

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS PARA A  
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

MARCELO CARVALHO DA ROSA

**SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICA ASSISTIDA PARA VEÍCULOS  
ELÉTRICOS E HÍBRIDOS UTILIZANDO MOTOR DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICO**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2015

**MARCELO CARVALHO DA ROSA**

**SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICA ASSISTIDA PARA VEÍCULOS  
ELÉTRICOS E HÍBRIDOS UTILIZANDO MOTOR DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: MSc. Prof. Guilherme A. Schneider

CURITIBA

2015

## RESUMO

As questões ambientais tornaram-se ao longo dos anos uma das grandes preocupações mundiais, em especial, questões relacionadas aos níveis de emissões gerado pelas frotas veiculares, devido ao aumento do número de veículos. O mercado automotivo por sua vez, através de normas regulamentadoras e incentivos, investem cada vez mais em soluções para reduzir os níveis de emissões de seus veículos, ou até mesmo, projetos de veículos com emissões zero, caso dos veículos 100% elétricos. O desenvolvimento de novos projetos para atender as normas regulamentadoras parte normalmente pelo sistema de tração dos veículos, pois são os principais emissores de poluentes devido a queima do combustível. Com o sistema de tração aperfeiçoado e sistemas de pós tratamento implementado, faz se necessário, otimizar os equipamentos auxiliares, com o intuito de reduzir ainda mais a demanda de potência do motor a combustão do veículo e conseqüentemente, reduzindo os níveis de emissões e melhorando a eficiência. Este trabalho tem como foco um dos equipamentos auxiliares do veículo, o sistema de direção elétrica assistida, utilizada tanto em veículos pesados tradicionais, como em veículos híbridos e 100% elétrico. Será apresentado o dimensionamento, comunicação e montagem do sistema de direção elétrica assistida em um veículo híbrido utilizado no transporte de pessoas. Será realizado ainda um teste funcional, com o objetivo de otimizar sua eficiência e funcionamento comparado aos sistemas convencionais acoplados ao motor a combustão.

**Palavras chave:** Direção elétrica assistida. Veículos híbridos. Eficiência na emissão de gases.

## ABSTRACT

Environmental issues have become over the years one of the major global concerns, in particular, issues related to the emissions generated by the vehicular fleet in the cities, due to the increased number of vehicles. The automotive market in turn, through regulatory incentives and regulations, are increasingly investing in solutions to reduce emission levels of their vehicles, or even, projects of vehicle with zero emission, for example, vehicles 100% electric. The development of new projects to meet the regulatory standards of the vehicles, normally starts with the drive system, as they are the major emitters of pollutants due to burning fuel. With the improved drive system and implementation of a after treatment systems, it is necessary, to optimize the auxiliary equipment of the vehicle, with the intuited to further reduce engine power demand and consequently, reducing emissions levels and improving the efficiency. The focus of this paper is over one of the auxiliary equipment of the vehicle, the electric hydraulic power steering system for heavy vehicles, used in conventional internal combustion engine (ICE) vehicles, such as, electric vehicles (EVs), hybrid electric vehicles (HEVs) and plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs). The paper will present the dimensioning, communication and the assembly of electric hydraulic power steering system in a hybrid bus. It will further be realized a functional test, with the aim of optimizing the efficiency and operation compared to conventional systems coupled to the conventional internal combustion engine.

**Keywords:** Electric hydraulic power steering. Hybrid Vehicles. Emissions efficiency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Emissões de NOx por tipo de combustível .....	8
Figura 2 - Emissões de MP por tipo de combustível .....	9
Figura 3 - Evolução dos limites de emissão para veículos pesados (Fases “P” do PROCONVE).....	10
Figura 4 – Sistema convencional de direção hidráulica .....	13
Figura 5 – Modelo do sistema de direção elétrica assistida .....	15
Figura 6 – Motor elétrico e servo bomba .....	18
Figura 7 – Motor de indução trifásico 5,3kW .....	21
Figura 8 – Sistema de direção elétrica .....	22
Figura 9 – Inversor automotivo CVW300 .....	24
Figura 10 – Modelo de controle do sistema de direção .....	25
Figura 11 – Software WLP .....	26
Figura 12 – Fluxo de óleo da Servo bomba .....	27
Figura 13 – Engrenagens Servo bomba.....	28
Figura 14 – Servo bomba .....	28
Figura 15 – Gráfico Pressão x rpm.....	29
Figura 16 – Sensor angular da direção .....	30
Figura 17 – Diagrama de blocos de comunicação .....	31
Figura 18 – Instalação do motor elétrico e reservatório hidráulico .....	33
Figura 19 – Bomba hidráulica acoplada ao motor elétrico .....	33
Figura 20 – Instalação do Inversor .....	34
Figura 21 – Gráfico com aquisição dos dados do percurso na pista de testes.....	36
Figura 22 – Gráfico com aquisição dos dados de movimentos bruscos do volante, direita e esquerda.....	38
Figura 23 – Gráfico com aquisição dos dados do percurso “Circuito 8” .....	40
Figura 24 – Gráfico com aquisição dos dados de esterçamento do volante até o fim de seu curso.....	41
Figura 25 – Rampa de aceleração e desaceleração .....	42
Figura 26 – Rota Mercês - Guanabara.....	43
Figura 27 – Potencia dissipada pelo sistema de direção elétrica assistida .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rotação em relação Pressão .....	17
Tabela 2 – Funcionamento da bomba.....	30

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
1.1	PROBLEMA	10
1.2	OBJETIVO GERAL	11
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.4	JUSTIFICATIVA	12
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	12
<b>2</b>	<b>SISTEMAS DE DIREÇÃO VEICULAR</b>	<b>13</b>
2.1	SISTEMA DE DIREÇÃO HIDRÁULICA CONVENCIONAL	13
2.2	SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICA ASSISTIDA	14
2.2.1	Vantagens e desvantagens de um sistema de direção com motor de indução	15
<b>3</b>	<b>PROJETO DO SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICO</b>	<b>17</b>
3.1	MONTAGEM DO SISTEMA	17
3.2	REQUISITOS DO SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICO	18
3.3	ESPECIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES	19
3.3.1	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	19
3.3.2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	24
3.3.3	PROGRAMAÇÃO E CONTROLE PID	26
3.3.4	SERVO BOMBA	27
3.3.5	SENSOR ANGULAR DA DIREÇÃO	30
3.4	PROGRAMAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR	31
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO E RESULTADOS</b>	<b>32</b>
4.1	MONTAGEM DO SISTEMA	32
4.2	RESULTADOS OBTIDOS	35
4.3	COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICA ASSISTIDA COM O SISTEMA HIDRÁULICO CONVENCIONAL	43
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>47</b>

**REFERÊNCIAS .....48**



## 1 INTRODUÇÃO

A frota mundial de veículos leves, médios e pesados são compostos na sua grande maioria por veículos a combustão, nos quais demandam uma grande quantidade de combustível derivado do petróleo. No entanto o lançamento de gases poluentes na atmosfera oriundos da queima de combustível fóssil gera inúmeros problemas, principalmente no caso dos motores a diesel como pode ser observado nos gráficos das Figuras 1 e 2. Nos motores a diesel, por exemplo, o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não-metano (NMHC), material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), e diversos outros compostos são lançados diretamente na atmosfera diariamente, causando inúmeros problemas ambientais e socioeconômicos, entre eles, a poluição do ar, o aumento do índice de doenças respiratórias em virtude da inalação dos gases e o aumento do efeito estufa (Ministério do Meio Ambiente, 2015).

Ainda pode-se destacar que segundo dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2013), somente os veículos a diesel em 2012, foram responsáveis pela emissão de 91% das emissões de NO<sub>x</sub> e 96% de MP diante dos demais veículos com diferentes combustíveis.

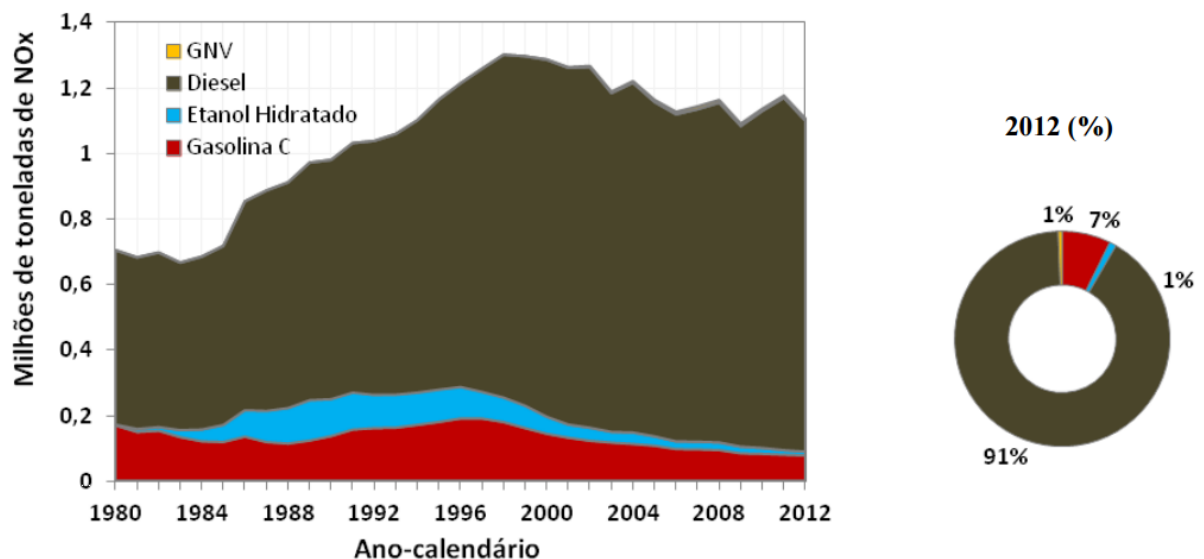


Figura 1 - Emissões de NO<sub>x</sub> por tipo de combustível  
Fonte: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2013.

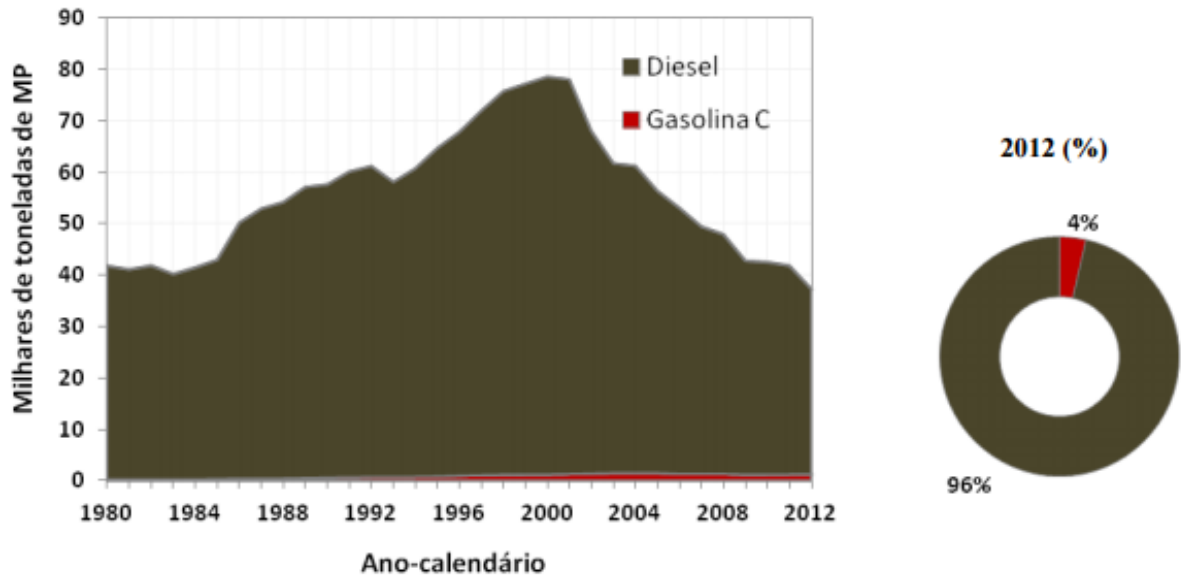


Figura 2 - Emissões de MP por tipo de combustível  
 Fonte: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2013.

A imposição cada vez maior para que os veículos reduzam drasticamente seus níveis de emissões através das normas regulamentadoras, e ainda, a crescente necessidade para que as montadoras busquem novas fontes de energia alternativas renováveis e sustentáveis, torna-se indispensável o aumento de investimentos no desenvolvimento de tecnologias para veículos híbridos, híbrido plug-in e 100% elétricos.

Em veículos pesados (massa total maior que 3.856 kg) os sistemas auxiliares, como, sistema de refrigeração, compressor de ar, ar condicionado e o sistema de direção, apresentam uma considerável carga para o sistema de tração. Sua potência então, deve ser dimensionada tanto para suprir o sistema de propulsão do veículo, como para suportar os sistemas auxiliares. Segundo Andersson (2004), enquanto a potência das cargas auxiliares do sistema é inferior a 10% da potência motriz, durante a aceleração, esse valor pode chegar próximo de 30% da potência total.

Caso os sistemas auxiliares do veículo sejam mal dimensionados ou sigam uma tecnologia inadequada, a demanda do sistema de tração acaba sendo afetada, ocasionando um rendimento do veículo inferior ao esperado, ou ainda, um sob dimensionamento sua potência com o intuito de suprir toda carga instalada.

## 1.1 PROBLEMA

No Brasil, desde 2012, o seguimento de veículos pesados a diesel deve atender os padrões de emissões definidos pelo PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) criado em 1986 pela CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente).

Segundo o PROCONVE, além de reduzir o limite para emissão de  $\text{NO}_x$ , a fase P7 estabeleceu a obrigatoriedade no uso de dispositivos ou sistemas para autodiagnóstico (OBD). Outra melhoria expressiva advinda dessa fase é relacionada à qualidade dos combustíveis, cujo teor de enxofre foi estabelecido em no máximo 10 ppm (parte por milhão).

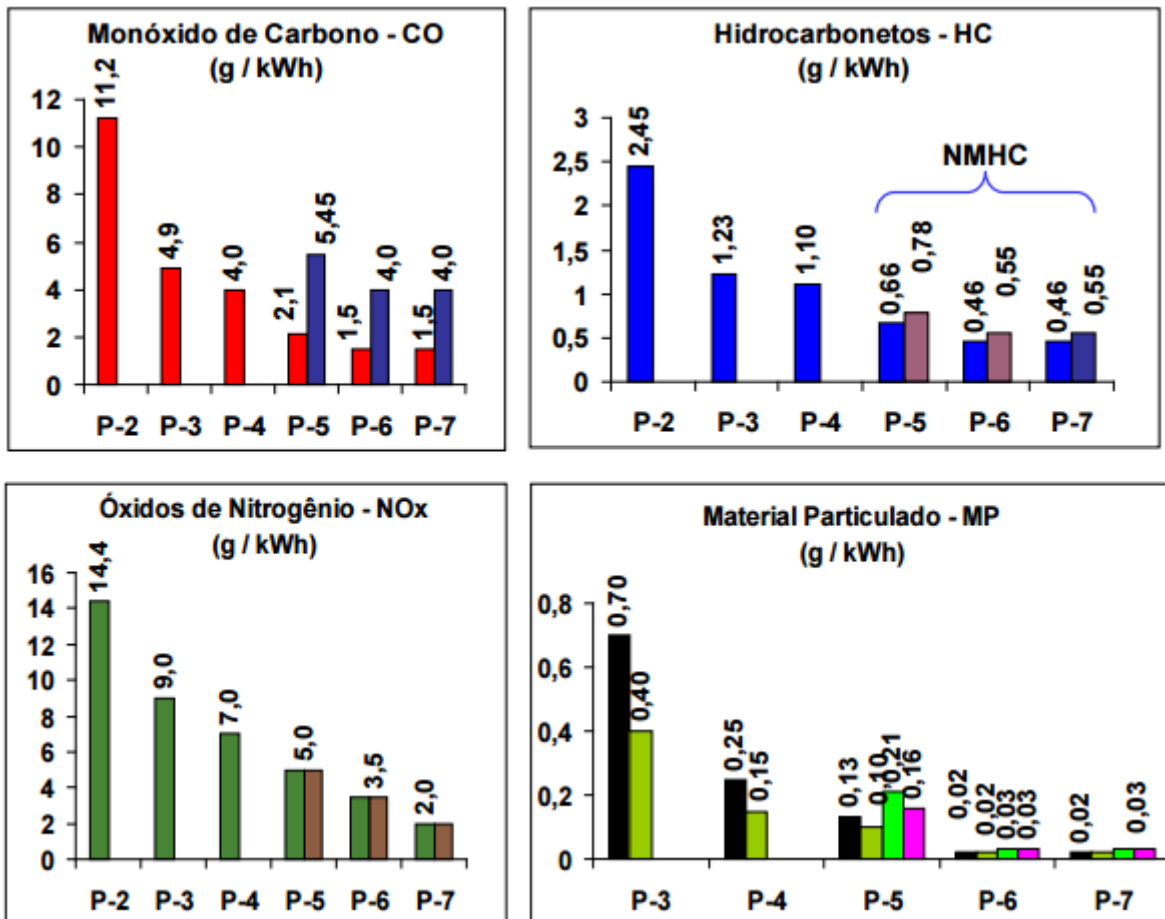


Figura 3 - Evolução dos limites de emissão para veículos pesados (Fases "P" do PROCONVE)

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2013.

As normas têm como objetivo reduzir os níveis de poluentes gerados pelos veículos automotores. Possivelmente, em breve, agindo somente no sistema de pós

tratamento, qualidade do combustível e parâmetros do motor, não será mais possível atingir as legislações vigentes, sendo necessário então, o auxílio de um novo sistema alternativo de propulsão. De acordo com a pesquisa recente realizada pela Navigant Research em janeiro de 2015, (*Market Data for Medium and Heavy Duty Commercial All-Electric, Plug-In Hybrid Electric, and Hybrid Electric Vehicles*), a venda anual de veículos pesados com propulsão elétrica crescerá de 16 mil em 2014 para 160 mil veículos em 2023.

Muito dos componentes auxiliares instalados nos veículos elétricos e híbridos, ainda demandam indiretamente ou diretamente da potência do motor diesel. Isso, faz com que o motor seja especificado com uma potência para suprir a demanda tanto do sistema de tração como dos componentes auxiliares. Com o dimensionamento elevado do motor diesel, temos conseqüentemente um aumento do consumo de combustível, aumento dos níveis de emissões, uma maior poluição sonora e uma menor eficiência na transformação de energia.

Quanto mais os componentes auxiliares demandarem energia do sistema elétrico maior é a eficiência do veículo. Com base nisso, esse trabalho irá tratar do sistema de direção elétrica assistida, *Electric Hydraulic Power Steering* (EHPS), para veículos híbridos plug-in e 100% elétricos, com um maior foco em veículos híbridos, pois o sistema de direção proposto será testado nesse seguimento.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Melhorar a performance do sistema de direção utilizada em veículos pesados híbridos, plug-in e 100% elétricos, bem como, reduzir a demanda de potência requisitada pelo sistema e conseqüentemente, reduzir os níveis de emissões.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos temos:

- Compreender o funcionamento do sistema atual;

- Dimensionar de forma otimizada o motor elétrico para o sistema de direção proposto;
- Especificar os componentes necessários para o sistema de direção proposto;
- Realizar a montagem de um protótipo do sistema de direção proposto;
- Levantar os dados e valores do sistema e analisa-los;

Será realizado ainda uma comparação do sistema de direção proposto com o modelo hidráulico convencional.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Utilizando equipamentos de baixo custo desenvolvidos para o setor automotivo, mas com tecnologia similar à empregada durante anos pela indústria, é possível aprimorar e otimizar sistemas auxiliares de veículos automotivos, obtendo benefícios econômicos, eficiência, conforto e ambientais.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho inicia com a explicação do sistema de direção hidráulica convencional, empregado praticamente em 100% da gama de veículos pesados da frota mundial. Em seguida, é apresentado o modelo do sistema de direção elétrica assistida, que utiliza um motor de indução trifásico proposto para o trabalho. Apresenta ainda, suas vantagens e aplicações.

No Capítulo 3 é apresentado os componentes utilizados no modelo proposto. É realizado o dimensionamento dos principais componentes através de cálculos ou somente pela especificação necessária para aplicação.

No Capítulo 4 é montado o conjunto no veículo, realizado os testes necessários para validação do sistema, apresentado os resultados dos testes e realizado a análise dos dados.

No Capítulo 5 é apresentados a conclusão do trabalho e as considerações finais.

## 2 SISTEMAS DE DIREÇÃO VEICULAR

### 2.1 SISTEMA DE DIREÇÃO HIDRÁULICA CONVENCIONAL

Em um sistema convencional de direção hidráulica, *Hydraulic Power Steering* (HPS), a bomba fornece uma quantidade de óleo ao sistema com uma vazão definida. Nesse sistema de circulação do óleo, a perda de pressão é ocasionada pela resistência ao fluxo do óleo. A bomba continua circulando óleo pelo sistema, mesmo quando não é requerida, como resultado, há um consumo desnecessário de energia (KOZUMA; ARITA; TSUDA, 2005). Na Figura 4, pode ser visto um exemplo do sistema convencional utilizado por diversas montadoras.



Figura 4 – Sistema convencional de direção hidráulica  
Fonte: Adaptado ZF Steering Systems for Commercial Vehicles, 2015.

Nesse sistema de direção HPS, a bomba é acionada por correias e polias ligadas ao motor do veículo; a bomba eleva a pressão do óleo para a entrada no mecanismo. Um sistema de válvula direciona o óleo dentro do mecanismo para uma das câmaras de pressão, na sequência, o óleo retorna para o reservatório. A bomba é acionada por uma correia ligada ao motor, portanto, parte da energia gerada pelo funcionamento do motor é usada para elevar a pressão do óleo para assistir o motorista na manobra. A bomba do sistema de direção hidráulica funciona de forma contínua proporcionando um gasto energético constante. Esse gasto energético em parte é determinado pela perda de carga no escoamento de óleo dentro do sistema de direção (Nacif, 2014).

## 2.2 SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICA ASSISTIDA

O sistema de direção elétrica assistida (EHPS) utiliza o torque de um motor elétrico para tracionar a bomba hidráulica, conforme apresentado na Figura 5. Desse modo, o sistema de direção torna-se independente da potência fornecida pelo motor a combustão do veículo, evitando a perda de potência do veículo e consequentemente, reduzindo o consumo de combustível.

O sistema de direção elétrica assistida, diferentemente do sistema convencional, mantém o óleo pressurizado somente quando necessário, aumentando sua eficiência. No caso do sistema convencional, esse trabalho em forma de pressão quando não é utilizada, é simplesmente descartada através de uma válvula de alívio.

Nesse modelo o funcionamento é intermitente, o que proporciona melhor eficiência energética em manobras a alta velocidade, quando a assistência hidráulica não é plenamente necessária, Nacif (2014).

Segundo Andersson (2004), o sistema elétrico assistido (EHPS) reduz aproximadamente 70% da potência dissipada comparado com os sistemas convencionais totalmente hidráulico para realizar o mesmo trabalho. Sendo ainda este, o sistema mais adequado para os veículos híbridos e elétricos. Sua desvantagem, encontra-se na demanda de potência unicamente elétrica do veículo, e maior custo de manutenção.

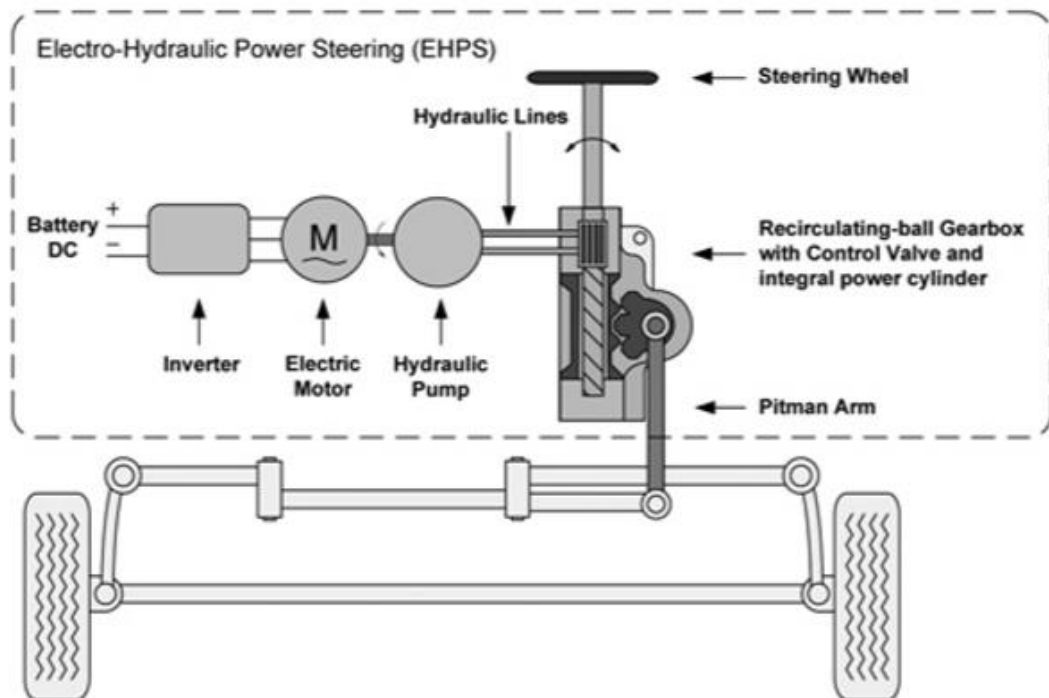


Figura 5 – Modelo do sistema de direção elétrica assistida  
 Fonte: Christopher Morton, Christopher M. Spargo e Volker Pickert, 2014.

### 2.2.1 Vantagens e desvantagens de um sistema de direção com motor de indução

O sistema de direção elétrica assistida oferece diversas vantagens comparado com o atual sistema de direção hidráulico para veículos pesados. Entre eles, estão a alta eficiência na conversão da energia sem perdas significativas, aproximadamente 70% de redução comparado com o sistema hidráulico, rápida resposta de velocidade devido a curva de aceleração, segurança, zero emissões, uma melhor dirigibilidade por parte do motorista do veículo, redução de ruídos, e redução de tubulação hidráulica para o sistema. Este último, devido a instalação da bomba no motor diesel e a conexão hidráulica que atravessa o veículo até a posição frontal, chegando ao sistema de direção e principalmente o controle de rotação/torque, isso possibilita que o sistema só demande a quantidade de energia necessária do sistema, sem perdas. Lembrando ainda, que para os veículos híbridos e plug-in, onde em determinados momentos a tração do veículo é realizada somente através do motor elétrico, não existe a possibilidade de ter uma bomba hidráulica tocando o sistema de direção, nesse caso, obrigatoriamente um sistema de direção elétrica faz se necessário.



Comparando ainda com sistemas convencionais elétricos, nos quais geralmente utilizam motores de corrente contínua (DC) para o funcionamento do sistema de direção, o sistema proposto nessa monografia utiliza um motor de indução trifásico 19 Vac. Esse sistema apresenta baixos índices de manutenção, não possui escovas nem comutador, um maior controle das rampas de aceleração e desaceleração, peso e tamanho inferiores ao motor DC mas com a mesma potência, e por fim, uma melhor disponibilidade de torque em ampla faixa de velocidade.

Como desvantagem, e ainda comparando com o sistema convencional hidráulico, o sistema de direção elétrico possui um maior custo de manutenção e um maior consumo de energia, (comparado com o sistema de direção elétrico DC). Também podemos considerar um maior consumo, devido as perdas para conversão de DC para AC através do inversor.

### 3 PROJETO DO SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICO

Neste capítulo será apresentado o dimensionamento dos principais componentes que constituem o sistema de direção elétrica assistida (EHPS), bem como, o funcionamento de cada um deles e a arquitetura de comunicação do sistema.

#### 3.1 MONTAGEM DO SISTEMA

A partir de componentes já existentes no mercado automotivo, é feita a montagem de um sistema de direção elétrica. Para tal, foi utilizado uma bomba com pressão máxima de 250 bar, mas com ajuste para operar em 150 bar, e vazão de 16l/min, para acionar um motor trifásico de 19 Vac e potência nominal de 5,3 kW acionado por um inversor com alimentação de 24 Vcc, no qual, converte para 19 Vac trifásico. Este inversor é comandado pelas unidades de controle do veículo (ECU), a partir de sinais de velocidade do veículo e ângulo de esterçamento do volante.

A Tabela 1 mostra a rotação da bomba em relação ao valor de pressão do sistema de direção. Estes valores permitem verificar condições necessárias para testes de homologação do sistema, bem como, teste de resistência do conjunto, vibração, condições climáticas, etc.

Tabela 1 – Rotação em relação Pressão

Rotação da bomba (rpm $\pm 3\%$ )	Pressão (bar $\pm 3\%$ )
500	5
1000	30
1500	75
1665	90
1830	120
2000	150

Fonte: Autor, 2015.

Ainda sobre a Tabela 1, temos um valor máximo de vazão (16 l/min) que deve ser obtido quando o motor atinge sua velocidade máxima requisitada pelo sistema, de 2000 rpm a uma pressão de 150 bar.

### 3.2 REQUISITOS DO SISTEMA DE DIREÇÃO ELÉTRICO

O sistema de direção elétrica assistida, além de ser um componente de extrema prioridade no quesito segurança para o veículo, ele ainda precisa seguir alguns requisitos normatizados para seu funcionamento:

- Rápida resposta
- Torque quando requisitado
- A direção necessariamente deve voltar para sua posição central quando não acionada
- O sistema de direção deve absorver determinados níveis de irregularidades da pista, visando elevar o conforto para o motorista

O sistema de direção elétrica assistida tem a tarefa de otimizar os movimentos do volante quando acionada, facilitando a dirigibilidade do veículo. Esse sistema é realizado através da transferência de movimentos do volante para a coluna de direção, que por sua vez, comanda a caixa de direção. A bomba, acionada através do motor elétrico, fornece a pressão hidráulica necessária para caixa de direção, como pode ser visto na Figura 6.



Figura 6 – Motor elétrico e servo bomba  
Fonte: Christian Anderson, 2015.

### 3.3 ESPECIFICAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

Nesta seção será apresentado o levantamento dos principais componentes utilizados no sistema EHPS. Além da descrição técnica e dimensionamento de cada componente, suas características de funcionamento e as principais vantagens em relação aos sistemas convencionais.

#### 3.3.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

A energia utilizada pela bomba em um sistema de direção elétrica assistida é fornecida por um motor elétrico ligado a bateria do veículo. Enquanto no sistema de direção hidráulico convencional a energia consumida pela bomba é constante devido à ligação direta ao eixo do motor propiciada pelo conjunto de polia e correia, para o sistema de direção elétrica assistido o funcionamento é intermitente e controlado a partir da necessidade do motorista em realizar a manobra, Nacif (2014).

O motor deve ser dimensionado a partir do modelo de bomba que será utilizado para suprir as necessidades do sistema. A bomba necessária para essa utilização será tratada no Capítulo 4.1.4. Por hora, é necessário saber que será utilizado uma bomba de pressão ajustada de 150 bar, vazão de 16 l/min, eficiência volumétrica de 97% e eficiência mecânica de 92%.

Utilizando a Equação 1 para o cálculo de potência dissipado pela bomba então:

$$P_{bomba} = \frac{p \cdot Q}{600 \cdot n_T} [kW] = \frac{(150 \text{ bar}) \cdot (16 \frac{l}{min})}{600 \cdot (0,97 \cdot 0,92)} = 4,48 \text{ kW} \quad (1)$$

onde a eficiência total é dada pela Equação 2:

$$n_T = n_V \cdot n_M \quad (2)$$

O sistema hidráulico então necessita de uma potência de 4,48 kW. Considerando que a eficiência do motor de indução trifásico é de 83%, tem-se a partir da Equação 3 a potência dissipada pelo motor elétrico trifásico:

$$P_{(motor\ de\ indução)} = \frac{P_{(bomba)}}{0,83} = 5,3\ kW \quad (3)$$

Para esse projeto, conforme dimensionamento otimizado, será utilizado um motor de indução trifásico assíncrono, com tensão nominal de 19 Vac e potência de 5,3 kW. A Figura 7 mostra uma foto deste motor.

O motor de indução foi escolhido devido as vantagens que apresenta em relação ao motor de corrente contínua. O motor trifásico foi dimensionado para atingir a potência necessária para o funcionamento ideal da bomba hidráulica, isso consiste em manter a vazão de óleo máxima do sistema em 16l/min à uma rotação de 2000 rpm.

Responsável pelo auxílio no direcionamento das rodas dianteiras, o motor elétrico, proporciona então, um maior conforto para o motorista quando realiza o esterçamento do volante, não podendo ultrapassar um esforço máximo aplicado pelo motorista de 200N para realizar um raio de 12m conforme a norma europeia ECE – homologation (70/311/EEC – 1999/7/EC).

Os principais dados do motor de indução trifásico dimensionado para o sistema de direção assistida proposto são:

- Potência nominal trifásica 5,3 kW
- Tensão de entrada 19 Vac
- Rotação nominal 1750 rpm
- Grau de proteção IP 66
- Fator de potência  $\cos \varnothing$  0,83
- Regime de serviço S3 15% ED
- Encoder incremental 15V
- Termistor PTC 180°C
- Fator de serviço FS 1.00



Figura 7 – Motor de indução trifásico 5,3kW  
Fonte: Catálogo de Inversores automotivos WEG, 2013

O motor possui em sua construção uma massa reduzida devido a sua construção ideal para veículos elétricos. Sua carcaça é confeccionada em alumínio e torque constante, especialmente desenvolvido para esse tipo de aplicação.

A principal função do motor é manter o fluxo de óleo e pressão do sistema de acordo com todos requisitos para condução do veículo, no qual, variam de acordo com a velocidade do veículo e ângulo de esterçamento do volante. O motor é um escravo do sistema, sem possuir autonomia, toda sua operação é coordenada e monitorada pelo inversor. Basicamente, o motor recebe a informação de rotação e rampas de aceleração e desaceleração no qual deve operar, fica responsável então, por enviar a resposta de rotação ao inversor através do sinal do encoder, de resolução 256 pulsos/revolução, e o torque que está sendo aplicado na bomba. O motor é responsável também por informar falhas a ele relacionadas, seu status de funcionamento e dos demais componentes instalados nele (encoder e termistor PTC), bem como, a temperatura de operação. Na Figura 8 é possível verificar, através do diagrama, o funcionamento do conjunto.

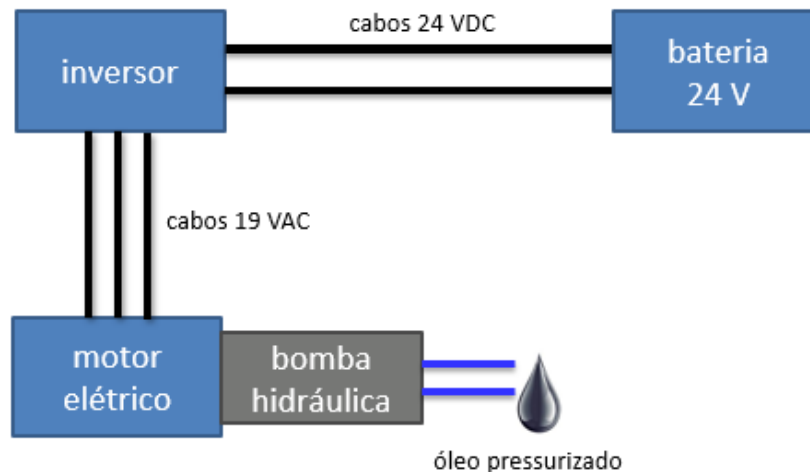


Figura 8 – Sistema de direção elétrica  
 Fonte: Autor, 2015.

Existe ainda dois componentes que são acoplados ao motor com funções específicas, são eles: o termistor que informa a temperatura do motor para a unidade de controle, e o encoder, que informa a velocidade de rotação do motor elétrico, de forma que o controle é realizado através de uma malha fechada.

#### **a) *Thermistor acoplado ao motor***

O thermistor instalado no motor é um dispositivo feito de materiais semicondutores, cuja resistência varia acentuadamente com a temperatura. Possuem tamanho reduzido, não sofrem desgaste mecânicos e tem uma resposta mais rápida em relação a outros detectores. O thermistor utilizado é do tipo PTC (coeficiente de temperatura positivo).

A brusca variação da resistência interrompe a corrente no PTC realizando o desligamento do circuito principal do sistema de direção, quando este, atinge a temperatura de 180°. Com temperatura de 150°, um código de falha é enviado ao painel do veículo como alerta de sobre aquecimento do sistema.

#### **b) *Encoder Incremental acoplado ao motor***

O encoder incremental 15V instalado ao motor, reproduz 256 pulsos por revolução a partir do movimento de rotação de seu eixo. Como está instalado dentro do motor, seu grau de proteção e níveis de vibração segue as mesmas características do motor.

O encoder é utilizado para enviar a resposta de velocidade de rotação do motor em uma malha de controle fechada. Sua resposta de rotação ainda é utilizada para o cálculo do torque pelo inversor. Mas como a necessidade da aplicação não requer uma grande precisão nem a posição angular do motor como resposta, foi definido utilizar um encoder ao invés de um resolver.



### 3.3.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Conforme catálogo, “Inversor de Frequência para Tração Elétrica” (2015), os inversores de frequência para tração elétrica, são direcionados para o mercado de veículos elétricos, sendo específicos para o controle de motores de indução trifásicos de baixa tensão, permitindo aplicações com tensões de baterias de 24 a 72 Vcc para sua alimentação. A Figura 9 mostra uma foto deste inversor.

Os principais dados do inversor dimensionado para o sistema de direção assistida proposto são:

- Tensão de alimentação 24 – 72 Vcc
- Tensão de saída  $V_{cc} / \sqrt{2}$
- Corrente de saída nominal 200 A
- Corrente de saída de pico de 400 A (2 min.)
- Frequência de chaveamento 10 kHz que permite uma operação silenciosa
- Grau de proteção IP66 para ambientes agressivos
- Temperatura de funcionamento -20°C até 50°C
- Controle vetorial com encoder
- Interface CAN (*Controller Area Network*)



Figura 9 – Inversor automotivo CVW300  
Fonte: Catálogo de Inversores automotivos WEG, 2013.

O inversor converte a tensão de alimentação de 24 Vcc da bateria do veículo em 19 Vac trifásico para alimentação motor da direção.

Através do barramento de comunicação CAN, o inversor recebe a mensagem de rotação em rpm no qual a bomba deve operar. Esta mensagem é enviada pela unidade de controle do veículo, responsável pelo sistema de direção, que utiliza a velocidade do veículo e ângulo de esterçamento do volante como variáveis para determinar o valor de rotação da bomba. O inversor então, interpreta a mensagem e realiza o controle de potência do motor elétrico através de uma tensão variável de 0 a 19 Vac.

A Figura 10 apresenta o sistema de controle realizado pela unidade de controle e transmitida para o Inversor através do barramento CAN, este por sua vez, alimenta o motor elétrico de acordo com o valor especificado, seguindo os parâmetros determinado para cada função.

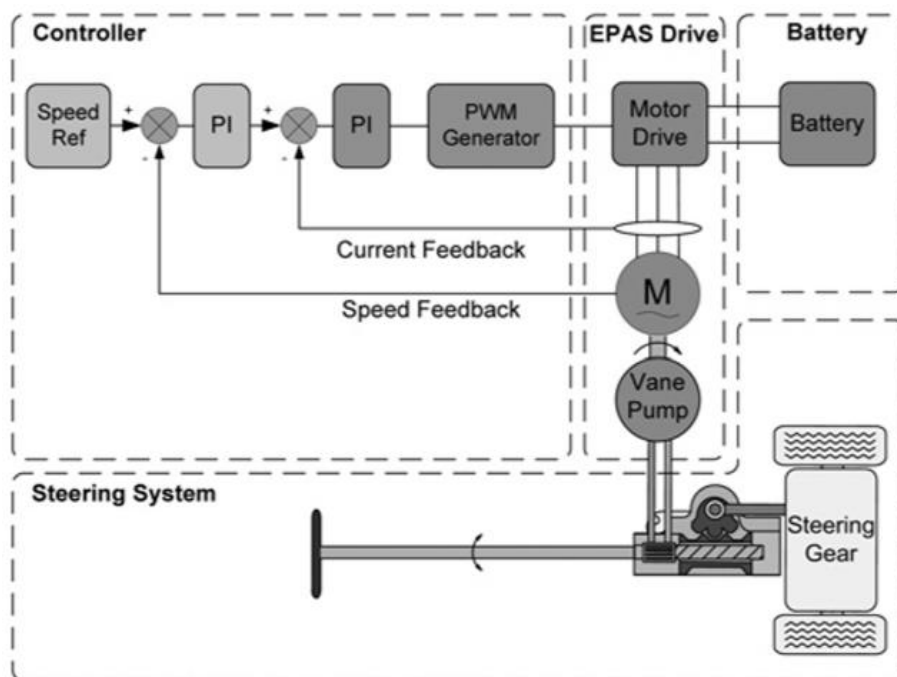


Figura 10 – Modelo de controle do sistema de direção  
 Fonte: Christopher Morton, Christopher M. Spargo e Volker Pickert, 2014.

O inversor monitora o sistema de direção e pode estabelecer um valor pré-programado para assegurar o fornecimento de energia para o motor elétrico no caso da ocorrência de uma falha. Sua construção é desenvolvida para suportar condições climáticas rígidas, podendo ser instalado externamente ao veículo.

### 3.3.3 PROGRAMAÇÃO E CONTROLE PID

A programação e parametrização do inversor é realizada através do software WLP (*WEG Ladder Programmer*) disponível no website da WEG para download. A linhas de programação não serão disponibilizadas neste estudo por se tratar de um conteúdo confidencial.

Neste caso, será apresentado somente alguns requisitos a serem considerados para a programação do inversor, a saber:

- Arranjo Paralelo.
- Degrau como sinal de entrada.
- Rampa de aceleração de 20ms. Acionando o volante o motor deve atingir a rotação solicitada pela Unidade de controle.
- Rampa de desaceleração de 6000ms. Sem o acionamento do volante, o motor deve atingir a rotação de 500 rpm (depende do status do veículo) com o intuito de reduzir o consumo de energia.
- Manter a rotação solicitada pela unidade de controle do veículo.

Caso o veículo esteja estacionado e sem acionamento do volante, o motor elétrico desliga reduzindo o consumo de energia.

A Figura 11 mostra a tela de programação do software. Nela pode ser observado que a programação é realizada em *Ladder*, utilizando blocos de funções. A programação do inversor é condicionada a efetuar os comandos de acordo com sua parametrização (especificado pelo sistema de direção) e ainda, enviar os códigos de falhas para a unidade de controle do veículo.

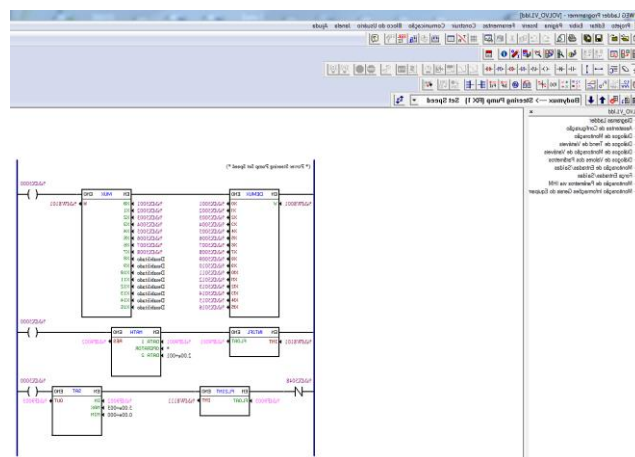


Figura 11 – Software WLP  
Fonte: Software WEG LADDER PROGRAMMER (WLP), 2015.

### 3.3.4 SERVO BOMBA

A Figura 12 mostra o ciclo interno da bomba. O sistema de direção elétrica utiliza uma bomba de engrenagens para pressurização do óleo no sistema hidráulico. Acoplada diretamente ao motor elétrico, as engrenagens entram em funcionamento, gerando uma pressão negativa no lado de sucção da bomba. O óleo do reservatório é sugado para dentro da bomba, então através das engrenagens, o óleo, sob pressão, é transportado para o sistema.

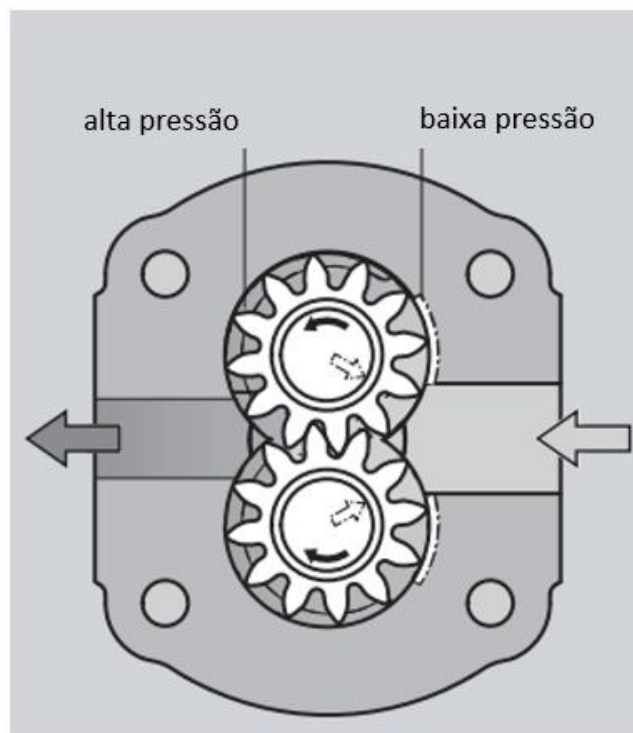


Figura 12 – Fluxo de óleo da Servo bomba  
Fonte: Adaptado do catálogo Haldex, 2009.

A carcaça da bomba é constituída de uma liga de alumínio com elevada resistência a tração e peso reduzido, já o eixo e as engrenagens são confeccionados em ferro fundido. Para otimizar a força e evitar quebra, as engrenagens e o eixo são usinados em uma só peça. A geometria dos dentes das engrenagens reduz os pulsos de pressão na bomba e conseqüentemente, reduz em aproximadamente 75% o ruído durante o trabalho. Na Figura 13 pode ser visto a comparação entre a bomba de pulsos reduzidos e uma bomba padrão.

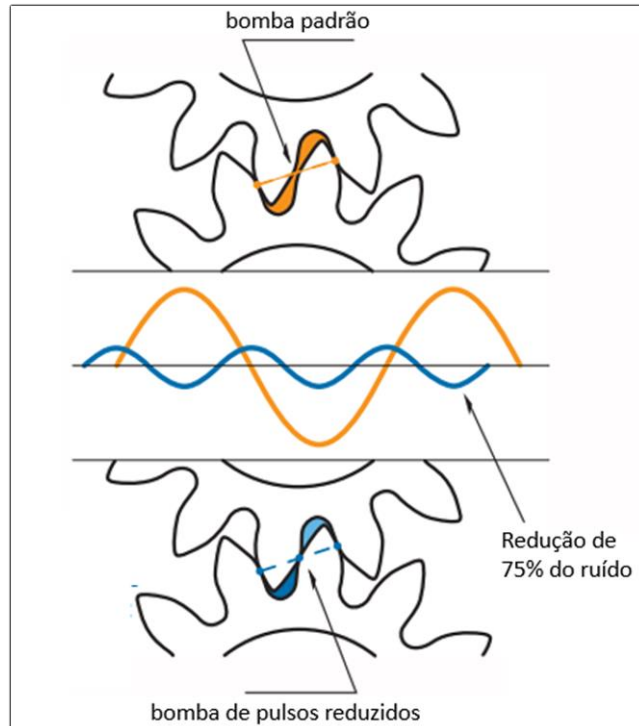


Figura 13 – Engrenagens Servo bomba  
 Fonte: Adaptado do catálogo Haldex, 2009.

A Figura 14 mostra uma foto da servo bomba. Ela deve agir rapidamente quando solicitada, atingindo a pressão correta determinada pelo sistema. Seu dimensionamento é compacto, em torno de 8 cm<sup>3</sup>.



Figura 14 – Servo bomba  
 Fonte: Catalogo Bosch Rexroth, 2015.

A vazão máxima para o modelo proposto é de 16 l / min com uma pressão máxima de 150 bar, conforme especificado para o bom funcionamento do sistema de direção. A bomba utilizada apresenta uma pressão máxima de 250 bar, mas a pressão pode ser reduzida de acordo com cada aplicação, basta utilizar um redutor de pressão na linha hidráulica. Para o modelo em estudo, foi reduzido a pressão máxima para 150 bar.

À medida que o motor elétrico varia sua rotação, a bomba acompanha diminuindo ou aumentando a pressão do sistema, chegando a uma pressão mínima de 5 bar com o motor funcionando em rotação reduzida. No gráfico da Figura 15, é representado a curva de pressão da bomba em relação a rotação (considerar a curva na cor azul).

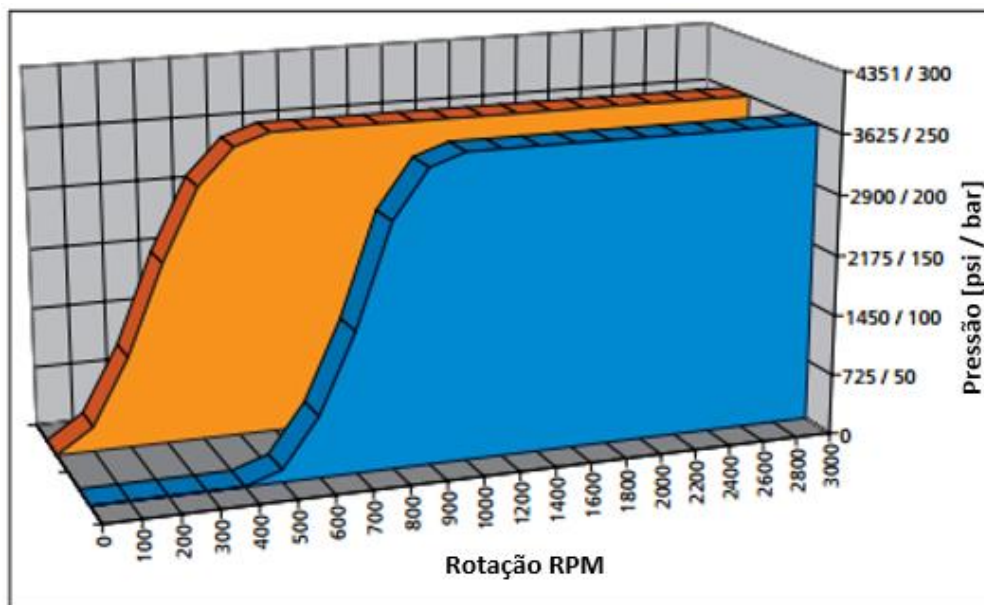


Figura 15 – Gráfico Pressão x rpm  
Fonte: Adaptado Catálogo Haldex, 2009.

Na Tabela 2 é apresentada o range de operação da bomba de acordo com a sua especificação. Para o sistema em estudo foi utilizado a de vazão 8.3 cm<sup>3</sup>/rev, obtendo assim, os 16 l/min com 2000 rpm.

Tabela 2 – Funcionamento da bomba

<b>SERVO BOMBA COM BAIXA EMISSÃO DE RUÍDO</b>				
Código (vazão)	Vazão (cm <sup>3</sup> /rev)	Pressão (bar)	Rotação máxima (rpm)	Rotação mínima (rpm)
060	6.2	250	4000	500
<b>080</b>	<b>8.3</b>	<b>250</b>	<b>4000</b>	<b>500</b>
110	11.3	250	3600	500

Fonte: Adaptado catálogo Haldex, 2009.

### 3.3.5 SENSOR ANGULAR DA DIREÇÃO

A Figura 16 mostra uma foto do sensor angular da direção. Para medir a rotação angular, velocidade angular e o sentido volante de direção do veículo, o sistema de direção elétrica utiliza os sinais do sensor de ângulo de rotação de direção. Montado diretamente na coluna da direção, o sensor define o exato direcionamento que o motorista deseja. Esses dados podem ser utilizados tanto para o sistema de direção, como para o sistema de suspensão, sistema de estacionamento e direcionamento dos faróis nas curvas.

O sensor é responsável por enviar, através no barramento CAN, a mensagem de número de voltas e posição angular da direção para a ECU responsável do sistema de direção. Esta, por sua vez, calcula a velocidade de movimento da direção e envia uma nova mensagem pelo mesmo barramento CAN para o inversor, solicitando a rotação adequada de rotação.



Figura 16 – Sensor angular da direção  
Fonte: Catálogo Bosch, 2009.

### 3.4 PROGRAMAÇÃO E PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR

A comunicação do inversor com a unidade eletrônica de controle (ECU) do veículo é realizada através de um protocolo de comunicação CAN. Assim, é possível o envio de mensagens de velocidade do veículo e ângulo da direção para a unidade de controle do veículo, que por sua vez calcula essas informações e envia para o inversor as mensagens de rotação, rampa de aceleração e rampa de desaceleração. O inversor então, por meio do barramento CAN também, retorna com a velocidade de rotação do motor e torque, bem como, com o diagnóstico de falhas. Como pode ser visto na Figura 17.

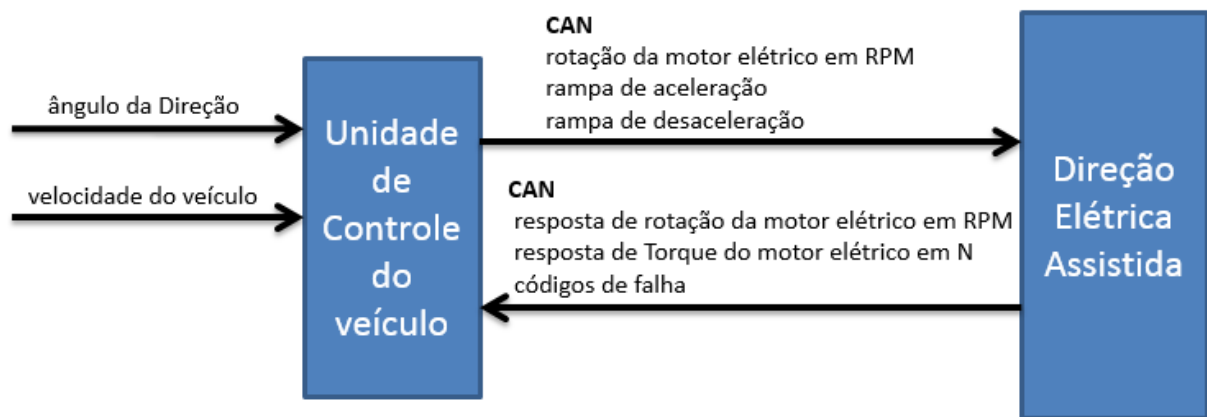


Figura 17 – Diagrama de blocos de comunicação  
Fonte: Autor, 2015.

O protocolo CAN, inicialmente desenvolvido para aplicação automotiva, realiza a comunicação entre as unidades de controle e dispositivos do veículo através de um único barramento.

Além das mensagens enviadas no barramento, o protocolo CAN é utilizado para programação das unidades de controle e dispositivos conectados ao barramento, bem como, a transmissão dos códigos de falha dos equipamentos conectados à rede.



## 4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo será realizado a montagem dos componentes que constituem o sistema de direção elétrica assistido. Além da montagem do modelo proposto será apresentado os resultados dos testes e simulações realizados no veículo protótipo com o sistema de direção elétrica assistida e comparado com o sistema com o sistema hidráulico convencional.

Será apresentado ainda, o comportamento das grandezas que envolvem o sistema proposto. Os valores foram obtidos durante os testes realizados com o funcionamento do veículo.

### 4.1 MONTAGEM DO SISTEMA

Primeiramente a montagem do protótipo do sistema de direção elétrica assistida foi realizada diretamente em um chassi de ônibus híbrido, a fim de verificar o funcionamento dos componentes e a comunicação entre eles e entre o sistema como um todo do veículo.

Nesta etapa foi ainda toda a configuração, parametrização e otimização do sistema de direção. Onde as rampas de aceleração e desaceleração foram trabalhadas para que apresentem o valor especificado conforme os requisitos. A configuração dos códigos de falhas do sistema também foi realizada nesse momento, tanto os códigos de falhas que o inversor recebe da unidade de controle do sistema, quando os enviados para o veículo. E por fim, realizado os testes preliminares de funcionamento do sistema como um todo.

Na Figura 18 é apresentado a instalação do motor elétrico próximo a base da direção do veículo. Na figura pode ser visto que o conjunto é fixo diretamente no chassi do veículo, garantindo uma melhor superfície de contato e menor vibração, uma vez que o conjunto motor/bomba possui aproximadamente 30Kg. O motor, apesar de compacto para uma potência de 5,3kW, ocupa uma área relevante, é necessário um estudo para determinar sua melhor posição para instalação, evitando o desperdício de espaço e comprimento de cabos.



Figura 18 – Instalação do motor elétrico e reservatório hidráulico  
 Fonte: Autor, 2015.

Nota-se nas Figuras 19 e 20, que a instalação do inversor não é realizada próximo ao motor. Por motivos de fixação e área disponível, a montagem do inversor é realizada a uma distância de 3 metros do conjunto motor/bomba. A conexão entre eles é dada através dos cabos de alimentação e do chicote elétrico.

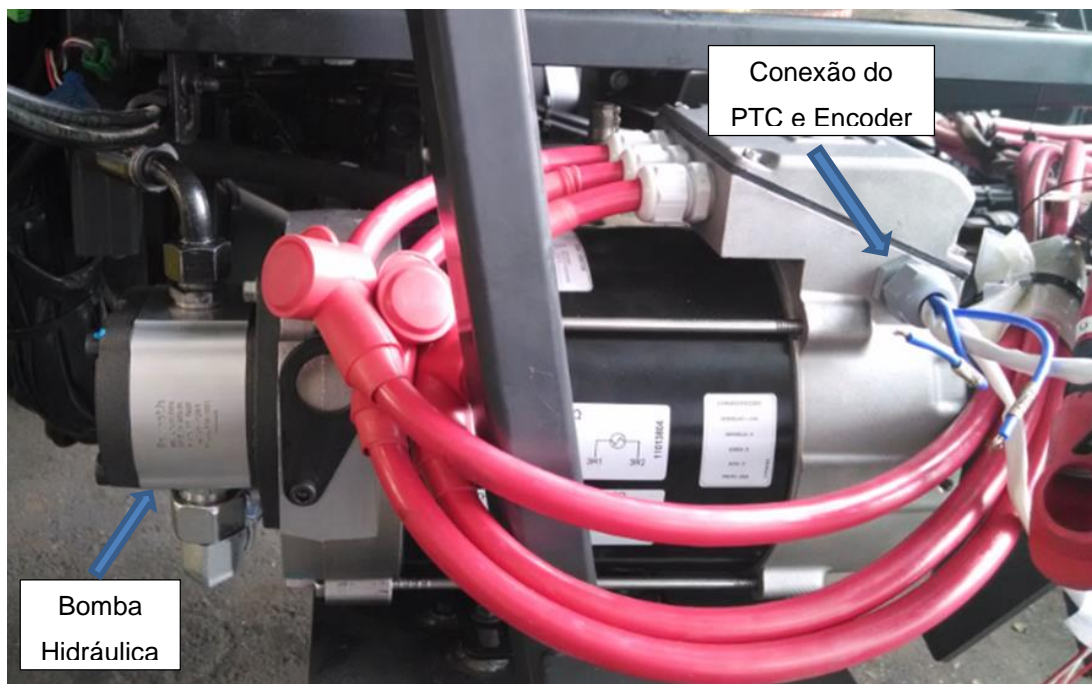


Figura 19 – Bomba hidráulica acoplada ao motor elétrico  
 Fonte: Autor, 2015.

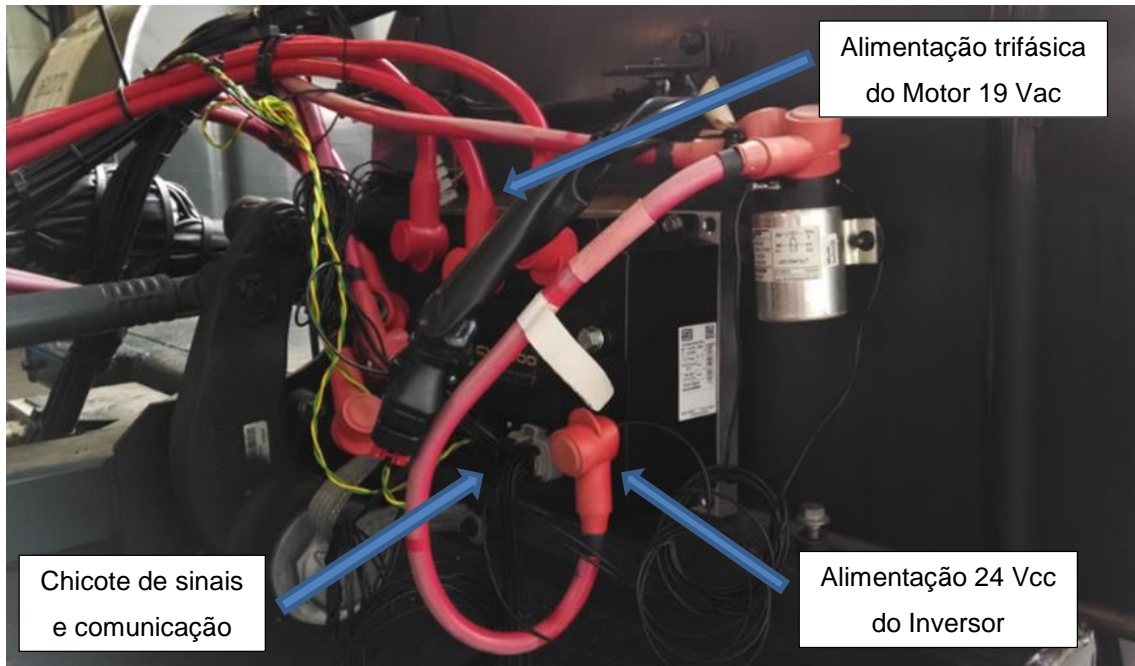


Figura 20 – Instalação do Inversor  
Fonte: Autor, 2015.

## 4.2 RESULTADOS OBTIDOS

Em uma segunda etapa do trabalho, agora com foco maior na aquisição dos dados do sistema de direção proposto, foi mensurado as grandezas e valores necessários para realizar a análise dos resultados. O objetivo nesta fase de desenvolvimento é trabalhar para otimização do sistema e obter seu melhor desempenho.

Os dados apresentados a seguir foram obtidos através do protocolo de comunicação do veículo CAN durante a realização dos testes. Os testes abrangem tanto o veículo em marcha lenta como com o veículo em movimento.

Em uma terceira etapa, que não é contemplada nesse trabalho, mede-se o esforço aplicado pelo motorista no volante da direção (teste não foi realizado até o momento).

Os seguintes testes foram realizados para aquisição de dados e análise dos resultados:

- Teste na pista com o veículo em movimento
- Com o veículo em movimento, realizar o esterçamento brusco do volante para direita e esquerda
- Realizar percurso em forma de “8”
- Com o veículo em marcha lenta, realizar o esterçamento do volante até o fim de seu curso
- Medição da rampa de aceleração e desaceleração
- Simulação dos códigos de falhas

Para facilitar o entendimento, as Figuras 21, 22, 23 e 24 foram divididas em diferentes gráficos para apresentar as unidades de medida em análise, mas devem ser interpretadas como um único registro de dados (mesmo intervalo de tempo), ou seja, para cada Figura, os gráficos constituem um único teste realizado de acordo com a legenda da Figura em questão.

No gráfico da Figura 21 é apresentado o teste realizado em uma pista de testes. Foi realizado o circuito completo da pista, é apresentado então, de forma simultânea e, em diferentes gráficos, a velocidade do veículo em km/h, o ângulo do volante em radianos, a rotação do motor elétrico da direção em rpm e o seu torque em Nm.

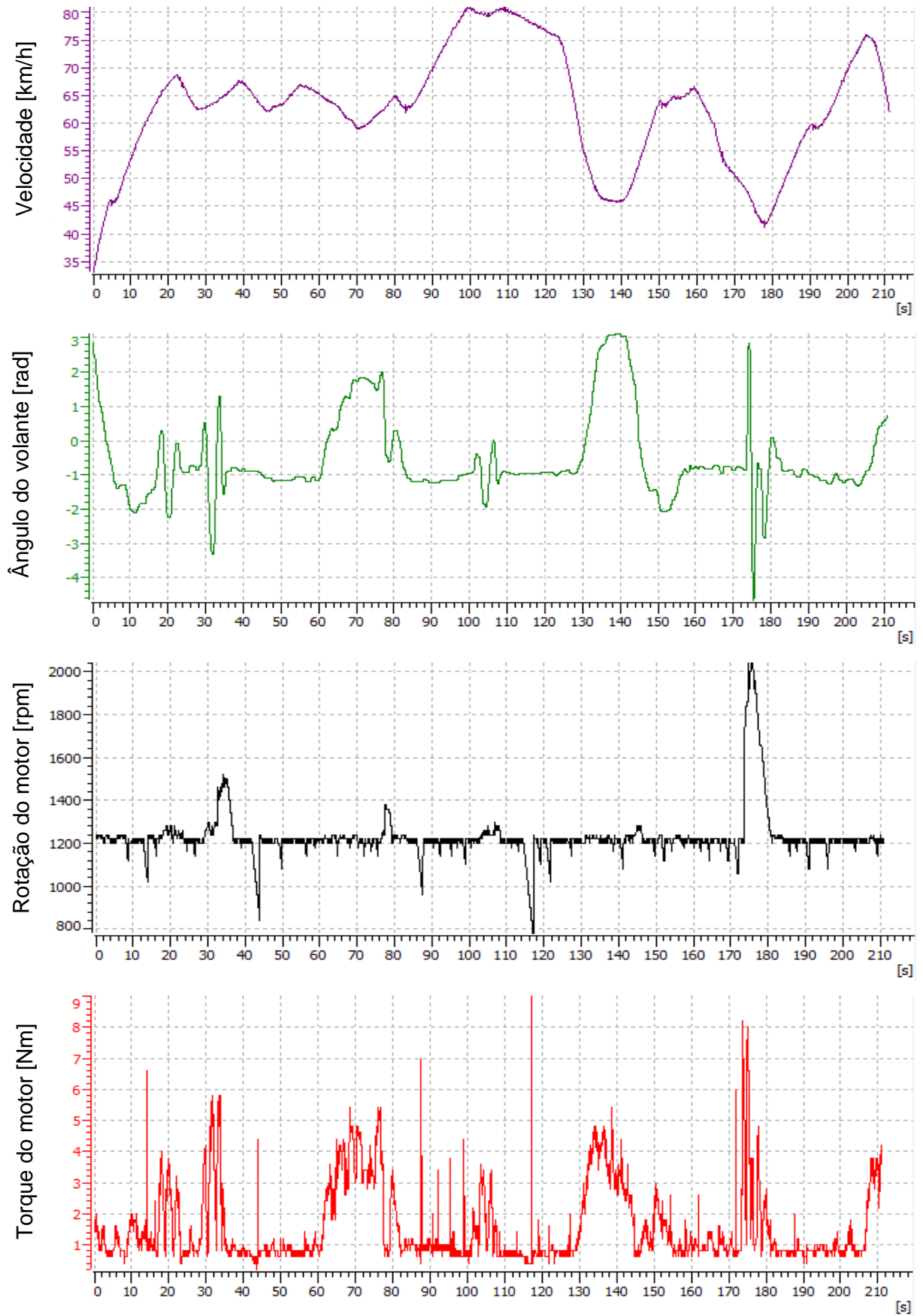


Figura 21 – Gráfico com aquisição dos dados do percurso na pista de testes  
Fonte: Autor, 2015.

Ainda referente ao teste realizado e apresentado na Figura 21, pode-se analisar o funcionamento estável do sistema de direção proposto, atingindo uma velocidade máxima de 80 km/h do veículo. Observa-se que, tem-se um sistema de direção confiável e que acompanha as reações de movimento do volante, mantendo o torque necessário para o bom funcionamento do sistema sem apresentar sobrecarga do sistema em um funcionamento normal. O torque nesse caso, não ultrapassa o valor de 9Nm independente da velocidade do veículo e rotação do motor elétrico da direção.

No tempo aproximado de 175 segundos, tem-se o movimento do volante da direção para os ambos os lados, realizando uma curva em “s”. Como se trata de uma curva normal para o sistema e não de uma manobra brusca, pode-se notar que a rotação do motor se eleva para 2000rpm, mas o torque do motor mantém-se controlado em 8Nm.

No gráfico da Figura 22 é apresentado o teste referente a virada brusca do veículo. Em determinados pontos o movimento radial do volante em até 12 rad (tempo 234 s), de modo que o sistema de direção necessita então elevar sua rotação para manter a pressão do sistema de óleo e o funcionamento adequado do sistema sem apresentar falhas. É muito importante, para o bom funcionamento do sistema de direção assistida, que o nível de óleo esteja sempre no nível recomendado evitando perdas na eficiência do sistema.

Analisando ainda o gráfico da Figura 22, no tempo de 210 s, tem-se uma parada do veículo no qual é aplicado o freio de estacionamento. Neste caso, como esperado, o motor da direção automaticamente entra em estado de repouso, chegando a 0 rpm após os 6s conforme a rampa de desaceleração programada anteriormente no software do inversor. O motor retorna somente quando o volante é acionado novamente, reduzindo assim, o consumo de energia do sistema. Aqui tem-se uma das vantagens desse modelo comparado com o sistema convencional, pois somente quando se faz necessário, o motor do sistema de direção elétrico entra em funcionamento, ao contrário do sistema convencional, que acoplado diretamente ao motor de tração, sempre realiza o trabalho de pressurizar o óleo para o sistema hidráulico independente da necessidade. Quando não há essa necessidade, o óleo pressurizado acaba retornando para o reservatório, em outras palavras, consome potência mesmo sem a necessidade de realizar trabalho.

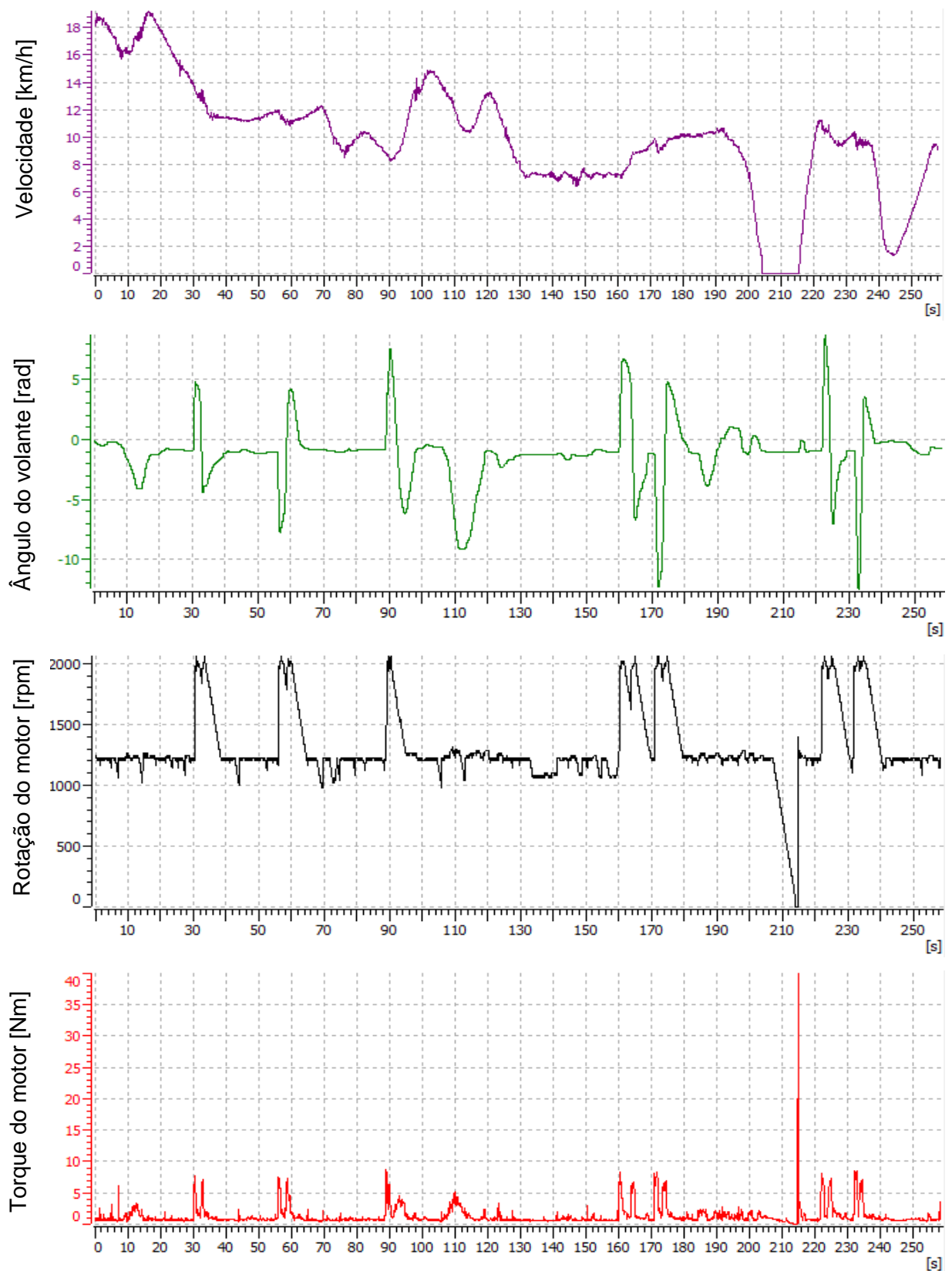


Figura 22 – Gráfico com aquisição dos dados de movimentos bruscos do volante, direita e esquerda  
Fonte: Autor, 2015.

No gráfico da Figura 23 pode ser verificado o circuito realizado em formato de 8, através do registro do ângulo da direção que varia de -17 a 17 radianos. Pode-se notar que tanto a rotação do motor elétrico como seu torque são elevados quando o movimento de rotação angular da direção aproxima-se das suas extremidades, onde ocorre o maior esforço do sistema.

Já no gráfico da Figura 24 o teste é realizado com o veículo em marcha lenta (estacionado), tem-se um maior atrito entre pneus com o solo. Neste teste é realizado o movimento de rotação o volante até ambas suas extremidades para verificar o comportamento do sistema. Lembrando que quando o volante chega em seu ângulo de rotação máximo, a válvula de alívio entra em operação, não sobrecarregando a pressão no sistema hidráulico. Comparando com o torque do gráfico da Figura 21, no qual apresentava em média um torque de 4 Nm com o veículo em movimento, no gráfico da Figura 24, temos um torque bem mais elevado, em média, de 20 Nm, mas ainda dentro do esperado.



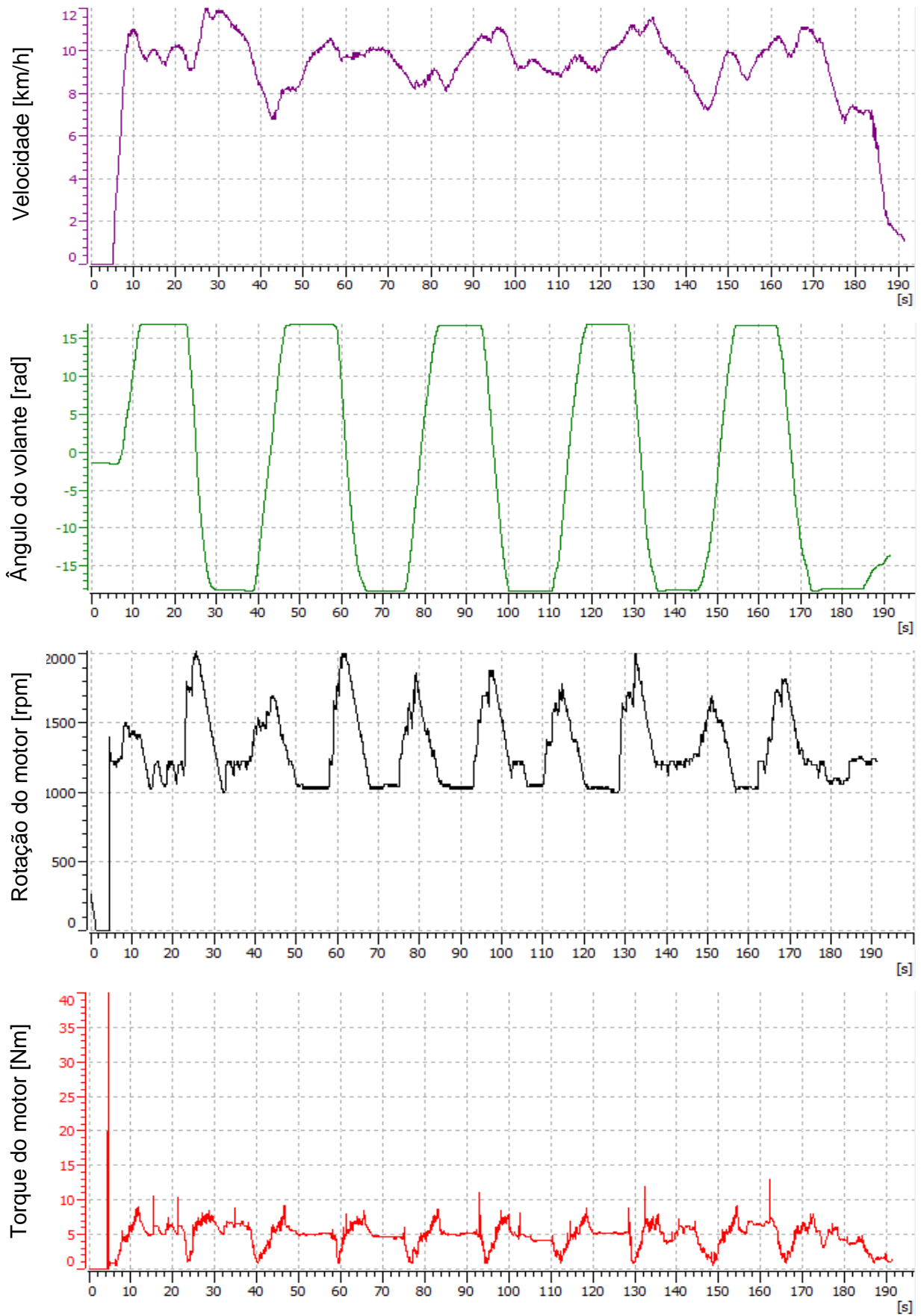


Figura 23 – Gráfico com aquisição dos dados do percurso “Circuito 8”  
Fonte: Autor, 2015.

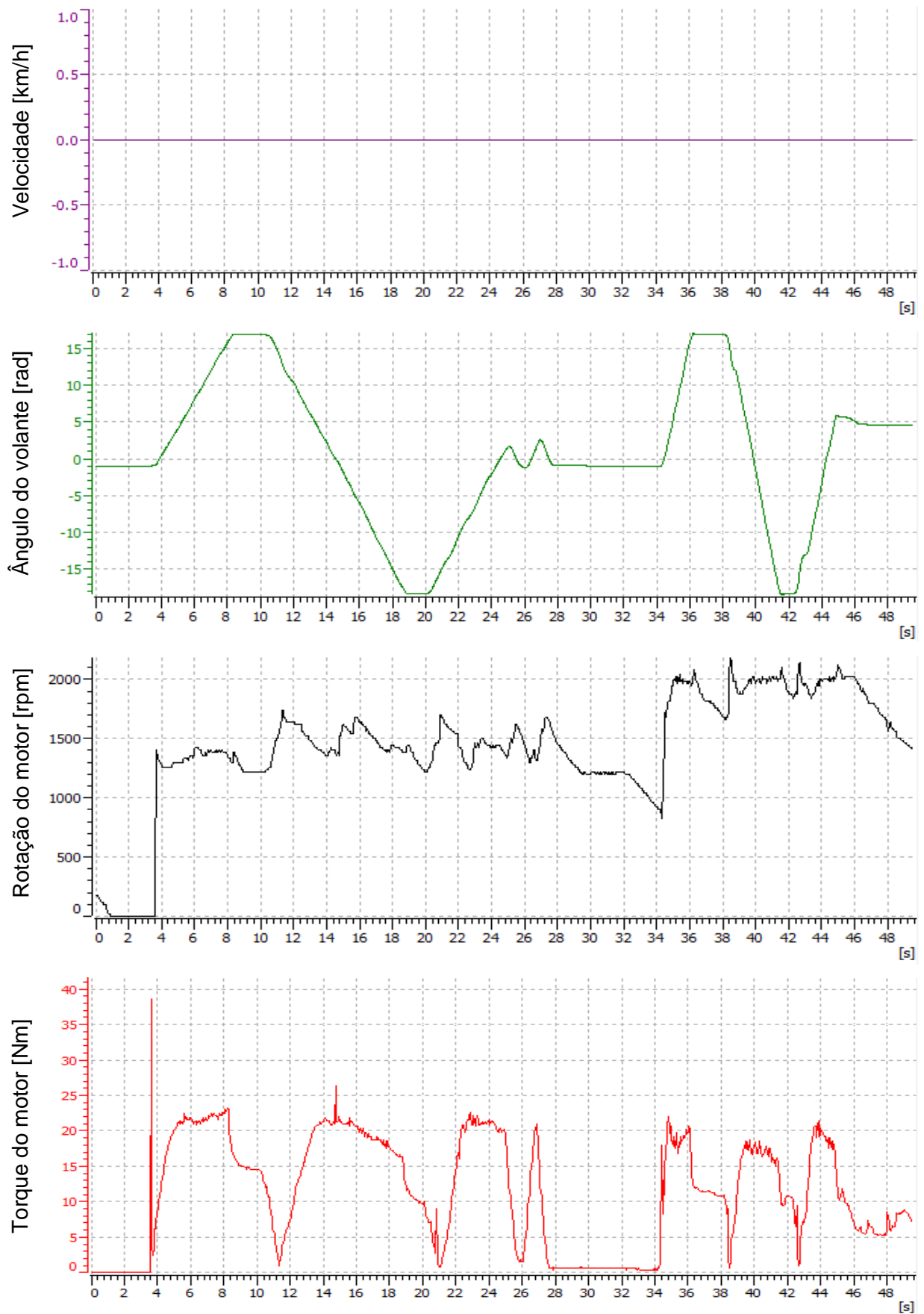


Figura 24 – Gráfico com aquisição dos dados de esterçamento do volante até o fim de seu curso  
Fonte: Autor, 2015.

Através da análise dos gráficos, pode ser visto que o sistema opera dentro das normas e requisitos exigidos. Portanto, o sistema de direção assistido proposto mantém-se estável e funcionando conforme o esperado.

No gráfico da Figura 25, pode ser visto os detalhes da rampa de aceleração com 20 ms e a rampa de desaceleração com 6 s, atingindo assim, mais um requisito do sistema de direção. No instante 3,2 s o sistema demanda pressão hidráulica para o sistema de direção, a rotação do motor elétrico então é elevada para 1200 rpm com uma rampa de aceleração instantânea de 20 ms. O mesmo ocorre quando o sistema requisita a redução de pressão do sistema ou até mesmo sua parada. Como também pode ser visto ainda no gráfico da Figura 25, no instante 5,5 s, o sistema hidráulico não está em funcionamento, é então solicitado pela unidade de controle a rotação de zero rpm do motor elétrico. O controle de desaceleração é então acionado, reduzindo para 0 rpm com uma rampa de desaceleração de 6s.

Um novo acionamento do volante da direção faz com que o sistema retorne novamente ao seu funcionamento com uma rampa de 20 ms, independente da rotação solicitada pela unidade de controle.



Figura 25 – Rampa de aceleração e desaceleração  
Fonte: Autor, 2015.



**a) Obtenção dos valores do sistema EHPS:**

A curva de potência instantânea dissipada do sistema EHPS foi obtida a partir da equação abaixo, utilizando os dados de rotação do motor elétrico e seu torque, valores adquiridos durante o percurso realizado.

A Equação 4 refere-se a potência dissipada do sistema EHPS, onde o valor de torque e rotação são obtidos em função do tempo:

$$P \text{ dissipada}_{(t)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{(t)} \cdot T_{(t)}}{60 \cdot 1000} [kW] = P \text{ dissipada } kW \quad (4)$$

Onde:

$n$  = rotação do motor elétrico em [RPM]

$T$  = torque em [Nm]

**Obtenção dos valores do sistema HPS:**

Utilizando a vazão teórica constante de 21 cm<sup>3</sup>/rev do sistema de direção hidráulica convencional, e a relação entre a rotação do motor de tração e a bomba hidráulica, foi possível levantar a curva de potência dissipada do sistema HPS. A partir do cálculo da pressão, volume e eficiência da bomba, foi considerado uma bomba com eficiência de 92%, tanto para eficiência mecânica, como volumétrica.

A Equação 5 refere-se a potência dissipada do sistema HPS em função do tempo:

$$\begin{aligned} P \text{ dissipada}_{(t)} &= \frac{p \cdot Q}{600 \cdot n_T} [kW] \\ &= \frac{(p_{(t)}) \cdot ((0,021 dm^3 / rev) \cdot (Rotação da bomba_{(t)}))}{600 \cdot (0,92 * 0,92)} = P \text{ dissipada } kW \end{aligned} \quad (5)$$

Onde:

$p$  = pressão do sistema hidráulico em [bar]

$Q$  = torque em [Nm]

$n_T$  = Eficiência da bomba ( $n_V \cdot n_M$ ) = (eficiência volumétrica \* eficiência mecânica)

No gráfico da Figura 27 é apresentado o gráfico com a potência dissipada para os dois sistemas ao longo do percurso realizado.

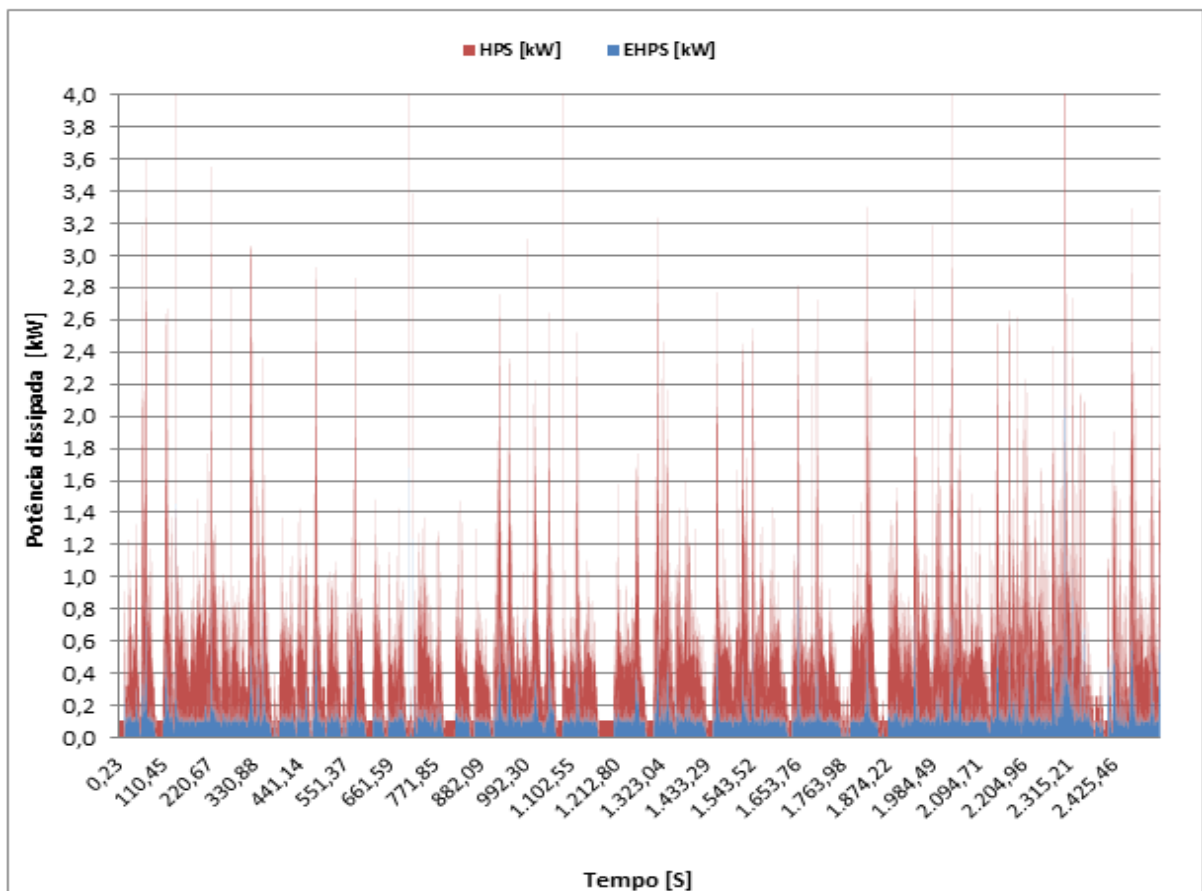


Figura 27 – Potencia dissipada pelo sistema de direção elétrica assistida  
Fonte: Autor, 2015.

No sistema HPS a rotação da bomba é diretamente proporcional à velocidade do motor. Isso significa, que independente da necessidade do sistema, a bomba mantém sua vazão teórica durante todo o percurso, mesmo quando a velocidade do motor é baixa, na maioria das situações, implicando em perdas desnecessárias.

O sistema EHPS, por se tratar de um sistema independente do sistema de tração, permite que a unidade de controle realize o controle da vazão e pressão necessária do sistema, sem desperdício. Em determinados pontos, pode ser

analisado ainda, que o motor elétrico não entra em funcionamento, pois não é sendo requisitado, reduzindo ainda mais a energia dissipada.

Comparando os dois sistemas então, o EHPS apresenta um menor consumo de energia em comparação com HPS, este, chegando a picos de 9 kW durante o percurso. A redução de energia dissipada é de aproximadamente de 69% durante o percurso urbano realizado, fazendo com que o modelo de direção proposto se torne atrativo em sua aplicação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de direção elétrica assistida, que comprovadamente, através dos dados analisados, reduz a demanda de potência requisitada. Consequentemente, reduz os níveis de emissões do veículo. Através dos testes realizados com o protótipo desenvolvido, foi possível realizar essa comprovação, alcançando assim, o objetivo geral do trabalho.

Com a especificação dos principais componentes utilizados para o sistema proposto, tais como: o dimensionamento do motor elétrico e a comunicação do sistema de direção com as demais unidades de controle do veículo, foram atingidas as metas dos objetivos específicos.

Reafirmando o sucesso dos testes realizados, dentre as inúmeras vantagens do sistema de direção elétrica assistida, a mais relevante comprovada neste trabalho, foi a alta eficiência na conversão de energia, aproximadamente de 69% em relação ao sistema hidráulico convencional. Proporcionando um projeto mais otimizado do motor de tração e de melhor performance, reduzindo o consumo de combustível, e consequentemente, os níveis de emissões.

Os resultados de eficiência alcançada, bem como a estratégia operacional que permite que o sistema EHPS seja controlado de acordo com a real necessidade, leva a uma redução significativa do consumo deste sistema, sem perdas de pressão e vazão para o sistema hidráulico.

Assim, pode-se considerar que o sistema de direção elétrica assistida, utilizando motor de indução trifásico, é um dos melhores sistemas a ser utilizado quando a aplicação necessita de um alto torque e alta eficiência energética.



## REFERÊNCIAS

ABVE. **Associação Brasileira do Veículo Elétrico**. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/>>. Acesso em: 10 maio 2015.

ANDERSSON, C. **On auxiliary systems in commercial vehicles**. 2004.

BEN. **Balanço Energético Nacional**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf)>. Acesso em: 20 junho 2015.

BOSCH REXROTH. **Vehicle Solution**. Disponível em: <<http://www.boschrexroth.com/ics/Vornavigation/VorNavi.cfm?Language=EN&DisplayType=tile&Region=none&VHist=Start%2Cp537304%2Cp537303&PageID=p542598>> Acesso em: 25 maio 2015.

BOSCH. **Steering Systems and Accessories for Commercial Vehicles**. Disponível em: <[http://www.bosch-automotive-steering.com/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/LENKSYSTEME\\_NKW\\_E.pdf](http://www.bosch-automotive-steering.com/fileadmin/_migrated/content_uploads/LENKSYSTEME_NKW_E.pdf)> Acesso em: 04 Novembro 2015

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202014.pdf>>. Acesso em: 20 junho 2015.

FERNANDES, A. M. **Estudos em Sistemas de Direção Veicular**. 101 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva) - Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HALDEX. **Hydraulic Systems**. Disponível em: <[http://www.hasmak.com.tr/haldex/Calma%20Pump\\_US\\_final082009.pdf](http://www.hasmak.com.tr/haldex/Calma%20Pump_US_final082009.pdf)> Acesso em: 09 maio 2015.

HONGDA, L. **Experiment and MATLAB Simulation of Electric Power Steering System Based on Permanent Magnet.** , p. 1228–1231, 2011.

KOZUMA, F.; ARITA, T.; TSUDA, H. **Development of Energy Saving Power Steering.** 6th JFPS International Symposium on Fluid Power, Tsukuba, p. 297-300, nov, 2005.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente.** Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_arquivos/ibama\\_cap\\_163.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/ibama_cap_163.pdf)>. Acesso em: 28 agosto 2015.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente.** Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/163/\\_publicacao/163\\_publicacao27072011055200.pdf/](http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf/)>. Acesso em: 17 abril 2015.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente.** Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE\\_atualizado%20em%2021nov13.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE_atualizado%20em%2021nov13.pdf)>. Acesso em: 28 agosto 2015.

MORTON, Christopher et Al. **Electrified hydraulic power steering system in hybrid electric heavy trucks.** Newcastle UK, Fevereiro 2014

NACIF, G. C. L. **Análise de Sistemas de Direção para Veículos Leves e o Impacto das Melhorias na Eficiência Energética no Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular.** 104 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2014.

NAVIGANT RESEARCH. **Electric Vehicles Transportation Efficiencies.** Disponível em: <<http://www.navigantresearch.com/research/electric-drive-trucks-and-buses>>. Acesso em: 09 maio 2015.

VOLVO. [www.volvobuses.com/bus/global](http://www.volvobuses.com/bus/global), Volvo bus manufacture, 2015

**WEG. Catálogo técnico Inversor de frequência para tração elétrica CVW300.** Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cvw300-inversor-de-frequencia-50041420-catalogo-portugues-br.pdf>> Jaraguá do Sul SC, 2015.

**WEG. Manual software Inversor de frequência para CVW300.** Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cvw300-manual-da-softplc-10002775146-manual-portugues-br.pdf>> Jaraguá do Sul SC, 2015.

**WEG. Soluções em propulsão e tração elétrica.** Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-solucoes-para-propulsao-tracao-eletrica-50042550-catalogo-portugues-br.pdf>> Jaraguá do Sul SC, 2015.