

**DOUGLAS PEREIRA BARBOSA**

**SIMULAÇÃO DE DIREÇÃO  
ELÉTRICA COM MOTOR SÍNCRONO  
DE ÍMÃS PERMANENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos,  
da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase  
em Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Carlos Canale

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B238s

Barbosa, Douglas Pereira  
Simulação de direção elétrica com motor síncrono de imãs permanentes / Douglas Pereira Barbosa ; orientador Antonio Carlos Canale. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Direção elétrica. 2. Sistema de direção. 3. Direção assistida. 4. Motor síncrono de imãs permanentes.  
5. Simulação. 6. Simulink. I. Título.

## **Agradecimentos**

Por conseguir realizar este trabalho agradeço primeiramente a Deus, a meus pais pela paciência e esforços para me manter estudando, a todos meus amigos de turma pela amizade sincera, a minha namorada também pela paciência, ao meu orientador, a meus professores, e a todos os funcionários da EESC que com certeza me ajudaram a chegar aqui.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>9</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>10</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Objetivo .....</b>	<b>13</b>
<b>3. Composição do sistema.....</b>	<b>14</b>
<b>4. Fundamentos Teóricos .....</b>	<b>15</b>
4.1. O sistema de direção .....	15
4.2. O sistema de direção elétrica .....	16
4.3. O motor elétrico .....	18
4.4. Controle do motor .....	22
4.4.1. PID .....	22
4.4.2. PWM .....	23
4.4.3. Ponte de transistores.....	24
<b>5. Materiais e Métodos.....</b>	<b>26</b>
5.1. Modelo completo .....	26
5.2. Modelo mecânico.....	29
5.3. Modelo do motor.....	29
5.4. Modelo do controle .....	33
5.4.1. Modelo do PID.....	33
5.4.2. Modelo do PWM.....	33
5.4.3. Modelo da ponte de transistores.....	35
<b>6. Resultados .....</b>	<b>36</b>
6.1. Sem assistência .....	37
6.2. Ajustando o bloco PID .....	37
6.3. Ajustando o bloco PWM.....	40
6.4. Sinais de controle .....	40
6.5. Outros testes .....	43
<b>7. Conclusão .....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>48</b>
<b>GLOSSÁRIO .....</b>	<b>49</b>

## **Lista de figuras**

Figura 1 – Diagrama de Blocos dos Sistemas Envolvidos .....	14
Figura 2 – Diagrama de Blocos das Partes Envolvidas.....	14
Figura 3 – Sistema Direcional .....	15
Figura 4 – Geometria de Ackerman .....	16
Figura 5 – Sistema de Direção Elétrica .....	17
Figura 6 – Princípio do Movimento do Rotor .....	18
Figura 7 – Esquema do Motor de Dois Pólos .....	19
Figura 8 – Fluxo Concatenado da Bobina a-a' .....	19
Figura 9 – Força Contra-Eletromotriz .....	20
Figura 10 – Corrente Elétrica Aplicada no Enrolamento .....	20
Figura 11 – Torque Produzido pelo Enrolamento .....	21
Figura 12 – Ligação dos Enrolamentos e Disposição dos Sensores <i>Hall</i> .....	21
Figura 13 – Sentido da Corrente Elétrica nos Enrolamentos .....	22
Figura 14 – Disposição Interna do Controlador PID .....	23
Figura 15 – Sinais PWM.....	24
Figura 16 – Ponte de Transistores .....	25
Figura 17 – Modelo Completo .....	26
Figura 18 – Bloco <i>Motor</i> .....	27
Figura 19 – Controle do Sentido do Torque de Assistência .....	28
Figura 20 – Modelo Mecânico .....	29
Figura 21 – Modelo do Motor .....	30
Figura 22 – Sinais dos Sensores <i>Hall</i> .....	30
Figura 23 – Tabela 2 Implementada no <i>Simulink</i> .....	31
Figura 24 – Tabela 3 Implementada no <i>Simulink</i> .....	32
Figura 25 – Lógica do Controle .....	33
Figura 26 – Modelo do Controlador PID .....	33
Figura 27 – Modelo do Sistema PWM.....	34
Figura 28 – Funcionamento interno do Bloco <i>PWM Generator</i> .....	34
Figura 29 – Sinal de Entrada.....	36
Figura 30 – Resposta sem Assistência .....	37
Figura 31 – Resposta com Ganho Proporcional em 15.....	38
Figura 32 - Resposta com Ganho Proporcional em 40 .....	39

Figura 33 – Estabilização do Torque de Assistência.....	39
Figura 34 – Respostas em Função da Frequência do PWM.....	40
Figura 35 – Sinais de Controle.....	41
Figura 36 – Resposta com Torque de Assistência a Favor do Movimento .....	42
Figura 37 – Resposta com Torque de Assistência Contra do Movimento.....	43
Figura 38 – Curva do Sinal de Referência 1.....	44
Figura 39 – Resposta com Pouca Assistência em Ângulos Pequenos .....	44
Figura 40 – Curva do Sinal de Referência 2.....	45
Figura 41 – Resposta com Bastante Assistência em Ângulos Pequenos .....	45
Figura 42 – Resposta com Maior Torque Exercido pela Roda.....	46

## **Lista de tabelas**

Tabela 1 - Tipos de Sistemas Elétricos.....	18
Tabela 2 – Estado da Força Eletromotriz em Cada Enrolamento.....	31
Tabela 3 – Sinais de Acionamento dos Transistores.....	32

## **Lista de abreviaturas e siglas**

MCU	Microcontroller Unit
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PID	Proporcional, Integrativo, Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation

## **Resumo**

O sistema de direção elétrica vem sendo cada vez mais utilizado pela indústria automobilística devido à possibilidade de ter total controle na assistência ao motorista com um uso menor de energia. Neste trabalho será apresentada uma simulação de um sistema de direção elétrica no qual se faz o uso de um sistema mecânico usual e um motor síncrono de ímãs permanentes alimentado por uma ponte de transistores. O controle será feito através de sensores, um bloco PID e um bloco PWM, que controlarão o torque de saída do motor. O eixo do motor está ligado a um redutor mecânico que por sua vez está ligado ao sistema de direção do veículo, proporcionando assim uma assistência ao motorista que é sentida no volante do veículo como uma facilidade maior em esterçar as rodas.

**Palavras-chave:** direção elétrica, sistema de direção, direção assistida, motor síncrono de ímãs permanentes, simulação, simulink.

## **Abstract**

The electric steering system is being increasingly used by the automotive industry because of the possibility of having full control in assisting the driver with a lower use of energy. This work presents a simulation of an electric power steering system in which it makes use of an ordinary mechanical system and a permanent magnet synchronous motor fed by a bridge of transistors. The control is done through sensors, a PID block and a PWM block, which control the engine torque output. The motor shaft is connected to a mechanical gearbox which is connected to the vehicle's steering system, providing assistance to the driver that is felt at the control wheel as an easier way to steer the wheels.

**Keywords:** electric power steering, steering system, assisted steering, permanent magnet synchronous motor, simulation, simulink.

## **1. Introdução**

Os primeiros sistemas de direção elétrica apareceram em 1990 com o Honda Acura NSX e hoje vem tomando cada vez mais espaço na indústria automobilística.

A crescente aceitação deste sistema se deve ao fato de que podemos controlar a assistência dada ao motorista em várias situações diferentes, como o carro rodando em alta velocidade, rodando em baixa velocidade, em manobras como as balizas entre outras, além de prover uma redução no consumo de combustível, pois o motor elétrico será acionado somente quando for preciso, diferente dos outros sistemas, hidráulicos, por exemplo, que estão sempre *roubando* energia do motor à combustão [1].

Devido às inúmeras facilidades introduzidas pelas ferramentas computacionais, como exemplo, economia nos recursos na fase de testes, a alta precisão dos resultados, possibilidade de fazer mudanças e testá-las rapidamente, foi decidido pelo uso da plataforma *Matlab/Simulink* como ferramenta de simulação.

A simulação é feita tomando por base um sistema mecânico de direção assistida que aplica um torque nas rodas do veículo e muda o ângulo delas em relação à carroceria. A força total para efetuar este movimento será sempre a soma da força feita pelo motorista no volante com a força feita pelo motor elétrico.

## **2. Objetivo**

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo do comportamento de um sistema de direção elétrica através da plataforma *Matlab/Simulink* para que desta forma se possa observar previamente qual será o resultado da implementação do sistema e assim poder regular os parâmetros necessários além da possibilidade de fazer testes para melhoria do sistema.

### 3. Composição do sistema

Os sistemas que compõem a simulação feita neste trabalho são interligados da forma mostrada no diagrama de blocos da figura 1.

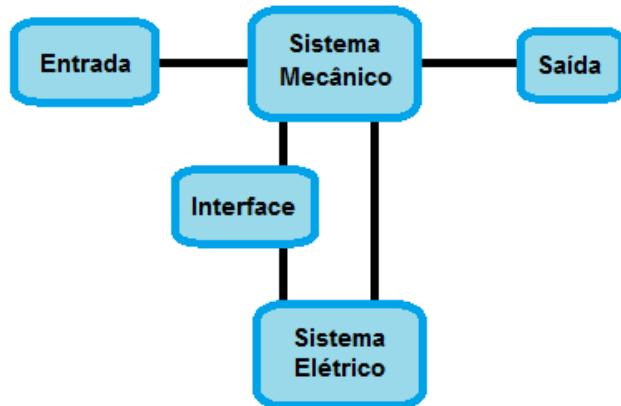


Figura 1 – Diagrama de Blocos dos Sistemas Envolvidos

Cada um destes sistemas possui vários elementos que têm suas funções descritas nos itens a seguir e juntos executam o que foi proposto. O bloco Interface faz a interconexão sensorial do sistema. No diagrama da figura 2, pode-se ver melhor estes elementos.

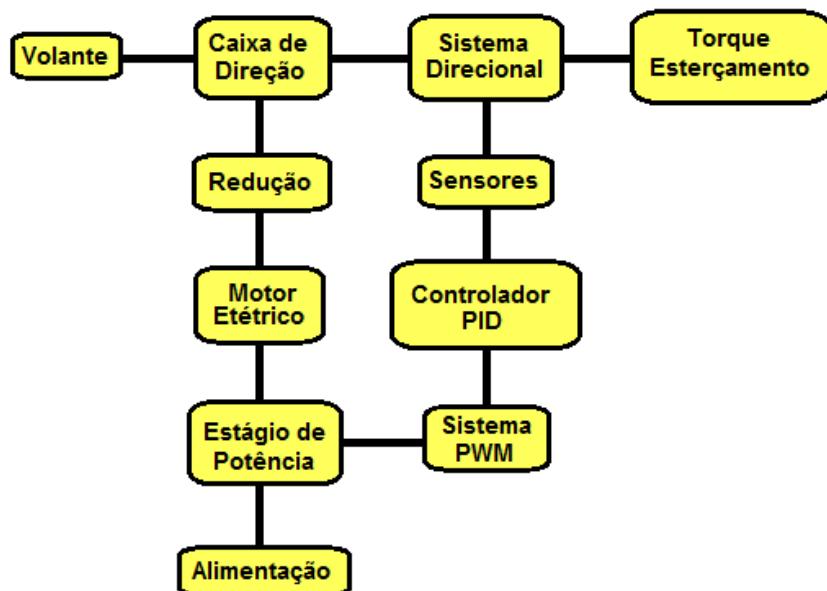


Figura 2 – Diagrama de Blocos das Partes Envolvidas

## 4. Fundamentos Teóricos

### 4.1. O sistema de direção

O sistema de direção de um veículo envolve todas as partes que fazem este mudar sua trajetória de acordo com a vontade do motorista. Ao virar o volante do carro as rodas viram também para o mesmo lado respeitando uma relação diferente para cada tipo de sistema, chamado relação de direção.

Esta relação pode ser alta ou baixa. Uma relação alta significa que o volante tem de ser girado um ângulo maior para que as rodas estremem certo número de graus. O dispositivo que produz esta relação possui em seu interior engrenagens que transferem o movimento do volante para o sistema direcional. Este é chamado caixa de direção, mostrada na figura 3.

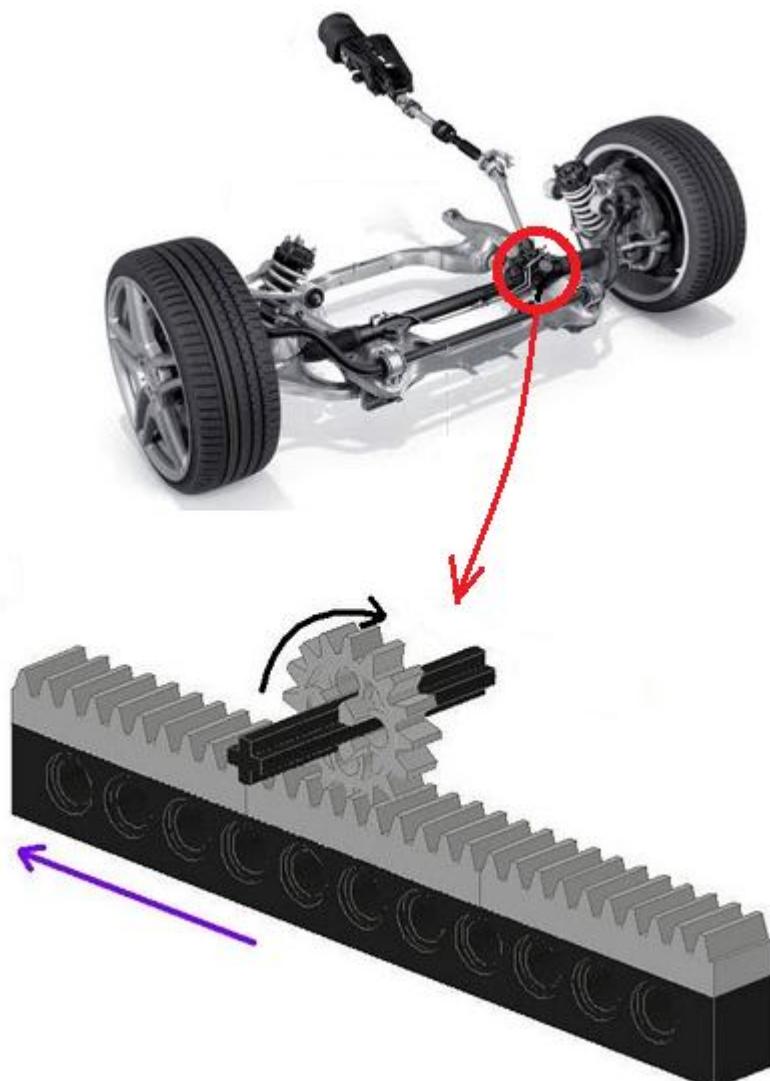
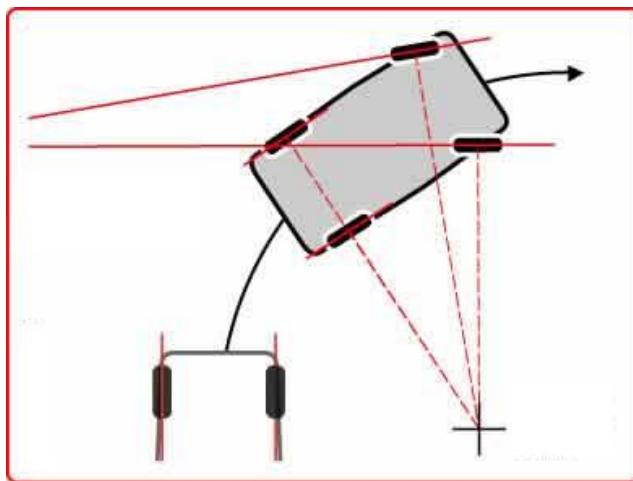


Figura 3 – Sistema Direcional

Para uma curva ser suave, cada roda deve desenhar um círculo diferente. Como em uma curva a roda interna segue um círculo com raio menor, ela faz uma curva mais fechada do que a roda externa. Traçadas linhas perpendiculares a cada roda, elas irão se interceptar no ponto central da curva. Esta trajetória diferente para cada roda é conseguida através da geometria dos elementos do sistema direcional do veículo.

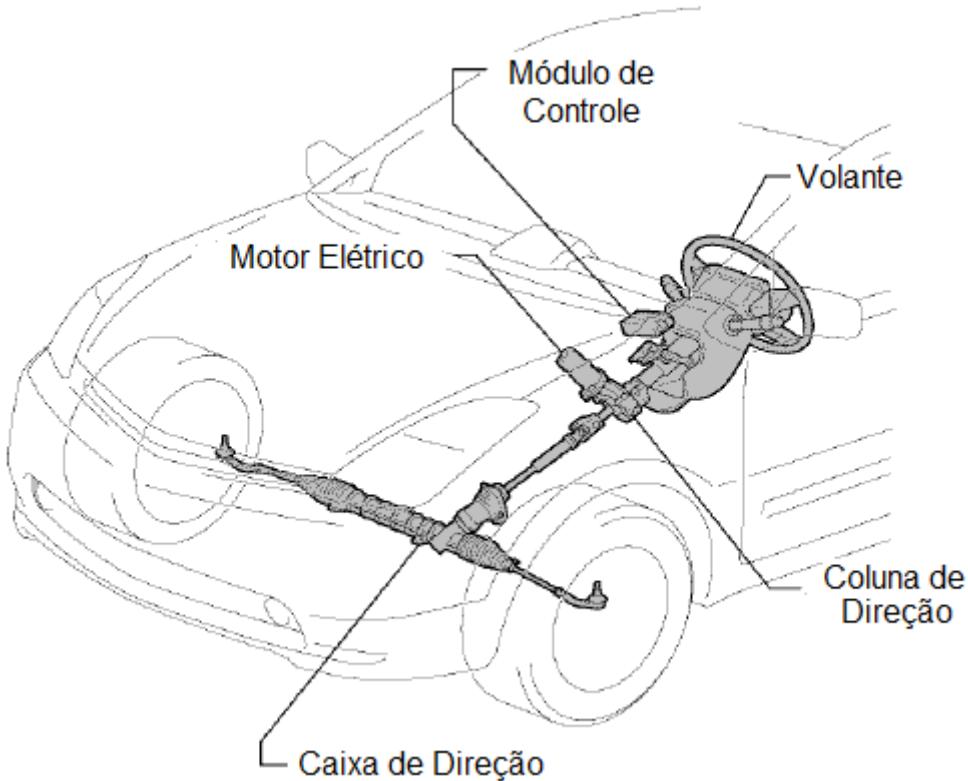


**Figura 4 – Geometria de Ackerman**

A figura 4 mostra um esboço do falado acima. Esta relação é conhecida como geometria de Ackerman. Com esta geometria os torques do sistema de direção tendem a crescer uniformemente com o ângulo de esterçamento, fornecendo desta forma, uma resposta adequada ao motorista. Se considerarmos as rodas descrevendo trajetórias paralelas, esse torque inicialmente cresce com o ângulo, mas em determinado momento ele diminui, podendo alcançar valores negativos, o que representaria um esterçamento mais brusco no meio do movimento. Isso gera uma sensação inadequada para quem dirige o veículo [2].

#### **4.2. O sistema de direção elétrica**

O sistema de direção elétrica é montado de tal forma que o torque que o motorista aplica no volante é somado com o torque de assistência do motor elétrico. Este sistema é como se fosse uma direção manual com um motor elétrico acoplado à coluna de direção através de uma redução. A figura 5 mostra esta montagem.



**Figura 5 – Sistema de Direção Elétrica**

Quando o motorista gira o volante, um sensor detecta a posição e o sentido do movimento. Esta informação somada ao sinal de um sensor de torque montado na coluna de direção alimentam o módulo de controle. Outros sinais podem ser também monitorados, como a velocidade do veículo e informações do controle de estabilidade.

Geralmente o módulo de controle trabalha em quatro modos:

- Modo normal: a assistência é fornecida de acordo com a velocidade do veículo;
- Modo de Retorno: utilizado para que o volante retorne à posição central sem o oscilar em torno dela;
- Modo de controle de amortecimento: usado para melhorar a sensibilidade do motorista. Este modo entra em ação em altas velocidades;
- Modo de proteção: protege o sistema elétrico contra aquecimento e correntes excessivas. [3]

Este trabalho será focado em projetar um sistema que forneça o torque de assistência desejado de acordo com um sinal de referência estabelecido.

### 4.3. O motor elétrico

O sistema elétrico pode ser projetado de várias formas com diversos tipos de motores. A tabela 1 mostra alguns tipos de motores e as características dos sistemas utilizados.

TIPO DE MOTOR	EFICIÊNCIA	CUSTO	MCU	ESTÁGIO DE POTÊNCIA
IP com escova	85%	Mais Baixo	8 Bits	1 Transistor + Díodo
3Φ IP sem escova	95%	Mais Alto	8 Bits	6 Transistores
3Φ Indução	90%	Médio	16 Bits	6 Transistores
3Φ Relutância Variável	90%	Alto	16 Bits	6 Transistores + Diodos

Tabela 4 - Tipos de Sistemas Elétricos [4]

Neste trabalho será usado um motor síncrono de ímãs permanentes. Este tipo de motor é trifásico e não possui escovas.

No motor síncrono de ímãs permanentes, o ímã fica no rotor e o estator é bobinado. Na figura 6 podemos observar que o fluxo magnético girante produzido pelos enrolamentos do estator está sempre à frente do fluxo magnético gerado pelo ímã, sendo assim o primeiro *arrasta* o segundo e desencadeia o movimento do rotor [5].

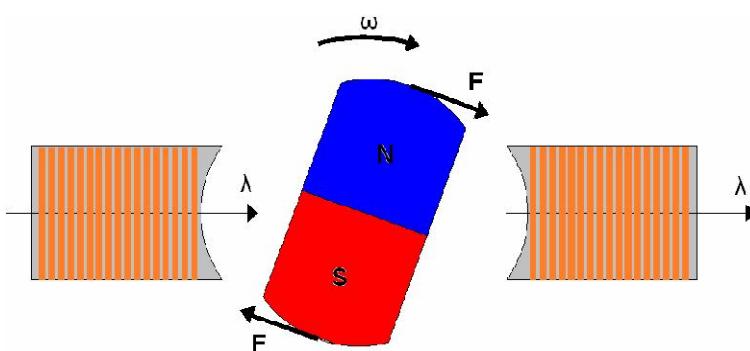
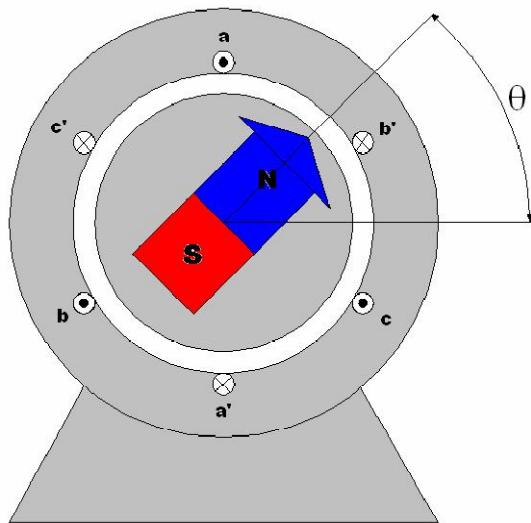


Figura 6 – Princípio do Movimento do Rotor

Quando o fluxo do rotor está alinhado com o fluxo da bobina, um circuito eletrônico inverte a direção da corrente elétrica, fazendo com que o rotor gire em torno de si.

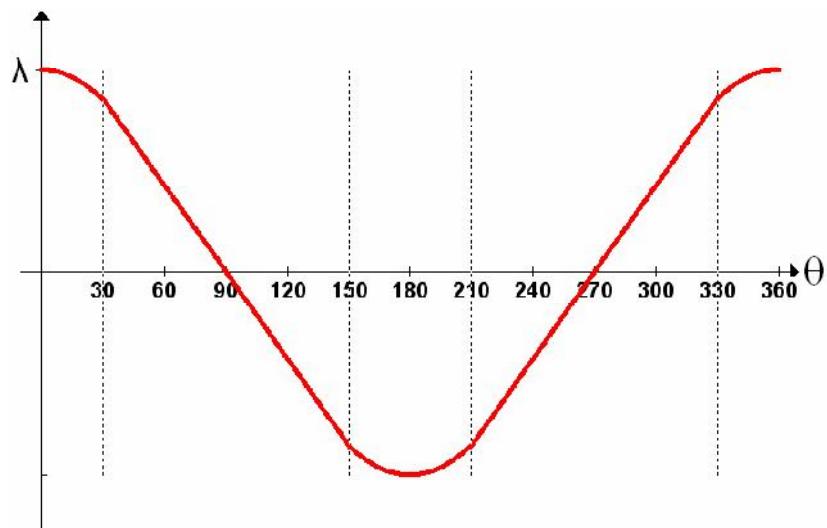
A figura 7 apresenta o esquema de um motor de dois pólos.



**Figura 7 – Esquema do Motor de Dois Pólos**

No caso do ângulo  $\theta$  ser zero, o fluxo concatenado com a bobina a-a' é máximo e conforme o ângulo cresce este fluxo diminui até tornar-se zero em  $90^\circ$ , onde ele se inverte.

A figura 8 mostra o gráfico do fluxo concatenado na bobina a-a' em função do ângulo  $\theta$ .



**Figura 8 – Fluxo Concatenado da Bobina a-a'**

A Lei de Faraday diz que a taxa de variação do fluxo concatenado é proporcional à tensão gerada nos terminais da bobina.

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{d\lambda}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\omega_m \cdot \frac{d\lambda}{d\theta}$$

$\omega_m$  é a velocidade angular, e sendo assim a derivada angular do fluxo concatenado corresponde à força contra-eletromotriz mostrada na figura 9.

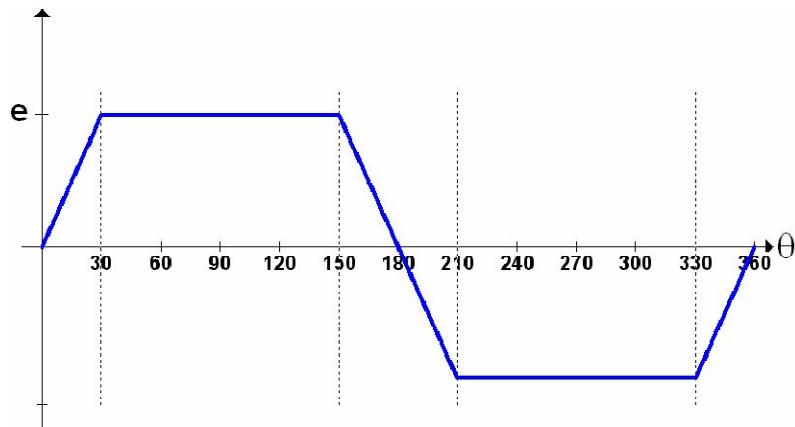


Figura 9 – Força Contra-Eletromotriz

Para que o motor funcione de forma correta, um circuito eletrônico deve fornecer uma corrente com polaridade invertida da força contra-eletromotriz ou a favor da força eletromotriz nos mesmos instantes como mostrado na figura 10.

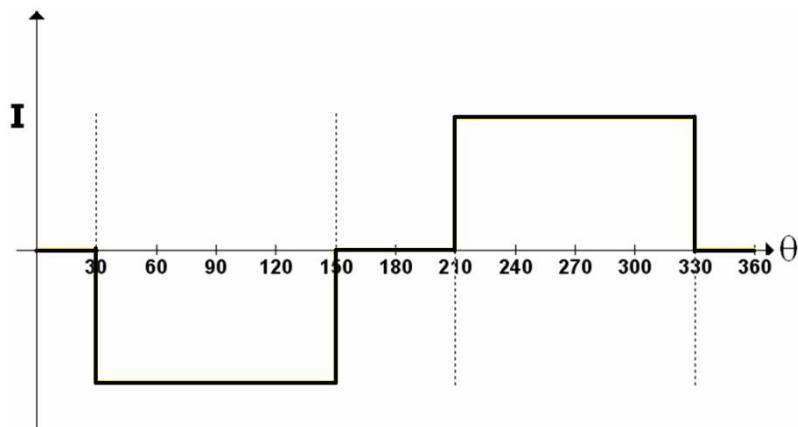


Figura 10 – Corrente Elétrica Aplicada no Enrolamento

Se a velocidade angular for constante, o conjugado será unidirecional da forma da figura 11.

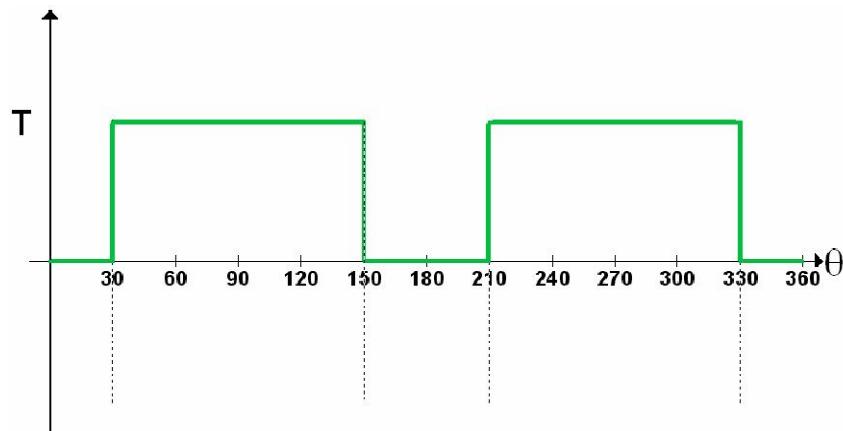


Figura 11 – Torque Produzido pelo Enrolamento

Com o motor projetado de forma a ter três bobinas defasadas de  $120^\circ$ , o conjugado final será constante e igual a  $2T$ .

Esse tipo de motor possui sensores de posição do rotor que podem ser de vários tipos, o mais comum é do tipo *Hall*<sup>1</sup>. Na figura 12, pode-se ver o circuito de controle que fornecerá a corrente das bobinas no momento e polaridade certo, fazendo o motor girar para o lado desejado. Este circuito de controle é baseado na configuração geométrica dos sensores e das bobinas.

As bobinas são ligadas na forma *estrela*<sup>2</sup> e a corrente sempre entra por uma e sai por outra, sendo assim uma das bobinas sempre estará desligada.

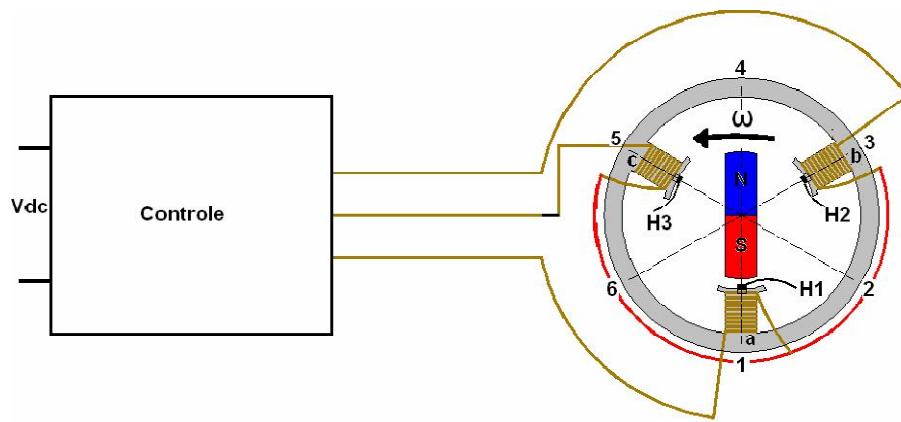
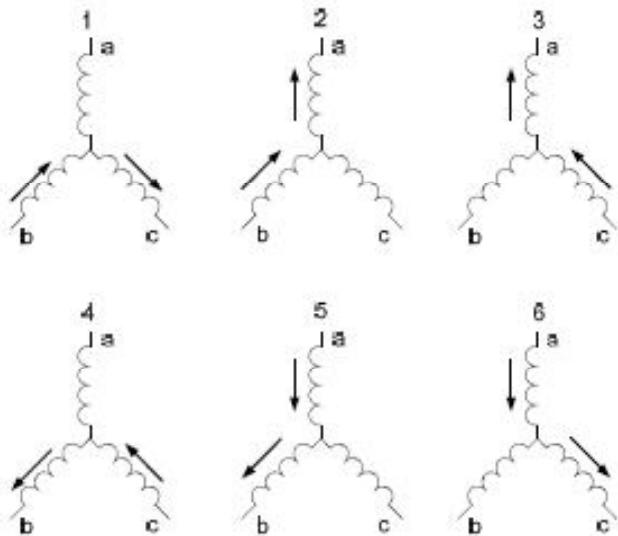


Figura 12 – Ligação dos Enrolamentos e Disposição dos Sensores *Hall*

Considerando a referência do rotor como sendo o pólo sul e o sentido de rotação como anti-horário, a figura 13 mostra a sequência de chaveamento das bobinas para cada instante.



**Figura 13 – Sentido da Corrente Elétrica nos Enrolamentos**

#### 4.4. Controle do motor

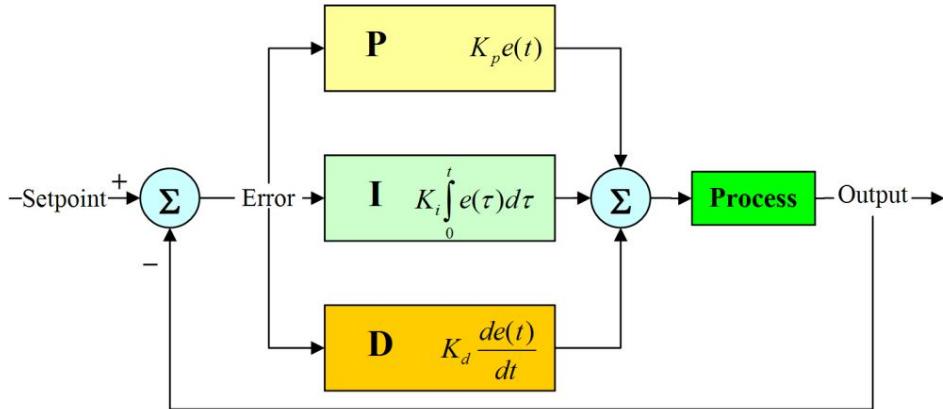
O correto controle do motor é fundamental para que se tenha a assistência desejada. Este controle é feito através de blocos separados, PID, PWM e uma ponte de transistores que juntos controlarão o torque adicionado ao que o motorista aplica no sistema.

##### 4.4.1. PID

O controlador PID é largamente utilizado nos sistemas de controle realimentado. Este tipo de controlador calcula um erro entre a variável medida e algum padrão definido e tenta minimizar este erro ajustando algumas entradas durante o processo.

Para este ajuste, o controlador faz uso de três parâmetros, são eles: proporcional  $P$ , integral  $I$  e derivativo  $D$ . Estes parâmetros reagem de forma diferente com as mudanças do erro. O proporcional reage com o erro corrente, o integral reage com a soma dos erros recentes, e o derivativo reage com a taxa de variação do erro. Estes termos podem ser interpretados temporalmente;  $P$  depende do erro presente,  $I$  depende dos erros passados acumulados e  $D$  é uma previsão dos erros futuros. [6]

Na figura 14 pode-se ter uma noção gráfica dos blocos que envolvem este tipo de controlador.



**Figura 14 – Disposição Interna do Controlador PID**

As constantes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  devem ser manipuladas para cada tipo de sistema a fim de se obter a resposta desejada.

Com o valor de  $K_p$  elevado, a resposta ao erro será rápida, quanto maior o erro maior será a compensação. A utilização do termo integrativo faz com que o sistema atinja mais rápido o valor do *setpoint* e elimina o erro de estado estacionário que um controlador proporcional teria, porém provoca um aumento do *overshoot*<sup>3</sup>. Já com o valor de  $K_d$  elevado, ocorre a redução do *overshoot*, mas também retarda a resposta transitória.

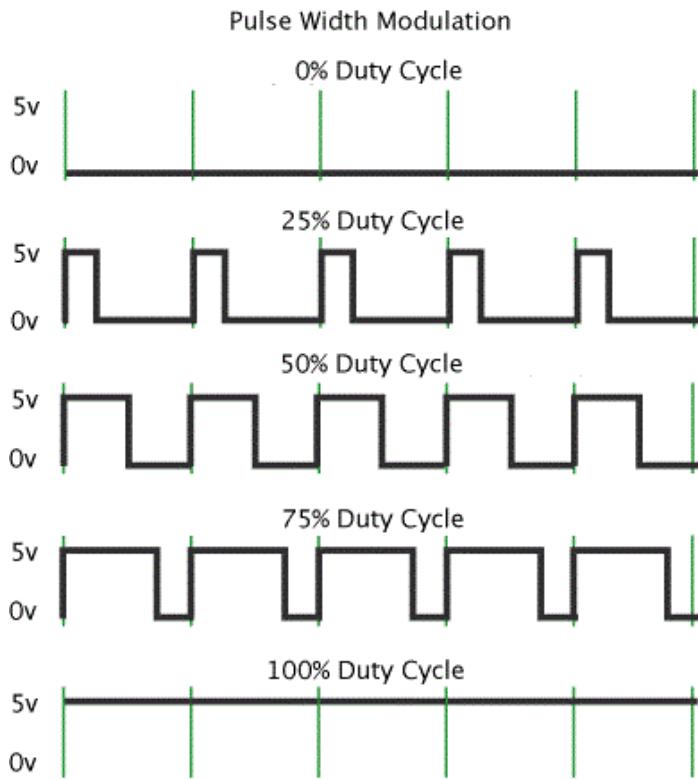
Na seção 6.2, estas constantes serão reguladas de forma que a resposta de saída do sistema seja aceitável.

#### 4.4.2. PWM

A sigla PWM vem do inglês (Pulse Width Modulation). Este tipo de sistema é capaz de controlar a potência entregue a uma carga através da variação do *duty cycle*<sup>4</sup> em uma onda quadrada, isto é, esta potência será relativa ao tempo que a onda fica nível alto.

Deste modo a carga terá sempre a tensão nominal em seus terminais, mas com a potência controlada. Isto é muito útil no uso do controle de motores, pois estes proporcionam melhor resposta quando a tensão aplicada é a tensão nominal. Além disso, este processo elimina as perdas que existem ao se usar recursos resistivos.

A figura 15 mostra alguns exemplos de ondas para valores diferentes de *duty cycle*.



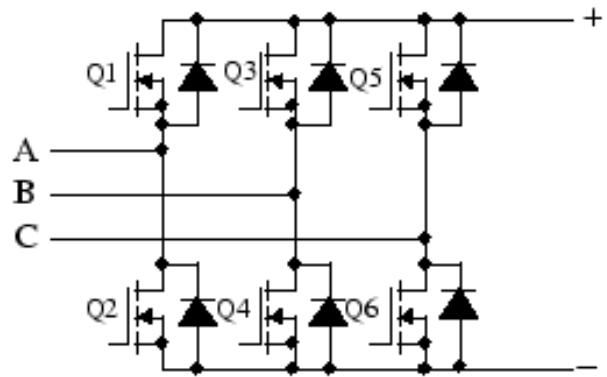
**Figura 15 – Sinais PWM**

#### 4.4.3. Ponte de transistores

A ponte de MOSFET mostrada na figura 16 possui três braços com dois transistores cada. Esta configuração é utilizada para controlar a corrente de dispositivos de potência trifásicos. No caso deste trabalho, o motor já apresentado acima.

Os transistores são controlados por um sistema que habilita a passagem de corrente pelos transistores certos de acordo com a posição em que o rotor se encontra. O grupo de transistores superior define em qual enrolamento do motor a corrente elétrica entrará, e o grupo inferior define de qual enrolamento ela sairá. Sendo assim, o sistema de controle, de acordo com os sinais dos sensores *Hall*, *chaveia* os transistores certos para que o motor forneça o torque no sentido correto.

Num exemplo simples, se a corrente elétrica tem que entrar no enrolamento A e sair pelo enrolamento C, os transistores Q1 e Q6 terão de estar ligados.



**Figura 16 – Ponte de Transistores**

## 5. Materiais e Métodos

Para efetuar o propósito do trabalho, foi utilizado um ambiente de simulação para sistemas dinâmicos e embarcados chamado *Simulink*. Essa ferramenta fornece um método interativo e gráfico com uma vasta biblioteca que nos permite desenvolver, simular, implementar e testar vários tipos de sistemas variantes no tempo. Com esse software podemos ajustar cada parâmetro do projeto com a precisão desejada e testar suas influências.

Abaixo serão explicados os modelos dos blocos que fazem parte do sistema.

### 5.1. Modelo completo

A figura 17 representa o sistema completo montado.

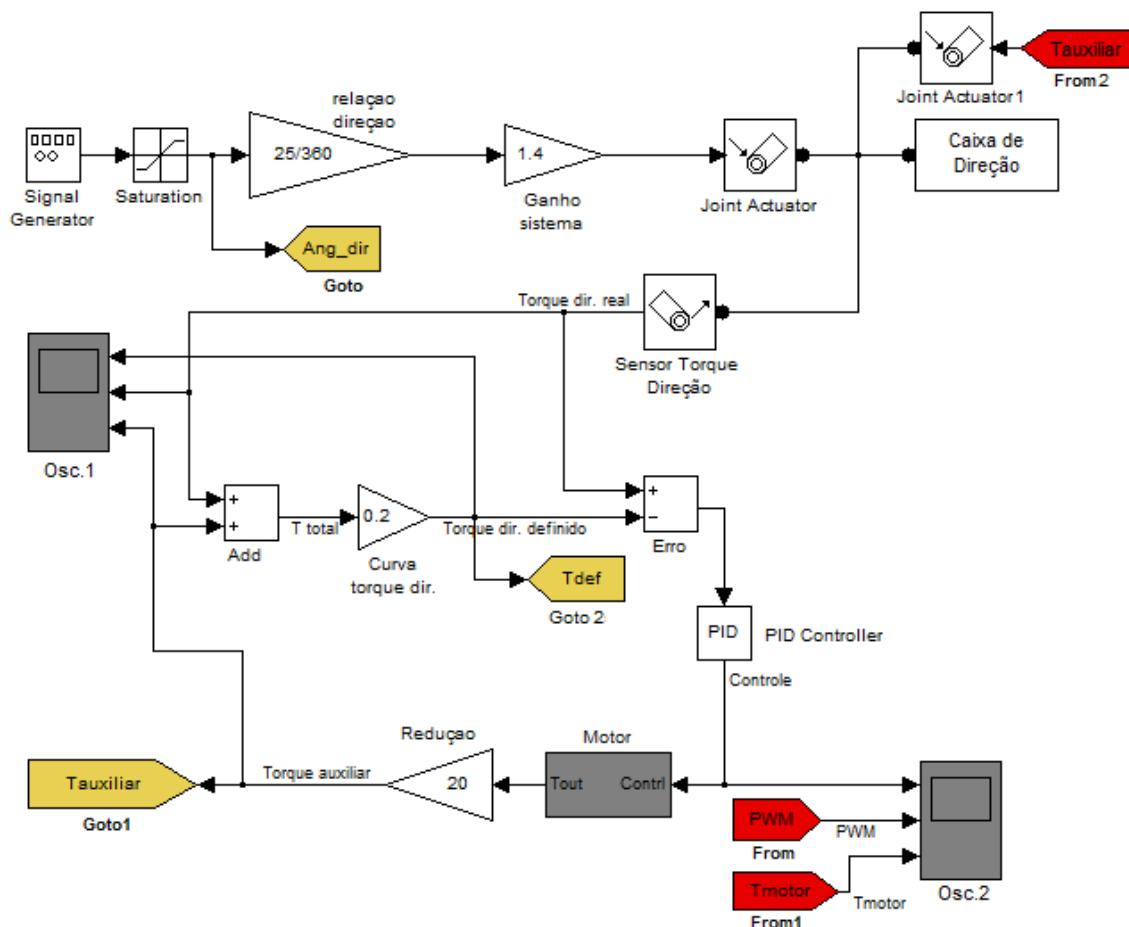


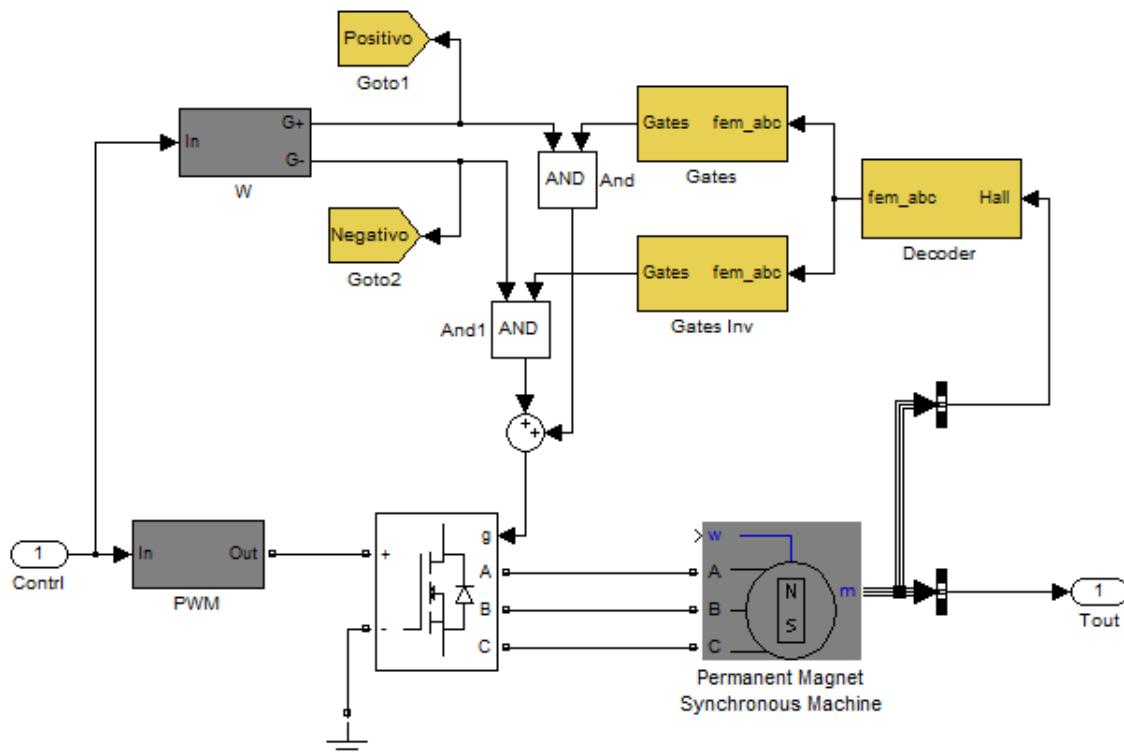
Figura 17 – Modelo Completo

O bloco *Signal Generator* simula um usuário girando o volante para os dois sentidos. O bloco *Saturation* representa os batentes do sistema de direção, que limita o movimento do volante a  $576^\circ$  para ambos os sentidos. O bloco *relação direção* juntamente com o bloco *Ganho sistema* representam a relação de ângulo entre o volante e a saída da caixa de direção e foram ajustados para que as rodas tenham um angulo aproximado de  $25^\circ$  ao se girar o volante em  $360^\circ$ . O bloco *Joint Actuator* aplica o movimento ao sistema mecânico.

O torque sentido no volante mais o torque auxiliar do motor representam o torque total transmitido nas rodas. O bloco *Add* faz essa soma. O bloco seguinte, *Curva torque dir.* é onde se regula a forma que o sistema vai fornecer a assistência desejada, podendo ser apenas um ganho como o da figura ou uma curva que varie com a velocidade por exemplo. A parte do controlador PID é explicada no item 4.4.1.

O torque de saída do motor entra no bloco *Reducao* que é uma representação de uma caixa de redução ligada no eixo do motor e retorna em sua saída o torque de assistência necessário.

O bloco denominado *Motor* é mostrado na figura 18.

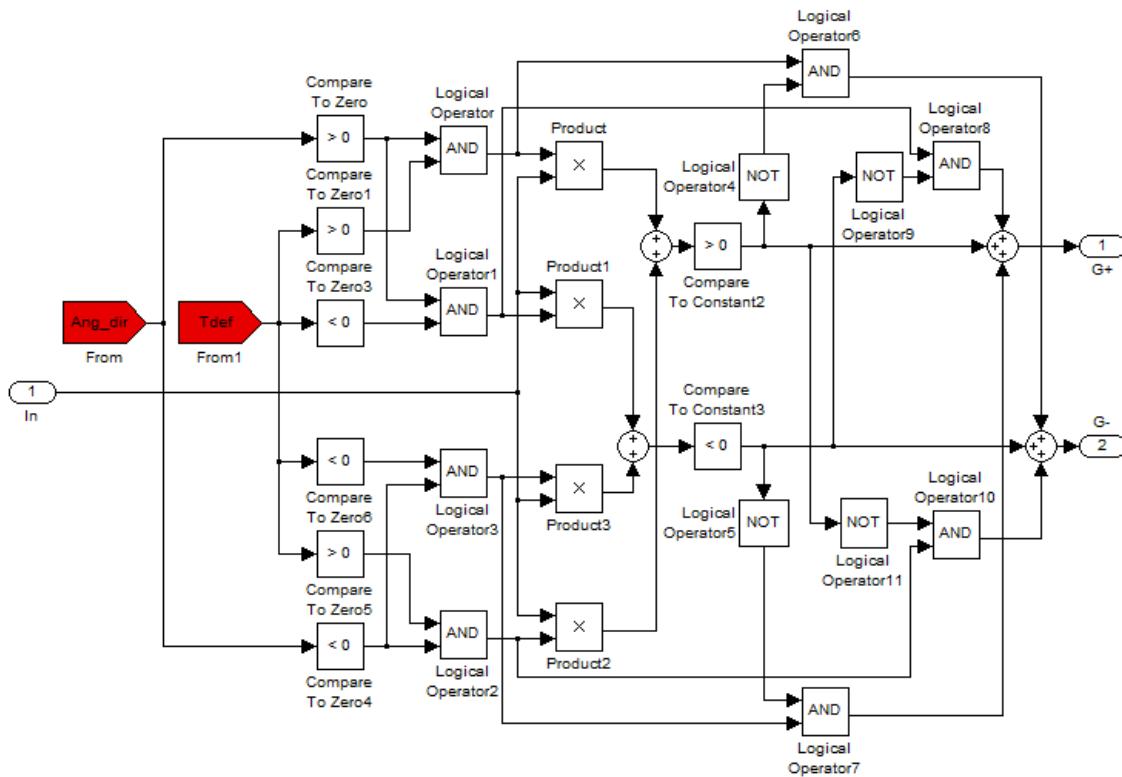


**Figura 18 – Bloco Motor**

Na figura acima, o bloco *Gates* corresponde à figura 24 e o bloco *Decoder* corresponde à figura 23 e serão explicados no item 5.3.

A saída *Gates* por sua vez é o conjunto de sinais que irão controlar os seis transistores da ponte através da porta *g*.

O bloco *PWM* será visto na figura 27 da seção 5.4.2., e o bloco *W* é quem comanda qual dos blocos, *Gates* ou *Gates Inv* irá controlar os a ponte de transistores gerando o torque para um sentido ou outro. Sua construção pode ser vista na figura 19.



**Figura 19 – Controle do Sentido do Torque de Assistência**

O circuito representado pela figura acima define o sentido do torque de assistência da seguinte forma:

Se o volante está virado para a direita e o torque no sistema de direção estiver contra este movimento (as rodas tendem a voltar à posição de  $0^\circ$ ), o torque de assistência do motor é a favor do movimento do volante, de modo oposto, se o torque no sistema de direção estiver a favor do movimento do volante (as rodas tendem a virar, caso de uma pista inclinada), o torque do motor será contra este movimento.

## 5.2. Modelo mecânico

O modelo mecânico do sistema de direção foi montado no *Simulink* de forma a representar ao máximo um sistema real. O diagrama da figura 20 mostra esta montagem sem nenhum esterçamento e com esterçamento total.

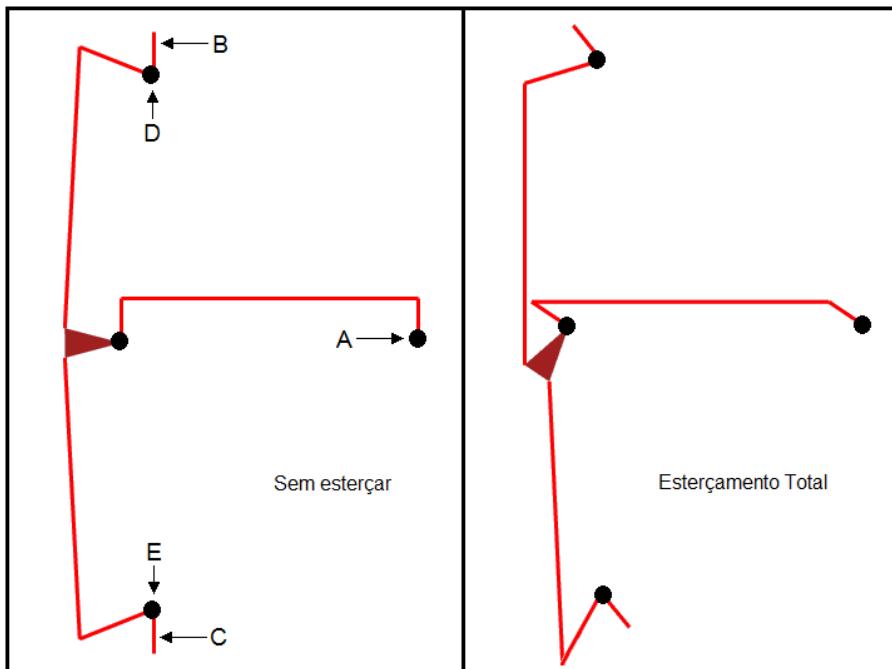


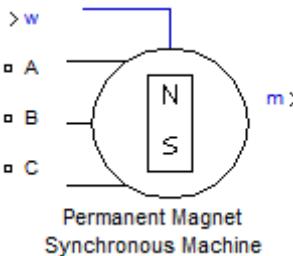
Figura 20 – Modelo Mecânico

Os pontos pretos indicam onde o sistema é fixado no chassi do veículo. O torque de assistência juntamente com o torque gerado pelo motorista são aplicados no ponto *A*. este ponto está ligado à saída da caixa de direção. Os pontos *B* e *C* são os eixos onde as rodas são colocadas. No ponto *D* e *E* são aplicadas forças que simulam a força que os pneus fariam se o veículo estivesse rodando em uma estrada, estas forças fazem as rodas tenderem ao alinhamento para frente como mostra a primeira parte da figura 20 [7].

## 5.3. Modelo do motor

Como dito anteriormente, o modelo de motor utilizado é o síncrono de ímãs permanentes. No *Simulink* o bloco que implementa o modelo deste motor tem o nome *Permanent Magnet Synchronous Machine*, figura 21, e simula a dinâmica de um motor

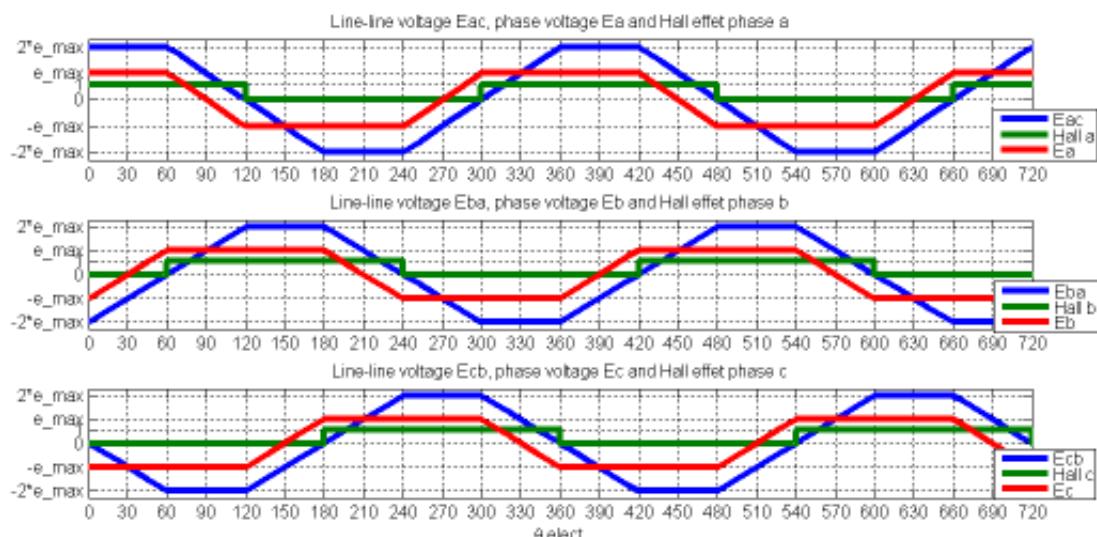
trifásico com força eletromotriz senoidal ou trapezoidal. Neste projeto será usado o tipo trapezoidal como mostrada na figura 22.



**Figura 21 – Modelo do Motor**

A figura acima mostra as entradas dos três enrolamentos *A*, *B*, *C*, a entrada de torque ou rotação aplicada ao rotor *w* e a saída de vários parâmetros do motor *m*, como: corrente em cada enrolamento, sinais dos três sensores *Hall*, força contra-eletromotriz de cada fase, velocidade, ângulo e torque do rotor.

O controle da corrente elétrica fornecida às bobinas do motor é feito através dos sinais dos sensores *Hall* presentes em seu interior. Na opção ajuda do modelo, podemos verificar como funcionam estes sinais com o auxílio da figura 22.



**Figura 22 – Sinais dos Sensores *Hall***

Da figura acima, pode-se obter a tabela 2 representando os estados que se encontram as forças eletromotrices de cada fase em relação aos sinais dos sensores *Hall*.

Hall A	Hall B	Hall C	Fem A	Fem B	Fem C
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	+1
0	1	0	-1	+1	0
0	1	1	-1	0	+1
1	0	0	+1	0	-1
1	0	1	+1	-1	0
1	1	0	0	+1	-1
1	1	1	0	0	0

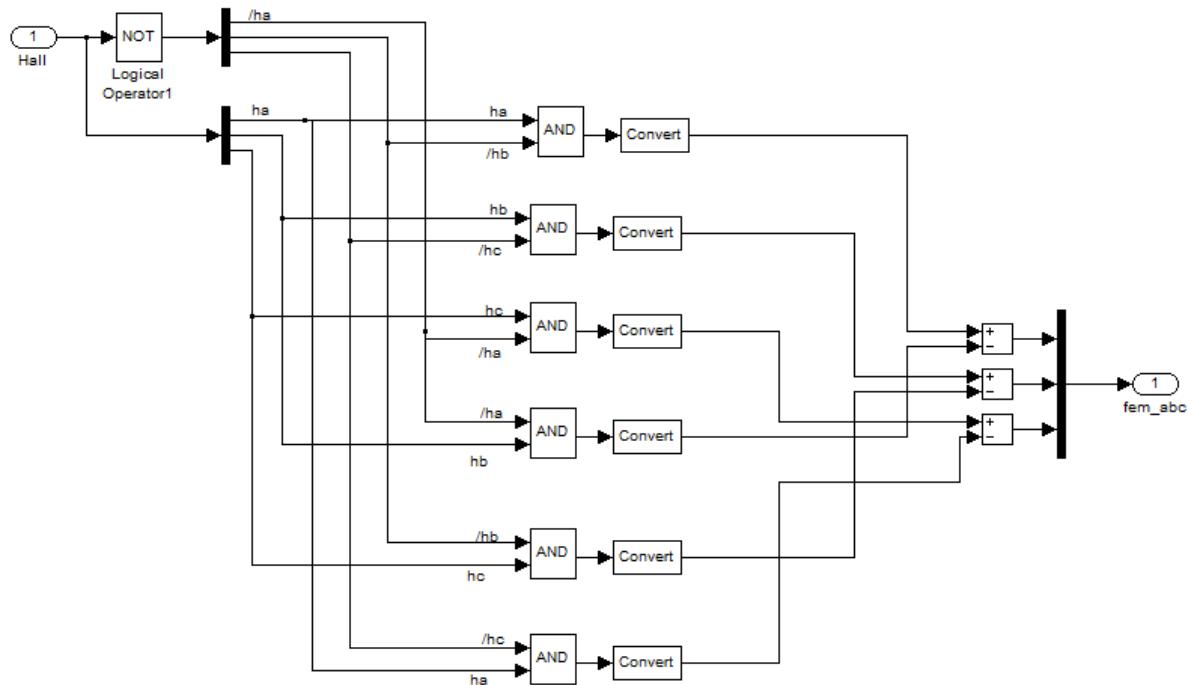
---

**Tabela 5 – Estado da Força Eletromotriz em Cada Enrolamento**

---

O símbolo 1 nas três colunas da esquerda indica que o sinal do sensor *Hall* da respectiva fase está em nível alto, e o símbolo 0 que está em nível baixo. Já nas três colunas da direita, o símbolo +1 indica que a força eletromotriz está positiva, o símbolo -1 indica que está negativa, e o símbolo 0 que está em transição.

Na tabela acima, nota-se que a  $Fem\ A$  é +1 quando  $Hall\ A$  é 1 e  $Hall\ B$  é 0, e é -1 quando  $Hall\ A$  é 0 e  $Hall\ B$  é 1. Utilizando esse padrão para  $Fem\ B$  e  $Fem\ C$  constrói-se o circuito da figura 23.



**Figura 23 – Tabela 2 Implementada no *Simulink***

Com esta relação entre os sinais dos sensores *Hall* e o estado da força eletromotriz, monta-se outra tabela com a relação de quando os gatilhos dos transistores da ponte de controle serão acionados, tabela 3.

Fem A	Fem B	Fem C	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	+1	0	1	0	0	1	0
+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 6 – Sinais de Acionamento dos Transistores

Esta tabela é feita de modo que a corrente elétrica entre na bobina que tem com o símbolo +1 e saia na bobina que tem o símbolo -1. A disposição dos transistores na ponte está representada na figura 16.

No *Simulink*, a representação da tabela 3 é da forma da figura 24.

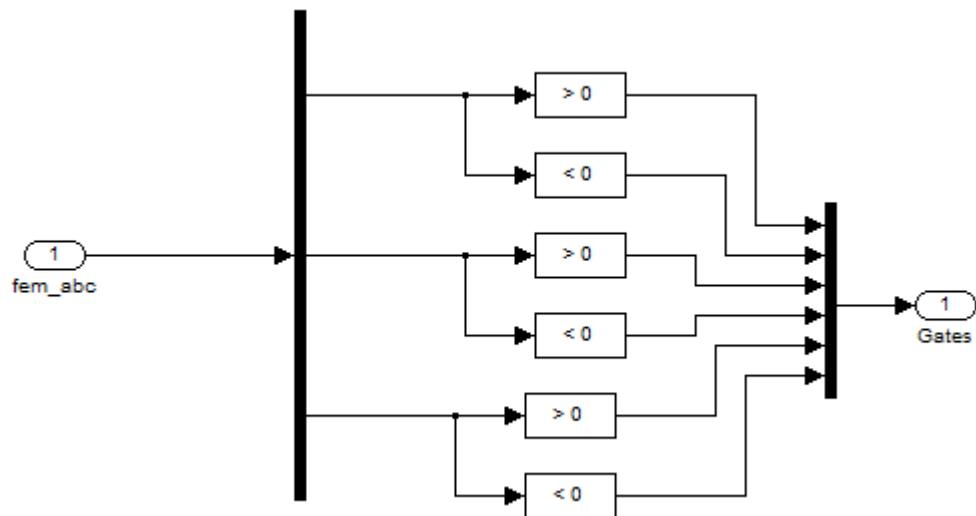


Figura 24 – Tabela 3 Implementada no *Simulink*

O procedimento de criação das tabelas acima produz torque em um sentido. Para que o torque gerado seja no sentido inverso, usa-se o mesmo método, porém invertendo o sentido da corrente elétrica nas bobinas do estator.

## 5.4. Modelo do controle

### 5.4.1. Modelo do PID

O sinal de erro necessário para o funcionamento do controlador é obtido da diferença entre o torque real sentido na caixa de direção e uma percentagem do torque total que a estrada aplica na roda. Esse sinal de erro entra no bloco PID como mostra a figura 25.

Após o sinal ser modificado pelo controlador ele entra no bloco do motor onde se encontra o sistema PWM.

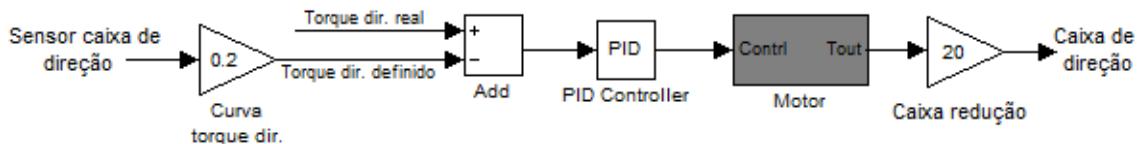


Figura 25 – Lógica do Controle

No bloco PID utilizado, tem-se três parâmetros a serem regulados, o proporcional, o integral e o derivativo. A figura 26 mostra a montagem interior do bloco.

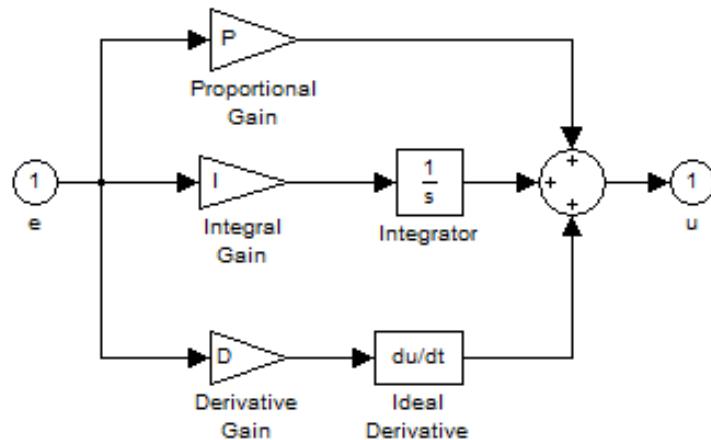


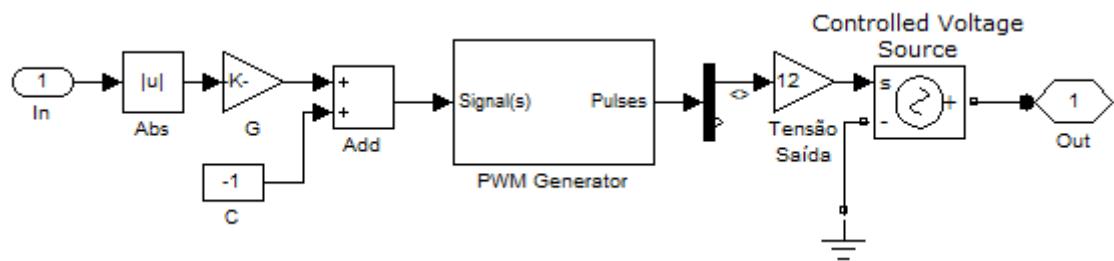
Figura 26 – Modelo do Controlador PID

### 5.4.2. Modelo do PWM

A tensão de entrada da ponte de transistores será influenciada diretamente pelo sistema PWM. Este sistema tem como entrada o sinal vindo do controlador PID.

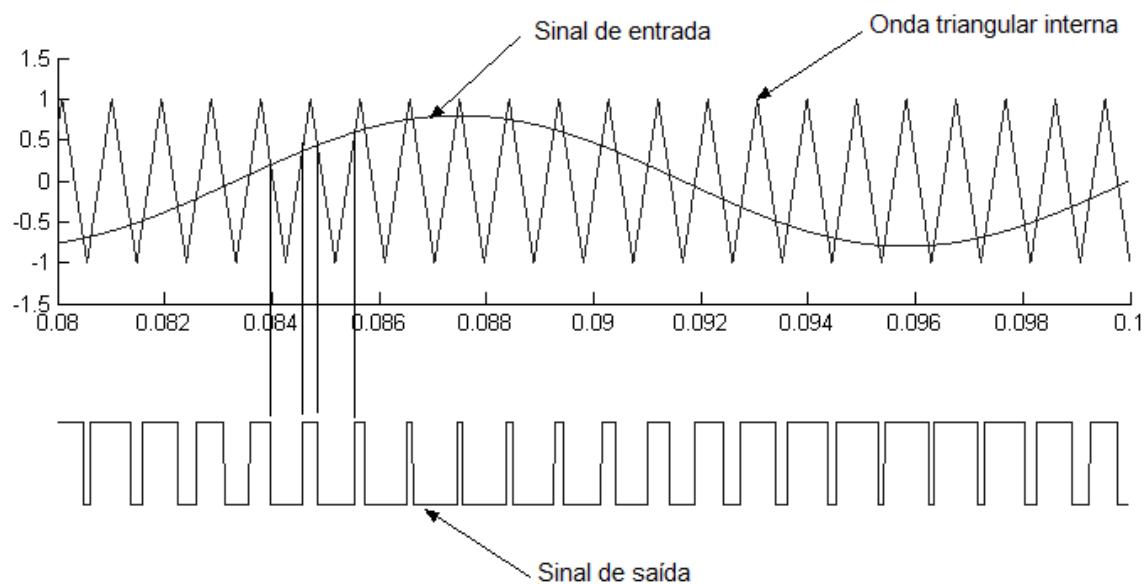
O sinal do controlador entra no bloco *Abs* que retorna o módulo do sinal, recebe um ganho de normalização e um nível de *offset* antes de entrar no bloco *PWM Generator*. A saída deste bloco é multiplicada por 12, tensão nominal do motor.

O bloco *Abs* é necessário, pois na inversão do movimento do volante, o sinal de erro também tem seu valor invertido, e isso faz com que o sistema funcione de forma incorreta. Esta particularidade é explicada na figura 36 da seção 6.4.



**Figura 27 – Modelo do Sistema PWM**

O bloco *PWM Generator* gera um sinal com pulsos modulados através da comparação de uma onda triangular interna e o sinal posto em sua entrada, de forma que quando estes sinais se cruzam, a saída vai para nível alto ou baixo dependendo do estado anterior. A figura 28 mostra seu funcionamento.



**Figura 28 – Funcionamento interno do Bloco PWM Generator**

A frequência da onda interna do *PWM Generator* influencia diretamente a resposta do sistema. Freqüências abaixo de 15kHz provocam ruídos audíveis além de

diminuir a resolução do torque do motor, mas também diminui as perdas de chaveamento do estágio de potência.

Frequências acima de 15kHz diminuem os ruídos, aumentam a resolução do torque porém também aumentam as perdas no chaveamento e necessitam de um *MCU* mais potente [4].

#### **5.4.3. Modelo da ponte de transistores**

O bloco ponte universal, *Universal Bridge*, presente na biblioteca do *Simulink*, é um modelo que pode ser configurado com uma série de dispositivos eletrônicos de potência, como MOSFETs, diodos, tiristores entre outros. Pode-se também alterar o número de braços da ponte além de podermos alterar alguns parâmetros dos dispositivos citados para podermos obter resultados mais próximos dos reais.

Este bloco foi configurado para três braços de MOSFET/diodos e os outros parâmetros foram mantidos.

## 6. Resultados

O sinal de entrada do sistema mostrado na figura 29, é uma onda senoidal com amplitude 576 e frequência 2Hz que representa o movimento do volante de batente a batente. Esta frequência foi calculada para simular um movimento muito rápido, de zero a  $576^\circ$  em 125 milissegundos. Este sinal entra no sistema de forma a alterar o ângulo de repouso e desta forma gera uma força de reação que é captada por sensores, analisada e processada. As respostas para esta entrada são captadas e mostradas nas figuras seguintes.

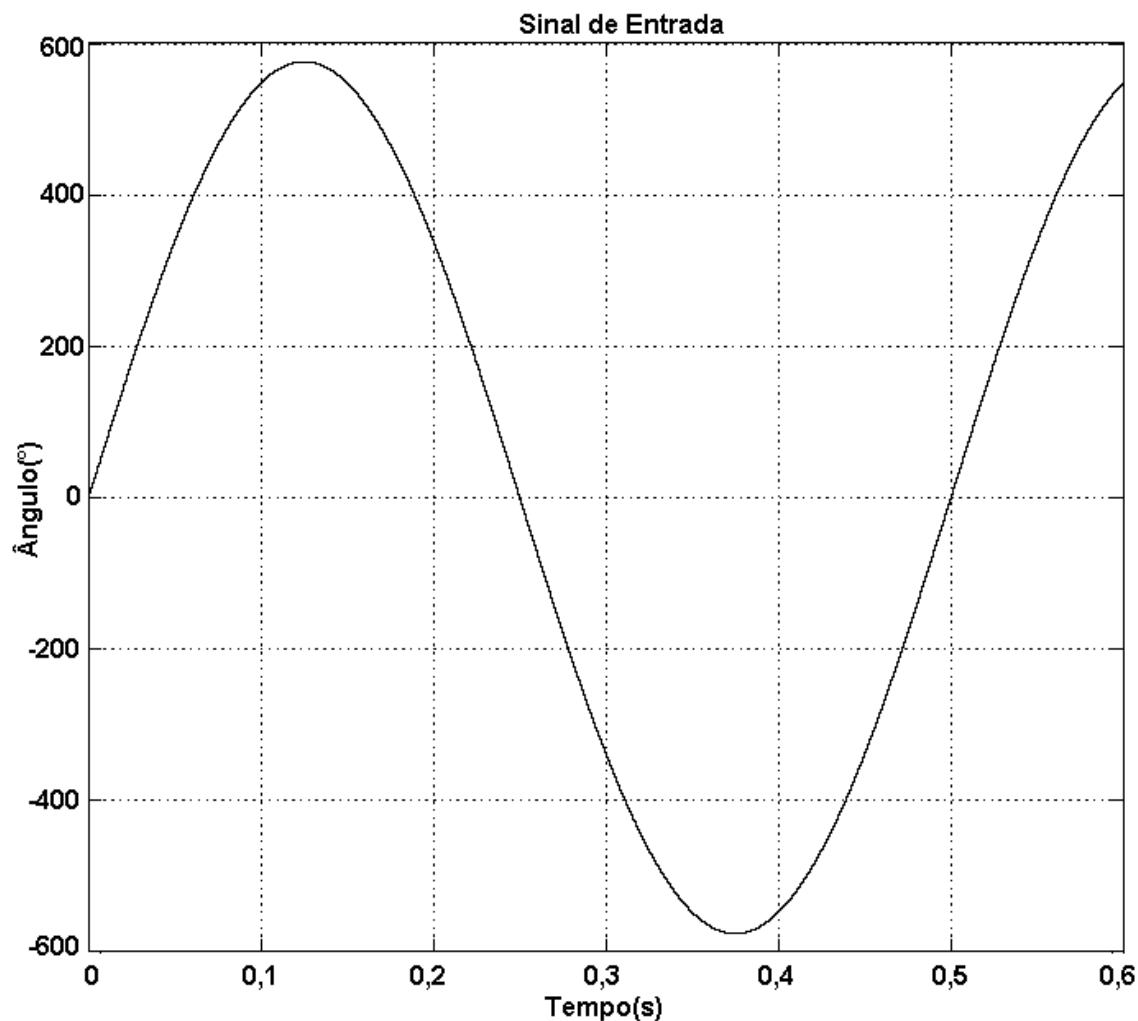


Figura 29 – Sinal de Entrada

### 6.1. Sem assistência

Desconectando o torque de assistência do motor, ou seja, retirando o bloco *Tauxiliar* mostrado na figura 17, todo o esforço é aplicado no volante e o motorista terá que se esforçar mais. Isto é mostrado na figura 30.

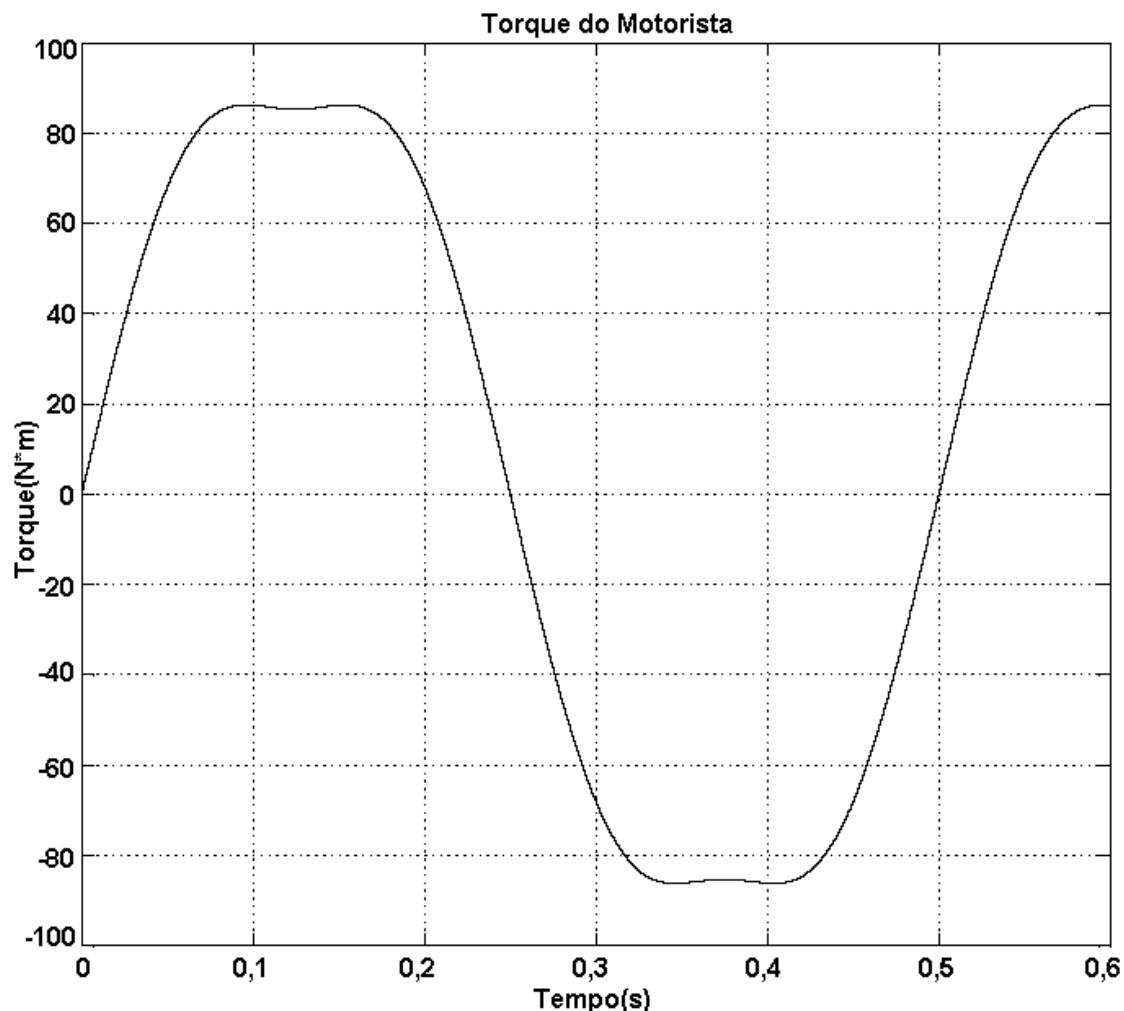
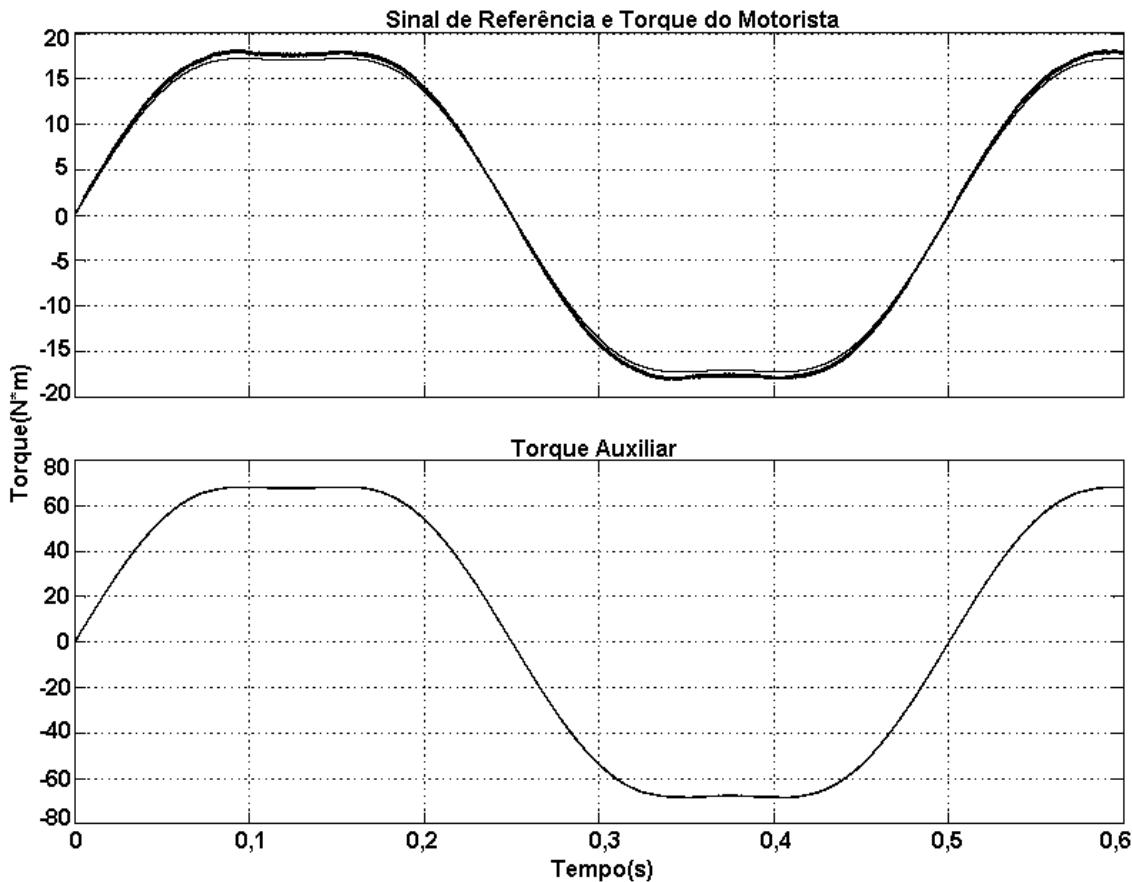


Figura 30 – Resposta sem Assistência

No gráfico acima, pode-se notar que o torque está no nível dos 90N\*m, ou seja, este torque de resposta captado pelo bloco *Sensor Torque Direção* da figura 17 é o torque que teoricamente o motorista estaria aplicando na caixa de direção do veículo.

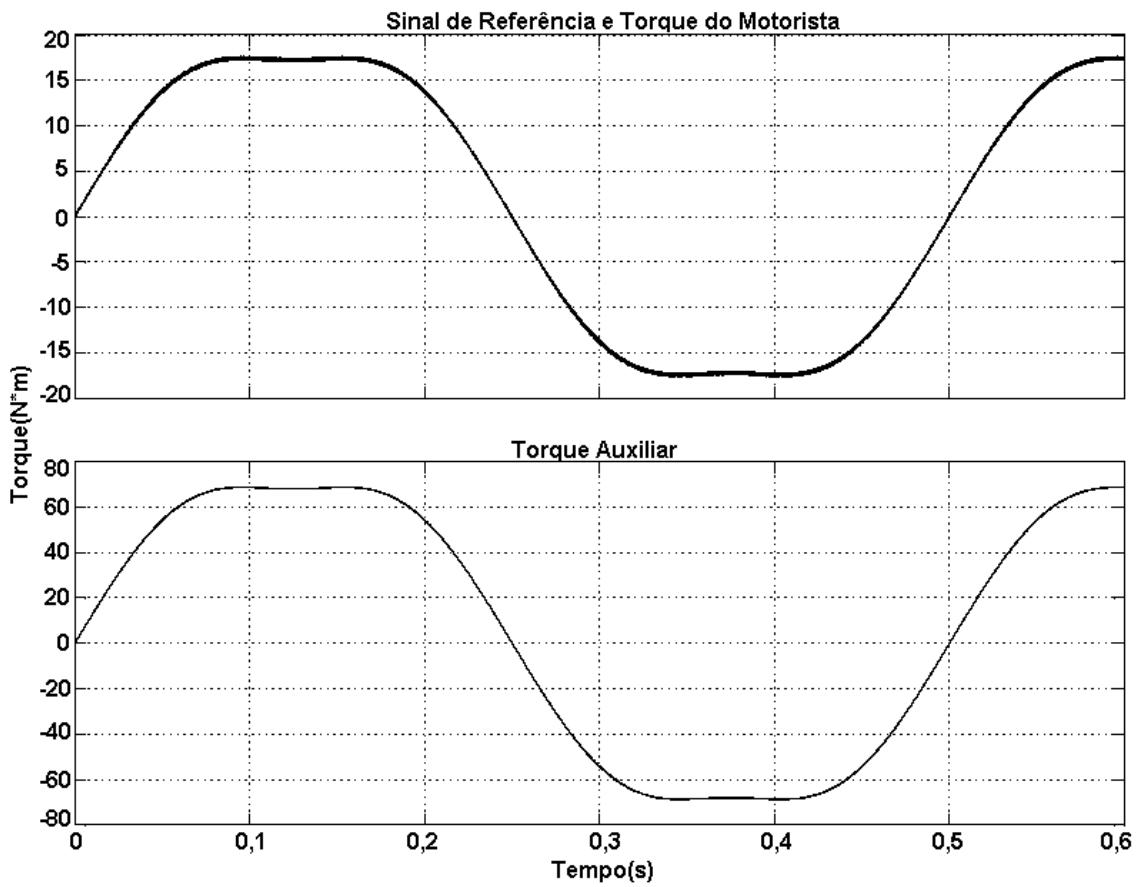
### 6.2. Ajustando o bloco PID

Primeiramente foi ajustado o ganho proporcional do bloco PID com o valor 15. O resultado é mostrado na figura 31. A linha mais fina é o sinal de referência, ou seja, o sinal teórico que o sistema tem que acompanhar, e a outra é o torque que deveria ser aplicado na caixa de direção pelo motorista.



**Figura 31 – Resposta com Ganho Proporcional em 15**

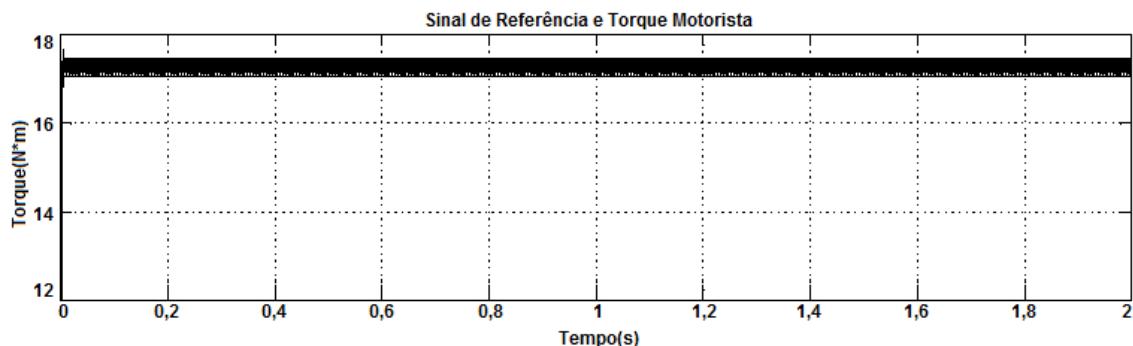
O resultado pode ser melhorado, assim ajusta-se o ganho proporcional para 40, o resultado é mostrado na figura 32.



**Figura 32 - Resposta com Ganho Proporcional em 40**

É um resultado satisfatório, tendo em vista que o movimento é bem rápido.

Outro teste é feito com a entrada indo até o máximo ângulo de esterçamento e mantendo-se assim. Este teste é feito para averiguar a estabilização do torque de assistência. Na figura 33 é mostrado este resultado.



**Figura 33 – Estabilização do Torque de Assistência**

Na figura acima a simulação foi mantida até gerar o resultado referente a dois segundos. O sinal de referência está em 17N\*m e o torque permanece estabilizado.

### 6.3. Ajustando o bloco PWM

Todas as simulações anteriores foram feitas com a frequência do bloco PWM em 20kHz, isto garante uma boa resolução de torque do motor. A frequência do bloco *PWM Generator* da figura 27 é baixada para 8kHz e o resultado comparativo está na figura 34.

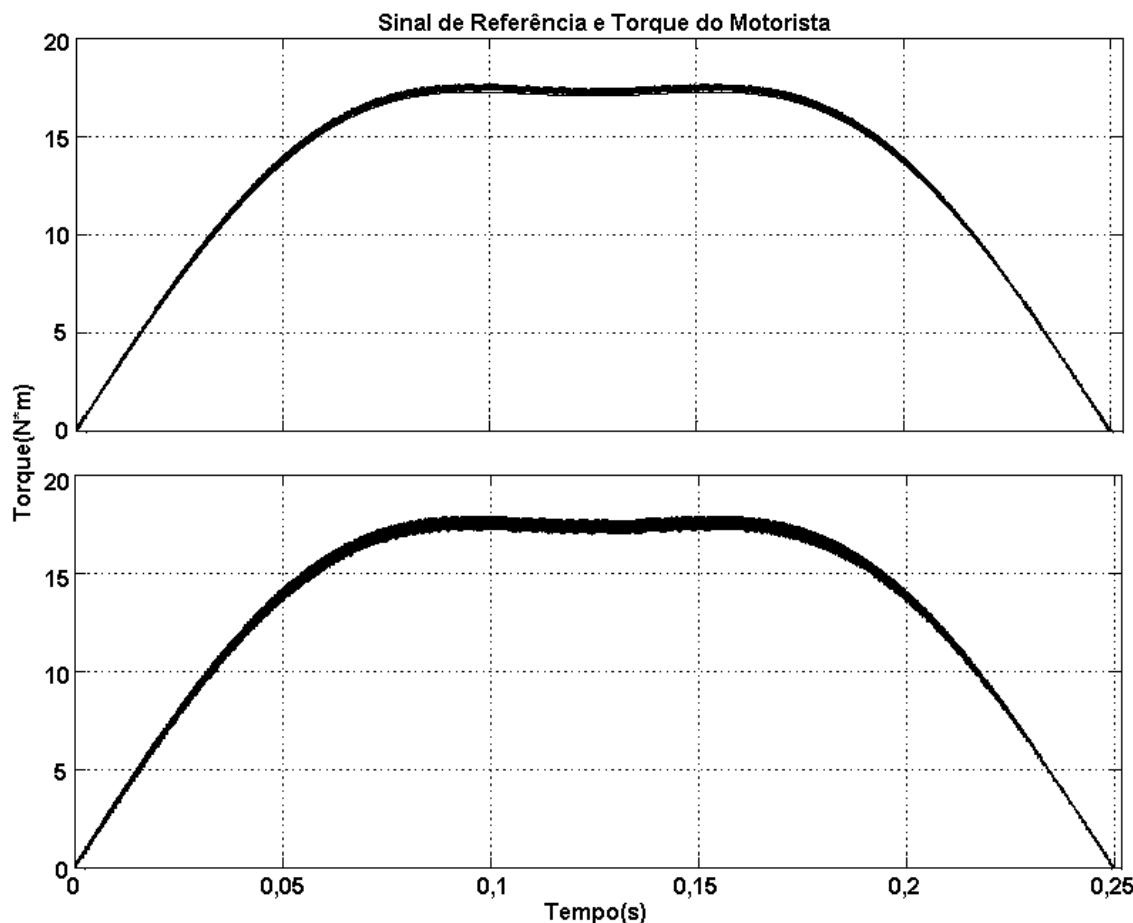


Figura 34 – Respostas em Função da Frequência do PWM

Na figura acima o primeiro gráfico mostra a resposta do semi-ciclo positivo da entrada para 20kHz e o segundo para 8kHz.

### 6.4. Sinais de controle

Na figura 35 podem-se observar os sinais de controle envolvidos no sistema.

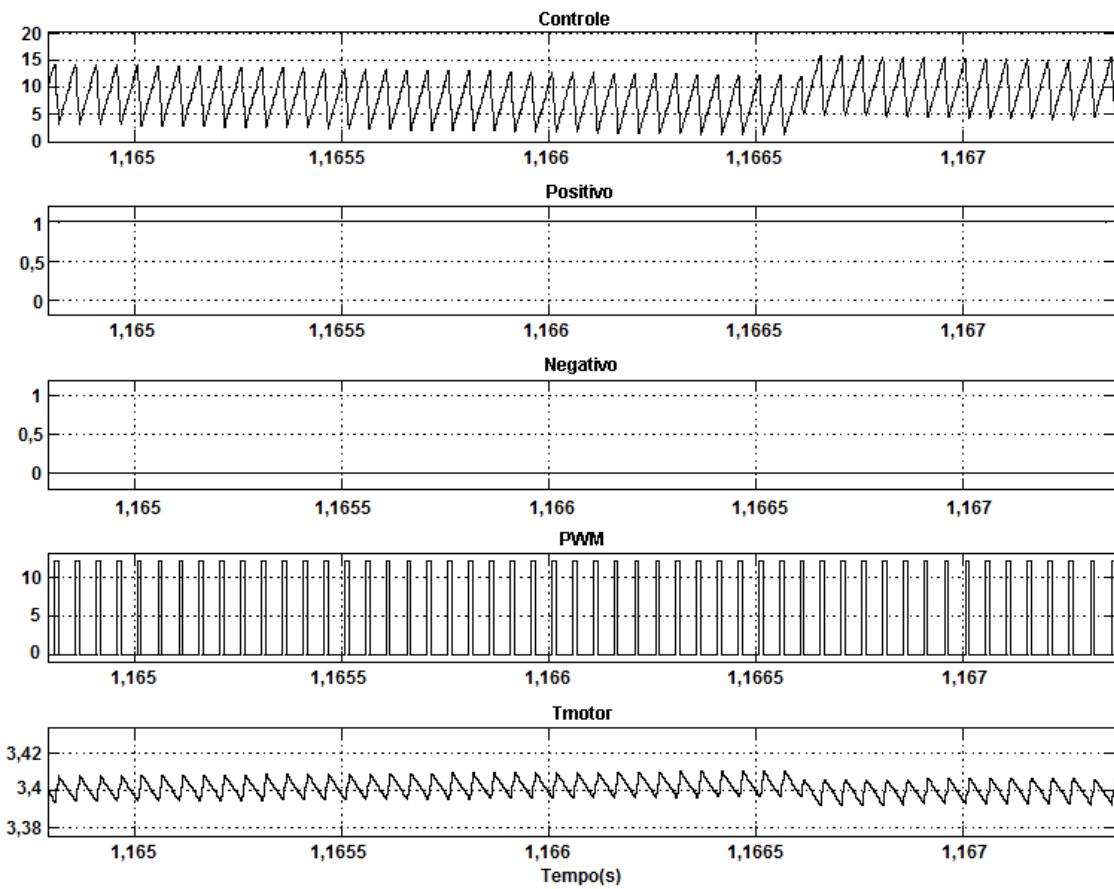
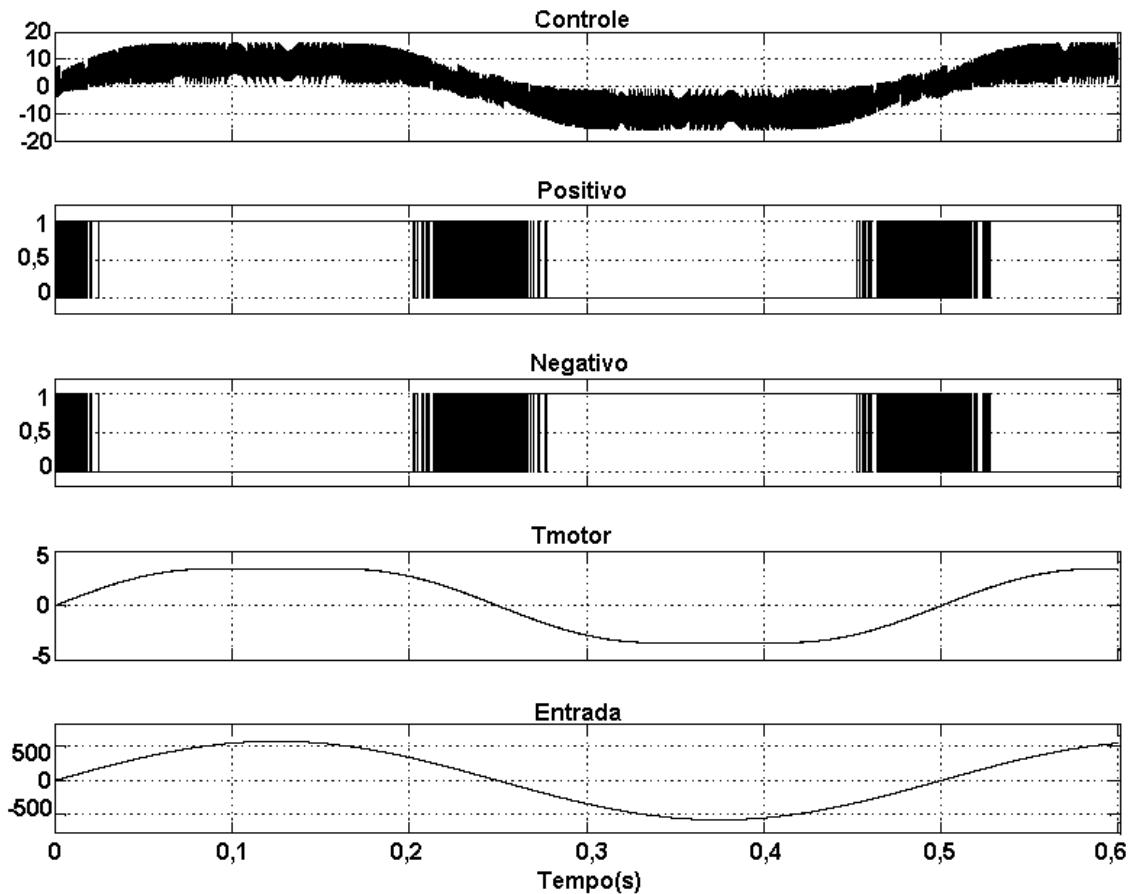


Figura 35 – Sinais de Controle

Na figura acima o primeiro gráfico é do controlador PID, o segundo é de quando o sentido da corrente é positivo, o terceiro é de quando o sentido da corrente é negativo, o quarto é do sinal PWM e o quinto é do torque que o motor produz. Este intervalo de tempo corresponde ao momento em que o torque está estabilizado, mostrado na figura 33. Como esperado, o sinal positivo está em nível alto, pois o torque do motor está a favor do movimento aplicado no volante, o sinal PWM permanece praticamente constante e o torque produzido pelo motor possui um *ripple*<sup>6</sup> muito pequeno, da ordem de 0,01 N\*m além do nível médio causado pelo chaveamento do bloco PWM.

Na figura 36 é possível visualizar todos os sinais em funcionamento para a situação em que a força que a roda produz tende a fazer o volante voltar à posição inicial, 0°.

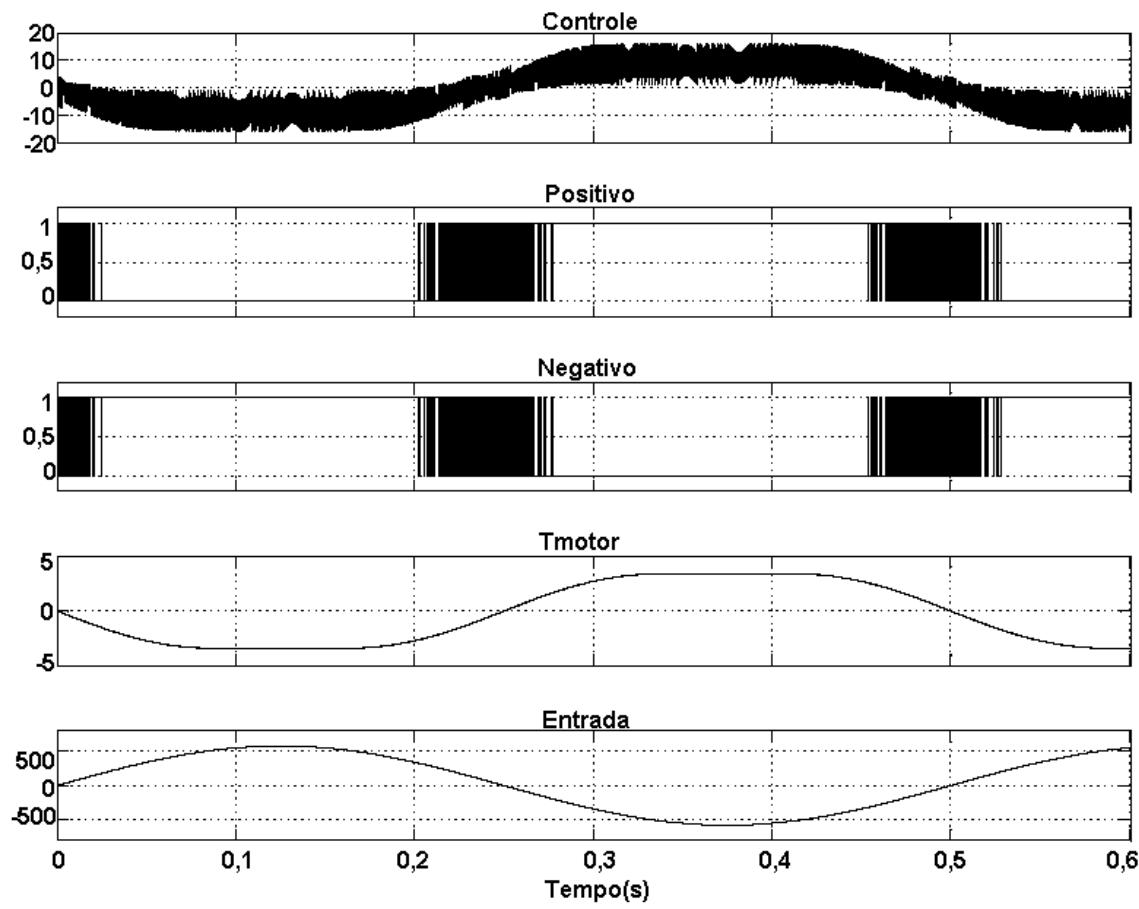


**Figura 36 – Resposta com Torque de Assistência a Favor do Movimento**

Pode-se notar na figura acima que o sinal *Positivo* vai para nível baixo pouco antes do sinal de entrada ficar negativo, isto é necessário, pois neste momento se o sinal PWM está em nível baixo, o torque na direção tende a diminuir, fazendo com que o sinal de erro fique negativo e o sinal PWM continue em nível baixo indeterminadamente. Por esse motivo o bloco *Abs* se faz útil no lugar mostrado na figura 27.

Com isso cria-se outro problema, pois mesmo que o sinal do erro seja sempre positivo, ele crescerá indefinidamente fazendo o sinal PWM se manter em nível alto. Por isso necessita-se da intervenção dos sinais denominados *Positivo* e *Negativo*. Estes sinais ligam e desligam os controles dos transistores que determinam o sentido do torque fornecido pelo motor, fazendo o motor mudar o sentido do torque para poder acompanhar o sinal de referência e assim o sistema funcionar da forma prevista.

Na figura 37 foi feito o mesmo ensaio da figura 36, porém com as rodas forçando o volante virar para um dos lados.

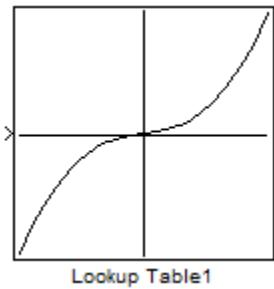


**Figura 37 – Resposta com Torque de Assistência Contra do Movimento**

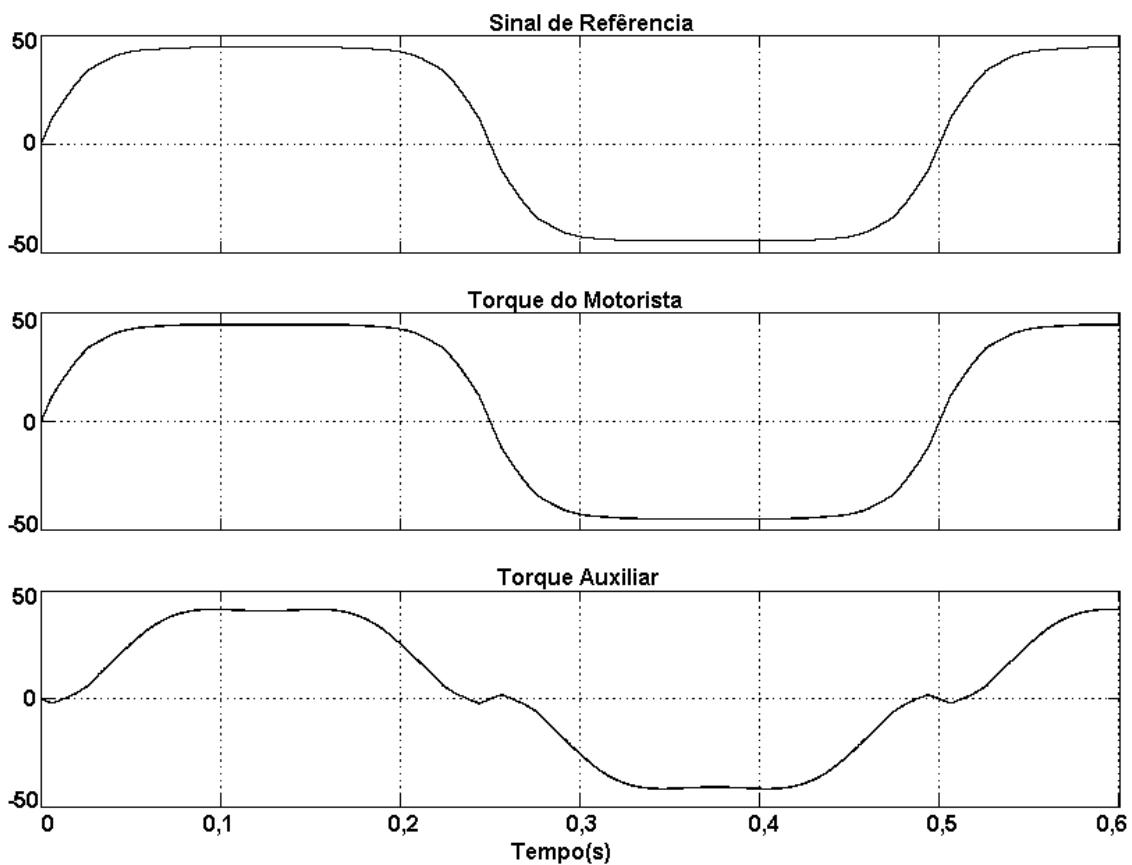
Nota-se que o sinal de entrada e o sinal do torque do motor estão espelhados.

### 6.5. Outros testes

Na figura 39 o gráfico mostra o sinal de referência, o torque aplicado pelo motorista na caixa de direção e o torque de assistência para um sinal de referência variável. Para isto, o bloco *Curva torque dir.* da figura 17 é substituído por um bloco que gera um sinal de saída da forma que com ângulos menores, tem-se menos assistência e com ângulos maiores, mais. A figura 38 mostra a curva do bloco falado.

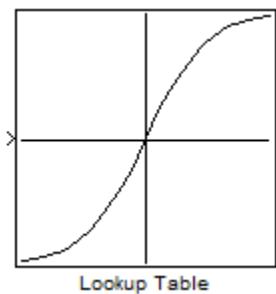


**Figura 38 – Curva do Sinal de Referência 1**

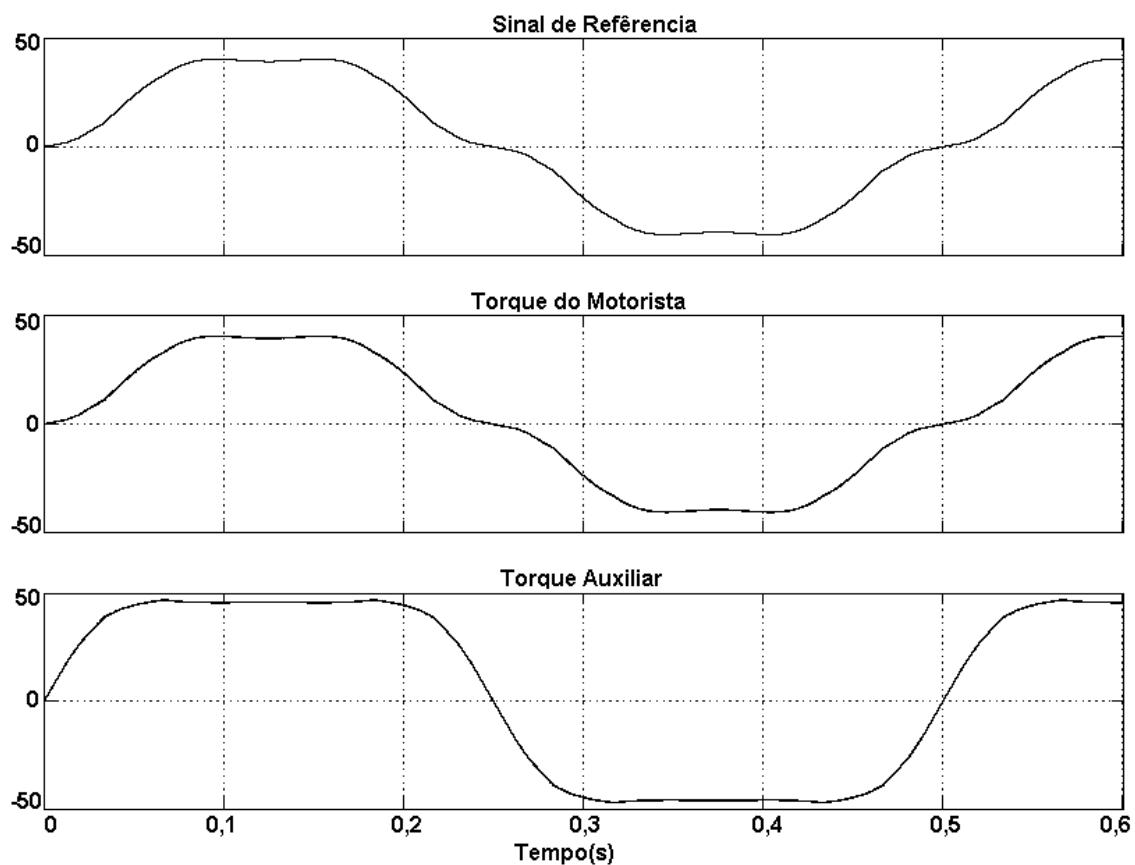


**Figura 39 – Resposta com Pouca Assistência em Ângulos Pequenos**

Na figura 41 o mesmo bloco do teste acima é modificado de tal forma que para ângulos menores o sistema fornece mais assistência e para ângulos maiores, menos. A figura 40 mostra a nova curva de assistência.

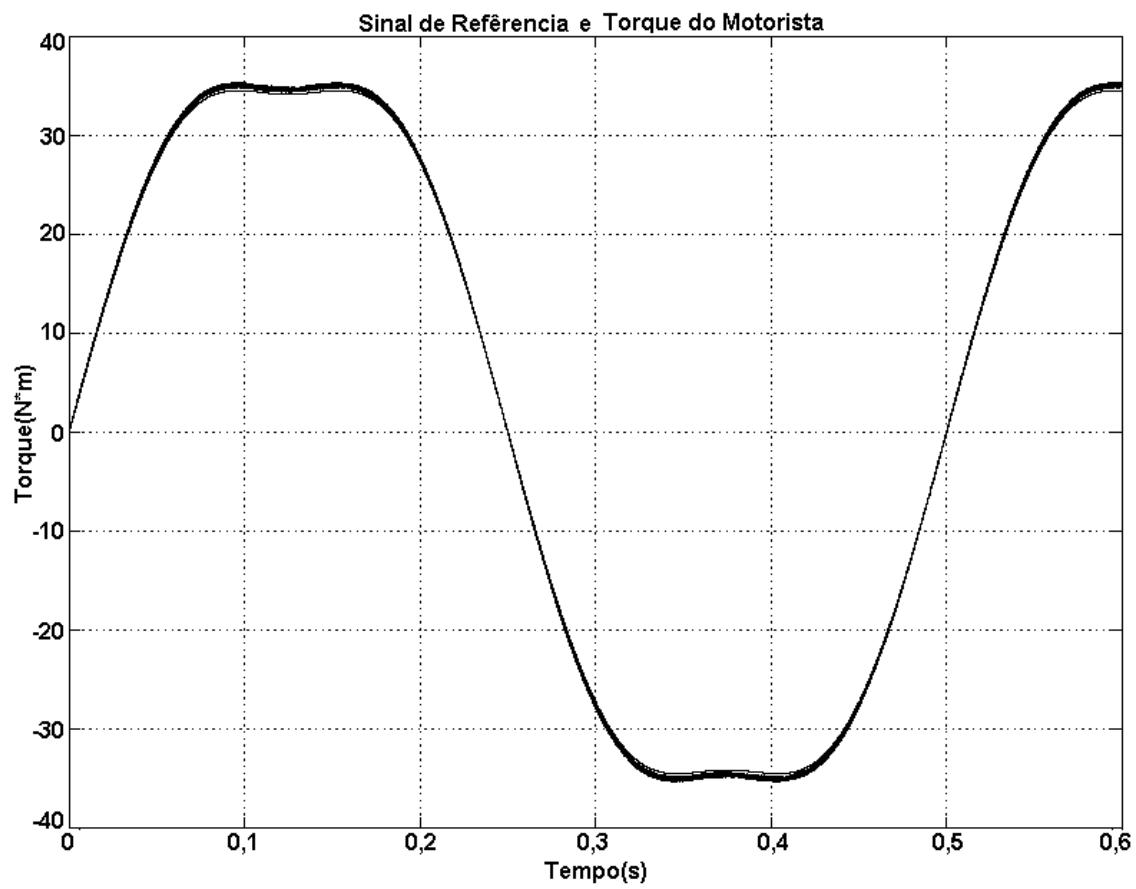


**Figura 40 – Curva do Sinal de Referência 2**



**Figura 41 – Resposta com Bastante Assistência em Ângulos Pequenos**

Outra simulação é feita mudando o valor da força que a roda aplica na caixa de direção enquanto o motorista esterça o veículo. O sinal de referência foi ajustado para que o motor forneça 80% deste esforço. O gráfico da figura 40 mostra esta simulação.



**Figura 42 – Resposta com Maior Torque Exercido pela Roda**

Pode-se notar que o torque é maior que na figura 32.

## 7. Conclusão

A possibilidade de simular projetos antes de implementá-los é uma conquista que devemos usar ao máximo. A simulação de problemas ou até mesmo de um sistema normal para analisar sua resposta e procurar por erros é de suprema importância quando se fala em termos de economia, pode-se identificá-los e corrigi-los sem gastos extras.

O ambiente *Matlab/Simulink* fornece esta possibilidade de forma precisa e confiável. Mudando as entradas, alguns parâmetros internos e analisando a resposta do sistema, obtém-se uma visão mais clara de onde se pode encontrar um problema ou efetuar melhorias.

Foi possível visualizar a importância de frequências mais elevadas para o sinal PWM para que se tenha uma boa resolução do torque controlado do motor, além de estimar o valor da caixa de redução necessária para que o torque de assistência tenha o valor desejado.

Também foi possível analisar o sistema em movimentos lentos e rápidos, a fim de averiguar se a resposta é rápida e se mantém estável ao longo do tempo.

Por fim conclui-se que o sistema proposto responde de forma satisfatória e pode ser adaptado e implementado para funcionar em algum ambiente específico.

Uma futura melhoria para o sistema pode ser feita aplicando a variável velocidade, de tal forma que a assistência dada ao motorista possa ser modificada por esta, mais assistência em baixas velocidades e menos em altas.

Outra melhoria seria um estudo mais detalhado do torque de esterçamento também dependente da velocidade aplicado pelas rodas no sistema.

## Referências Bibliográficas

- [1] LIN, Auto; TSAI, Go-Long; CHEN, Bo-Chiuan. *Embedded System Development of an Electric Power Assisted Steering System Using MATLAB/SIMULINK/Real-Time Workshop*, SAE, 2004, Document Number: 2004-01-0711
- [2] ARMELIN, Rafael Tytco. *Viabilidade física do mecanismo de esterçamento e suspensão de um eixo direcional e tracionado para veículos 4x4 com esterçamento em dois estágios*, Disponível em: <[www.automotiva-poliusp.org.br/mest/banc/pdf/rafael\\_armelin.pdf](http://www.automotiva-poliusp.org.br/mest/banc/pdf/rafael_armelin.pdf)>, acesso em 15/02/2010.
- [3] AUTOMOTIVE DIAGNOSTIC & REPAIR HELP FOR CARS AND TRUCKS. Disponível em: <[http://www.aa1car.com/library/steering\\_power\\_electric.htm](http://www.aa1car.com/library/steering_power_electric.htm)>, acesso em 15/03/2010.
- [4] VALENTINE, R. J.. *Power Electronics in Transportation*, IEEE, 1996, p. 105-110.
- [5] SIQUEIRA, Daniel Souto; ANDRADE, Darizon Alves de. PROJETO E SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE UM MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA SEM ESCOVAS, Disponível em: <[www.ic-ufu.org/anaisufu2008/PDF/IC2008-0151.PDF](http://www.ic-ufu.org/anaisufu2008/PDF/IC2008-0151.PDF)>, acesso em 09/03/2010.
- [6] OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de Controle Moderno*, Quarta Edição, Prentice Hall Brasil, 2007.
- [7] CANALE, Antonio Carlos. *Automobilística: dinâmica, desempenho*, São Paulo, Érica, 1989.

## Glossário

*Hall*<sup>1</sup> - Os sensores efeito Hall se usam do efeito Hall para a medição de campos magnéticos, corrente elétrica e para a determinação de posição.

*Estrela*<sup>2</sup> - A ligação estrela é aquela em que cada enrolamento de um sistema trifásico possui uma ponta ligada em uma fase e outra ligada em um ponto comum chamado neutro.

*Overshoot*<sup>3</sup> - Quando o sinal excede por um instante o valor ao qual deveria estabilizar-se.

*Duty Cycle*<sup>4</sup> - Refere-se ao tempo em que uma onda quadrada fica em estado ativo (nível alto).