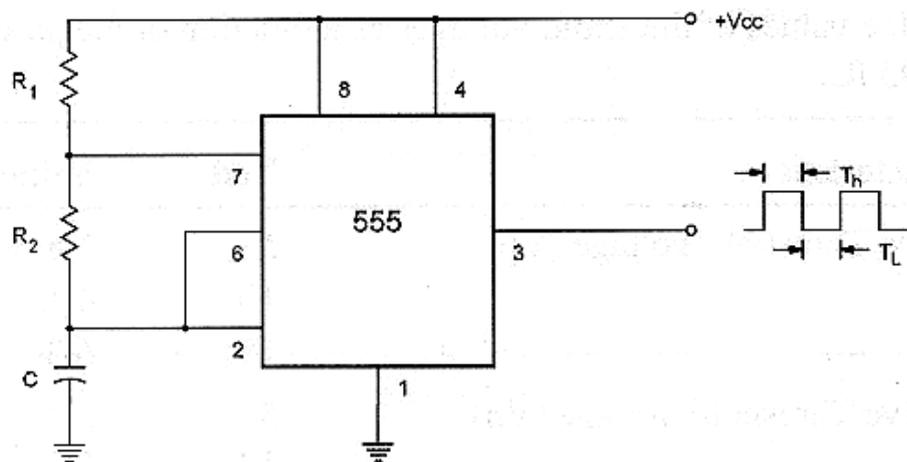
A calibração do sistema é realizada com a esterção do volante de um batente até o outro, e voltar para a posição inicial (centro). Com a contagem de pulsos desta sequência, será determinado qual é o marco zero da posição do volante.

- Simulação dos Sinais

Foi realizado um experimento para obter os sinais do sensor de torque, a partir da reprodução dos sinais proveniente dos pinos de LA_CLK_LSD, LED_DRV e pinos de alimentação. Os circuitos projetados consistiram em utilização de portas lógicas e circuitos osciladores.

Para o LA_CLK_LSD, foram desenvolvidos dois circuitos. Cada um com uma sequência de pulsos distintas, de acordo com os dois períodos encontrados no módulo original (2us e 1us). O dimensionamento dos resistores e capacitores foram realizados para o funcionamento do circuito integrado 555 em modo astável, ou seja, um oscilador com o controle do tempo em alto e em baixo.

Figura 64. Oscilador 555 em modo astável.



Fonte: Astável 555 - Cálculo M012 (BRAGA, Newton).

As fórmulas necessárias para a modulação dos tempos T_h e T_L são:

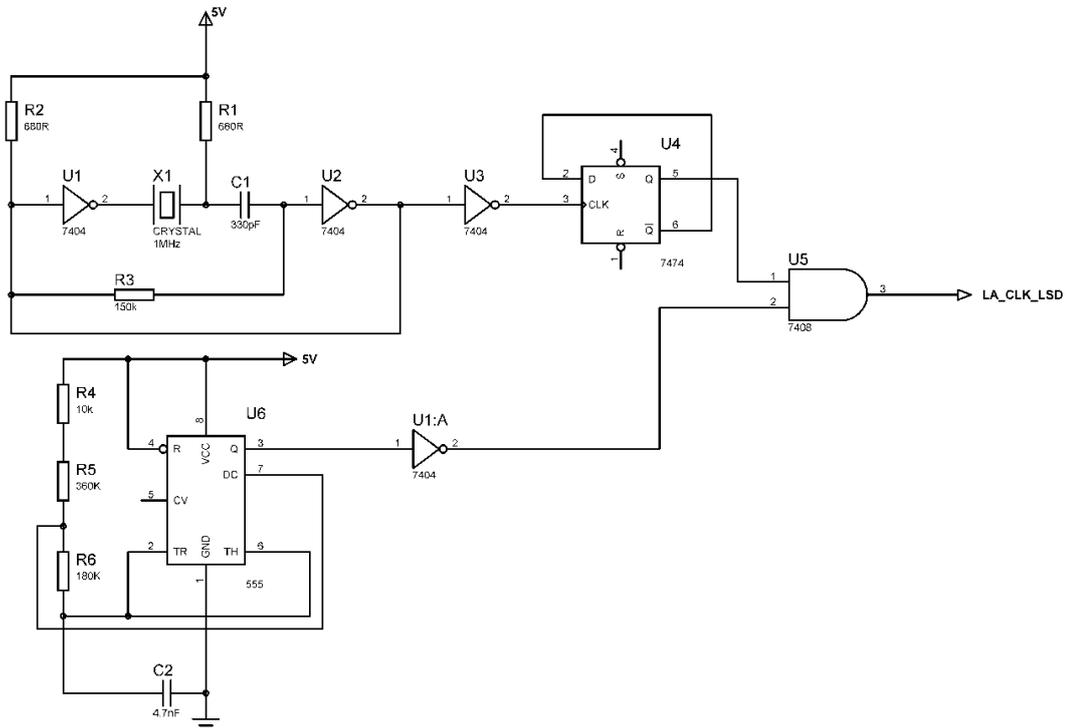
$$T_h = 0.694 \cdot C \cdot (R_1 + R_2)$$

$$T_L = 0.693 \cdot R_2 \cdot C$$

Onde:

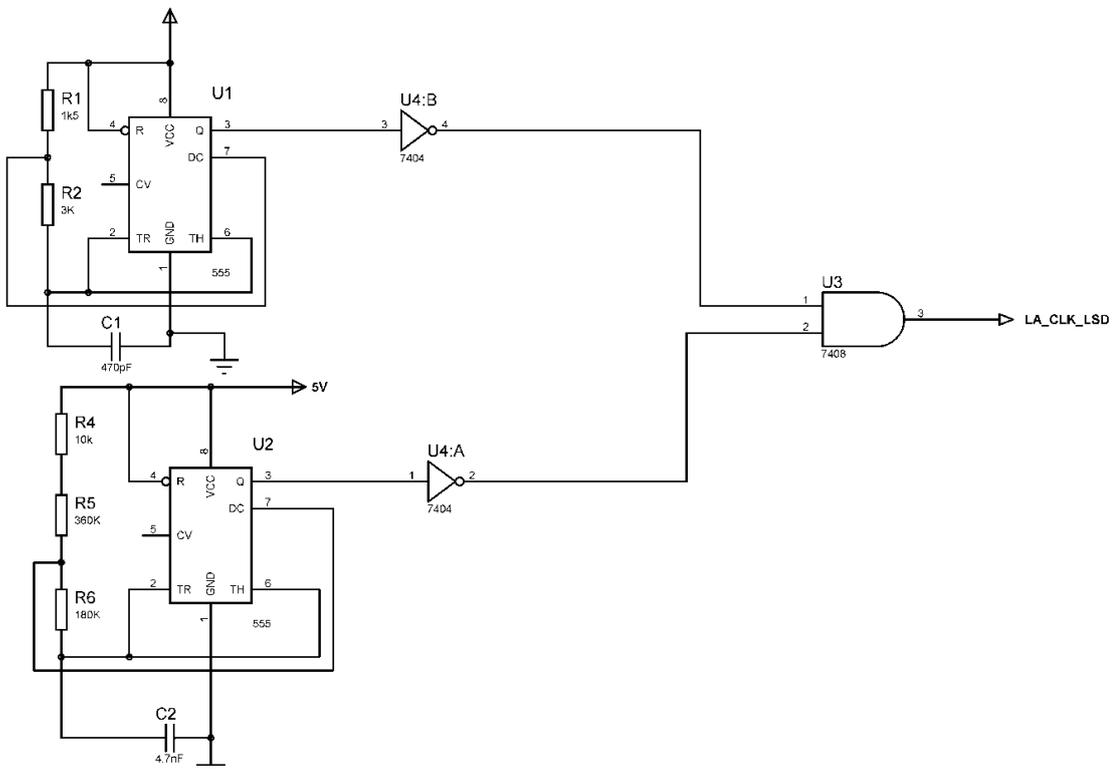
- T_h = Tempo de carga do capacitor, tempo em alta em segundos;
- T_L = Tempo de descarga do capacitor, tempo em baixa em segundos;
- R_1 e R_2 = Resistências em Ohms;
- C = Capacitância em Farads.

Figura 65. Circuito simulador do LA_CLK_LSD para pulsos de 2us.



Fonte: Acervo dos autores.

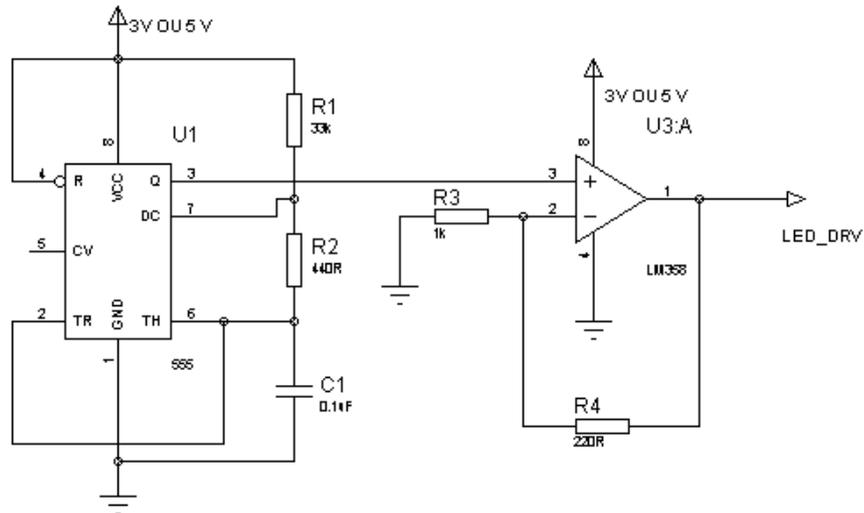
Figura 66. Circuito simulador do LA_CLK_LSD para pulsos de 1us.



Fonte: Acervo dos autores.

Para a reprodução do sinal do LED_DRV, foi adotado o seguinte circuito:

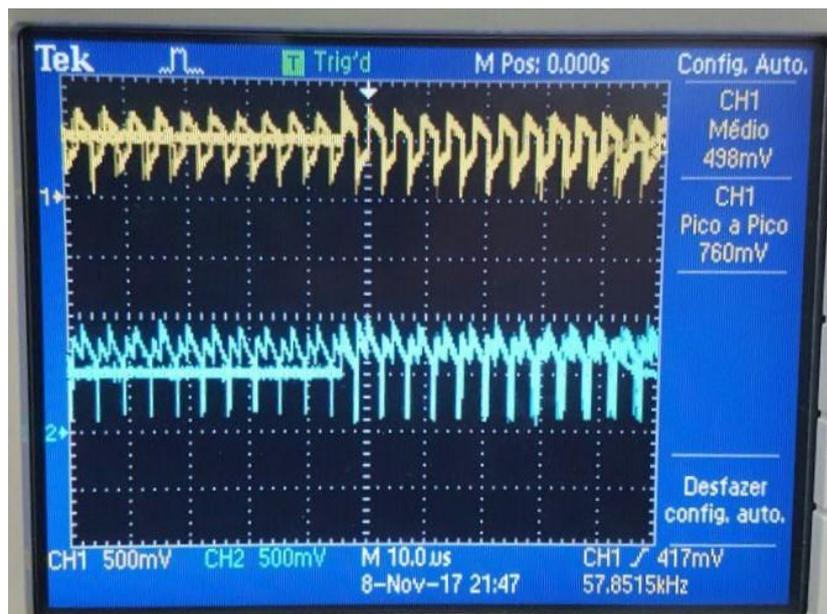
Figura 67. Circuito simulador do LED_DRV



Fonte: Acervo dos autores.

A utilização dos circuitos simuladores tinha o objetivo de impor uma referência de tempo para o sistema do sensor de torque. Foi obtido uma resposta nos pinos de LA_CHAN_A e LA_CHAN_B, porém, não obteve variação com a rotação e imposição de força sobre o eixo.

Figura 68. Resultado da aplicação dos circuitos simuladores do Conector A.

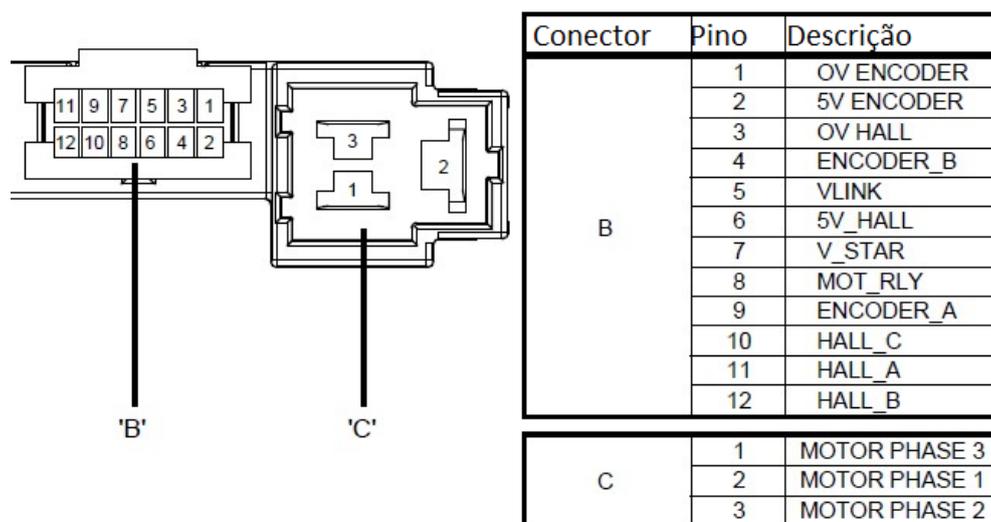


Fonte: Acervo dos autores.

4.4 – Funcionamento do Motor BLDC

O motor BLDC possui a função de movimentar os eixos ligados nas rodas, sendo o atuador do sistema de direção elétrica. No módulo em que foi realizado os testes, os conectores B e C são os responsáveis pela alimentação do motor, e por trocar informações do conjunto com o módulo, como visto na figura a seguir.

Figura 69. Configuração de pinos do módulo de controle para o conjunto do motor.

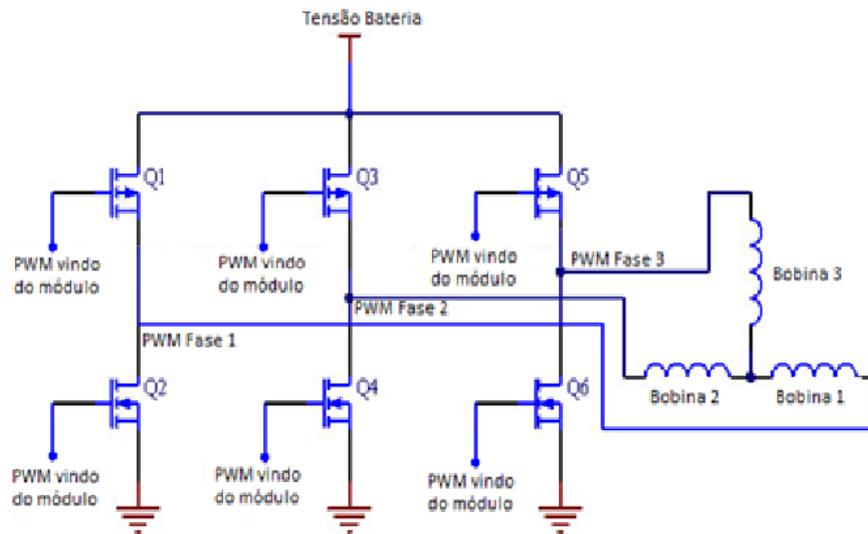


Fonte: Diagrama Esquemático Elétrico I30 (HYUNDAI, 2010 – Editado).

O Conector C é responsável por ligar as três fases do motor BLDC. Constituem em três sinais defasados 120° , em forma pulsante com alteração de largura (PWM). Os períodos destes sinais alteram por igual. Quanto maior for a carga imposta no motor, maior será a largura dos pulsos.

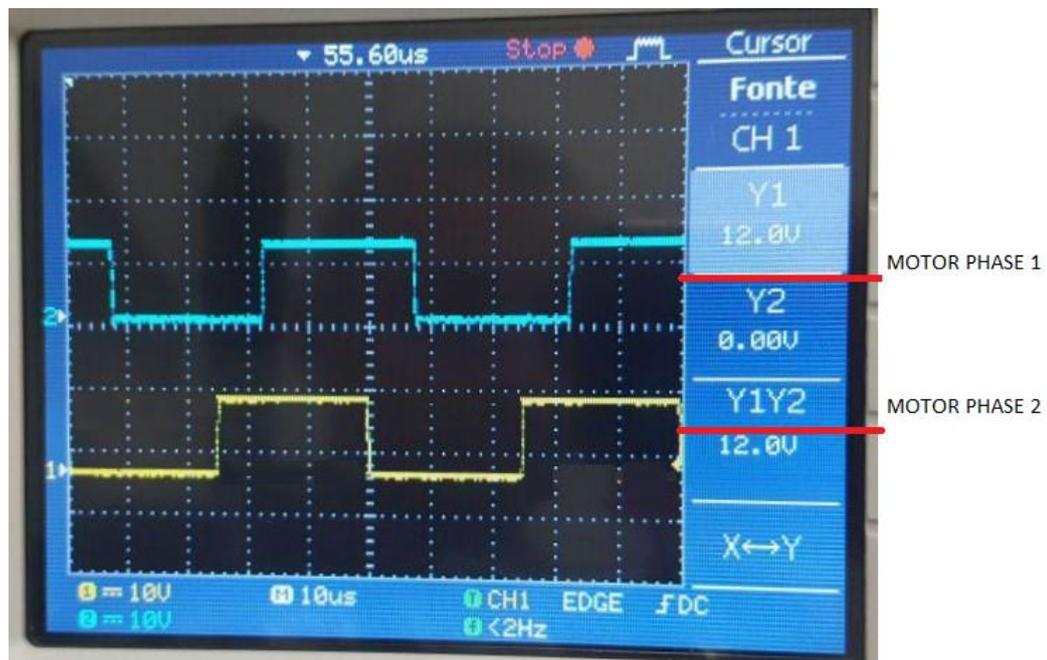
A tensão dos três sinais tem origem do +12V do conector de entrada do módulo (tensão da bateria), e eles são o resultado do chaveamento da ponte do *driver* de MOSFETs, como visto no circuito a seguir:

Figura 70. Exemplo da aplicação das fases de acionamento do motor BLDC – *driver* meia ponte.



Fonte: The Use of Brushless DC (NAING, Tin – Editado).

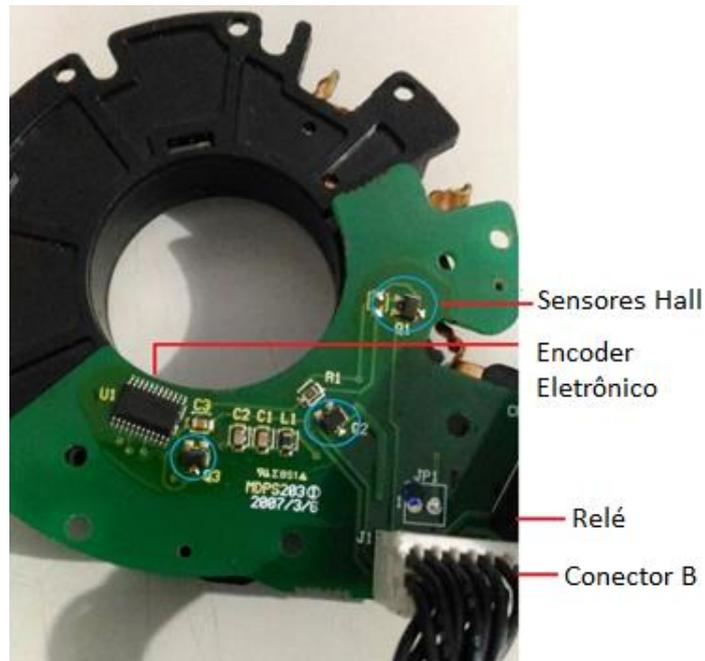
Figura 71. Sinais encontrados nos pinos 2 e 3 do Conector C.



Fonte: Acervo dos autores.

No Conector B, encontra-se os sinais de acionamento do relé de ativação do motor, tensão de alimentação e resposta dos sensores Hall e posição angular, tensão trapezoidal para o motor e tensão de linha.

Figura 72. Componentes da placa do conjunto do motor BLDC.



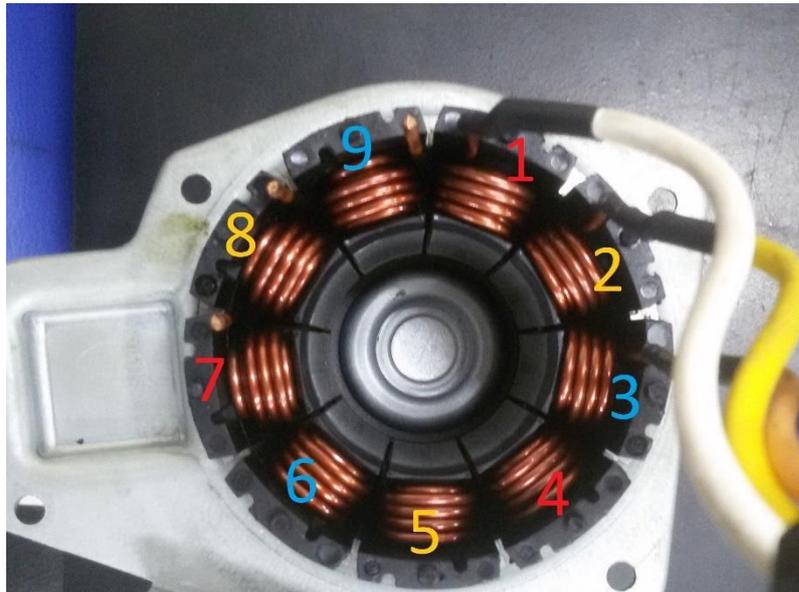
Fonte: Acervo dos autores.

Os sensores Hall são alimentados com uma tensão de 5V, e estão instalados em uma configuração geométrica de 60° entre si. O sinal de resposta de cada sensor é transmitido de volta para o módulo, informando a rotação do motor, e servirá de referência de posição angular para o circuito do encoder eletrônico. De acordo com o acionamento de cada bobina, será detectada a posição angular do rotor, através da seguinte lógica:

Tabela 3 – Sequência de detecção dos sensores Hall.

Hall 1	Hall 2	Hall 3	Bobina 1	Bobina 2	Bobina 3
0	0	1	VCC+	N/C	VCC-
0	1	1	VCC+	VCC-	N/C
0	1	0	N/C	VCC-	VCC+
1	1	0	VCC-	N/C	VCC+
1	0	0	VCC-	VCC+	N/C
1	0	1	N/C	VCC+	VCC-

Figura 73. Interligação das bobinas no motor BLDC do conjunto.



Fonte: Acervo dos autores.

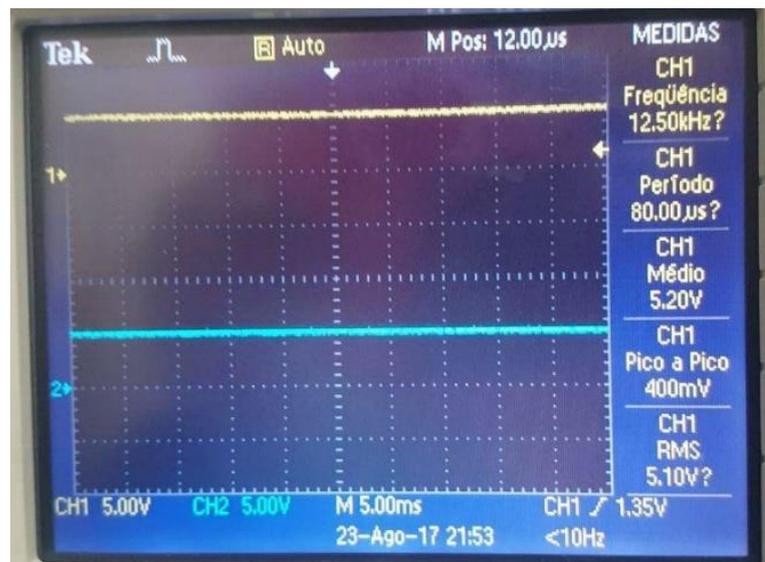
Figura 74. Sinais de resposta dos sensores Hall.



Fonte: Acervo dos autores.

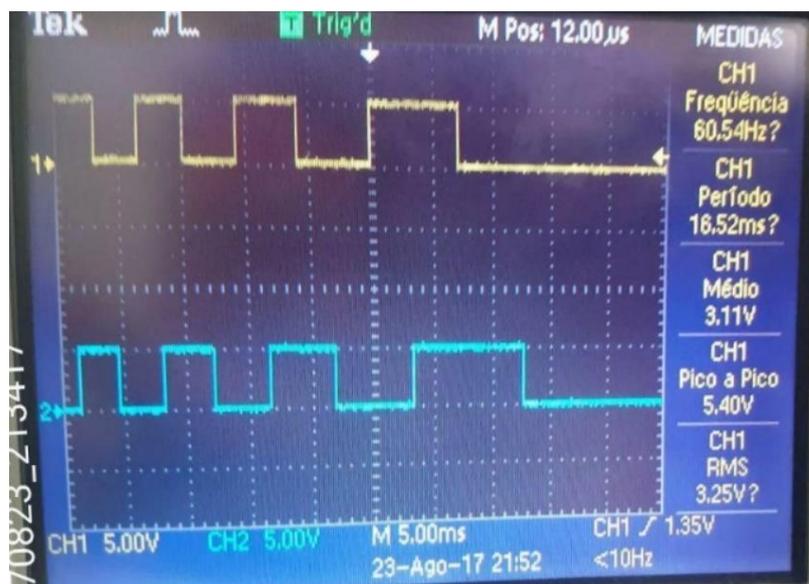
Os pinos ENCODER_A // B correspondem ao sistema do sensor de posição angular. Trata-se de um sinal pulsante, que varia o seu período entre os dois sinais de acordo com a movimentação do motor. Quanto maior for a velocidade de rotação, maior será a frequência do sinal. Quando não houver movimentação do rotor, o sinal permanece em nível lógico alto ou baixo. Possui um funcionamento similar ao sensor de rotação.

Figura 75. Sinais dos pinos sensor de posição angular com o motor parado.



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 76. Sinais dos pinos sensor de posição angular com o motor com pouca movimentação.



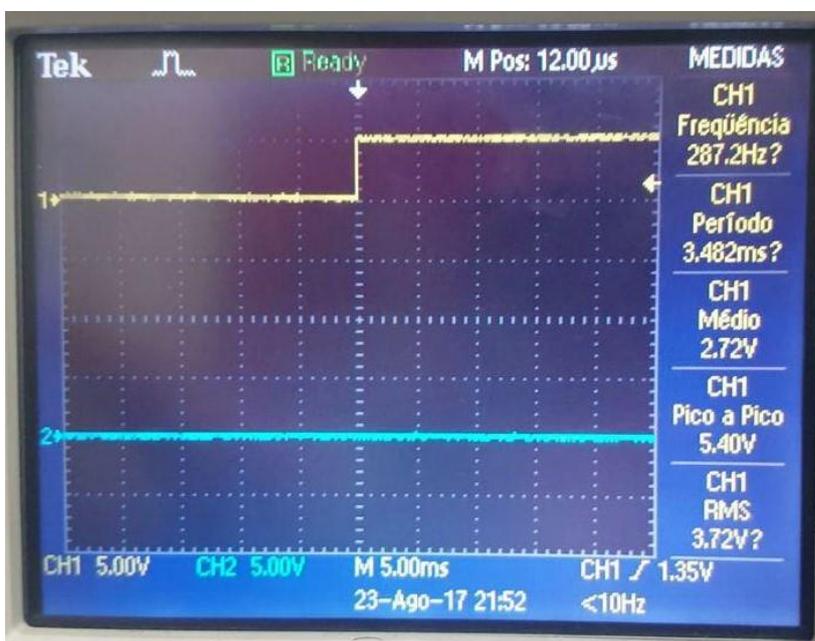
Fonte: Acervo dos autores.

Figura 77. Sinais dos pinos sensor de posição angular com o motor com maior movimentação



Fonte: Acervo dos autores.

Figura 78. Sinais dos pinos sensor de posição angular com o motor com rotação próxima a 0.

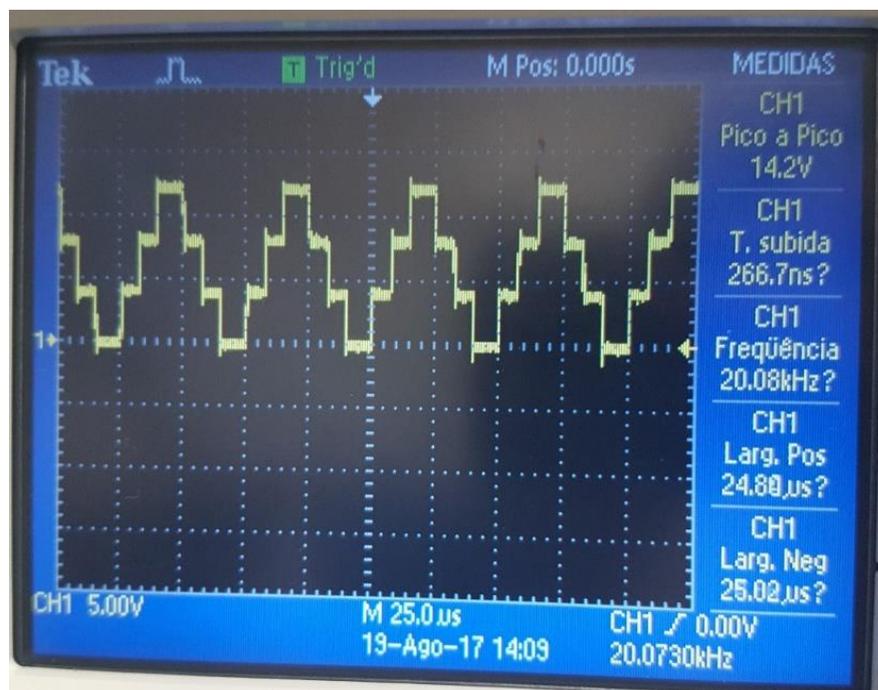


Fonte: Acervo dos autores.

Diferentemente do motor com escovas, o BLDC necessita de um método de acionamento especial, em que não possua um alto índice de ruído e perdas. O pino V_STAR, representado na figura a seguir, indica um sinal comum nos sistemas que utilizam motores sem escovas.

O pino V_STAR possui um sinal senoidal digitalizado, em que é gerado através de componentes chaveadores (transístores, MOSFETs). Este sinal será filtrado, devido à ligação na armadura do motor BLDC. A sua função é a linearização do torque de resposta. Analisando a forma de onda da corrente deste sinal, nota-se que é uma senoide.

Figura 79. Forma do sinal presente no pino V_STAR.



Fonte: Acervo dos autores.

5. PRÓXIMOS PASSOS

Através dos conhecimentos obtidos do sistema de direção elétrica da Hyundai, é possível propor alguns passos para continuar o desenvolvimento de um novo sistema.

Para obter a devida resposta do sensor de torque, deve-se aprimorar os circuitos simuladores dos sinais, aplicando um sistema de filtragem. Ou então, utilizar um microcontrolador mais robusto e com melhor processamento, e desenvolver um *software* que realize as devidas sequências de pulsos nos conectores LA_CLK_LSD e LA_SL_LSD. Por motivos de limitações técnicas do PIC 18F4550, a utilização dos circuitos simuladores está sendo a mais viável, tendo em vista em economizar as entradas e saídas do microcontrolador.

Através da resposta do sensor de torque, é possível retirar o conjunto do motor e módulo, e medir os limites de força aplicada sobre o eixo do volante, alimentando o sensor de torque com o circuito simulador de sinais externamente. Com isso, é possível traçar um gráfico com largura dos pulsos do LA_CHAN_A // B, em função da força exercida.

Com os dados do sensor de torque, poderá realizar o *software* ideal para controlar o acionamento das bobinas do motor BLDC, de acordo com o torque e sentido de rotação do volante. Deve-se levar em consideração a resposta proveniente do Conector B, que são os sinais dos sensores Hall e do sensor de posição angular.

6. CONCLUSÃO

Os sistemas de direção veicular com assistência elétrica estão se tornando cada vez mais comuns nos veículos, tendo em vista as suas vantagens; como:

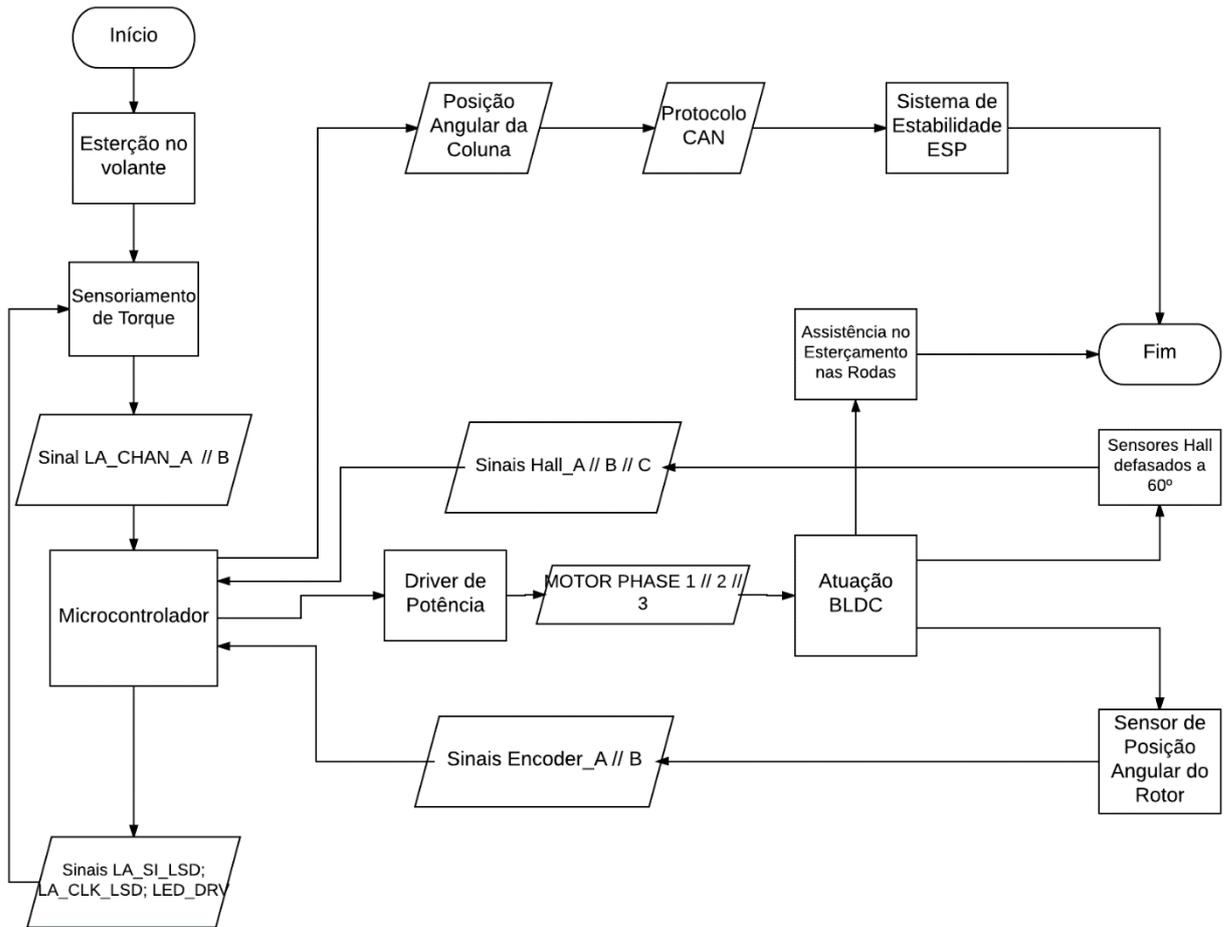
- Redução de emissões;
- Conforto;
- Controle indispensável para segurança e estabilidade do veículo;
- Aplicação futura para o controle de direção para veículos autônomos.

Com base nesses dados, teve-se a ideia de utilizar a estrutura de um sistema de direção elétrica já criado por uma montadora e desenvolver uma nova unidade de controle criada pelo do grupo do trabalho.

A ideia inicial partia do total desenvolvimento do *software*; desde a aquisição de dados do sensor de torque, até o controle no acionamento das bobinas do motor *brushless*. Também era previsto projetar toda a parte de *hardware*, como a placa lógica (adotando o conjunto do microcontrolador, circuitos simuladores e processadores de sinais) e de potência (ponte de MOSFETs, e circuito *driver*).

Embora a proposta inicial do projeto não tenha sido totalmente realizada, o seu desenvolvimento possibilitou uma análise detalhada do funcionamento de todos os sistemas envolvidos no conjunto de direção elétrica, como os sinais necessários para obter resposta do sensor torque, os sinais dos sensores Hall e sensor de posição angular para o devido chaveamento dos pulsos por PWM para acionamento do motor, alimentações necessárias e a localidade de todos os componentes envolvidos.

Figura 80. Diagrama de blocos do funcionamento do sistema de direção elétrica.



Fonte: Acervo dos autores.

Um das maiores dificuldades encontradas além da alta complexidade do desenvolvimento do projeto como um todo, foi interpretar e gerar os sinais necessários para se obter uma resposta do sensor de torque, sendo este um sinal microcontrolado, e não um sinal gerado por um oscilador ou por um circuito CPLD (*Complex Programmable Logic Device*).

Mesmo com as dificuldades encontradas e com alguns objetivos propostos no início do projeto não alcançados, podemos concluir este trabalho como fundamental para se ter uma base técnica de conhecimentos sobre sistemas de direção elétrica.

Novos projetos que visam o desenvolvimento destes sistemas poderão utilizar esta monografia como referência, tendo em vista a atual escassez de materiais que utilizam o conceito de um sensor de torque realizar o acionamento controlado de um motor elétrico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INSTITUTO NEWTON BRAGA – *A Evolução da Direção*. Disponível em <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/artigos/51-automotivos/108-a-evolucao-da-direcao.pdf>. Acesso em 12/04/2017.

FERNANDES, Mailson Oliveira - *ANÁLISE DE CONFIGURAÇÕES E APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE DIREÇÃO VEICULAR*. Disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAftaQAF/analise-configuracoes-aplicacoes-sistemas-direcao-veicular>. Acesso em 16/04/2017.

QUATRO RODAS – *As vantagens e (poucas) desvantagens da direção elétrica*. Disponível em <http://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/as-vantagens-e-poucas-desvantagens-da-direcao-eletrica/>. Acesso em 16/04/2017.

CHAINSAW JOURNAL – *What is a Brushless Motor and how does it work?* Disponível em <http://www.chainsawjournal.com/what-is-a-brushless-motor-and-how-does-it-work/>. Acesso em 22/04/2017.

AUTOMOTSYS – *Using shaft encoders in motion control*. Disponível em <http://www.automotsys.com.au/encodersmc.html>. Acesso em 22/04/2017.

ENCODER PRODUCTS COMPANY – *What is an encoder?* Disponível em <http://encoder.com/blog/company-news/what-is-an-encoder/>. Acesso em 25/04/2017.

NOVAK, Gabriel. – *Introdução ao Magnetismo*. Disponível em <http://www.cbpf.br/~labmag/miguel.pdf>. Acesso em 30/04/2017.

NUSSENZVEIG, Moisés – *Curso de Física Básica 3* – Editora Blucher.

SALMERON, Roberto. *Auto indução ou self-indução*. Disponível em http://efisica.if.usp.br/electricidade/basico/inducaao/auto_inducaao/. Acesso em 30/04/2017.

MELO, Priscila – *Campo Magnético*. Disponível em <http://www.estudopratice.com.br/campo-magnetico/>. Acesso em 30/04/2017.

GROMIKO, Fernando – *Características dos Materiais Magnéticos – Ferromagnéticos, Diamagnéticos e Paramagnéticos*. Disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgs0oAC/caracteristicas-materiais-magneticos-ferromagneticos-diamagneticos-paramagneticos#>. Acesso em 02/05/2017.

SILVA, João Carlos – *Encoder Absoluto e Incremental*. Disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAesEcAJ/encoder-absoluto-incremental>. Acesso em 07/05/2017.

CRAIG, K. – *Actuators & Sensors in Mechatronics*. Disponível em http://engineering.nyu.edu/mechatronics/Control_Lab/Craig/Craig_RPI/SenActinMech/S&A_Optical_Encoders.pdf. Acesso em 07/05/2017.

INSTITUTO NEWTON BRAGA – *Como funcionam os sensores de efeito Hall*. Disponível em <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6640-como-funcionam-os-sensores-de-efeito-hall-art1050>. Acesso em 09/05/2017.

ELECTRICAL TECHNOLOGY – *Brushless DC Motor: Construction, Working Principle & Applications*. Disponível em <http://www.electricaltechnology.org/2016/05/bldc-brushless-dc-motor-construction-working-principle.html>. Acesso em 09/05/2017.

GONÇALVES, Fabrício de Almeida; SAMBIASE, Rafael Iuliano – *O sistema de direção elétrica como medida de melhoria de eficiência para o veículo*. Centro Universitário FEI, 2017.

BARBOSA, Douglas Pereira – *Simulação de direção elétrica com motor síncrono de ímãs permanentes*. Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce.../Barbosa_Douglas_Pereira.pdf.

LENZ, André Luiz – *Como se constituem e operam os motores BLDC (CC sem Escovas)*. Disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgxbgAD/como-se-constituem-operam-os-motores-bldc-motores-cc-sem-escovas>.

TRINDADE, Rafael Henrique – *Estudo de máquinas elétricas não-convencionais: Motor Brushless DC*. Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-23042010-091439/?&lang=br>

DEVENDRAN, Seetharaman - *Acoustic Noise in Home Appliances Due to Torque Ripple in Motor Drives*. Texas Instruments, 2016. Disponível em https://e2e.ti.com/blogs_/b/motordrivecontrol/archive/2016/02/18/acoustic-noise-in-home-appliances-due-to-torque-ripple-in-motor-drives-part-1

MANAVELLA, Humberto José – *Estabilidade Veicular – Direção Dinâmica*. HM Autotrônica. Disponível em <http://www.hmautotron.eng.br/zip/hm006-c18-DirDinam.pdf>. Acesso em 20/11/2017.

HORTON ET AL. – *Optical Displacement Sensor and Torque Sensor Employing Relatively Movable Slit Patterns*. HORTON, Steven John; TRACE, Adrian Leslie; REES, David. Patente no. US RE37,969 E. 28/01/2003. Disponível em <http://www.google.ch/patents/USRE37969>. Acesso em 22/11/2017.

MERELLO, Andrea – *Bootstrap Network Analysis: Focusing on Integrated Bootstrap Functionality*. International Rectifier. Disponível em <https://www.infineon.com/dgdl/an-1123.pdf?fileId=5546d462533600a40153559692661096>. Acesso em 18/11/2017.

NAING, Tin Tin – *The Use of Brushless DC*. Disponível em <http://www.uaelec.com/English%20express%20release/BLDC.htm>. Acesso em 10/12/2017.