

RODRIGO SILVEIRA RODRIGUES

**ANÁLISE DA TECNOLOGIA HÍBRIDA HIDRÁULICA PARA FROTA DE  
CAMINHÕES NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO – ESTUDO DE CASO**

**CONSULTA  
FMP-186**

São Paulo

2010

OK

**RODRIGO SILVEIRA RODRIGUES**

**Análise da tecnologia híbrida hidráulica para  
frota de caminhões no Município de São Paulo –  
Estudo de Caso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do Título de Mestre Profissional em  
Engenharia Automotiva.

**Área de Concentração:**  
Engenharia Automotiva

**Orientador:**  
Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta

*São Paulo*

2010

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, pela força dada para enfrentar todas as dificuldades encontradas ao longo do curso e na realização deste trabalho.

Meu sincero agradecimento ao Professor Dr. Marcos de Mattos Pimenta, pelas instruções, ensinamentos e paciência nos trabalhos de orientação.

E em especial, a minha família e a Valéria, pelo apoio e paciência dado em todos os momentos.

## Resumo

O estudo de tecnologias para redução de emissões de poluentes em veículos é tema de varias frentes de pesquisas. Neste contexto, temos estudos direcionados para melhoria dos motores a combustão interna, desenvolvimento de veículos elétricos, híbridos, célula a combustível, motores de combustão interna com o uso de biomassas como fonte de energia e os sistemas híbridos hidráulicos. A pesquisa aborda a tecnologia hidráulica como uma possível solução para economia de combustível e redução de emissões para veículos pesados, que executam serviços submetidos a um ciclo urbano de para e anda. Assim sendo, foi elaborado um dimensionamento de um sistema híbrido hidráulico paralelo para um caminhão coletor compactador. Com informações das condições de trabalho do caminhão, foi possível analisar quantitativamente os benefícios que a tecnologia pode oferecer para uma frota de 180 caminhões. A pesquisa possibilita uma análise dos pontos de melhoria e propõe um anteprojeto de veículo utilizando esta tecnologia na cidade de São Paulo. A avaliação do estudo propõe para a sociedade paulistana, a introdução desta tecnologia como discussão e solução para redução de emissões e economia de combustível, melhorando desta forma, a qualidade de vida e economia de combustível do caminhão coletor compactador.

**Palavras-Chave:** Sistema híbrido hidráulico paralelo. Economia de combustível. redução de emissões.



**Janus**

Universidade de São Paulo

10

**RELATÓRIO DE DEFESA**

Aluno: 3149 - 6594842 - 1 / Página 1 de 1

Relatório de defesa pública de Dissertação do(a) Senhor(a) Rodrigo Silveira Rodrigues no Programa: Engenharia Automotiva, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 15 dias do mês de setembro de 2010, no(a) realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) Rodrigo Silveira Rodrigues, apresentada para a obtenção do título de Mestre intitulada:

"Análise da tecnologia híbrida hidráulica para frota de caminhões no município de São Paulo - estudo de caso"

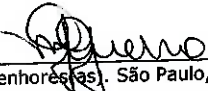
Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

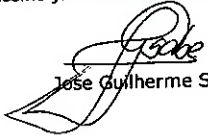
*Codpes/Un: 29942 PME*

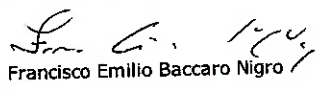
Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Marcos de Mattos Pimenta	Presidente	EP - USP	<i>Aprovado</i>
Jose Guilherme Sabe	Titular	EESC - USP	<i>Aprovado</i>
Francisco Emilio Baccaro Nigro	Titular	EP - USP	<i>Aprovado</i>

Resultado Final: APROVADO

**Parecer da Comissão Julgadora \***

Eu, Monica de Castro Santos Guerra , lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as) São Paulo, aos 15 dias do mês de setembro de 2010.

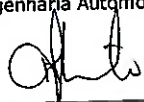
  
Jose Guilherme Sabe

  
Francisco Emilio Baccaro Nigro

  
Marcos de Mattos Pimenta  
Presidente da Comissão Julgadora

\* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em 18/10/2010 e, portanto, o(a) aluno(a) faz jus ao título de Mestre em Engenharia Automotiva obtido no Programa Engenharia Automotiva.

  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação  
Prof. Dr. Fernando José Barbin Laurindo  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

## **Abstract**

The study of technologies for reducing emissions of pollutants by vehicles is the subject of several research fronts. In this context, studies have been directed to improvement of internal combustion engines, development of electric vehicles, hybrids, fuel cell, internal combustion engines with the use of biomass as an energy source and the hydraulic hybrid systems. The research is about the hydraulic technology as a possible solution to fuel economy and emission reductions for trucks, which perform services subject to a urban cycle for urban with stop and go events. The research elaborated a design of a parallel hydraulic hybrid system for a refuse truck. Based on information regard the refuse work conditions, it was possible to quantitatively analyze the benefits that technology can offer a fleet of 180 trucks. The research provides an analysis of areas for improvement and proposes a draft vehicle using this technology in São Paulo city. The evaluation of the study proposes to São Paulo society, the introduction of this technology as a discussion and solution for reducing emissions and fuel economy, thus improving the quality of life and fuel economy for a refuse truck.

**Keywords :** Parallel Hydraulic Hybrid System. Fuel savings. Emissions reductions.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1 COMENTÁRIOS GERAIS.....	10
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	13
1.3 HIPÓTESES.....	13
1.4 JUSTIFICATIVA.....	14
1.5 OBJETO DE ANÁLISE.....	15
1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	15
<b>2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA</b> .....	17
2.1 DESENVOLVIMENTO DESORDENADO DOS GRANDES CENTROS URBANOS E A POLUIÇÃO.....	17
2.2 POLUIÇÃO - CLASSIFICAÇÕES E ÍNDICES.....	19
2.3 CONSTATAÇÕES DOS EFEITOS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM CENTROS URBANOS.....	23
2.4 CUSTOS ESTIMADOS À MORTALIDADE PROJETADA PELOS AGENTES POLUENTES – DIESEL.....	27
2.5 DECRETO 52469, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2007 – ESTADO DE SÃO PAULO.....	28
2.6 LEI 13798, DE 09 DE NOVEMBRO DE 2009 – ESTADO DE SÃO PAULO.....	30
2.7 CONSIDERAÇÕES RELATIVAS A POLUIÇÃO E SEUS EFEITOS.....	31
<b>3 TECNOLOGIA DE PROPULSÃO VEÍCULAR</b> .....	32
3.1 INTRODUÇÃO.....	32
3.2 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.....	32
3.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS.....	38
3.4 CÉLULAS COMBUSTÍVEIS.....	44
3.5 MOTORES MOVIDOS COM COMBUSTÍVEIS VERDES.....	46
3.6 TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES.....	49

<b>4 SISTEMAS HÍBRIDOS HIDRÁULICOS</b> .....	51
4.1 ASPECTOS GERAIS.....	51
4.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS HIDRÁULICOS.....	56
4.3 CASOS DE PROTÓTIPOS E VEÍCULOS COM TRAÇÃO HÍBRIDA HIDRÁULICA.....	61
4.4 DETALHAMENTO DE UM SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO PARALELO.....	67
4.4.1 Acumulador hidráulico em sistemas híbridos hidráulicos.....	68
4.4.2 Bomba hidráulica.....	74
4.4.2.1 Bomba hidráulica – Recuperando energia de frenagem do veículo e preenchendo os acumuladores.....	76
4.4.2.2 Bomba hidráulica – Atuação com função de motor, fornecendo torque ao sistema.....	77
4.4.2.3 Bomba hidráulica – Determinação do volume geométrico.....	81
4.4.3 Controle de torque em sistemas hidráulicos.....	82
4.4.4 Estratégias de gerenciamento da potência.....	87
4.4.4.1 Estratégias de gerenciamento de potência somente na aceleração.....	87
4.4.4.2 Estratégias de gerenciamento de potência na aceleração e potência assistida com o uso de 50 % da carga do acumulador.....	88
4.4.4.3 Estratégias de gerenciamento de potência na aceleração e potência assistida com uso da capacidade total da carga do acumulador.....	91
4.4.4.4 Modelo básico de operação da propulsão híbrida elétrica.....	93
4.5 SEGURANÇA HIDRÁULICA.....	95
4.6 TRANSMISSÃO DE ENERGIA EM FORMA DE TORQUE AO SISTEMA DE TRAÇÃO DO VEÍCULO.....	96
4.7 ACELERAÇÃO.....	99
4.8 FRENAGEM.....	100
4.9 RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO DO VEÍCULO.....	103
4.9.1 Resistência ao rolamento.....	103
4.9.2 Arrasto aerodinâmico.....	104
4.9.3 Resistência à subida e força de descida.....	104



4.9.4 Potência da resistência ao movimento.....	105
<b>5 PROPOSTA DO ANTEPROJETO.....</b>	<b>106</b>
5.1 METODOLOGIA DE PESQUISA PARA PROPOSTA DO ANTEPROJETO.....	106
5.1.1 Hipótese simplificadora.....	106
5.2 DETALHAMENTO DO OBJETO DE ESTUDO.....	107
5.2.1 Perfil da empresa pesquisada.....	108
5.2.2 Objeto de estudo – Características do veículo.....	108
5.2.3 Condições de trabalho do objeto de estudo.....	109
5.3 CONSIDERAÇÕES PARA O ESTUDO DO ANTEPROJETO DE SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO PARA CAMINHÃO COLETOR COMPACTADOR...111	
5.3.1 Trajeto.....	112
5.3.2 Aceleração de desaceleração.....	112
5.3.3 Velocidade de trabalho.....	113
5.4 CÁLCULO DE POTÊNCIA DO OBJETO DE ESTUDO PARA O SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO PARALELO.....	114
5.5 CÁLCULO DO TEMPO DE DESACELERAÇÃO TS.....	115
5.6 CÁLCULO DA DISTÂNCIA MÍNIMA DE FRENAGEM SD.....	115
5.7 CÁLCULO DA POTÊNCIA DE FRENAGEM.....	116
5.8 CÁLCULO PARA ACUMULAÇÃO DE ENERGIA.....	116
5.9 CÁLCULO DO VOLUME DO ACUMULADOR.....	117
5.10 CÁLCULOS DA POTÊNCIA DE ACELERAÇÃO, POTÊNCIA DE FRENAGEM, ENERGIA DE ACUMULAÇÃO, VOLUME DE N <sub>2</sub> , FORÇA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE E CONDIÇÕES DE DECLIVIDADE.....	119
5.10.1 Condições de tráfego na cidade de São Paulo.....	119
5.10.2 Condições de declividades no Município de São Paulo.....	122
5.10.3 Tabela com cálculos estimados da potência de aceleração, potência de frenagem, energia acumulada e volume de N <sub>2</sub> .....	126
5.10.4 Cálculo da potência de resistência ao movimento.....	127
5.11 DETERMINAÇÃO DO VOLUME PARA O ACUMULADOR DO ANTEPROJETO.....	129
5.12 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA BOMBA.....	132
5.13 CIRCUITO HIDRÁULICO.....	132

5.14 ANÁLISE QUANTITATIVA.....	134
5.14.1 Condições e critérios para análise.....	134
5.14.1.1 Análise da potência de frenagem regenerada.....	135
5.14.1.2 Análise da economia de combustível.....	136
5.15 INVESTIMENTO.....	137
5.16 ANÁLISE SOB O ASPECTO DA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE POLUENTES.....	138
<b>6 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>142</b>
6.1 INTRODUÇÃO.....	142
6.2 POLUIÇÃO E SAÚDE PÚBLICA.....	143
6.3 TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES VEÍCULARES.....	145
6.4 TECNOLOGIA HÍBRIDA HIDRÁULICA.....	147
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>154</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>157</b>
<b>ANEXO 1 – INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS</b>	
<b>ANEXO 2 – ESQUEMA HIDRÁULICO BÁSICO</b>	
<b>ANEXO 3 – CÁLCULO DO TEMPO DE CARREGAMENTO DOS ACUMULADORES</b>	

## INTRODUÇÃO

### 1.1 COMENTÁRIOS GERAIS

Os crescentes índices de poluição nas grandes cidades do mundo, a diminuição das reservas de petróleo e a perda de energia durante a frenagem dos veículos são as motivações deste trabalho.

O aumento da frota de veículos nas cidades possui a sua contribuição para o aumento dos índices de poluentes na atmosfera por meio da emissão de fumaça resultante da queima dos combustíveis utilizados pelos motores.

Em função do progresso das cidades e do aumento do consumo de produtos pela sociedade, é vital para o transporte e logística desta crescente demanda a utilização de veículos automotores.

Contudo, a concentração da quantidade de veículos nas grandes cidades traz o problema do aumento dos níveis de poluição e conseqüentemente a perda da qualidade de vida.

O Brasil, como todo país em desenvolvimento, apresenta um crescimento explosivo de suas regiões metropolitanas. O Estado de São Paulo enfrenta uma situação particularmente preocupante por deter cerca de 40% da frota automotiva do país. Segundo dados da PRODESP, a frota motorizada no Estado de São Paulo, em Dezembro de 2007, é de aproximadamente 16,9 milhões de veículos. A frota da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) representa cerca de 8,5 milhões de veículos. A frota de veículos do ciclo Diesel (caminhões, ônibus, microônibus e vans), no Estado de São Paulo é composta por 1.077 mil veículos e na RMSP por 457,6 mil veículos.

(CETESB, 2009)

A diminuição da qualidade de vida das pessoas bem como os problemas de saúde causados em função dos gases emitidos pelos veículos faz com que a sociedade e os Governos discutam soluções. Neste contexto, são elaborados Protocolos, Convenções e Leis sobre o desempenho e níveis das quantidades de emissões que os veículos podem gerar.

Braga et.al. (2007, p.S570) descreve que, “poluição atmosférica nos grandes centros urbanos tem sido identificadas como um grave problema de saúde pública”.

Na busca pela melhoria de desempenho e redução dos níveis de poluição gerados por carros, caminhões e ônibus, foram realizadas pesquisas e implantadas soluções com sistemas alternativos de fontes de energia bem como melhorado cada vez mais a desempenho dos motores a combustão.

Dentre as propostas, existem linhas de pesquisas como, por exemplo, o desenvolvimento de sistemas híbridos e outras fontes para geração de energia de veículos.

“Com o objetivo de reduzir a dependência de petróleo e combustíveis convencionais, os governos vão lançar regulamentações e iniciativas que fornecem desconto em impostos e concessões para aqueles que usarem veículos emissão zero”. (SWAMINATHAN, 2007, p.2)

Destaca-se dentre as soluções para redução de emissões e economia de combustível os sistemas híbridos. Esta tecnologia é a soma de diferentes fontes de energia. Com a aplicação de diferentes potências energéticas espera-se alcançar o mesmo desempenho que um único motor a combustão é capaz de produzir.

O estudo de sistemas híbridos para a sociedade é muito importante. Por meio do histórico desta linha de pesquisa, esta tecnologia vem comprovando que é possível diminuir o consumo de combustível fóssil do motor a combustão atualmente existente nos veículos.

Com o preço de U\$\$ 3,0/ Gal nos E.U.A ( valor registrado em Março de 2008 ) , os construtores de veículos buscarão o aperfeiçoamento dos sistemas de propulsão pesquisando a melhor combinação entre economia de combustível e redução dos níveis de poluentes. Em 2012 estima-se uma produção de 2,2 milhões de veículos com sistemas híbridos contra os 612 mil veículos previstos em serem vendidos em 2007. ( RANDY, 2008 )

Atualmente o sistema mais difundido para os carros são os sistemas híbridos elétricos. Estes sistemas são formados por um motor a combustão unida a um sistema de baterias elétricas.

A tecnologia de sistemas híbridos elétricos não se limita a aplicação em carros. A pesquisa estende também o uso deste conceito de projeto para veículos utilitários como ônibus e caminhões.

Com o modelo de carro com sistema Híbrido Elétrico chamado Prius, foi possível a empresa Toyota colocar disponível no mercado um veículo que reduz o consumo de combustível em até 40%. ( TOYOTA, 2006 )

Além do sistema do híbrido elétrico, existem outras tecnologias desenvolvidas com foco na redução de emissões e economia de combustível. Dentre os apresentados para a sociedade podemos destacar sistemas de propulsão que utilizam; células combustíveis, combustíveis verdes (exemplos: etanol e biodiesel), veículos elétricos e veículos híbridos hidráulicos.

Todas as soluções estudadas como alternativas para redução de emissões apresentam características e condições de funcionamento diferentes. Tais diferenças devem ser levadas em consideração no planejamento energético automotivo a ser adotado pelos governos.

O cuidado na correta avaliação das condições ambientais, topográficas, tecnológicas, disponibilidade, cultura e conhecimento técnico são prováveis fatores a serem observados na definição e direcionamento nas decisões adotadas.

Tais conclusões devem buscar redução de emissões de poluentes, melhoria da qualidade de vida das pessoas, responsabilidade ambiental e economia.

Na análise de um plano de redução de emissões, além das alternativas tecnológicas implantadas nos veículos diretamente, destacam-se também soluções como por exemplos melhoria do transporte coletivo, rodízio de veículos e inspeções de emissões veiculares.

Embora seja possível verificar que para o problema de emissões de poluentes, muitas soluções são apresentas, este trabalho terá o foco na análise de tecnologias aplicadas em veículos.

Dentre as soluções tecnológicas, é perceptível através de modelos de veículos disponíveis no mercado, que a utilização de sistemas híbridos elétricos para carros têm mostrado bons resultados de economia de combustível e ocupado espaço na mídia. Porém será esta a melhor tecnologia para todos os tipos de veículos?

O intuito deste estudo é oferecer uma contribuição ao tema tecnologia de sistemas para redução de emissão de poluentes, analisando e conferindo por meio de estudo de caso, o uso de sistemas híbridos hidráulicos, como possível solução.

Não se pretende no trabalho, efetuar comparações entre os diferentes sistemas bem como proceder julgamentos sobre qual é o melhor, porém, acredita-se ser possível demonstrar um estudo que transpareça as condições favoráveis para o uso dos híbridos hidráulicos.

O veículo híbrido hidráulico (VHH) atualmente é tema de pesquisa principalmente nos E.U.A (Estados Unidos da América) segundo a EPA ( Agência de Proteção ao Meio Ambiente ) em um fórum realizado em 2004 em conjunto com a SAE. (INSTITUTE FOR THE ANALYSIS OF GLOBAL SECURITY, 2004 )

O estudo será orientado pelo seguinte problema de pesquisa: avaliar uma solução para reduzir os níveis de emissões de poluentes e aumentar a economia dos combustíveis por meio do estudo de dimensionamento e análise quantitativa de um sistema híbrido hidráulico paralelo (SHHP) para uma frota de caminhão coletor compactador no Município de São Paulo.

## **1.2 OBJETIVO DO TRABALHO**

Como objetivo geral, pretende-se mensurar os fatores que influenciam o dimensionamento de um SHHP. Além disso, pretende-se realizar o dimensionamento de um sistema hidráulico para um caminhão coletor compactador de lixo e uma análise quantitativa, estimando os potenciais benefícios que esta solução poderá oferecer para diminuição dos níveis de emissões de poluentes e economia de combustível para uma frota de 180 veículos.

## **1.3 HIPÓTESES**

O projeto de pesquisa sobre sistemas hidráulicos a serem usados na função de auxílio de propulsão dos veículos parte de algumas hipóteses que motivam e a princípio podem desde já prover um direcionamento as possíveis respostas aos objetivos de pesquisa.

- a) O aumento da poluição atmosférica nos grandes centros urbanos provêm da queima de combustíveis dos veículos.
- b) Os combustíveis por sua vez possuem a tendência de ficarem mais caros e escassos devido à diminuição das reservas de petróleo.
- c) De acordo com as teorias da hidráulica, o óleo mineral possui a possibilidade de ter sua energia acumulada por meio de acumuladores de pressão.
- d) Busca-se na teoria de sistema regenerativo, acumular a energia de frenagem gerada nos momentos de desaceleração com o uso de freio dos veículos.
- e) O histórico da tecnologia hidráulica permite o seu uso em diferentes aplicações tecnológicas sem grandes mudanças de projetos do produto ou modificações de equipamentos usados nas linhas de produção destes componentes.
- f) Tecnologia hidráulica tem padronização, normas e conhecimento disseminado na sociedade.
- g) As condições de trabalho, topográficas e procedimento de trabalho, podem indicar tecnologias para redução de poluentes e economia de combustível mais apropriadas frente as exigências técnicas.

Contudo, por meio das hipóteses apresentadas, acredita-se que quanto maior a energia absorvida pelo sistema hidráulico no processo de frenagem, menor será o consumo de potência despendida pelo motor de combustão empregado no veículo. Com o alcance do raciocínio apresentado, acredita-se possível tornar atrativo, aplicável e viável o SHHP.

#### **1.4 JUSTIFICATIVA**

A pesquisa tem como justificativa estudar quais as teorias envolvidas para o dimensionamento de um SHHP, as condições de trabalho e quais os possíveis benefícios que os SHHP's possam oferecer de vantagens na economia e redução da emissão de poluentes para o Município de São Paulo, utilizando como análise uma frota de caminhão coletor compactador.

O trabalho busca, por meio de conceitos de um sistema de energia acumulativa, uma alternativa para reduzir as emissões de poluentes e prover economia de combustível.

O custo de não se estudar o sistema será a perda de oportunidade de pesquisar este tipo de tecnologia, ficando as opções atuais de sistemas como os veículos híbridos elétricos com baterias de chumbo ou lítio.

Com o desenvolvimento da pesquisa, pretende-se pesquisar o conceito da tecnologia hidráulica aos veículos analisando sua possível viabilidade. Tendo como base os conceitos de utilitários híbridos e da hidráulica como fonte de energia, se buscará mensurar as possíveis vantagens técnicas.

## **1.5 OBJETO DE ANÁLISE**

O objeto de pesquisa será um caminhão coletor compactador de lixo, sendo aplicado a ele um projeto de um SHHP.

O estudo de caso é a metodologia de pesquisa escolhida em função dos custos e tempo para construção de um protótipo para avaliação real, considerando o prazo para finalização desta dissertação. Contudo, a pesquisa fará uso de referências de projetos desenvolvidos na Europa e nos Estados Unidos da América (EUA).

## **1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA**

Com a introdução, o trabalho terá mais 6 capítulos, totalizando 7 capítulos.

O capítulo 2 estuda a poluição atmosférica em centros urbanos, mensurando causas e impactos. A intenção é abordar conceitos de emissões nocivas oriundas da queima dos combustíveis e exemplos das consequências que os gases podem causar na saúde pública.

As tecnologias para redução da emissão de poluente pelo veículo serão abordadas no capítulo 3. Nesta fase da pesquisa, serão descritos os funcionamentos dos seguintes sistemas:

- Tecnologia dos motores a combustão
- Veículos Elétricos
- Veículos Híbridos Elétricos



- Veículos movidos a células combustíveis
- Motores empregando combustíveis verdes

O capítulo 4 irá embasar e detalhar os sistemas híbridos hidráulicos, apresentando o histórico, características, vantagens e desvantagens e o estado da arte desta tecnologia. O objeto de estudo deste item será o SHHP, porém outros sistemas híbridos hidráulicos serão mencionados como base informativa para a tese.

Pretende-se no capítulo 4 apresentar equações para dimensionamento de um sistema SHHP, com base na teoria da hidráulica e da dinâmica veicular nos processos de aceleração e frenagem do veículo.

No capítulo 5, o objetivo é propor um anteprojeto de um SHHP para um caminhão coletor compactador, realizando o seu dimensionamento por meio das informações técnicas e condições operacionais do objeto de estudo. Além disso, uma análise quantitativa dos possíveis benefícios que o SHHP será apresentada.

O capítulo 6 trará discussões, sugestões e considerações.

No capítulo 7, temos a conclusão da pesquisa.

## CAPÍTULO 2

### POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

#### 2.1 DESENVOLVIMENTO DESORDENADO DOS GRANDES CENTROS URBANOS E A POLUIÇÃO

A explosão demográfica em determinadas regiões, motivadas pelo crescimento industrial, desenvolvimento econômico e o sonho de maiores possibilidades de prosperidade para os indivíduos fizeram com que surgissem locais com alta densidade demográfica, aglomerações de indústrias e por consequência veículos automotores.

Tais fatores ocorreram em intervalos de tempo nos quais não se planejou crescimento sustentável, onde não foram previstas medidas que impedissem os problemas com poluição atmosférica.

A poluição atmosférica advém de várias fontes. Nas regiões metropolitanas, as emissões de poluentes provenientes de veículos automotores são as principais produtoras de gases nocivos a sociedade.

Os poluentes são gerados por meio da queima dos combustíveis como gasolina, álcool e Diesel.

Conforme a CETESB (2009), as emissões causadas por veículos produzem gases com substâncias tóxicas. A composição destes gases carregam em sua maioria o monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SOx), material particulado (MP), etc. Estes componentes químicos atacam principalmente o sistema respiratório.

“Na região metropolitana de São Paulo (RMSP), os veículos automotores (veículos leves e pesados, incluindo ainda as motocicletas e similares) correspondem a principal fonte de emissões de poluentes, com uma contribuição de cerca de 95% das emissões de CO, 94% das emissões de HC, 96% das emissões de NOx e 65% das emissões de SOx.”

(AZUAGA, 2000, p.6 apud CETESB, 1999)

O contato diário com estes gases faz com que as pessoas que vivem nos centros urbanos com índices de emissões acima do limite desejado para a saúde tenham perda de qualidade de vida e sofram algum tipo de consequência em virtude da poluição.

É possível por meio de pesquisas e dados já levantados sobre o assunto emissões, ter uma boa noção de qual o efeito em particular que cada tipo de componente químico respirado por uma pessoa possa fazer com a sua saúde.

“O monóxido de carbono (CO) é uma substância inodora, insípida e incolor - atua no sangue reduzindo sua oxigenação.

Os óxidos de nitrogênio (NOx) são uma combinação de nitrogênio e oxigênio que se formam em razão da alta temperatura na câmara de combustão - participa na formação de dióxido de nitrogênio e na formação do "smog" fotoquímico.

Os hidrocarbonetos (HC) são combustíveis não queimados ou parcialmente queimados que é expelido pelo motor - alguns tipos de hidrocarbonetos reagem na atmosfera promovendo a formação do "smog" fotoquímico.

A fuligem (partículas sólidas e líquidas), sob a denominação geral de material particulado (MP), devido ao seu pequeno tamanho, mantém-se suspensa na atmosfera e pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e ocasionar:

- mal estar;
- irritação dos olhos, garganta, pele etc.;
- dor de cabeça, enjôo;
- bronquite;
- asma;
- câncer de pulmão.”

(CETESB, 2009)

Os impactos causados a saúde varia de indivíduo, existem pessoas mais suscetíveis a sofrer os efeitos negativos causados pela poluição.

## 2.2 POLUIÇÃO - CLASSIFICAÇÕES E ÍNDICES

Após momentos críticos de saúde pública ocasionados por altos índices de componentes químicos encontrados no ar, iniciou-se um processo de classificação e medição dos patamares de poluição e dos agentes que causam lesão a saúde. Estes valores servem de base para o monitoramento e controle de emissões.

Na tabela 2.1, encontra-se a classificação das substâncias poluentes.

Tabela 2.1 – Classificação das substâncias poluentes

Compostos de Enxofre	Compostos de Nitrogênio	Compostos Orgânicos	Monóxido de Carbono	Compostos Halogenados	Material Particulado	Ozônio
SO <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> Compostos de Enxofre reduzido; (H <sub>2</sub> S, Mercaptanas, Dissulfeto de carbono, etc) sulfatos	NO NO <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> HNO <sub>3</sub> Nitratos	Hidrocarbonetos Álcoois, Aldeídos, Cetonas, Ácidos orgânicos	CO	HCl HF Cloretos, fluoretos	Mistura de compostos no estado sólido ou líquido	O <sub>3</sub> Formaldeído Acroleína PAN, etc.

Fonte: CETESB (2009)

A qualidade do ar é dimensionada pela quantidade de poluentes. Os valores usados no Brasil foram padronizados pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente) e aprovado pelo CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) por meio da resolução 03/90.

Na tabela 2.2, seguem os padrões e suas respectivas grandezas de medição e método conforme resolução do CONAMA número 03 de 28/06/90.

Tabela 2.2 – Padrões nacionais de qualidade do ar

Padrões nacionais de qualidade do ar (Resolução do CONAMA número 03 de 28/06/90)				
Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário mg/m <sup>3</sup>	Padrão Secundário µg/m <sup>3</sup>	Método de Medição
Partículas totais em suspensão	24 horas <sup>1</sup> MGA <sup>2</sup>	240 80	150 60	Amostrador de grandes volumes
Partículas inaláveis	24 horas <sup>1</sup> MAA <sup>3</sup>	150 50	150 50	Separação Inercial/filtração
Fumaça	24 horas <sup>1</sup> MAA <sup>3</sup>	150 60	100 40	Refletância
Dióxido de enxofre	24 horas <sup>1</sup> MAA <sup>3</sup>	365 80	100 40	Pararosanilina
Dióxido de nitrogênio	1 hora <sup>1</sup> MAA <sup>3</sup>	320 100	190 100	Quimiluminescência
Monóxido de carbono	1 hora <sup>1</sup>	40.000 35 ppm	40.000 35 ppm	Infravermelho não dispersivo
	8 horas <sup>1</sup>	10.000 9 ppm	10.000 9 ppm	
Ozônio	1 hora <sup>1</sup>	160	160	Quimiluminescência

1 – Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano. 2 – Média geométrica anual. 3- Média aritmética anual.

Fonte: CETESB 2009

No Estado de São Paulo, a Legislação DE 8468 de 08/09/76 também estabelece padrões de qualidade do ar. Os padrões e critérios obedecem às regulamentações federais com exceção ao padrão de ozônio. No caso do Estado de São Paulo, o nível de atenção é mais rigoroso, tendo a grandeza de 200 µg/m<sup>3</sup>.

Na tabela 2.3 encontramos os valores de critérios para episódios agudos de poluição do ar.

Tabela 2.3 – Critérios para episódios agudos de poluição do ar

Critérios para episódios agudos de poluição do ar (Resolução CONAMA número 03 de 28/06/90)			
Parâmetros	Atenção	Alerta	Emergência
Partículas totais em suspensão ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24h	375	625	875
Partículas inaláveis ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24h	250	420	500
Fumaça ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24h	250	420	500
Dióxido de enxofre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24h	800	1.600	2.100
SO <sub>2</sub> X PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24h	65.000	261.000	393.000
Dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 1h	1.130	2.260	3.000
Monóxido de carbono (ppm) – 8h	15	30	40
Ozônio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 1h	400*	800	1.000

\*O nível de atenção é declarado pela CETESB com base na Legislação Estadual que é mais restritiva (Para o padrão de ozônio, o limite de atenção é de  $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Fonte: CETESB 2009

Para que os critérios e classificações dos episódios agudos de poluição do ar sejam mostrados a sociedade de forma mais simplificada, são comuns os órgãos responsáveis pelo controle do meio ambiente atribuir notas e significados de acordo com os resultados coletados.

Nas tabelas 2.4 e 2.5 podemos encontrar exemplos da CETESB. Fazendo uso de técnicas matemáticas usadas de forma satisfatória também nos E.U.A e no Canadá. O órgão do Estado de São Paulo relaciona os índices de poluição coletados com grupos de notas e classificações simplificadas de fácil entendimento pela sociedade. Na tabela 2.4 são correlacionadas as classificações da qualidade do ar e as respectivas concentrações de elementos químicos coletados na atmosfera.

Tabela 2.4 – Índices de Qualidade do ar

Qualidade	Índice	MP <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CO (ppm)	NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	SO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Boa	0 – 50	0 – 50	0 – 80	0 – 4,5	0 – 100	0 – 80
Regular	51 – 100	50 – 150	80 – 160	4,5 - 9	100 - 320	80 – 365
Inadequada	101 – 199	150 – 250	160 – 200	9 - 15	320 - 1130	365 – 800
Má	200 – 299	250 – 420	200 – 800	15 - 30	1130 - 2260	800 – 1600
Péssima	> 299	> 420	> 800	> 30	> 2260	> 1600

MP = Material particulado, O<sub>3</sub>= Ozônio, CO = Monóxido de Carbono, NO<sub>2</sub> = Dióxido de Nitrogênio, SO<sub>2</sub> = Dióxido de Enxofre

Fonte: CETESB 2009

Com base na classificação da qualidade do ar, é estimado o possível efeito a saúde. Desta forma, os órgãos de monitoramento traduzem os efeitos à saúde relacionada com a classificação da qualidade do ar.

Tabela 2.5 – Efeitos a saúde de acordo com a qualidade do ar

Qualidade	Índice	Significado
Boa	0 – 50	Praticamente não há riscos à saúde.
Regular	51 – 100	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas), podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
Inadequada	101 – 199	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas), podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
Má	200 – 299	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardores nos olhos, nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
Péssima	> 299	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: CETESB 2009

Na tabela 2.6 visualizamos as grandezas, limites máximos de emissões de poluentes por elemento químico, classificação de cronograma PROCONVE e o comparativo com a norma Euro, neste caso, informação útil para o Brasil.

Como podemos perceber, a previsão é estarmos na fase P-6 para veículos do ciclo Diesel, porém atualmente os motores atendem a classe P-5, equivalente ao Euro 3. Atualmente existe no Brasil uma discussão relativa ao atraso na implementação da fase P-6 para veículos a Diesel. Isto se deve ao fato da necessidade da adoção de novas tecnologias que emitam menos emissões de poluentes bem como a utilização do combustível Diesel com 50 ppm de quantidade de enxofre.

Atualmente, o Diesel vendido nas Metrôpoles é de 500 ppm explica Martins (2010) e por causa disto, existem discussões em aberto relativo ao tema entre fabricantes, indústria do petróleo e o Governo.

Na Europa, no ano de 2009 conforme Hedberg (2005), a exigência é atender aos requisitos da norma Euro 5.

Tabela 2.6 – Comparação de emissões PROCONVE x Euro Veículos a Diesel (g/kW.h)

PROCONVE	Vigência	Norma Euro	CO	HC	NO <sub>2</sub>	MP
Fase I (P-1)	1989 a 1994	Sem espec.	14,00*	3,50*	18,00*	xxx*
Fase II (P-2)	1994 a 1996	Euro 0	11,20	2,45	14,40	0,60*
Fase III (P-3)	1996 a 2000	Euro 1	4,90	1,23	9,00	0,40
Fase IV (P-4)	2000 a 2005	Euro 2	4,00	1,10	7,00	0,15
Fase V (P-5)	2005 a 2008	Euro 3	2,10	0,66	5,00	0,10
Fase VI (P-6)	A partir de 2009	Euro 4	1,50	0,46	3,50	0,02

CO= Monóxido de Carbono, HC= Hidrocarbonetos; NO<sub>2</sub>= Dióxido de Nitrogênio

Dados : Proconve

\*Não foram exigidos legalmente

Fonte: Augusto (2008)

Os índices de poluição normalizados são importantes para o controle da qualidade do ar.

Encontra-se atualmente discussões para o aperfeiçoamento dos índices para desta forma, contribuir para minimizar os efeitos dos gases nocivos a saúde. Isto garante a não ocorrência de eventos graves de poluição atmosférica com efeitos que agridem a saúde pública.

### 2.3 CONSTATAÇÕES DOS EFEITOS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA EM CENTROS URBANOS

A busca por soluções para a questão da poluição é motivada por razões dos impactos negativos que as mesmas geram para a sociedade.

Contudo, é importante uma investigação para que de fato, a solução proposta possa ser viável a ponto de contribuir para a redução do problema.

As decisões da adoção de medidas devem ser embasadas em informações reais dos malefícios existentes para que assim se possa justificar investimentos tecnológicos e criar mecanismos de monitoramento e regulação.

A justificativa dos investimentos para redução dos gases nocivos ao meio ambiente possivelmente leva em conta os custos quantitativos e qualitativos para a sociedade.

O estudo de epidemiologia atmosférica tem se apresentado como tema em diversas pesquisas e artigos, assim como o estudo de economia ambiental.



A intenção é descobrir os efeitos nocivos a saúde pública e quantificar os números de atendimentos nas redes de hospitais relacionados com poluição atmosférica.

Busca-se também, por meio destes estudos, levantar um questionamento sobre os atuais limites normalizados dos agentes poluentes classificados como aceitáveis para a sociedade.

Para que os estudos de impactos dos agentes poluentes sejam viabilizados, é importante e de grande ajuda que as cidades ou locais pesquisados tenham um sistema de monitoramento dos agentes nocivos à saúde encontrados no ar.

Por meio destes recursos, é possível obter pesquisas, resultados e conclusões.

Desta forma, a sociedade consegue elaborar pesquisas e apresentar constatações, como por exemplo às descritas a seguir.

Gouveia et al. 2006 explica que os avanços tecnológicos são notáveis na busca por um ar mais limpo, porém os níveis de emissões obtidos por meio das soluções elaboradas ainda representam riscos a uma parcela da população.

“Apesar dos notáveis avanços obtidos nas últimas décadas em direção a um ambiente com ar mais limpo, especialmente nos países desenvolvidos, os atuais níveis de poluição experimentados pela maior parcela da população continuam a se mostrar danosos a saúde. Os primeiros estudos relacionando a poluição atmosférica e implicações na saúde datam da metade do século passado, e ainda hoje essa relação é observada e comprovada por trabalhos de investigação científica”. (GOUVEIA.et al.p.2669,2006)

Gouveia et al. (2006) encontrou em sua pesquisa relações entre doenças respiratórias, circulatórias e isquêmicas do coração nas pessoas com associação aos agentes poluentes. Por meio de análise estatística, verificou-se um aumento do número de casos das doenças acima citadas com eventos de aumento das quantidades de poluentes na atmosfera.

Martins et al (2001) menciona que “a poluição atmosférica, mesmo apresentando concentrações abaixo dos níveis permitidos pelos órgãos competentes, tem afetado de forma significativa a vida dos seres terrestres”.

Na pesquisa de Martins et al (2001), ele procurou associar em um determinado intervalo de tempo, os índices de internação de IVAS (infecções de vias aéreas superiores) com os níveis diários de poluentes do ar (CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub>).

Martins et al (2001) coloca como reflexão e discussões futuras alguns pontos importantes.

“Tanto este trabalho quanto os citados anteriormente mostram que, mesmos os poluentes atmosféricos estando dentro dos padrões permitidos de qualidade do ar, continuam afetando a morbidade e mortalidade por problemas respiratórios. Sugere-se que esses limites de qualidade do ar sejam reavaliados”.

(MARTINS et al,p.228, 2001)

Para mensurar os impactos de poluentes, os pesquisadores relacionam os componentes químicos encontrados nas pessoas com os gases emitidos pelos veículos.

Paralelamente são monitoradas as condições atmosféricas e por meio dos registros de atendimentos hospitalares, correlacionam-se as informações originando discussões e interpretações dos resultados.

As pesquisas conseguem obter conclusões e levantar algumas discussões. Uma conclusão pode ser encontrada na pesquisa realizada por Braga et al. (2007).

“os poluentes gasosos e o material particulado inalável gerados a partir da queima de combustíveis fósseis apresentam efeitos diretos sobre o sistema respiratório, em especial, de crianças e idosos. Esses efeitos têm sido medidos através de aumentos nos atendimentos de pronto-socorro<sup>3,4,5</sup>, internações hospitalares<sup>6,7,8</sup>, e mortalidade<sup>9,10,11,12,13,14</sup>”

(BRAGA et al,p.S570,2007)

A real grandeza dos efeitos das emissões nas pessoas é difícil de ser mensurada, pois as pesquisas usam os registros de atendimentos nos hospitais e pronto-socorros, ou seja, somente situações no qual o cidadão busca atendimento médico. Efeitos com impactos mais amenos como por exemplos alergias, inflamações nas vias respiratórias, irritações e dores de cabeça que não são registrados por causa de diversos fatores, possivelmente, parte dos casos não participam das estatísticas. Contudo, foi possível identificar alguns sintomas.

“No Brasil, também se tem encontrado associações positivas entre poluentes atmosféricos e desfecho da gravidez. Em São Paulo, Pereira et al.<sup>37</sup>, em 1991 e 1992, encontraram associação positiva entre NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e CO e mortalidade intra-uterina. Evidência da exposição do feto à poluição ambiental foi corroborada pela associação positiva entre carboxi-hemoglobina presente no sangue do cordão umbilical de recém-nascidos de mães não-fumantes e concentrações ambientais de CO”. (JUNGER.W.L; LEON.A.P, p.S589,2002)

Considerando-se várias hipóteses e critérios, uma pesquisa realizada em 2002 na cidade do Rio de Janeiro por Junger;Leon (2002) encontrou relação entre agentes poluentes com o baixo peso ao nascer de crianças.

“Os resultados deste estudo sugerem que existe associação entre poluição atmosférica e a ocorrência de baixo peso ao nascer no Município do Rio de Janeiro. Após controlar por diversos fatores de confusão em potencial, foi estimado que recém-nascidos de mães expostas a concentrações moderadas ou altas dos agentes poluentes da atmosfera analisados, principalmente nos primeiro e terceiro trimestres de gestão, são mais prováveis de nascer com peso inferior a 2.500g”.

(JUNGER.W.L; LEON.A.P, p.S594,2002)

De posse das referências apresentadas, foi possível detectar que os resultados encontrados citam uma associação do aumento da poluição com um maior nível de atendimento em hospitais de doenças respiratórias, circulatórias, cardiovasculares e baixo peso no nascimento de bebês.

Isto significa um sinal de alerta, pois os grandes centros urbanos têm a tendência de aumentar a sua concentração de pessoas e veículos. A soma destes dois fatores com a ausência de políticas públicas e medidas de redução dos poluentes pode causar um problema de saúde pública.

## 2.4 CUSTOS ESTIMADOS À MORTALIDADE PROJETADA PELOS AGENTES POLUENTES – DIESEL

Tendo em vista que o objeto de estudo desta pesquisa é um caminhão que utiliza o Diesel como combustível, a intenção do item 2.4 é quantificar os possíveis danos que as emissões geradas por este combustível podem ocasionar.

No item 2.3 foram descritos alguns efeitos que os agentes poluentes causam em algumas parcelas na sociedade, como por exemplo, doenças respiratórias, cardiovasculares e baixo peso em recém nascido.

Por meio de uma pesquisa com a participação pelo Professor Paulo Saldiva em 2007, foram pesquisadas 6 cidades no Brasil, onde foram levantados os excessos de mortes com relação nas emissões provenientes do Diesel.

Na tabela 2.7 é apresentado o excesso de mortes pelas emissões de Diesel em cada uma das cidades pesquisadas.

Tabela 2.7

	Mortes por causas naturais (>30 anos)	excesso de mortes pelas emissões diesel
Recife	16891	297
Belo Horizonte	19029	657
Rio de Janeiro	69067	1467
São Paulo	85982	6923
Curitiba	12507	391
Porto Alegre	21685	725

Número de mortes por causas naturais em adultos acima de 30 anos ocorridas no ano de 2005, e o excesso de mortes atribuída pelas emissões dos veículos diesel, nas 6 regiões metropolitanas avaliadas

Fonte: Saldiva et al.(p.48, 2007)

Com base nos números levantados nas projeções, foi possível estabelecer valores quantitativos.

“De posse destas projeções de mortalidade, é possível estabelecer-se uma estimativa grosseira dos custos financeiros da poluição por veículos diesel nas 6 capitais avaliadas. Caso consideremos o menor valor estatístico da vida humana em países em desenvolvimento – US\$ 512.000,00 – o custo anual da poluição por veículos Diesel nas cidades estudadas é da ordem de US\$ 5 bilhões (cinco bilhões de dólares americanos) ao ano.”

(SALDIVA et al, p.49, 2007)

De posse do expressivo número projetado na pesquisa realizada, cuja ordem de grandeza é de U\$\$ 5 bilhões de dólares americanos anuais de mortes causadas por agentes poluentes do Diesel, entende-se que os custos a sociedade são elevados, e que a poluição atmosférica causada por veículos automotores, na presente data da pesquisa, evidencia um risco elevado a saúde das pessoas, e devido ao número de mortalidade projetada, um problema de saúde pública.

Saldiva et al (2007) ainda revela que utilizando-se metodologias preconizadas pela Organização Mundial da Saúde e os dados de mortalidade do Ministério da Saúde do Brasil, o risco ambiental associado a populações expostas aos agentes emitidos pelo combustível Diesel pode representar um potencial de 10000 mortes em excesso por ano.

Importante salientar que o estudo gerou algumas sugestões para minimizar o impacto dos agentes poluentes gerados pelo combustível Diesel, sendo que dentro delas encontramos a medida de se reduzir o teor de enxofre no Diesel.

Contudo, as soluções podem ser a produção de um combustível mais limpo ou tecnologias que possam reduzir a quantidade de consumo de combustível.

A redução do consumo de combustível, impacta diretamente na redução de gases nocivos emitidos bem como se converte em economia dos gastos em abastecimentos da frota.

## **2.5 DECRETO 52469, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2007 – ESTADO DE SÃO PAULO**

O Decreto 52469 de 12 de Dezembro de 2007 do Estado de São Paulo trata da regulação, organização, classificação e pontuação de áreas com saturação de agentes poluentes no Estado de São Paulo.

Por meio do decreto, para efeito de utilização do mesmo e preservação do ar, o Estado de São Paulo fica dividido em regiões, denominadas Regiões de Controle de Qualidade do Ar – RCQA.

Estas regiões devem coincidir com as regiões administrativas estabelecidas no Decreto número 52576 de 12 de Dezembro de 1970, sendo que as mesmas podem ser subdivididas de acordo com a conveniência do órgão controlador ambiental em busca de um melhor controle das condições ambientais.

No decreto 52469, no artigo 23 é definido o termo grau de saturação da qualidade do ar.

“Artigo 23 – Determina-se o grau de saturação da qualidade do ar de uma sub-região quanto a um poluente específico, cotejando-se as concentrações verificadas nos últimos 3 (três) anos com os Padrões de Qualidade do Ar (PQAR) estabelecidos no artigo 29 deste Regulamento e na resolução CONAMA nº3/90 ou regulamentação correlata superveniente.”

Este decreto torna-se importante para o controle da qualidade do ar pois é possível por meio dos critérios e classificações nele regulamentado, classificar uma área de acordo com os seus níveis de emissões encontrados.

O artigo 24 do decreto permite a CETESB implementar um Programa de Redução de Emissões Atmosféricas – PREA para os empreendimentos que se encontrem em operação, os quais se incluem as fontes fixas e móveis geradoras de poluição, nas sub-regiões em vias de saturação ou já saturadas.

As sub-regiões que se encontrem em vias de saturação ou saturadas, estão sujeitas a adoção do PREA.

Por meio das melhorias de redução de emissões de poluentes em fontes móveis, as bem feitorias podem ser convertidas, conforme critérios e apuração do órgão regulador, em créditos de emissão.

Um exemplo é um frotista que presta serviços dentro de uma área com classificação de saturada. Caso ele implemente soluções tecnológicas de modo que a sua frota apresente como resultado uma redução nos níveis de emissões de poluentes, ele poderá pleitear créditos de emissão.

Conforme Komatsu e Alvares Jr. (2009), algumas das formas como os créditos podem ser utilizados são;

- Na implantação de novos empreendimentos
- Na ampliação de empreendimentos existentes
- No cumprimento de metas do PREA

Com a política dos créditos de emissão, torna-se possível motivar as políticas ambientais de redução de emissões de poluentes. Como consequência disto, o desenvolvimento de novos negócios, como por exemplo, aumento de uma frota de caminhões de entrega, em áreas saturadas ou em vias de saturamento se torna possível e sustentável no que tange ao PREA.

Tendo em vista que o objeto de estudo desta dissertação atua no município de São Paulo, é importante salientar que conforme o Resolução SMA 42, de 26/06/2008 – Áreas Saturadas, podemos extrair os seguintes dados em relação a classificação com os seus respectivos agentes poluentes.

Tabela 2.8 – Situação de saturação de emissões de poluentes

Município	MP	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>
São Paulo	SAT-MOD	NS	EVS	EVS	SAT-SEV

Onde; MP=material particulado, SO<sub>2</sub>=dióxido de enxofre, CO=monóxido de carbono, NO<sub>2</sub>=dióxido de nitrogênio, O<sub>3</sub>= ozônio, SAT-MOD=área saturada moderado, NS=área não saturada, EVS=área em vias de saturação, SAT-SEV=área saturada sério

Fonte: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (2008)

Desta forma, conforme os dados do SMA 42, o Município de São Paulo tem saturação de MP e O<sub>3</sub>.

## 2.6 LEI 13798, DE 09 DE NOVEMBRO DE 2009 – ESTADO DE SÃO PAULO

Conforme o artigo 2 da Lei 13798, a Política Estadual de Mudanças Climáticas – PEMC, estabelece o compromisso do Estado de São Paulo frente ao desafio das mudanças climática globais.

A Lei 13798 possui uma abordagem ampla de medidas a serem implementadas que motivam uma política ambiental.

No que tange a transportes, no artigo 16, é descrito que serão adotadas políticas públicas que deverão priorizar o transporte sustentável, no sentido de minimizar as emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, a lei prevê o combate a medidas e situações que, de qualquer forma, estimulem a permanência de veículos obsoletos e o uso de combustíveis mais poluentes em termos de emissão de gases de efeito estufa.

Na lei, é prevista cobrança por atividades emissoras de gases de efeito estufa pelo uso de vias terrestres, bem como será privilegiado modais de transportes mais eficientes e com menor emissão por passageiro ou por unidade de carga.

## **2.7 CONSIDERAÇÕES RELATIVOS A POLUIÇÃO E SEUS EFEITOS**

O capítulo 2 descreveu que os veículos automotores são a principal fonte de emissões de gases poluentes nos grandes centros urbanos.

Demonstraram-se por meio das tabelas, as definições e classificações dos agentes poluentes.

Foi possível verificar que diversas pesquisas relacionam aumento de atendimento hospitalares de problemas de saúde, como por exemplo, infecções nas vias respiratórias, com eventos de maior concentração de gases emitidos por veículos na atmosfera. Mesmo os níveis de emissões estando dentro do que é classificado como satisfatório pelos órgãos competentes, foram evidenciados prejuízos a saúde pública por causa de emissões veiculares.

No que tange a cidade de São Paulo, o município possui índices de saturamento para alguns poluentes como, por exemplo, o MP. O que indica um alerta de que medidas devem ser tomadas para redução destes gases nocivos saturados ou em vias de saturação.



## **CAPÍTULO 3**

### **TECNOLOGIA DE PROPULSÃO VEÍCULAR**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

O objetivo do capítulo 3 é descrever uma breve análise de algumas tecnologias usadas com o intuito de redução de emissões de poluentes. Contudo, conforme já descrito na introdução desta pesquisa, não se pretende avaliar ou mensurar qual a tecnologia é melhor ou pior, porém possivelmente é importante o breve conhecimento de algumas tecnologias, para que assim possa-se situar a tecnologia hidráulica híbrida, foco da pesquisa.

#### **3.2 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA**

Os motores a combustão interna são os mais usados na propulsão de carros, ônibus, caminhões e tratores. Atualmente, é raro encontrar veículos que não usam motores com combustão interna.

Estas tecnologias, principalmente após as descobertas dos ciclos Otto e Diesel, apresentam eficiência, aplicabilidade, confiabilidade e constante potencial para melhoria conforme pode ser observado na história da indústria automotiva.

O motor a combustão interna do ciclo Otto, leva o nome do seu inventor. Basicamente este sistema consiste em 4 tempos (4T) de um ciclo térmico para movimentação do pistão. Para a transformação da energia térmica em mecânica, o ciclo Otto apresenta um sistema de alimentação de combustível e a explosão do mesmo acontece por meio da geração de uma faísca.

No ciclo de 4T, o pistão percorre 4 vezes o seu curso, correspondente a duas voltas da manivela e do eixo do motor para completar um ciclo.

No ciclo a 4T, temos as fases de admissão, compressão, expansão e escape.

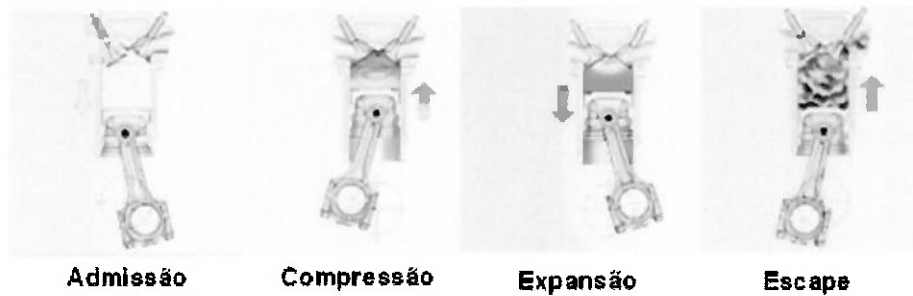


Figura 3.1 – Sistema de combustão interna de 4 tempos (4T)

Na admissão, o pistão desloca-se do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI). Na movimentação, o pistão gera uma pressão negativa no qual provoca a sucção de combustível e ar por meio de uma válvula de admissão. Neste momento, a câmara do pistão fica preenchida de combustível e ar.

O tempo de compressão começa a partir do momento em que a válvula de admissão é fechada, o pistão desloca-se do PMI para o PMS, comprimindo a mistura. A compressão deve elevar a temperatura interna da câmara do pistão.

Pouco antes do pistão chegar ao PMI, no caso do ciclo Otto, solta-se uma faísca que será responsável por gerar a ignição da mistura. Temos então o tempo de expansão. A combustão da mistura provoca um aumento da pressão interna no qual desloca o pistão do PMS para o PMI através da expansão dos gases. É nesta fase que o pistão realiza o trabalho mecânico no motor.

O tempo de escape é realizado após a expansão, quando o pistão no PMI desloca-se para o PMS, empurrando os gases para o sistema de escape por meio da abertura da válvula.

O ciclo Diesel assemelha-se ao ciclo Otto quanto às etapas de admissão, compressão, expansão e escape, a diferença está na forma como ocorre a ignição do combustível.

No ciclo a Diesel a ignição é espontânea, ou seja, é gerada pelo aumento da temperatura interna na câmara do pistão não existindo, portanto sistema por faísca.

A eficiência dos motores a combustão é aperfeiçoada a cada dia. Num passado não muito distante, os motores a combustão do ciclo Otto usavam o carburador para injeção de combustível na câmara de combustão, hoje, com o advento da eletrônica, temos sistemas de injeção eletrônica que trazem grandes benefícios como redução do consumo de combustível e emissão de poluentes.

O mesmo ocorre com os motores a Diesel por meio do aperfeiçoamento do sistema de dosagem do combustível, principalmente pelo sistema individual de abastecimento no qual cada cilindro possui uma bomba e um dosador.

Os fabricantes de motores de combustão interna enfrentam hoje um dilema no atendimento as normas e índices máximos de emissões.

Brunetti; Garcia (1992) explica que a combustão completa estequiométrica produz  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$ . A proporção desses gases depende do combustível, condição de funcionamento do motor e da qualidade da mistura.

Na reação real, Brunetti; Garcia descreve que os gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$  gerados numa combustão correspondem com cerca de 98% dos gases de escape, 1 % é formado por  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2$  e mais 1% são os gases nocivos.

Os gases nocivos emitidos por um veículo não chega a afetar a saúde humana, porém a soma de emissão de vários veículos pode causar um problema de saúde pública conforme explicado no capítulo 2.

Brunetti; Garcia (1992) explica que um dos fatores que influencia no índice de emissões é a qualidade do combustível. Além disso, temos também a mudança da composição dos combustíveis e alterações na regulagem do motor.

Modificações podem trazer benefícios e malefícios ao mesmo tempo.

Seguem alguns exemplos dados por Brunetti; Garcia.

"A variação do avanço da faísca em relação ao valor ótimo pouco influí na emissão de CO e HC, mas incrementa a formação dos  $\text{NO}_x$ . Atrasar a faísca reduz os  $\text{NO}_x$  mas aumenta o consumo."

"O aumento da taxa de compressão provoca um aumento da temperatura máxima do ciclo e uma redução da relação volume/superfície da câmara. O primeiro fator tende a reduzir os  $\text{NO}_x$  e o segundo a aumentar os HC. O que se nota é que em geral os fatores geram efeitos antagônicos em relação a formação dos três poluentes básicos. Logo, um controle plenamente eficaz só pode ser obtido pela sua neutralização a jusante, isto é, na tubulação de escape."

(BRUNETTI;GARCIA,p293.,1992)

Atualmente, as empresas automotivas e fabricantes de motores a combustão interna projetam a tecnologia de acordo com o rigor das legislações vigentes nos países de atuação. Quanto mais rigoroso os limites de emissões, mais tecnologia e soluções são exigidas.

Relativo à tecnologia de motores a combustão interna, é possível encontrar na Europa grande parte das tendências tecnológicas em desenvolvimento em prol da redução de emissões em veículos com combustão interna.

O estado atual de tecnologia de motores a combustão interna no Brasil para atendimento do Euro 3 faz uso de sistema eletrônico de injeção e a utilização de catalisadores, no qual realizam um tratamento dos gases nocivos após o processo de queima do combustível.

Na Europa, para atender ao Euro 4, as empresas tiveram que rever as estratégias, principalmente para motores a combustão interna do ciclo a Diesel, onde duas linhas tecnológicas foram adotadas.

A tecnologia por meio de recirculação do gás de exaustão cuja sigla é conhecida como sistema EGR, constituiu no reaproveitamento dos gases emitidos após o processo de combustão no próximo ciclo.



Figura 3.2 – Sistema EGR  
Fonte: Hedberg (2005)

O gás da exaustão recircula no sistema, com isto é possível realizar a redução de NOx a níveis que atendem segundo Hedberg os níveis de emissões da norma Euro 4.

Para o atendimento da norma Euro 5, este sistema também pode ser usado, com modificação tecnológica em alguns parâmetros do processo de queima do motor a combustão e qualidade do combustível explica Hedberg.

A segunda tecnologia aplicada por fabricantes de motores a Diesel é o pós tratamento dos gases poluentes, cuja a sigla é o SCR, popularmente chamado de “Adblue”, que consiste na mistura de uréia com os gases emitidos após o processo de combustão. Este líquido composto por uréia possui a coloração azul, por isto o nome popular.

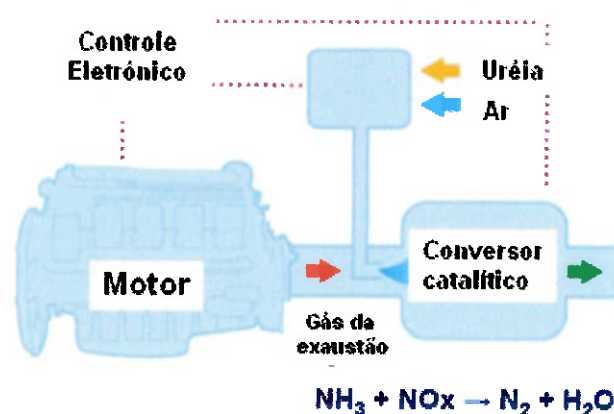


Figura 3.3 – Sistema SCR

Fonte: Hedberg (2005)

Com a mistura do  $\text{NH}_3$  com  $\text{NO}_x$ , ocorre uma combinação estequiométrica, fazendo com que o gás contenha  $\text{N}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ .

A tecnologia SCR atende ao nível de exigência Euro 4 e com algumas alterações no sistema de combustão como por exemplo pressão de injeção de combustível, é possível usar esta tecnologia para atender aos níveis exigidos pela Euro 5.

Para o atendimento da norma Euro 6, as tecnologias para motores do ciclo Diesel estão em discussão. Contudo, a experiência Européia indica o uso dos sistemas EGR, SCR somado ao sistema DPF combinados. O DPF é uma filtragem dos gases provenientes da queima do combustível no motor. O sistema com EGR + SCR + DPF possui sensores nos quais possibilitam o monitoramento e controle em malha fechada no sistema.

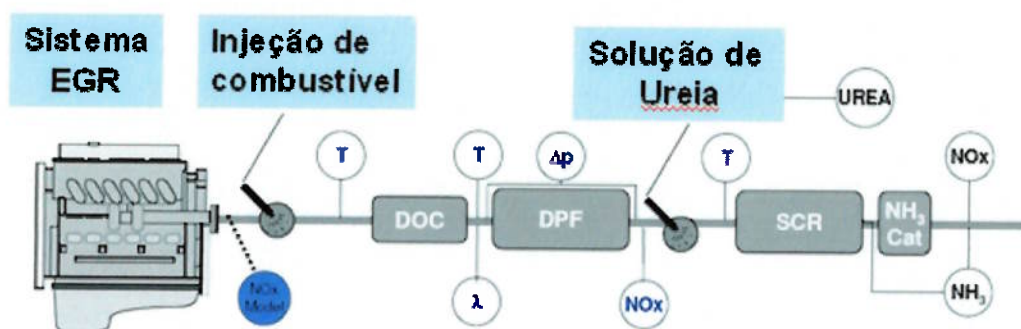


Figura 3.4 – Sistema EGR, SCR e DPF para atendimento da norma Euro VI  
 Fonte: Cassidy (2009)

Da mesma forma que explanamos as ações para controle de emissões dos motores do tipo Diesel, os motores do ciclo Otto também apresentam soluções para redução dos níveis de emissões.

O exemplo do sistema “Stop and Go” que em Português significa “Para e Anda” é uma dessas soluções. Quando o carro para, por exemplo, em um semáforo, o sistema desliga o motor, após isto, ocorrendo à necessidade de se reiniciar o movimento do veículo, o comando eletrônico do carro liga o motor sem necessidade do uso da chave para reiniciar a ignição do motor, ou seja, o motor desliga e liga automaticamente.

Esta solução permite que o motorista tenha a decisão de ativá-lo ou não dependendo das condições do tráfego. Com a tecnologia “stop and go”, é possível obter a redução de  $\text{CO}_2$  entre 25 % à 30 % dependendo da versão. (MITSUBISHI 2009)

Os motores de combustão interna são aperfeiçoados e conforme as tecnologias atuais, com o uso dos combustíveis diesel e gasolina, com ações no âmbito do sistema de injeção e controle eletrônico do motor, é possível notar o alcance do atendimento das normas de emissões Euro 4.

Acima disto, percebe-se a necessidade do uso de pós-tratamento POR MEIO de catalisadores e composições químicas como é o caso da uréia. Algumas soluções podem aumentar o nível de consumo de combustível como é o caso do sistema SCR e outras podem promover economia de combustível, como é o caso do sistema “Stop and Go” exemplificado neste trabalho pelo sistema da Mitsubishi.

Segundo Junior (2009) os principais pontos que os fabricantes de automóveis devem se atentar para a busca da solução compreende-se em três fases;

- Antes da combustão
- Durante a combustão
- Após a combustão

Contudo, nota-se que o nível tecnológico dos motores pode apresentar, portanto, melhorias, principalmente no universo da eletrônica, tratamento dos gases e na adaptação dos motores do ciclo Otto e Diesel a combustíveis alternativos como é o caso do álcool e do gás natural.

### **3.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS**

Desde 1832 já podemos encontrar registros de estudos de veículos elétricos.

A competição tecnológica entre veículos elétricos e os movidos por motores a combustão é antiga. Cowan (1996) explica que esta competição tecnológica pode ser dividida em 5 fases, sendo:

- 1885 à 1905: formação da indústria automotiva
- 1905 à 1920: domínio dos veículos movidos a combustão interna
- 1920 à 1973: consolidação dos motores a gasolina
- 1973 à 1998: questionamentos sobre os motores a combustão para veículos
- 1998 até os dias atuais: legislações obrigando estudos que introduzam a

produção em larga escala de veículos elétricos

A classificação de um veículo como elétrico pode gerar algumas considerações e diferentes critérios de agrupamento, porém neste trabalho acreditam-se existir duas principais classificações.

A primeira são os veículos que não usam motores a combustão. Sua fonte é unicamente elétrica.

Neste tipo de sistema temos a alimentação de energia elétrica que move um motor elétrico conectado ao sistema de tração. O fornecimento de energia pode ser constante, ou seja, captado diretamente na rede elétrica ao longo do percurso do veículo, como, por exemplo, os trólebus. Outros modelos são projetados para condições quando não existe a possibilidade de captação constante de energia.

O veículo tem baterias que são carregadas numa fonte elétrica. Depois de carregado, o veículo realiza o percurso limitado a autonomia fornecida pela energia armazenada.

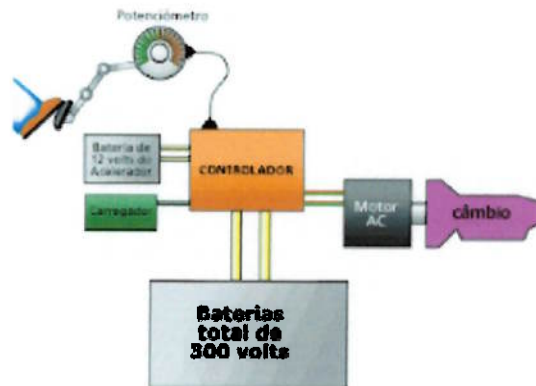


Figura 3.5 – Exemplo de sistema de propulsão para veículo elétrico  
Fonte : Brain (2009)

Conforme a figura 3.5, a aceleração e velocidade são acionadas por meio de um potenciômetro conectado ao pedal do veículo. De acordo com a posição do pedal, o controlador aumenta ou diminui a quantidade de energia transferida ao motor elétrico.

Este tipo de solução não emite emissões por não possuir nenhum processo de geração de energia por meio da queima de qualquer combustível. A grande dificuldade em adotar um sistema como este é a autonomia das baterias. Além disso, uma estrutura energética se faz necessária, pois devem existir pontos para carregamento das baterias.

O segundo grupo de carros que possuem a eletricidade como fonte de energia para a propulsão do sistema de tração são os híbridos.

Os híbridos elétricos são formados por motor a combustão, bateria, gerador, motor elétrico, freio regenerativo e controladores eletrônicos.

Diferente do elétrico explicado no primeiro grupo, estes veículos usam motores a combustão e as baterias elétricas como fonte de energia. O objetivo é proporcionar reduzido tamanho do motor a combustão, compensando a necessária energia para tracionar o veículo com o uso do motor elétrico e energia armazenada nas baterias.

Atualmente, os híbridos elétricos são os mais divulgados na mídia, tendo como um grande exemplo o modelo Prius da Toyota.

Os híbridos elétricos possuem três princípios de sistemas de funcionamento, sendo;

- Sistema em série



- Sistema em paralelo
- Sistema misto

No sistema híbrido elétrico em série, visto no exemplo da figura 3.6, o motor a combustão interna aciona o gerador. O gerador tem a função de converter energia mecânica em elétrica. A energia elétrica produzida carrega as baterias. O fluxo de energia segue para um transformador que modifica corrente elétrica contínua para alternada. A potência elétrica é transmitida ao motor de tração elétrico que por sua vez, modifica energia elétrica em mecânica e envia torque para mover as rodas do veículo.

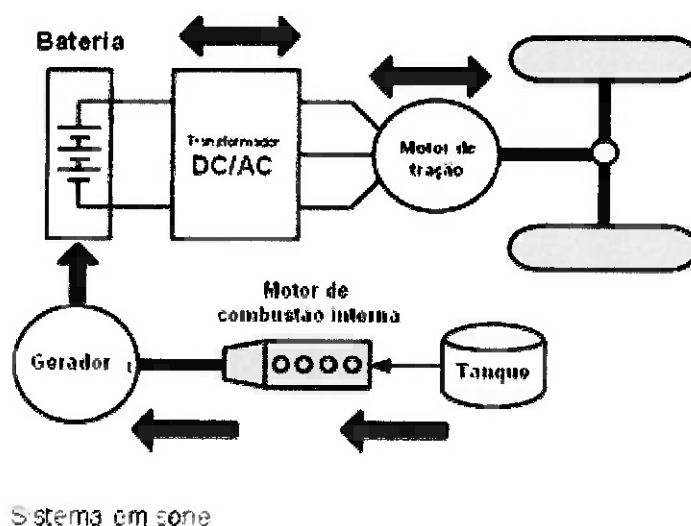


Figura 3.6 – Sistema híbrido elétrico em série  
 Fonte : Emadi et al,p.766 (2005)

Quando o veículo realiza a frenagem, o motor de tração elétrico torna-se um gerador, transformando a energia mecânica da frenagem em elétrica, carregando desta forma as baterias.

A energia recuperada no sistema de frenagem é um dos grandes diferenciais dos híbridos, promovendo economia e diminuição de emissões.

Devido ao fato de existir a recuperação da energia, uma menor demanda de energia nova será exigida. No veículo híbrido elétrico em série, o motor a combustão normalmente é acionado quando a energia da bateria possui entre 65 % à 75 % de carga.

Uma das vantagens é que o motor a combustão normalmente trabalha sempre num ponto de máxima eficiência e rotação constante, o que favorece durabilidade, ruído, economia e redução dos níveis de emissões.

O sistema híbrido elétrico em paralelo se diferencia do sistema em série devido ao mesmo possuir duas fontes de energia, cuja sua transmissão chega ao sistema de tração de forma independente. No caso do sistema em série, toda a energia gerado no motor a combustão passa pela bateria, já no sistema em paralelo isto não ocorre.

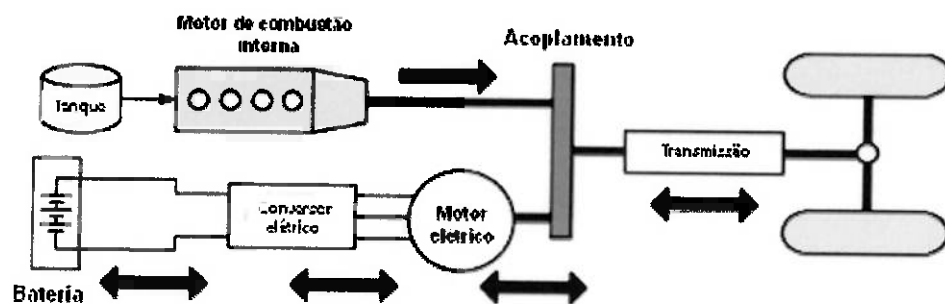


Figura 3.7 – Sistema híbrido elétrico em paralelo

Fonte : Emadi et al,p.766 (2005)

A estratégia principal do sistema em paralelo é usar o motor elétrico quando o veículo desenvolve baixas velocidades e o motor a combustão quando o mesmo estiver em velocidades altas.

A alternância do uso dos dois tipos de motores deste sistema, deve sempre buscar os máximos pontos de eficiência.

Quando o motor a combustão está desempenhando a função de movimentação do veículo, o motor elétrico pode, desde que exista uma energia sobressalente a necessidade de consumo, ser usado para carregar as baterias, ou seja, um excedente poderá ser reaproveitado. Além disso, observa-se ao fato de que a energia de frenagem também é usada para carregar as baterias.

O sistema híbrido elétrico misto unifica a possibilidade de trabalhar com o veículo, tanto desempenhando a suas funções no modo em série como em paralelo.

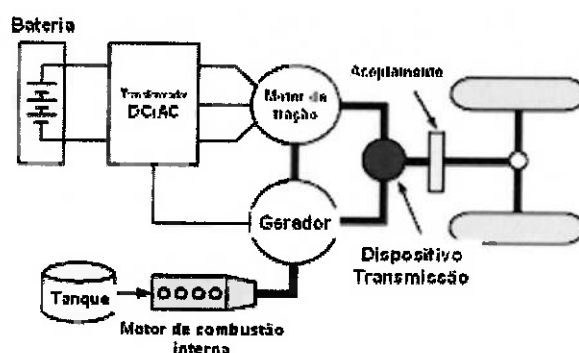


Figura 3.8 – Sistema híbrido elétrico misto – Paralelo e em série  
 Fonte : Emadi et al, p.766 (2005)

Com o sistema misto, que incorpora os sistemas em série e paralelo é possível usar os melhores recursos que ambos os sistemas podem oferecer, no caso do sistema em série a possibilidade de mover o veículo com o motor de combustão desligado e o paralelo com o seu melhor índice de autonomia para longos percursos.

O intuito da tecnologia híbrida elétrica é reduzir emissões e prover economia. Segundo Emadi et al. (2005), apenas 15 % da energia gerada num veículo com motor a gasolina é aproveitada para realizar o movimento, isto se deve ao fato do motor estar sempre trabalhando e portanto, consumindo combustível, mesmo em momentos em que o mesmo encontra-se parado. O veículo híbrido elétrico consegue aumentar a eficiência do uso de combustível, melhorando o seu aproveitamento para 30 % à 40 %.

Nos veículos híbridos elétricos, o maior desafio tecnológico é o desenvolvimento das baterias. A dificuldade no desenvolvimento de um sistema de armazenamento elétrico que seja eficiente na captação e fornecimento da energia, leve, seguro e resistente provoca uma corrida tecnológica entre fabricantes de veículos e sistemistas.

Temos atualmente, diferentes tipos de baterias, com diferentes materiais e características, sendo mais conhecidas as baterias de chumbo, níquel cádmio, níquel metal e a de lítio.

A mais promissora tecnologia de bateria é a de lítio em função das suas propriedades.

Em comparação com a bateria de chumbo, ela tem maior energia específica, capacidade de armazenamento por unidade de massa e maior ciclo de vida.

Atualmente, as baterias de lítio são comercializadas em pequenos módulos. Para obter uma bateria de maior capacidade, uma série de combinações modulares com ligações em série e em paralelo são necessárias.

No sistema com bateria de lítio, a garantia da segurança deste sistema também é um dos maiores objetivos de pesquisa. A indústria automotiva necessita desenvolver sofisticados sistemas de gerenciamento para prolongar a vida útil e prevenir defeitos decorrentes a aumentos de temperatura. Uma importante vantagem desta bateria é a alta resistência a memória elétrica e descargas profundas.

Tabela 3.1 – Comparação entre as mais promissoras baterias para veículos elétricos

Tipo de bateria	Tensão Nominal (V)	Energia específica (Wh/kg)	Densidade de energia (Wh/l)	Potência específica (W/kg)	Densidade Potencial (W/l)	Auto descarga (%/mês)	Ciclo de vida (carga/descarga)
Chumbo	2.0	35	70	~200	~400	4-8	250-1000
Lítio Ion	3.6	115	260	20-250	400-500	5-10	500-1000
Lítio – polímero	3.0	100-200	150-350	>200	>350	~1	200-1000
Níquel Cádmio	1.2	40-60	60-100	140-220	220-350	10-20	300-700
Níquel metal	1.2	60	220	130	475	30	300-500
Ar zinco	1.2	146	204	150	190	~5	~200
Zebra	2.6	100	160	150	250	~1	~1000

Fonte: Shukla et al. (2000)

Na tabela 3.2 encontramos um comparativo entre as propriedades energéticas dos diferentes tipos de materiais. Economicamente, a bateria de chumbo é a mais atrativa, sua grande desvantagem é o de possuir uma baixa energia específica, ou seja, a capacidade de liberar energia, relacionado com autonomia e massa.

Shukla et al. (2000) apresenta um exemplo comparativo, explicando que para mover 1 km, um veículo com a bateria de chumbo necessita de uma massa de 6 kg, o mesmo padrão de veículo, usando uma bateria de lítio polímero necessitaria de 2-2,5 kg de massa de bateria para mover 1 km, ou seja, mesma capacidade de fornecimento de energia com menos massa necessária de armazenamento.

Outro fator importante a ser considerado para aplicação automobilística de baterias elétricas é a sua vida útil.

Na tabela 3.1, é mostrada a quantidade de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada. Quanto maior esta vida útil, mais viável será a tecnologia no que tange a custo de manutenção e impacto ambiental.

Além dos desafios de desempenho, existe também a necessidade de desenvolvimento de uma estrutura de recuperação e reciclagem das baterias. O chumbo, níquel e cádmio são tóxicos a saúde humana e ao meio ambiente, a bateria de lítio polímero demonstra menor impacto ao meio ambiente, sendo portanto, definida como a tendência de baterias para os veículos.

### 3.4 CÉLULAS COMBUSTÍVEIS

A tecnologia de células a combustível apresenta-se como uma solução com a capacidade de fornecer energia a veículos com possibilidades de gerarem zero nível de emissão.

Dentre as alternativas de solução para redução de emissões apresentadas neste trabalho, ela tem grande potencial de se tornar no futuro a possível tecnologia de propulsão dos veículos.

As células combustíveis geram energia por meio de uma reação eletro-química. Por meio desta reação, é produzida uma corrente elétrica contínua que é usada como fonte de energia para diversas aplicações, incluindo-se os veículos.

O hidrogênio é o gás mais usado nos estudos de células combustível. Por meio da sua oxidação à prótons num eletrodo de difusão gasoso, são liberados elétrons nesta reação.



Num segundo eletrodo, chamado de eletrodo oposto ocorre a reação com o oxigênio gerando desta forma a molécula de água.



Cada célula combustível é capaz de produzir aproximadamente um potencial aberto de 1,0 à 1,2V. Estes valores apresentam um baixo nível de energia, em função disso, faz se um empilhamento de várias células em série para o alcance de potencias abertos maiores.

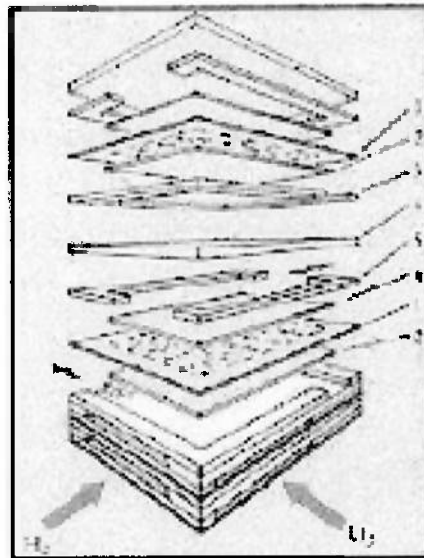


Figura 3.9 – Montagem de um empilhamento de unidades de células a combustível.  
 Fonte : Linardi et al. (1999)

Tendo em vista a possibilidade de produção de energia em células, muitos são os registros de trabalhos realizados nesta linha de pesquisa.

Existem diferentes tipos de células combustíveis. O que as difere são os tipos de materiais usados e as reações eletro-químicas. Esta variação de células se deve ao fato de procurar-se gerar energia de uma forma tecnicamente mais adequada em cada tipo de aplicação.

No que tange ao uso automotivo, a célula de hidrogênio não é uma aplicação muito confortável analisando a questão do armazenamento. O hidrogênio é difícil de ser manipulado, o mesmo deve ser usado numa forma pura e o seu armazenamento precisa ser realizado em acumuladores constituídos de nanotubos ou fibras de carbono com capacidade e distribuição molecular capaz de vedar a molécula.

Schlapbach (2001) explica que um carro movido a célula combustível precisaria de aproximadamente 4 kg de hidrogênio. Para prover o armazenamento destes 4 kg na forma gasosa, precisaríamos de um acumulador de 225 L pressurizado a 200 bar. O armazenamento do hidrogênio na forma líquida a uma pressão de 1 atm ocorre com -241 graus Celsius, acima disto o hidrogênio transforma-se em gás.

De posse das dificuldades acima descritas, porém não impeditivas a continuidade do estudo do uso de hidrogênio em células combustíveis, para aplicação veicular, os pesquisadores desenvolvem células combustíveis com o uso de outras fontes.

Para aplicação automotiva, destaca-se o metanol como fonte química de fornecimento de hidrogênio, esta célula combustível em específico possui a sigla PEMFC. Trata-se de uma célula combustível com membrana polimérica condutora de prótons.

Neste sistema, o hidrogênio é extraído do metanol. O que dificulta a sua utilização é um sistema de catalisador que consiga realizar o trabalho de oxidação do metanol sem ser afetado pelo gás CO. Linardi et al. (1999) explica que uma célula PEMFC gera na reforma catalítica do metanol um gás de síntese com 1% CO. Este volume contamina o catalisador de célula. Para que o problema seja resolvido, este volume deve ser diminuído 10 vezes.

### **3.5 MOTORES MOVIDOS COM COMBUSTÍVEIS VERDES**

No decorrer do desenvolvimento da indústria automotiva, além da gasolina e do Diesel, novas fontes energéticas para motores a combustão foram desenvolvidas, nos quais podemos destacar o etanol, metanol e o biodiesel, também chamados de combustíveis provenientes de biomassas.

Estes combustíveis são produzidos tendo como base vegetais. Eles podem serem usados como única fonte de combustível para um motor, como é o caso do etanol, ou ser misturado aos combustíveis tradicionais, como é o caso do biodiesel e o etanol misturado na gasolina.

Popularmente chamados de combustíveis verdes, recebem esta classificação devido à idéia de gerarem emissões menos agressivas ao meio ambiente e serem provenientes de biomassas.

Tecnicamente, no que tange ao uso dos combustíveis verdes, algumas alterações de parâmetros de trabalho dos motores bem como materiais nos sistemas de alimentação e escape do combustível são necessárias, um exemplo é o etanol que possui maior poder de corrosão que a gasolina.

As modificações não são complexas e fazem com que seja atrativa para a indústria automotiva atual, a utilização destas fontes, por manter desta forma, as matrizes e soluções tecnológicas atuais com apenas algumas modificações.

No Brasil, o desenvolvimento e os incentivos no uso de fontes verdes de energia é motivado pela sociedade e governo. O ponto inicial na busca do desenvolvimento destas fontes de combustível ocorreu em 1973 em função do choque do petróleo e até os dias atuais, o Governo brasileiro investe e incentiva o uso dos combustíveis verdes não somente no Brasil, mas oferecendo ao mundo todo.

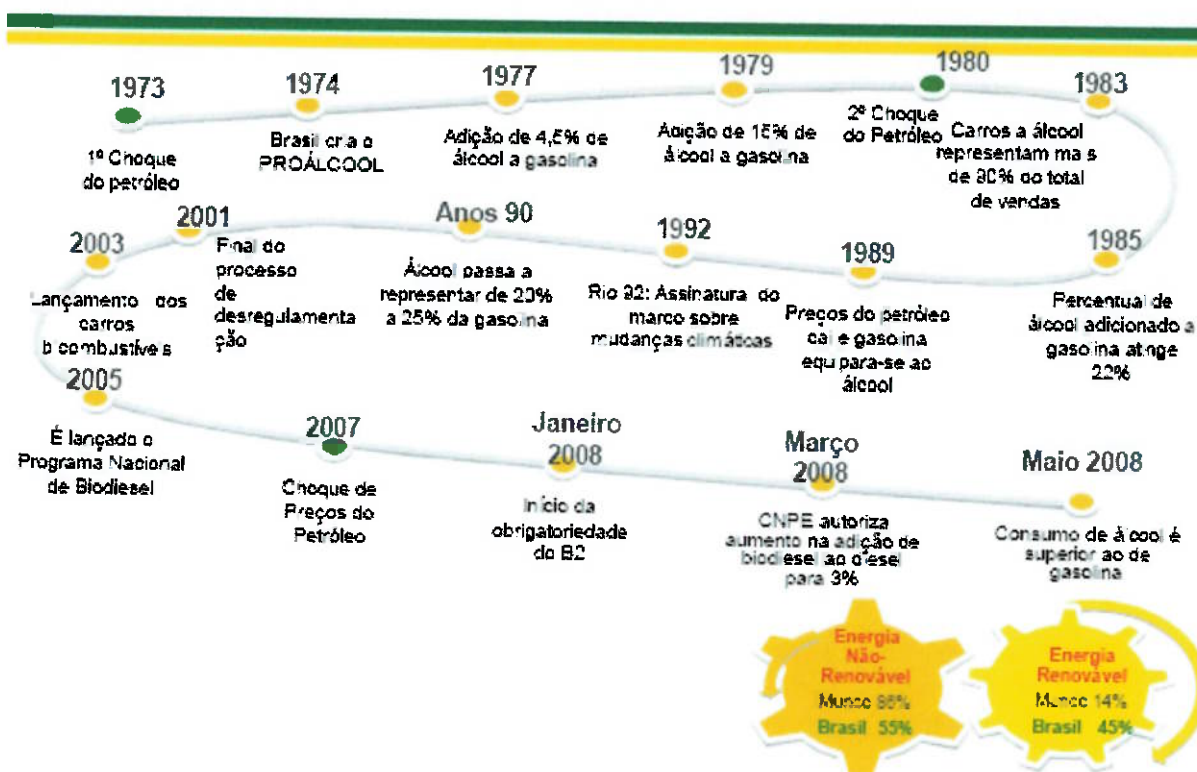


Figura 3.10 – Biocombustível no Brasil

Fonte : (KARDEC,2009)

Após 1973, o álcool teve bastante representatividade de consumo e mostrou-se concorrente à gasolina, principalmente em função do seu custo. Destaca-se na história dos biocombustíveis o ano de 1974 com a criação do PROÁLCOOL e o ano de 2005, onde lançou-se o programa do biodiesel.

No que tange ao nível de emissões de poluentes, os combustíveis verdes emitem menos CO<sub>2</sub> que os produzidos a base de petróleo.

Kardec (2009) exemplifica um comparativo entre o etanol de cana e a gasolina, fazendo uma analogia ao consumo e níveis de CO<sub>2</sub>;

- 1.000 litros de etanol de cana emitem 309 kg de CO<sub>2</sub>
- 1.000 litros de gasolina emitem 3368 kg de CO<sub>2</sub>



No ano de 2008, Kardec explica que o Brasil consumiu 19,6 bilhões de litros de etanol e que portanto foram evitadas 37,6 milhões de toneladas de emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

O Biodiesel assim como o etanol de cana de açúcar foi incorporado a matriz energética brasileira, tendo como uma importante data o ano de 2005, no qual foi lançado pelo Governo o seu programa.

O biodiesel é feito a base de óleos vegetais provenientes da mamona, da soja, do amendoim, etc. A viabilização do biodiesel requer uma análise estrutural de produção e venda, bem como um planejamento de demanda energética.

Assim como o etanol, o biodiesel tem um grau de abrangência e fatores similares ao que podemos constatar na produção do etanol a base de cana. No âmbito de redução de emissões, o mesmo possui a propriedade de redução do CO<sub>2</sub> na atmosfera.

O biodiesel já é produzido e utilizado em outros países, um exemplo disto é a Alemanha, que já possui em sua matriz energética, o uso do biodiesel misturado ao Diesel proveniente do petróleo. Neste país, 20% do combustível é composto de biodiesel. A base do biodiesel alemão é o óleo de colza.

No Brasil, no ano de 2008 foi estipulado que 2 % da mistura do diesel devem conter o biodiesel. Ao longo dos anos, este volume vai ser aumentado devido ao fato que toda uma estrutura de produção de oleaginosas deve ser viabilizada.



Figura 3.11 – Biocombustível no Brasil

Fonte : (KARDEC,2009)

Conforme o cronograma de previsão da ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), em 2013 existe a previsão de obrigatoriedade no uso de biodiesel que resultará na geração de 2,0 bilhões L/ano.

Os veículos que usam o Diesel, além da utilização do biodiesel, que reduz a emissão de CO<sub>2</sub>, possuem a previsão de iniciar o uso do diesel com 50 ppm de enxofre a partir de 2009, e o diesel com 10 ppm a partir de 2013 segundo previsões de Kremer (2009).

O Diesel usado no Brasil para veículos usam 500 ppm de enxofre. Portanto, juntando-se ao fato da utilização do biodiesel e a tendência de diminuição de teor do enxofre do Diesel a base de petróleo, uma melhora nos níveis de emissões será obtida.

Importante ressaltar que na Alemanha, onde se usa o diesel com 10 ppm e 20% de biodiesel, alcança-se o nível de emissões classe Euro IV.

Contudo, deve se ter cautela na análise de vegetais no uso de combustíveis. Possivelmente as queimas destes óleos nos motores podem emitir gases nocivos a saúde humana. Portanto, não é por que o combustível seja a base de uma planta, que o mesmo não possa ser nocivo.

Os veículos a base de biomassas possuem a tendência de emitir aldeídos na atmosfera, o que afeta a química atmosférica nas áreas poluídas, aumenta a concentração de ozônio na troposfera e são importantes precursores de ácidos orgânicos, provocando a formação de chuva ácida.

Desta forma, normas reguladoras para aldeídos podem contribuir para o aperfeiçoamento destes combustíveis a base de biomassa, o que certamente irá somar-se as atuais vantagens que os biocombustíveis apresentam.

### **3.6 TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES**

No capítulo 3 foi descrito algumas das principais frentes de pesquisas para redução de emissões automotivas.

As pesquisas têm diferentes conceitos, natureza e fundamentos físicos e químicos.

Contudo, em todas as tecnologias descritas, existem espaços para melhoria e desenvolvimento, algumas já estão presentes na sociedade e outras em fase de teste.

A tendência é a busca do aperfeiçoamento de cada uma delas conforme a conveniência e necessidade da sociedade local.

## **CAPÍTULO 4**

### **SISTEMAS HÍBRIDOS HIDRÁULICOS**

#### **4.1 ASPECTOS GERAIS**

Componentes e sistemas hidráulicos são comuns em aplicações industriais como, por exemplo, máquinas operatrizes, injetoras, prensas e na área de veículos fora de estrada que é o caso de tratores, colheitadeiras e guindastes.

As tecnologias hidráulicas usadas nestes equipamentos usam sistemas capazes de trabalharem com pressões de até 350 bar, com possibilidades em algumas aplicações na ordem de 630 bar.

Os sistemas híbridos hidráulicos fazem o uso de componentes que possibilitam o deslocamento e controle do óleo pressurizado para a realização do trabalho.

O grande objetivo de um sistema híbrido hidráulico é captar energia do sistema de frenagem na desaceleração, e no ato da aceleração, devolver a energia para o sistema de tração do veículo.

Trata-se de uma tecnologia com estudos iniciados nas décadas de 70 à 80.

Os principais centros de desenvolvimento destes sistemas estão nos E.U.A (Estados Unidos da América) e na Alemanha.

Nos E.U.A, a Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency - EPA), vem motivando, divulgando, estimulando parcerias e investimentos desta tecnologia.

Na Alemanha, a tecnologia é motivada pelo Governo, que oferece abertura de testes de veículos em frotas de caminhões de limpeza e ônibus.

Entre a década de 80 e os dias atuais, existe um limitado número de veículos usando esta tecnologia, isto se deve ao fato do amadurecimento de projeto e testes, porém, alguns protótipos foram construídos e apresentaram bons resultados.

A tendência que vêm sendo demonstrada é que a tecnologia híbrida hidráulica seja aplicada em veículos comerciais leves e pesados com regime de trabalho em centros urbanos.

Em áreas urbanas, grande parte da energia é perdida em forma de calor pelo sistema de frenagem. Como reaproveitar esta energia estimula engenheiros a idealizar soluções.



Figura 4.1 –Ciclo na cidade, energia desenvolvida pelo sistema de roda (referência, 20000 lbs, vt364)  
 Fonte : Baseado no gráfico Gray,p.13,2006

Na figura 4.1 a Agência Americana de Proteção ao Meio Ambiente - EPA, relata que 40% do total de um ciclo de energia desenvolvido nas rodas são perdidas por meio do trabalho da frenagem numa cidade, neste exemplo, foi considerado um veículo comercial com peso de 20000 lbs (9 Ton).

Para veículos comerciais, devido ao tamanho e massa envolvida, para que um sistema seja eficiente, o mesmo deve ser capaz de oferecer uma potência suficiente para fazer com que o veículo consiga acelerar e sair da inércia.

Por meio dos diagramas de Ragone, é possível avaliar a capacidade de potência e energia específica de armazenamento para diferentes sistemas. Os diagramas de Ragone consideram normalmente recursos de armazenamento elétrico de energia, como por exemplo baterias e capacitores.

Acumuladores hidráulicos são incluídos nos diagramas de Ragone com base nos dados e informações extraídas de empresas e especialistas que trabalham com este tipo de tecnologia, tendo como base a potência e energia específica que pode ser realizada por um acumulador.

Na figura 4.2 podemos encontrar um digrama de Ragone, onde localizamos os acumuladores hidráulicos, sendo possível desta forma, reconhecer e localizar as propriedades de potência e energia específica.

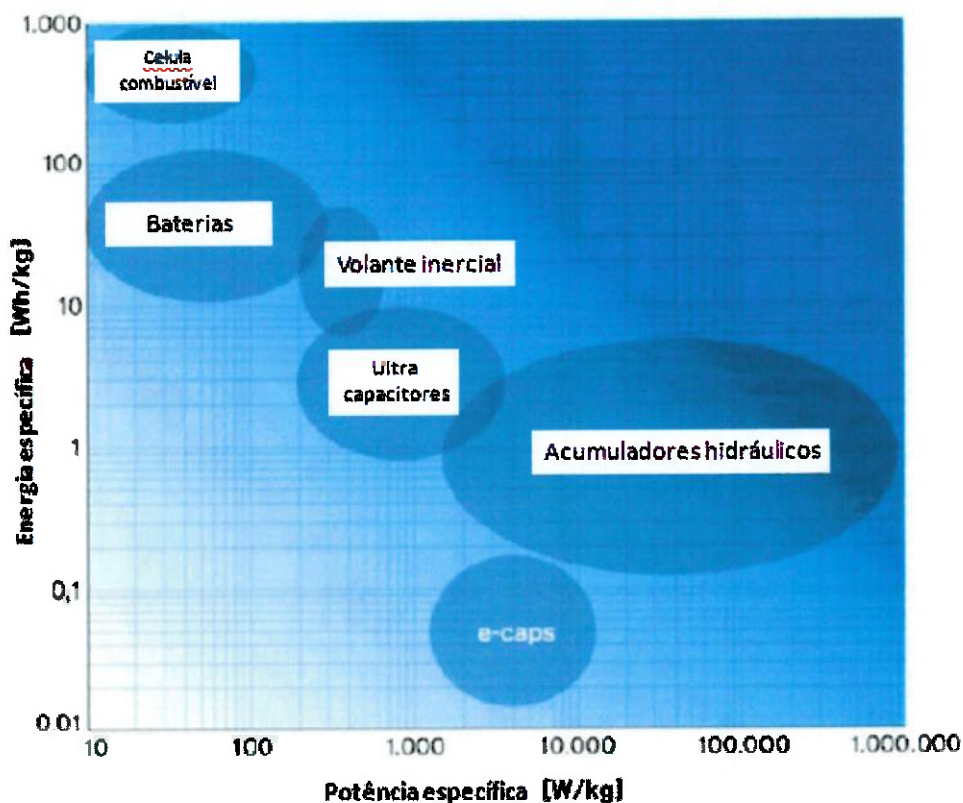


Figura 4.2 – Diagrama de Ragone – Potência específica x Energia específica para sistema de armazenamento de energia

Fonte : Baseado na figura 1,p.5, Kliffken et al. (2009)

As baterias possuem alta energia específica, os acumuladores possuem alta potência específica.

Isto significa dizer que quando temos alta energia específica, temos um cenário no qual a autonomia é favorecida. Quando temos alta potência específica, a capacidade de captar bem como liberar energia em um espaço curto de tempo é favorecida.

Na aplicação em veículo com uso dentro de um ciclo urbano, com constantes eventos de desaceleração e aceleração, isto torna-se interessante pelas necessidades de alta potência específica para prover a aceleração e desaceleração, principalmente em veículos comerciais pesados.

Na figura 4.3 podemos observar três situações diferentes. A intenção da figura é avaliar a capacidade de armazenamento de energia em três curvas de frenagens com os seus respectivos modelos de veículos.

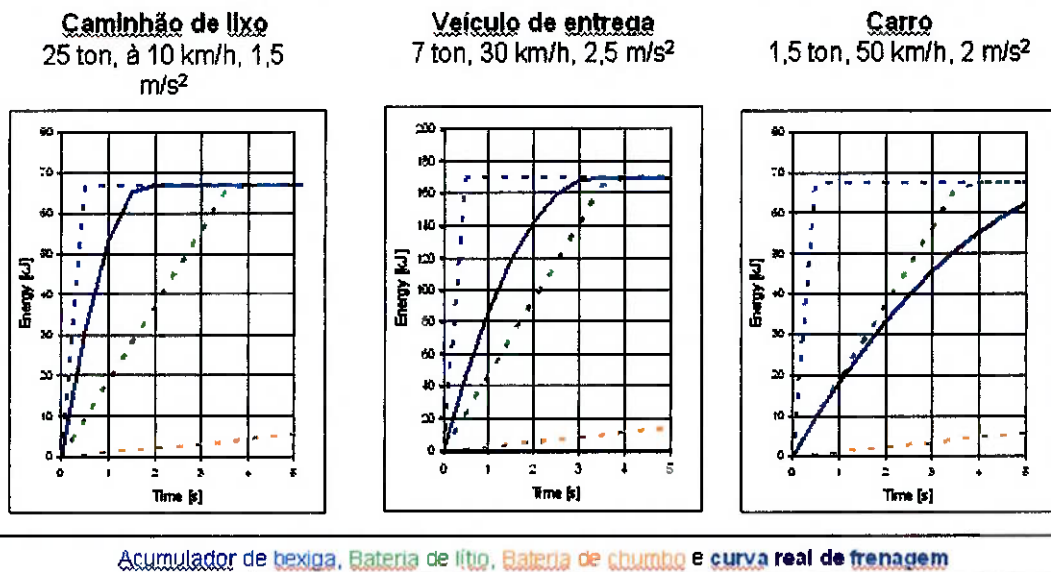


Figura 4.3 –Capacidade de carregamento de energia em função da velocidade para um a curva de frenagem

Fonte : Bosch Rexroth (2008)

Na curva do caminhão de lixo, somente os acumuladores hidráulicos são capazes de acumular toda a energia de frenagem desenvolvida pelo veículo. A bateria de lítio absorve uma parte da energia e a bateria de chumbo demonstrou um reduzido desempenho nesta situação.

Na curva do veículo comercial com 7 toneladas, o acumulador continuou apresentando boa captação da energia de frenagem, a bateria de lítio demonstrou uma melhora na captação de energia em relação a curva do caminhão de lixo, já a bateria de chumbo manteve o desempenho.

No carro, o acumulador consegue absorver toda a energia de frenagem bem como a bateria de lítio, a bateria de chumbo manteve o mesmo desempenho nos veículos utilitários.

Na medida que a intensidade de energia e conseqüentemente as curva de frenagens vão diminuindo, a bateria de lítio vai tornando-se suficiente para a captação total da energia fornecida. Isto é observado no momento em que a mesma é avaliada frente a curva de frenagem desenvolvida por um carro.

O acumulador hidráulico tem a capacidade de absorção de energia em todas as situações, já a bateria de lítio somente alcança este desempenho nos carros. Com os resultados apresentados, é possível verificar a aplicabilidade do sistema híbrido hidráulico em veículos comerciais leves e pesados com ciclo urbano de para e anda e as baterias de lítio para carros.

A potência de frenagem em veículos que se movem em grandes centros é a principal fonte a ser recuperada e reutilizada, para tanto, as soluções de sistema devem prover de eficiência e bom rendimento para a devolução da potência recuperada no freio regenerativo para as rodas.

Gray (2006) demonstra por meio de um estudo realizado pelo Centro de Pesquisas Automotiva da Universidade de Michigan, um típico balanço de rendimento dos componentes envolvidos no sistema híbrido hidráulico para um caminhão de entrega categoria 6.

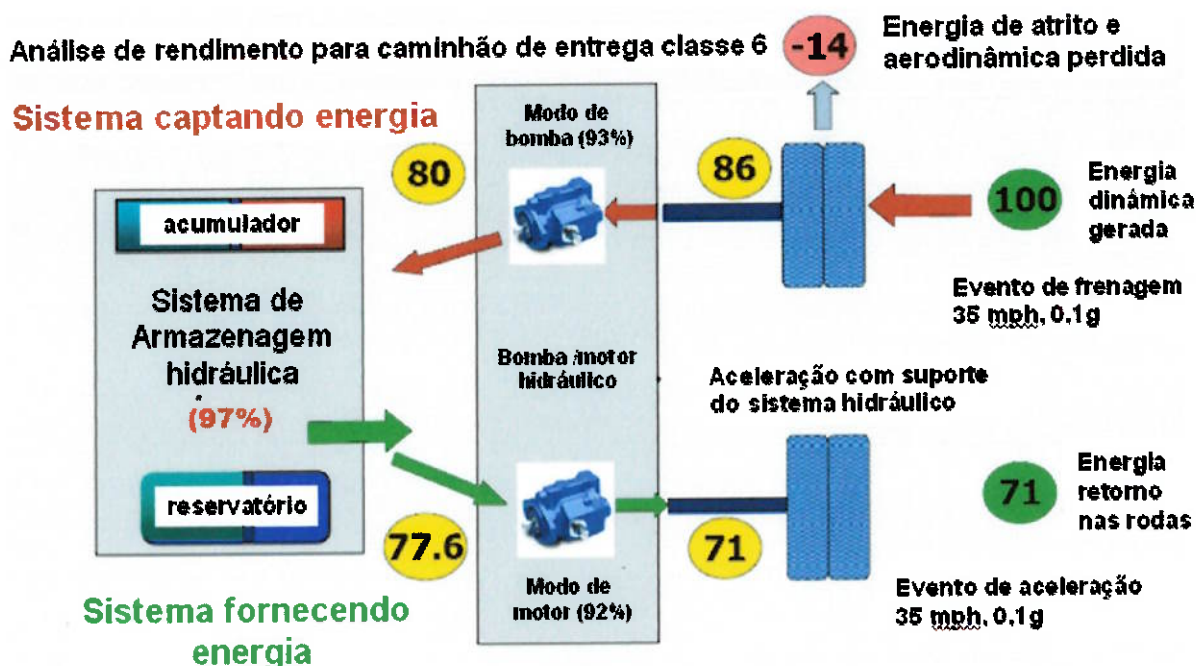


Figura 4.4—Análise de rendimento de captação e fornecimento de energia para caminhão de entrega classe 6, Centro Automotivo da Universidade de Michigan

Fonte: Gray, p.14 (2006)



No sistema analisado, por meio dos eventos de aceleração e desaceleração é realizada uma análise com o objetivo de se determinar em quantidades percentuais, o quanto da energia captada pelo sistema regenerativo dos freios irá retornar ao sistema de tração do veículo.

As porcentagens estimadas consideram os rendimentos totais dos componentes que formam o sistema. Conforme a energia vai passando pelos componentes, debitam-se as porcentagens perdidas em cada um deles no qual se estimam, conforme Gray (2006), no caso analisado, um retorno de 71 % da energia captada pelo freio regenerativo hidráulico.

Componentes hidráulicos possuem rendimentos na ordem de 80% à 95 % dependendo do componente e aplicação, que melhor serão detalhados (componentes usados no sistema regenerativo) separadamente nos itens a seguir neste capítulo.

## **4.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS HIDRÁULICOS**

Nos sistemas híbridos hidráulicos existem dois formatos de funcionamento, o sistema em série e o paralelo.

Os componentes básicos de um sistema híbrido em série são bomba/motor, um acumulador de alta pressão, um acumulador de baixa pressão e um transmissão hidráulica.

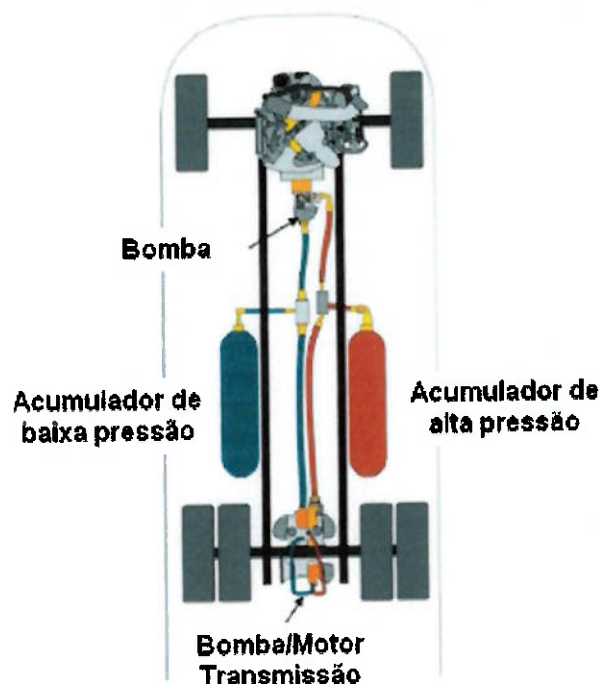


Figura 4.5—Sistema híbrido hidráulico em série  
 Fonte: Bohlmann (2007)

No sistema híbrido hidráulico em série, toda a transferência de potência mecânica do motor a combustão é transmitido diretamente para as rodas por meio de uma transmissão hidráulica.

A estratégia de funcionamento deste sistema é carregar o acumulador durante os eventos de frenagem e usar esta energia hidráulica armazenada para movimentar o veículo. Os veículos possuem os seguintes modos de operação;

- Frenagem: Bomba/Motor hidráulico funciona como uma bomba, succionando óleo do reservatório de baixa pressão e carregando o acumulador de alta pressão;
- Aceleração com acumulador : O veículo pode acelerar utilizando somente o óleo contido no acumulador pressurizado, ou seja, a transferência de energia hidráulica é realizada diretamente do acumulador para a transmissão, sem atuação do motor a combustão;
- Aceleração com o motor a combustão: O motor a combustão transfere torque para a bomba hidráulica, esta por sua vez envia óleo para a transmissão hidráulica que converte energia hidráulica em mecânica;

- Aceleração com acumulador e motor a combustão: A aceleração pode ser realizada usando energia hidráulica proveniente da bomba conectada ao motor a combustão e do acumulador hidráulico.

O grande objetivo deste sistema é usar o menos possível o motor a combustão, realizando se possível toda a movimentação de início de movimento por meio do acumulador, deixando o motor a combustão atuar somente em velocidades mais altas.

O sistema híbrido hidráulico em paralelo (SHHP) é basicamente composto de reservatório de baixa pressão, acumulador de alta pressão, bomba/motor e embreagem de acoplamento.

#### SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO EM PARALELO

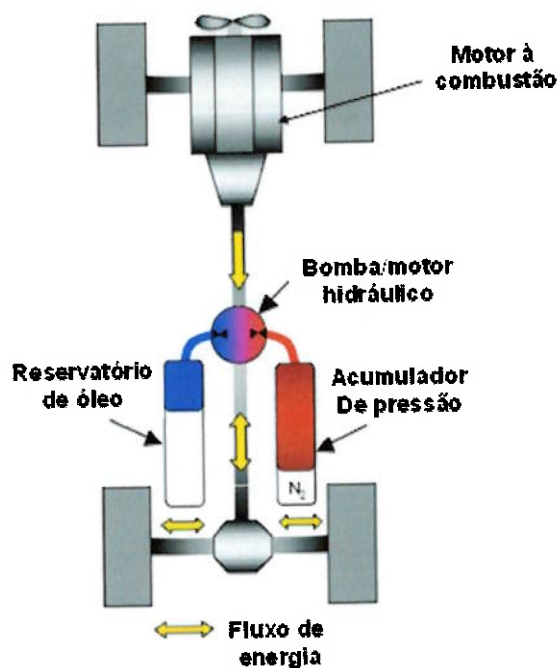


Figura 4.6–Sistema híbrido hidráulico em paralelo (SHHP)

Fonte: Bohlmann (2007)

No SHHP, o veículo tem o sistema de tração padrão, com motor a combustão conectada a uma caixa de transmissão e os respectivos eixos para transferência de torque para as rodas.

Adicionalmente ao sistema de tração convencional, usada em veículos com motor de combustão interna, monta-se um circuito hidráulico em paralelo que por meio de um sistema de embreagem, pode realizar a tração das rodas com motor à combustão desconectado, consumindo a energia hidráulica armazenada no acumulador. Os modos de operações do sistema em paralelo são;

- Frenagem: Durante a desaceleração, o sistema de embreagem é acoplado ao sistema de tração mecânica do veículo, por meio da rotação do eixo, o torque é transmitido para a bomba/motor hidráulico através da caixa de embreagens, neste momento, a bomba/motor succiona óleo do reservatório hidráulico transmitindo o mesmo para o acumulador, realizando o trabalho de pressurização do óleo;

- Aceleração com acumulador: No momento em que o veículo necessita realizar a aceleração, o óleo pressurizado no acumulador é descarregado para a bomba/motor que por sua vez, irá através da pressão e vazão de óleo recebido, transmitir torque para a caixa de embreagens conectada ao sistema de tração do veículo, este torque chegará até as rodas realizando o movimento do veículo;

- Aceleração com motor a combustão: A aceleração pode ser realizada diretamente pelo motor a combustão conforme os sistemas padrões atuais;

- Aceleração com motor a combustão e acumulador hidráulico: Possível de ser realizada, a tração do veículo pode ser realizada com ambos os sistemas fornecendo energia.

A estratégia de redução de consumo de combustível do sistema paralelo é usar a energia hidráulica proveniente do sistema regenerativo dos freios, para iniciar o movimento do veículo, onde ocorre a necessidade de maiores torques, permitindo desta forma que o motor a combustão possa trabalhar num nível ótimo de torque onde se consiga seu melhor rendimento.

O sistema é paralelo, portanto, em momentos onde uma maior demanda de energia seja necessária, a hidráulica pode entrar em atuação automaticamente.

Os sistemas híbridos hidráulicos em série e paralelo são diferentes, os sistemas paralelos possuem como vantagem se adaptar mais facilmente aos sistemas de trações veiculares atuais, ou seja, sem grandes alterações de projeto do veículo, é possível montar ou até mesmo adaptar o sistema hidráulico em paralelo.

Nos sistemas em série não é possível adaptação nos sistemas de tração mecânica dos veículos atuais, portanto, ou o veículo já é concebido da fábrica montado, ou em caso de reforma, todo o sistema de tração mecânica de um veículo deve ser retirada.

Gray (2006) relata que os sistemas paralelos têm como pontos positivos ser mais fácil a adaptação tecnológica, com riscos menores de aplicação, permitindo desta forma adquirir mais facilmente um amadurecimento dos efeitos da hidráulica nos sistemas de frenagem regenerativa, aparentemente, os custos dos sistemas hidráulicos em paralelo são menores quando comparados com os sistemas híbridos elétricos. Para as montadoras e usuários de veículos, a possibilidade de manter o sistema de tração mecânico convencional por meio da utilização do SHHP, traz mais segurança e é uma alternativa de continuação de funcionamento do veículo caso o sistema hidráulico tenha algum impedimento de funcionamento.

O ponto que requer melhoria do sistema hidráulico em paralelo está no tempo de retorno do investimento em função dos resultados de economia de combustível e por manter dois sistemas independentes de tração, fazendo com que o veículo possua maior massa e componentes.

O sistema em série hidráulico quando comparado ao sistema paralelo hidráulico consegue obter retorno mais rápido do investimento na tecnologia, permite uma maior eficiência na redução de emissões de poluentes e consegue usar conceitos e tecnologia da tração hidráulica já utilizada nos veículos fora de estrada como, por exemplo, caminhões usados por mineradoras e tratores de grande porte.

Um fator importante para o sistema híbrido hidráulico em série é o amadurecimento tecnológico para veículos não fora de estrada. Por se tratar de uma tecnologia no qual se retiram todos os sistemas de tração mecânica atual formada pela embreagem, caixa de transmissão, eixo, semi-eixo, etc, a tecnologia híbrida em série apresenta um risco tecnológico maior, no qual uma maior demanda de testes, normalizações e análises serão necessárias. A EPA foca os investimentos futuros nos sistemas híbridos hidráulicos em série conforme Gray (2006).

### 4.3 CASOS DE PROTÓTIPOS E VEÍCULOS COM TRAÇÃO HÍBRIDA HIDRÁULICA

A tecnologia híbrida hidráulica tem despertado interesse devido aos resultados obtidos. Somam-se aos resultados obtidos também todo o desenvolvimento, nível de conhecimento disseminado dos componentes hidráulicos e os seus princípios de funcionamento. Outro fator importante para a viabilidade da tecnologia é um maior uso da eletrônica incorporado aos atuadores hidráulicos como por exemplo bombas e válvulas.

Por meio da pesquisa, foi possível relatar alguns exemplos e casos de sucessos que fazem com que engenheiros e centros automotivos de pesquisa invistam no uso da hidráulica para captar energia regenerativa dos freios.

Em 1980, a MAN desenvolveu o Hydrobus, que conforme Scott (1980), conseguiu uma economia de combustível entre 21 à 28 %.

Em 2003, um caminhão Ford modelo F-550 foi reformado, onde foi montado um sistema de freio regenerativo hidráulico paralelo. Este projeto conseguiu obter uma economia de combustível de 20 à 30 % de mpg (milhas por galão) o que resultou na premiação do *Michelin Bibendum Challenge 2003* na categoria economia e performance de combustível.



Figura 4.7 – Ford F-550 e o prêmio *Michelin Bibendum Challenge 2003*  
Fonte : Gray.p28 (2006)

Em 2006, um ônibus modelo Ford E450 do exercito americano foi equipado com um sistema hidráulico paralelo, no qual obteve uma economia de até 25% de combustível e uma redução de ruído de 6dBA no momento da aceleração.



Figura 4.8 – Ford E450 com sistema híbrido hidráulico paralelo HLA da Eaton  
 Fonte : Bohlmann (2007)

Tabela 4.1 – Resultados de economia e redução de emissões de um sistema híbrido hidráulico paralelo

% de economia e redução de emissões – Sistema Híbrido Paralelo HLA <sup>1)</sup>			
Peso do veículo (lb)	NOx	CO <sub>2</sub>	Economia de combustível
12000	17,5 %	20,8 %	26,2 %

Fonte : Bohlmann (2007)

Ford E-450, Motor diesel de 6.0 L, 5 marchas, transmissão automática

1) Sistema Híbrido paralelo da Eaton HLA

Os caminhões de lixo têm sido um dos veículos selecionados para estudo e avaliação de desempenho de sistemas híbridos hidráulicos.

Kliffken et al. (2007) explica que o sistema de freio regenerativo hidráulico HRB da empresa Bosch Rexroth, por meio de simulações e testes foi possível prever uma economia de combustível no sistema paralelo na ordem de 15 à 25 % na condição “para e anda” desenvolvida por um caminhão de lixo.

No caso, o veículo testado foi uma caminhão de lixo com peso de 26 ton, potência de 205 kW, consumo de diesel de 10 l/h e com uma velocidade de 25 km/h. Kliffken et al (2007) obteve as seguintes curvas de resultados.

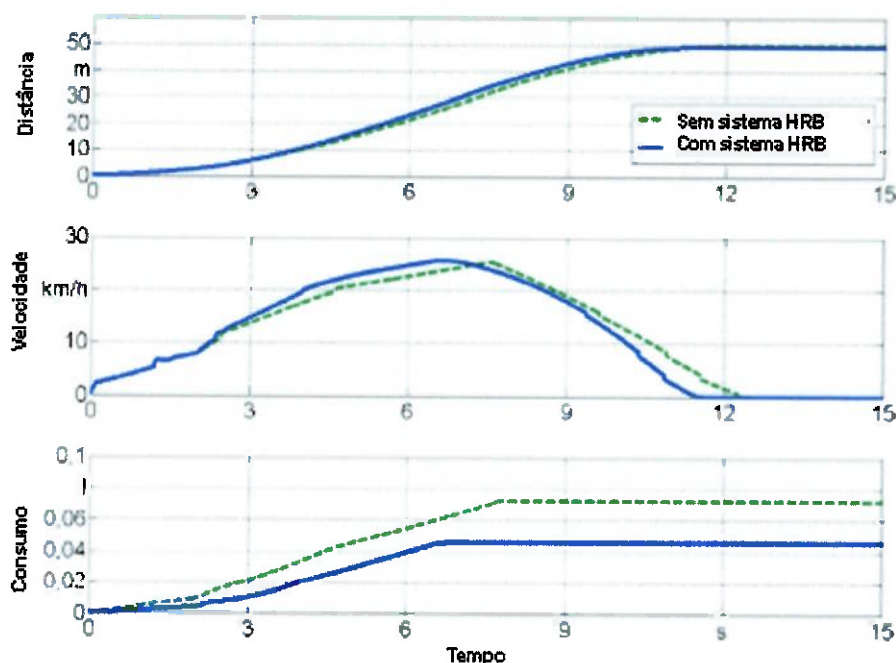


Figura :4.9

Fonte : Kliffken et al (2007)

Veículo: Caminhão de Lixo, 26 ton, 205 kW

Por meio da figura 4.9 é possível perceber que em termos de desempenho de velocidade, bem como distância percorrida, o veículo híbrido hidráulico quando comparado com o veículo de mesma natureza sem o sistema, obteve resultados aproximados. Ao analisar ambos os veículos, na referência de tempo em 6 s, os resultados aproximados podem ser representados conforme a seguir;

- Com o sistema híbrido hidráulico: consumo de 0,040 L, velocidade de 25 km/h em uma distância de 23 m

- Sem o sistema híbrido hidráulico: consumo de 0,057 L, velocidade de 22 km/h em uma distância de 23 m

Valores próximos também foram obtidos em um outro teste de caminhão de lixo. Bohlmann (2008) obteve 28 % de economia de combustível em um caminhão de lixo chassis Peterbilt 320, com peso de 63000 lb, com motor a diesel de 315 hp e transmissão automática.

Outro exemplo de veículo híbrido hidráulico com sistema paralelo é um caminhão de lixo onde seus dados são demonstrados abaixo:

- Veículo Mercedes Benz Actros
- Peso : Variante entre 15 / 26 Toneladas
- Motor Diesel 235 kW



- Potência do sistema híbrido hidráulico : 250 kW / 2500 Nm
- 2 Acumuladores de aço hidráulicos de bexiga com volume de 32 litros, pressão máxima de trabalho 330 bar, pressão mínima estipulada em 120 bar
- Velocidade de alcance de 30 Km/h
- Capacidade de energia de acumulação = 550 kJ

Fonte: (MARSHALL, 2008)

Este veículo em teste consegue obter economia de combustível na ordem de 25% nas condições de um percurso real numa cidade Alemã conforme explicado por Marshall (2008)



Figura 4.10—Ilustração de um Sistema híbrido hidráulico em paralelo montado no modelo X2ceco da Empresa Haller

Fonte: Haller Umweltsysteme GmbH & Co (2009)

Os projetos e veículos montados com sistemas híbridos hidráulicos em séries apresentam resultados mais interessantes em termos de economia e redução de emissões.

A EPA em 2005 desenvolveu em parceria com a UPS, Eaton, Internation Caminhões e o Exército Americano um veículo comercial leve de entrega com sistema híbrido hidráulico em série. Este veículo pode ser visualizado na figura 4.11.

Resultados importantes foram obtidos conforme relatado por Gray (2006), cujos valores renderam uma nota no jornal New York Times em Fevereiro de 2005 descrevendo que *“A Agência de Proteção Ambiental e a UPS anunciam hoje um projeto relativo a um novo tipo de transmissão que poderá economizar energia e reduzir emissões de poluentes”*.

Os resultados obtidos pela EPA neste projeto foram;

- uma economia de 60 à 70 % em mpg com o veículo se deslocando num trajeto determinado pelos pesquisadores,

- um custo inicial de investimento na ordem de 10 à 15 % sobre o valor atual do veículo
- com a economia de combustível alcançado, um retorno de 2 à 3 anos sob o valor investido.

Tabela 4.2 – Resultados de economia de sistema híbrido hidráulico em série, teste no laboratório  
□dynamômetro

	MPG	Aumento de economia
Veículo padrão base sem sistema híbrido hidráulico	10,4	
Sistema híbrido hidráulico – motor sempre ligado	14,4 – 15,0	39 – 44%
Sistema híbrido hidráulico – motor desconectado (quando o veículo não está se movimentando)	15,8 – 16,5	52 – 59%
Sistema híbrido hidráulico – motor desconectado na maior parte do tempo (quando o veículo está desacelerando quando o veículo não está se movimentando)	17,8 – 18,1	70 – 74%

Fonte: Gray, p.35 (2006)

Dentre as condições urbanas, o veículo urbano da UPS apresentou resultados satisfatórios, tanto que a partir deste momento, a EPA foca agora os investimentos e esforços de estudos para os sistemas híbridos hidráulicos em série.

Este mesmo veículo atualmente é utilizado na cidade de Detroit e nos trabalhos diários obtêm economia de combustível na ordem de 45 à 50 % conforme Bohlmann (2008).



Figura 4.11 – Veículo Híbrido Hidráulico em Série UPS  
Fonte: Gray,p.33 (2006)

Os veículos híbridos hidráulicos em série provocam alterações mais profundas e um estudo totalmente novo no lay-out.

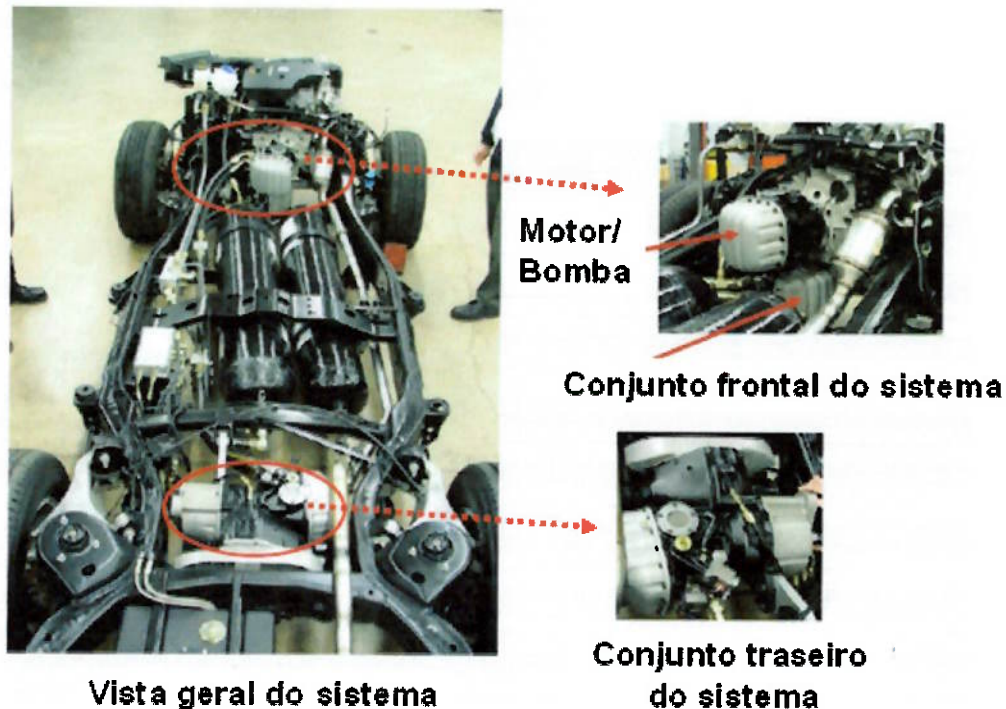


Figura 4.12 – Veículo Híbrido Hidráulico em Série, montagem no chassi  
Fonte: Gray,p.31 (2006)

Conforme podemos perceber na figura 4.12, novos conceitos de projetos são necessários para o desenvolvimento deste tipo de solução. Embora resultados sejam satisfatórios conforme obtido no veículo da UPS, o risco de projeto é maior neste tipo de sistema, demandando desta forma um estudo de confiabilidade, testes e certificações.

Com base nas informações apresentadas, o sistema em paralelo possivelmente acredita-se ser uma solução a ser adotada como primeiro passo para empresas e países nos quais desejam iniciar a adoção deste tipo de tecnologia. O sistema em série, devido a sua complexidade, sugere-se ser adotado em um passo seguinte.

Em razão disso, conforme descrito neste item, os próximos itens relacionados aos sistemas híbridos hidráulicos abordarão o sistema em paralelo, seguindo o raciocínio de que no atual amadurecimento tecnológico atual no Brasil, o detalhamento do mesmo ofereça uma maior contribuição ao conhecimento atual.

#### **4.4 DETALHAMENTO DE UM SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO PARALELO**

O sistema SHHP para veículos é basicamente composto por reservatório, bomba/motor, acumulador, bloco de aço com válvulas montadas e o sistema de acoplamento.

O intuito deste capítulo é prover um detalhamento dos itens que são montados no sistema híbrido hidráulico paralelo realizando uma análise individual do funcionamento dos principais componentes para posterior proposta de um anteprojeto. O princípio de funcionamento do sistema híbrido hidráulico em paralelo foi descrito no item 4.2.

#### 4.4.1 Acumulador hidráulico em sistemas híbridos hidráulicos

SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO EM PARALELO

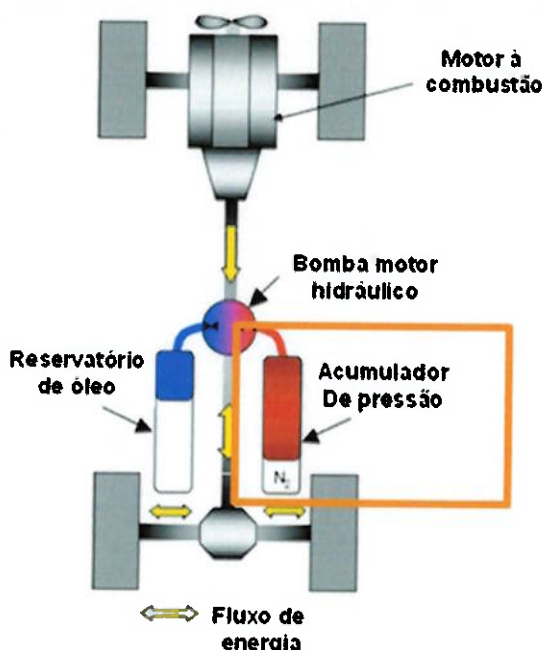


Figura 4.13–Sistema híbrido hidráulico em paralelo – Acumulador hidráulico  
Fonte: Bohlmann (2008)

Acumuladores são dispositivos mecânicos com diversas finalidades e aplicações na hidráulica. As principais possibilidades do uso de acumuladores de pressão na hidráulica são para atuar como fonte auxiliar de energia, compensar vazamentos, atuar como fonte de energia de emergência e absorver excedentes de energia atuando como amortecedores de eventuais pulsações originadas por comutações de válvulas, choques hidráulicos e etc.

O princípio operacional é baseado na acumulação de fluido, mantido sob pressão em decorrência da interação entre forças de pressão interna (hidráulica) e externa, do tipo gravitacional ou de mola mecânica ou pneumática. A energia assim armazenada fica disponível para reabsorção pelo sistema hidráulico quando a resistência ao escoamento é reduzida.

(LINSINGEN,p.357,2003)

Existem diferentes tipos construtivos de acumuladores. Em sistemas híbridos hidráulicos, os acumuladores utilizados são a gás com bexiga ou pistão.

Os acumuladores de bexiga são o foco da pesquisa pois é este tipo de acumulador que será adotado no anteprojeto do sistema hidráulico híbrido paralelo no capítulo V. Entende-se que possivelmente, este tipo de acumulador tenha a capacidade suficiente para armazenar o gás e o volume de óleo para o acúmulo da energia necessária do sistema.

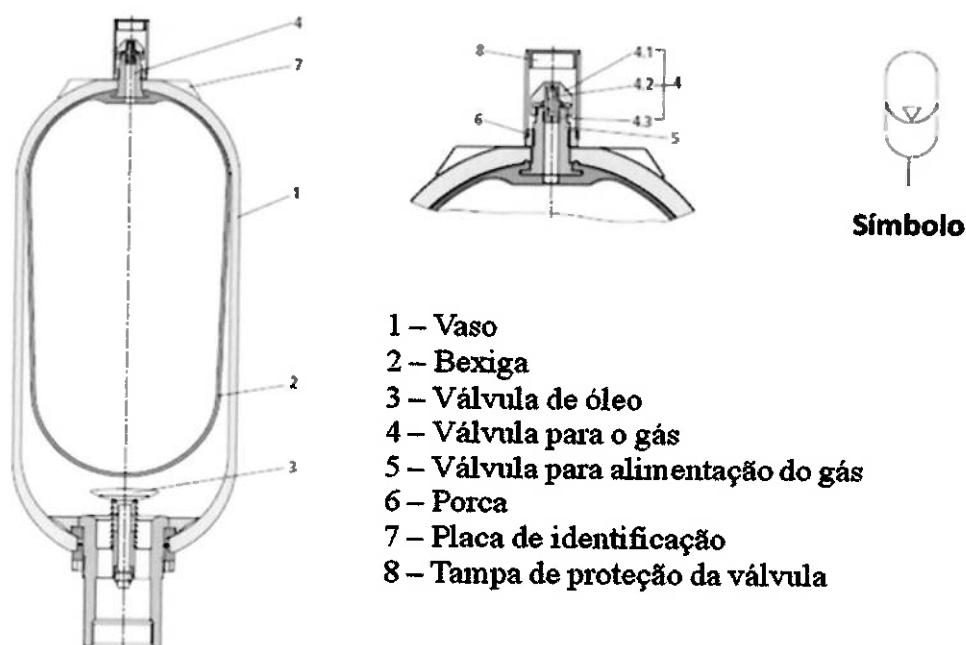


Figura 4.14 – Acumulador hidráulico de bexiga

Fonte : Baseado na figura do catálogo RE50170, pg. 3 – Empresa : Bosch Rexroth

O princípio do acúmulo de energia ocorre por meio do aumento da pressão do gás em função da sua compressibilidade, é o que descreve Lisingen (2003).

“Em relação ao acumulador com carga de gás, isso significa, por exemplo, que um dado volume de gás confinado será reduzido à metade quando a pressão for duplicada, desde que a temperatura se mantenha constante. A compressibilidade do gás é, portanto, utilizada como fonte de energia potencial”.

(LINSINGEN,p.359,2003)

O acumulador hidráulico de bexiga tem um vaso de aço com extremidades esféricas (item 1, figura 4.14) , na extremidade superior temos a válvula e sistema de alimentação do gás (itens 4 e 5 da figura 4.14). Este gás em sistemas hidráulicos é o nitrogênio. Uma bexiga feita de elastômero (item 2 da figura 4.14) é introduzida e fixada nesta válvula, é dentro desta bexiga que será carregado e armazenado o gás nitrogênio. Na extremidade inferior do vaso temos a válvula de óleo (item 3 da figura 4.14) que atua com a função de retenção, seu intuito é impedir a extrusão da bexiga para dentro do sistema.

No sistema híbrido hidráulico para veículos, quando ocorre a frenagem, a bomba do sistema envia óleo para o acumulador. Com a entrada do óleo dentro do acumulador, acontece a compressão e redução do volume do nitrogênio, resultando desta forma, no acúmulo de energia.

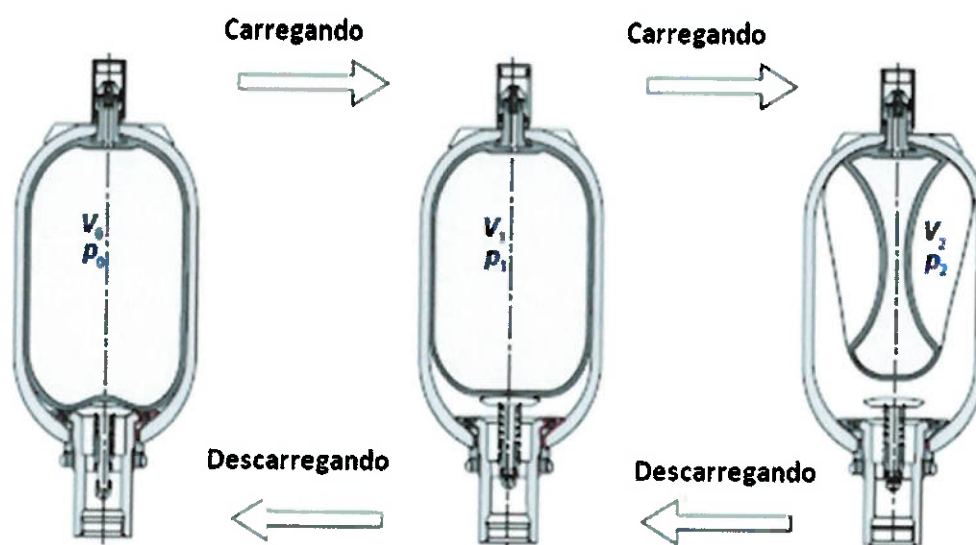


Figura 4.15 – Acumulador hidráulico de bexiga – Princípio de operação  
 Fonte : Baseado no catálogo RE50170, pg.5 – Empresa : Bosch Rexroth

Na figura 4.15, da esquerda para direita na parte superior, é representado as setas que indicam a sentido de fluxo de óleo entrando dentro do vaso, e como conseqüência disto, observamos a compressão da bexiga.

No sentido da direita para a esquerda, as setas na parte inferior podemos visualizar a bexiga expandindo-se fazendo com o óleo confinado seja descarregado para o sistema.

Algumas nomenclaturas são importantes de serem definidas a partir da figura 4.15.

V0 = Volume do gás em L

p0 = Pressão do gás em bar no volume V0

V1 = Volume do gás em L na pressão p1

p1 = Pressão mínima de trabalho do acumulador em bar no volume V1

V2 = Volume do gás em L na pressão p2

p2 = Pressão máxima de trabalho do acumulador em bar no volume V2

No projeto onde são usados acumuladores hidráulicos, alguns dados são necessários para o cálculo, desta forma, é comum o projetista especificar as pressões p1 e p2 como sendo um dado de entrada a ser adotado.

O processo de acumulação de energia do veículo híbrido hidráulico paralelo ocorre no momento da frenagem.

A energia é captada quando o fluido entra no acumulador e consegue comprimir o gás que está dentro da bexiga, por meio da compressibilidade do gás, a energia é absorvida.

A relação entre a compressão, com o respectivo aumento de pressão é descrita por meio da equação de Boyle.

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n \quad \text{Equação (4.1)}$$

Relação entre pressão e volume de gás – Lei de Boyle

n=expoente politropico

Fonte: LISINGER ( pg.372,2003)

Com o acumulador, o acumulo e a descarga de energia é realizada por meio da compressão e expansão do gás. As equações de acumulação de energia são úteis pois ajuda a encontrar no projeto de um sistema híbrido hidráulico paralelo para veículos, o volume nominal que os acumuladores devem possuir para absorção da energia.

Critérios como perda de carga na instalação e fatores de rendimento na transmissão de energia devem ser levados em conta no dimensionamento.

Kordac (2003) apresenta equacionamento para cálculo do volume nominal dos acumuladores para absorção de energia dos sistemas. Ele explica que os acumuladores podem absorver energia de diferentes formas, sendo as principais formas compreendidas em;



- Energia potencial
- Energia cinética
- Energia rotacional

Nos quais são representadas nas equações abaixo;

$$E_{pot} = m.g.h$$

Equação (4.2)

$$E_{cin} = \frac{1}{2}.m.v^2$$

Equação (4.3)

$$E_{rot} = \frac{1}{2}.j.\omega^2$$

Equação (4.4)

Sendo;

$E_{cin}$  = Energia cinética em Nm,

$E_{pot}$  = Energia potencial em Nm,

$E_{rot}$  = Energia rotacional em Nm,

$g$  = aceleração da gravidade em  $m/s^2$ ,

$h$  = diferencial de altura em m,

$j$  = momento de inércia em  $kgm^2$ ,

$m$  = massa em kg,

$v$  = velocidade em m/s

$\omega$  = velocidade angular em rad/s

Equacionamento para diferentes fontes potenciais de energia

Conforme a teoria explicada por Kordac, por meio das equações de energia e através da integração do trabalho adiabático do gás da equação é possível mensurar o quanto pode ser absorvido de energia. De posse disto, podemos calcular o volume nominal do sistema de acumuladores através da equação a seguir;

$$V1 = \frac{E_{acc}.(1-n)}{p1.10^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p1}{p2} \right)^{1-n} \right]}$$

Equação (4.5)

Onde:

$E_{acc}$  = Energia para ser absorvida em Nm,

$n$  = expoente politropico para  $N_2$

Equacionamento para o volume  $V1$  do acumulador na pressão  $p1$

O expoente politrópico para o gás nitrogênio pode ser encontrado na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Expoente politropico por K.R. Ruprecht

Pressão de Operação		bar				
Temperatura do N2		50	100	200	300	400
°C	K	expoente politropico n				
-23	250	1,540	1,677	1,835	1,842	1,801
27	300	1,485	1,563	1,669	1,707	1,705
77	350	1,465	1,507	1,581	1,618	1,629

n = 1,4 para o N<sub>2</sub> à temperatura de 273 K e pressão de 1 bar

°C = temperatura na escala Celsius

K = temperatura na escala Kelvin

Fonte: KORDAC (pg. 179, 2003)

O tamanho do acumulador é especificado comercialmente pelo volume de gás que pode ser armazenado, o volume V<sub>0</sub> pode ser calculado conforme a expressão abaixo segundo KORDAC;

$$V_0 = \frac{V_1}{0,85}$$

Equação (4.6)

A divisão pelo fator 0,85 significa uma adicional de segurança para o volume do gás afim de evitar a extrusão da bexiga.

#### 4.4.2 Bomba hidráulica

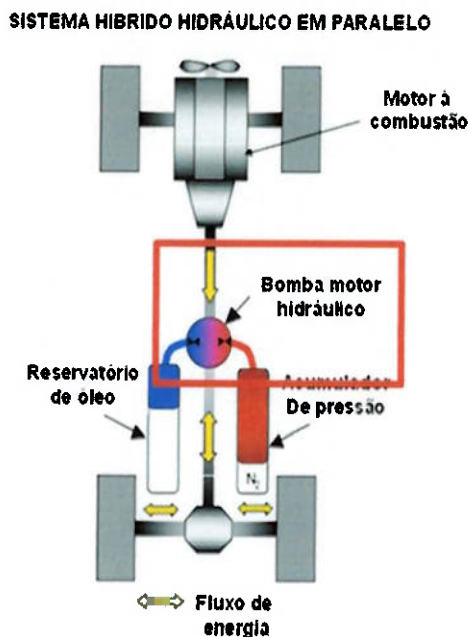


Figura 4.16–Sistema híbrido hidráulico em paralelo – Bomba/motor  
Fonte: Bohlmann (2008)

No sistema híbrido hidráulico, são adotadas máquinas hidrostáticas, conhecidas como bombas.

Dentro do universo de variedades e tipos de bombas, a principal função deste componente no sistema híbrido é fornecer torque na tração do veículo, e no momento da frenagem, por meio da sucção de óleo contido no reservatório, preencher os acumuladores.

É comum a classificação deste item como motor/bomba hidráulica neste sistema devido ao fato deste único componente, no caso de um sistema paralelo, atuar como motor e bomba.

Nos casos estudados e apresentados no capítulo 4, a maioria dos sistemas utilizam bombas de pistões axiais para realização dos trabalhos.

A bomba de pistão axial, representada nas figuras 4.17 e 4.18 basicamente é composta por um conjunto rotativo inclinável, viga de basculamento, um tambor com furos onde se deslocam os pistões, um controlador, também conhecido como variador hidráulico e um eixo para acoplamento da bomba em outros componentes como por exemplo motores a combustão, motores elétricos e no caso do sistema híbrido, com o conjunto de embreagem acoplado no sistema de tração do veículo.

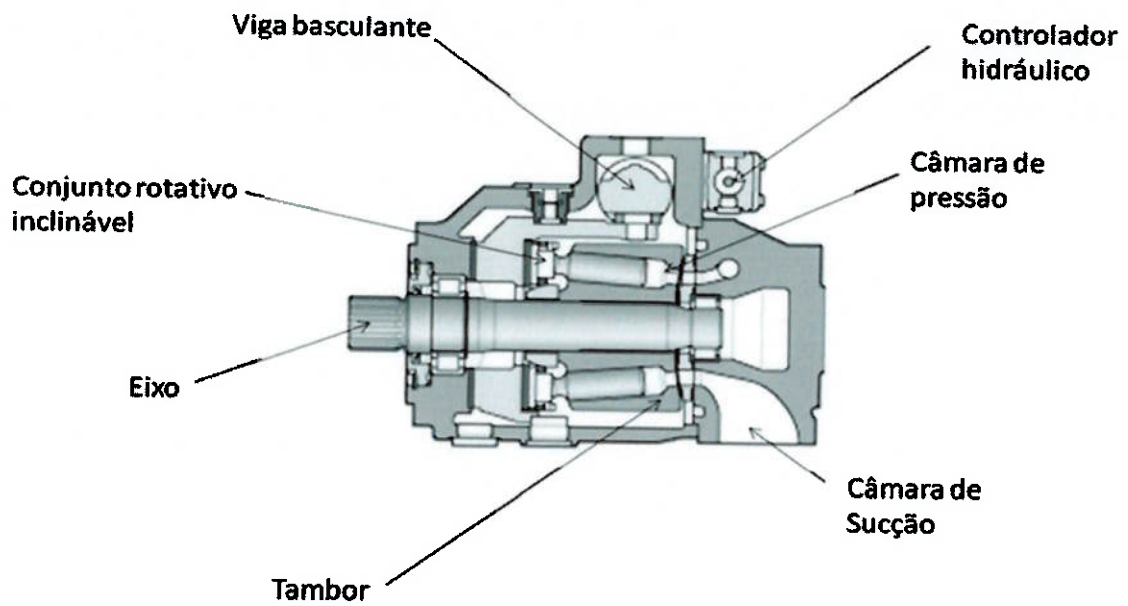
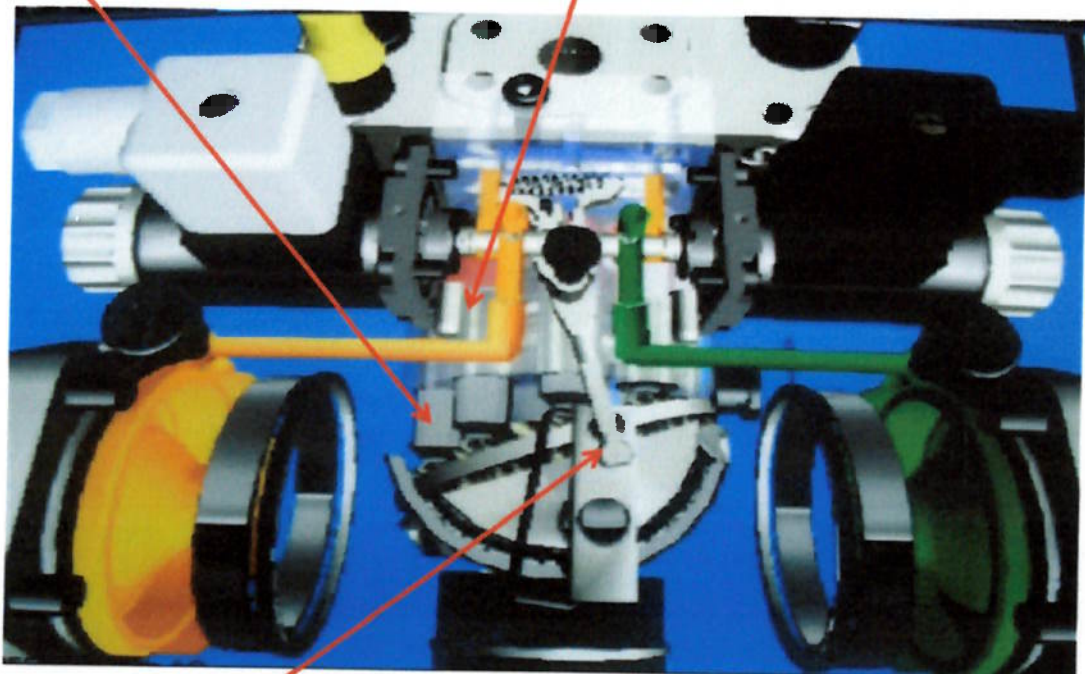


Figura 4.17 – Baseado na bomba modelo A4V – Bosch Rexroth  
 Fonte: <http://www.boschrexroth.com/mobile-hydraulics> – acesso em 22.08.09

**Pistão**

**Tambor**



**Viga basculante**

Figura 4.18 – Bomba de pistão modelo A4V – Vista de topo  
 Fonte : Baseado em figura extraída do Training-3D visualizations – Bosch Rexroth (2004)

Na figura 4.18 podemos visualizar o momento de basculamento dos pistões por meio do movimento da viga basculante para o lado direito.

O óleo de pilotagem hidráulico, responsável por deslocar o eixo conectado a viga, entra na câmara representada na cor amarela e por meio de um mecanismo, a viga bascula para a direita, como os pistões estão conectados mecanicamente a este conjunto de basculamento, os mesmo rotacionam juntos.

Nota-se que o ângulo da viga pode variar infinitamente, isto representa que os pistões podem ter infinitas posições e conseqüentemente infinitos cursos, resultando em diferentes volumes geométricos.

A bomba de pistão variável possui vários tipos de controladores com diferentes finalidades, temos controlador de pressão, vazão, potência, controladores eletrônicos, etc. A escolha do controlador é feita em função da aplicação do produto. O controlador da bomba usado em sistemas híbridos hidráulico paralelo em veículos em estudo será detalhado mais adiante.

Nos sistemas híbridos hidráulicos, o fornecimento de torque ao sistema de embreagem acoplado a tração do veículo é um dos principais objetivos deste componente.

Existem duas formas básicas de trabalho da bomba no sistema híbrido hidráulico paralelo. O primeiro é atuando na sua forma original conforme a sua própria definição, como uma bomba, e o segundo é atuando como motor. Na atuação como motor é que teremos o sistema hidráulico fornecendo torque ao veículo no momento de aceleração.

#### **4.4.2.1 Bomba hidráulica – Recuperando energia de frenagem do veículo e preenchendo os acumuladores**

A bomba de pistão variável funciona da seguinte forma em um veículo híbrido hidráulico paralelo atuando como função de bomba no momento da frenagem do veículo;

- A bomba succiona o óleo do sistema por meio do seu movimento rotativo;
- No momento da frenagem do veículo, o óleo contido no reservatório de baixa pressão deverá ser deslocado até os acumuladores;

- Quando o veículo entra em desaceleração, a embreagem do sistema híbrido hidráulico mecanicamente se conectará ao eixo de tração do mesmo, desta forma, será ligada a transmissão entre o eixo do veículo e a bomba do sistema hidráulico;
- Com a rotação do eixo do veículo, é possível transmitir por meio da embreagem, torque e rotação para bomba, transferindo desta forma, parte da energia de frenagem para o sistema hidráulico;
- Com a rotação do eixo da bomba, o óleo é impulsionado para a câmara de sucção da mesma, pela força da gravidade, em função da geração de uma depressão por causa do movimento de rotação;
- A pressão atmosférica consegue vencer as resistências entre o reservatório de óleo até a bomba, empurrando o óleo para dentro da câmara de sucção da bomba;
- A bomba realiza o trabalho de sucção, fornecendo desta forma, um fluxo contínuo de óleo para carregar os acumuladores;
- Assim sendo, a bomba no sistema híbrido hidráulico paralelo executa a recuperação da energia do momento da frenagem por meio da energia em forma de momento torsor desenvolvido pelo sistema de tração do veículo decorrente da sua desaceleração;
- A energia de frenagem no veículo equipado somente com o motor a combustão, que seria transformada em energia térmica dissipada por meio dos freios é transformada em energia hidráulica no sistema híbrido hidráulico paralelo, sendo armazenada nos acumuladores.

#### **4.4.2.2 Bomba hidráulica – Atuação com função de motor, fornecendo torque ao sistema**

Conforme mostrado nas figuras 4.17 e 4.18, e descrito nos parágrafos acima, a bomba é classificada como variável devido à possibilidade de alteração do ângulo da viga basculante, com esta alteração, é possível variar o volume geométrico do óleo que será fornecido ao sistema. Este volume varia através do posicionamento do pistão no furo do tambor. Esta característica é importante no sistema híbrido hidráulico paralelo devido ao fato de podermos ter a possibilidade de controlar o torque desejado.

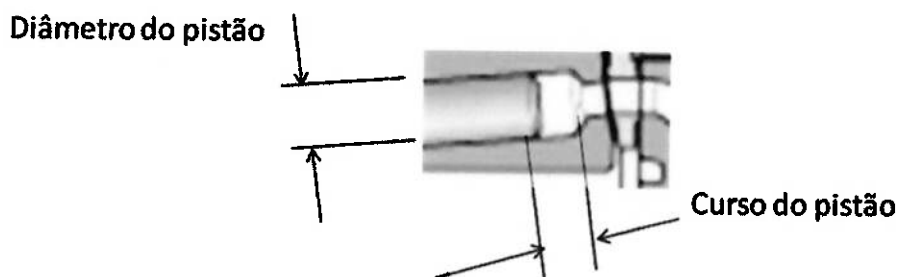


Figura 4.19 – Volume geométrico baseado na bomba modelo A4VSO – Bosch Rexroth  
 Fonte: <http://www.boschrexroth.com/mobile-hydraulics> – acesso em 22.08.09

O volume é determinado em função do diâmetro e do curso do pistão.

Por meio do volume geométrico da bomba, da rotação e da pressão desenvolvida no sistema, é possível calcular o torque.

A bomba fornece o torque quando a mesma inicia o trabalho com funções de motor.

Para compreendermos como este componente transfere energia na forma de torque ao sistema de tração do veículo no momento da aceleração é necessário conhecermos por meio das equações 4.7, 4.8 e 4.9 a seguir, as grandezas de como um atuador rotativo hidráulico interage na forma de motor com o sistema onde ele é usado.

Conceitualmente, é importante neste momento entender que temos um componente que trabalha com função dupla. Desta forma, reforço que será abordado neste item o componente bomba com função de motor, pois nos sistemas híbridos hidráulicos em paralelo, o mesmo é usado nesta forma para fornecer energia no formato de torque à tração do veículo.

As equações 4.7, 4.8 e 4.9 descritas abaixo são utilizadas para calcular, vazão, rotação e o torque que motores hidráulicos fornecem em sistema hidráulicos gerais, por exemplo em máquinas, veículos “off-road” e máquinas especiais.

Na equação 4.7, podemos calcular a vazão do motor hidráulico em L/min.

$$q_v = \frac{V_g \cdot n}{1000 \cdot \eta_v} \quad \text{Equação (4.7)}$$

Onde;

$q_v$  = Vazão em L/min

$V_g$  = Deslocamento volumétrico em  $\text{cm}^3$

$n$  = Rotação em RPM

$\eta_v$  = Rendimento volumétrico

A equação 4.7 é útil pois com o valor de rotação necessária a ser fornecida ao sistema é possível conhecer a grandeza de vazão necessária a ser fornecida ao motor hidráulico.

Realizando algumas inversões na equação 4.7, podemos calcular diretamente a rotação do motor hidráulico.

$$n = \frac{q_v \cdot 1000 \cdot \eta_v}{V_g} \quad \text{Equação (4.8)}$$

As equações 4.7 e 4.8 mostram que a função rotação é diretamente influenciada pela grandeza de vazão.

O torque é a forma como a energia hidráulica é transferida ao sistema de tração do veículo e é definida conforme a equação 4.9.

$$T = \frac{V_g \cdot \Delta p \cdot \eta_{mh}}{20 \cdot \pi} \quad \text{Equação (4.9)}$$

Onde;

$T$  = Torque em Nm

$\Delta p$  = Diferencial de pressão entre a entrada do motor hidráulico e a saída em bar

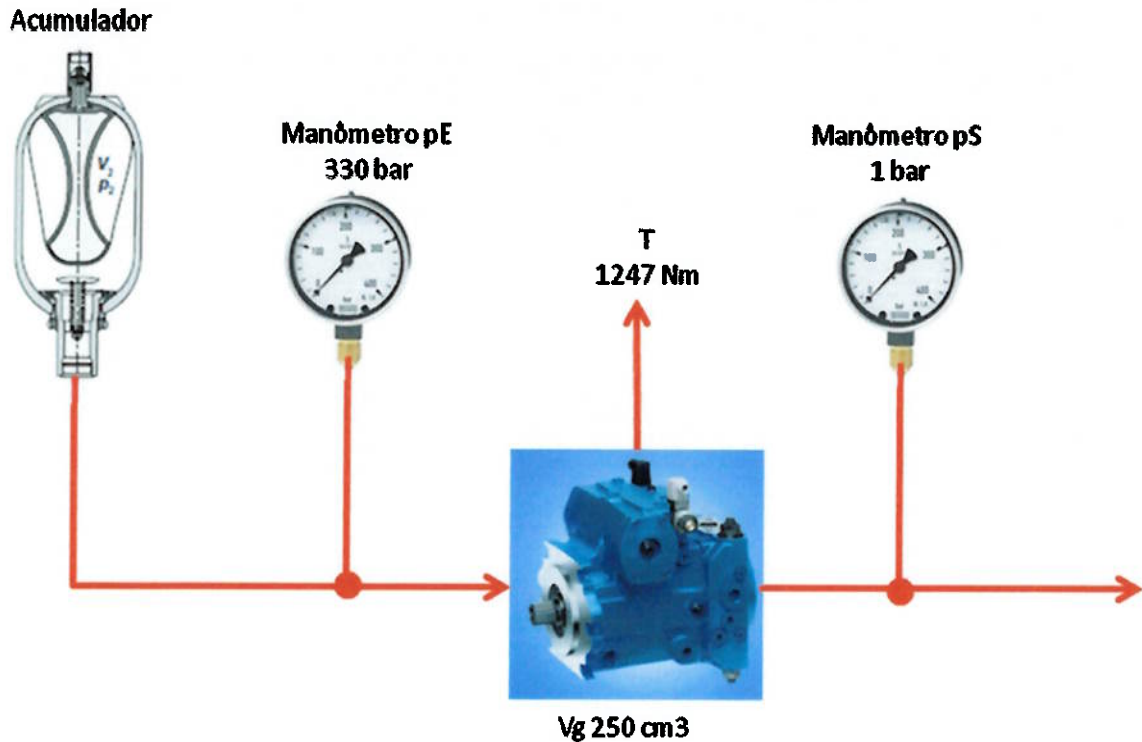
$\eta_{mh}$  = Rendimento mecânico hidráulico

$V_g$  = Deslocamento volumétrico em  $\text{cm}^3$

No torque, duas grandezas são importantes, o  $\Delta p$  e o  $V_g$ .

No sistema híbrido hidráulico paralelo, o  $\Delta p$  pode ser determinado subtraindo-se a pressão de saída da pressão de entrada. Na figura 4.20 podemos visualizar um exemplo.





Onde;  
 pE = Pressão de entrada (bar)  
 pS = Pressão de saída (bar)  
 Figura 4.20

Na figura 4.20, o acumulador fornece ao sistema a pressão pE de 330 bar, a pressão de saída pS é de 1 bar (considerando que a pressão atmosférica é 1 atm, que por sua vez é aproximadamente igual a 1,01325 bar, Fonte : Conversor de medidas do IPEM, acesso : <http://www.ipem.sp.gov.br/5mt/cv2/index.htm> em 27.09.09 às 13:13). O diferencial de pressão  $\Delta p$  é calculado conforme a equação 4.10.

$$\Delta p = pE - pS$$

Equação (4.10)

$$\Delta p = 330 - 1 = 329 \text{ (bar)}$$

Por meio da equação 4.9 (torque) podemos encontrar um torque de 1247 Nm.

Os modelos comerciais de bombas de pistões axiais trabalham com pressões de trabalho de 350 bar, chegando a 420 bar em alguns casos.

Existem desenvolvimentos específicos nos quais pressões maiores de 420 bar podem ser encontradas, porém quando aumenta-se a pressão do sistema hidráulico, deve se ter cuidado com os outros componentes que formam o circuito hidráulico, como por exemplos canos, conexões e válvulas, tais componentes devem possuir o mesmo grau de resistência que o da bomba caso decida-se trabalhar com as pressões limites.

Em sistemas hidráulicos, o cálculo de potência é determinado por meio da equação 4.11 abaixo descrita;

$$N = \frac{Q * P}{600} \quad \text{Equação (4.11)}$$

Onde;

Q = Vazão (L/min)

P = Pressão (bar)

N = Potência (kW)

O uso da equação 4.11 será importante para definição do tamanho da bomba do objeto de estudo.

#### **4.4.2.3 Bomba hidráulica – Determinação do volume geométrico**

O tamanho da bomba é representado normalmente pelo seu volume geométrico ou vazão sob determinada rotação. Por exemplo; Uma bomba com tamanho nominal 250 pode significar uma bomba com um volume geométrico de 250 cm<sup>3</sup>, representado pela sigla Vg.

O dimensionamento e seleção do modelo e tamanho da bomba consideram as potências envolvidas na aceleração e frenagem, porém alguns fatores adicionais como pressão de trabalho, rotação, rendimento e o tempo que se leva para o preenchimento dos acumuladores do sistema híbrido hidráulico para veículos devem ser contemplados na análise do projeto.

Seguem alguns importantes aspectos considerados na seleção de uma bomba;

- Potências envolvidas

- Pressões de trabalho
- Volume dos acumuladores
- Rotação do sistema de embreagem e transmissão da tração do veículo
- Torque necessário a ser desenvolvido
- Tipo de controle que a bomba do sistema necessita
- Fluido a ser usado no sistema
- Tempo de preenchimento dos acumuladores

As pressões usadas nos sistemas híbridos hidráulicos situam-se na faixa de 100 à 350 bar. O volume dos acumuladores é determinado em função da energia a ser absorvida.

A rotação do sistema de embreagem, responsável pela alteração da energia hidráulica para a mecânica em forma de torque é um dado fornecido pela montadora do veículo, pois este sistema é conectado ao sistema de tração do veículo.

A potência do sistema híbrido hidráulico tende a ser o mesmo que o motor a Diesel pode fornecer, sob este aspecto é importante salientar que num veículo híbrido hidráulico, toda a sua aceleração para iniciar o movimento pode ser feita pelo hidráulico, quando o veículo atinge a velocidade máxima almejada no projeto, o veículo começa a usar o sistema convencional. Outras estratégias de uso da energia hidráulica podem ser adotadas como por exemplo, um adicional de potência trabalhando junto ao motor Diesel.

#### **4.4.3 Controle de torque em sistemas hidráulicos**

O principal produto do sistema híbrido hidráulico paralelo para um veículo é recuperar energia mecânica proveniente da frenagem e devolve-la quando necessária. Para que isso seja possível, junto com os componentes hidráulicos e mecânicos, é necessário o controle e administração deste sistema por meio da eletrônica.

Todo o conjunto eletrônico, onde incluímos controladores eletrônicos programáveis, reguladores eletrônicos e instrumentos terão a função de tornar o sistema hidráulico mais eficiente.

O torque fornecido pelo sistema hidráulico é uma das principais variáveis a ser controlada. Isto é viabilizado por meios instrumentos e sensores. Eles têm a função de enviar a central eletrônica, informações importantes para controle e comando do sistema hidráulico.

Neste item será descrito um método de regulação de rotação e após isto um método de comando e controle de torque em sistemas hidráulicos.

Na figura 4.21, visualizamos um esquema simplificado de componentes e instrumentos utilizados para um regulador de rotação.

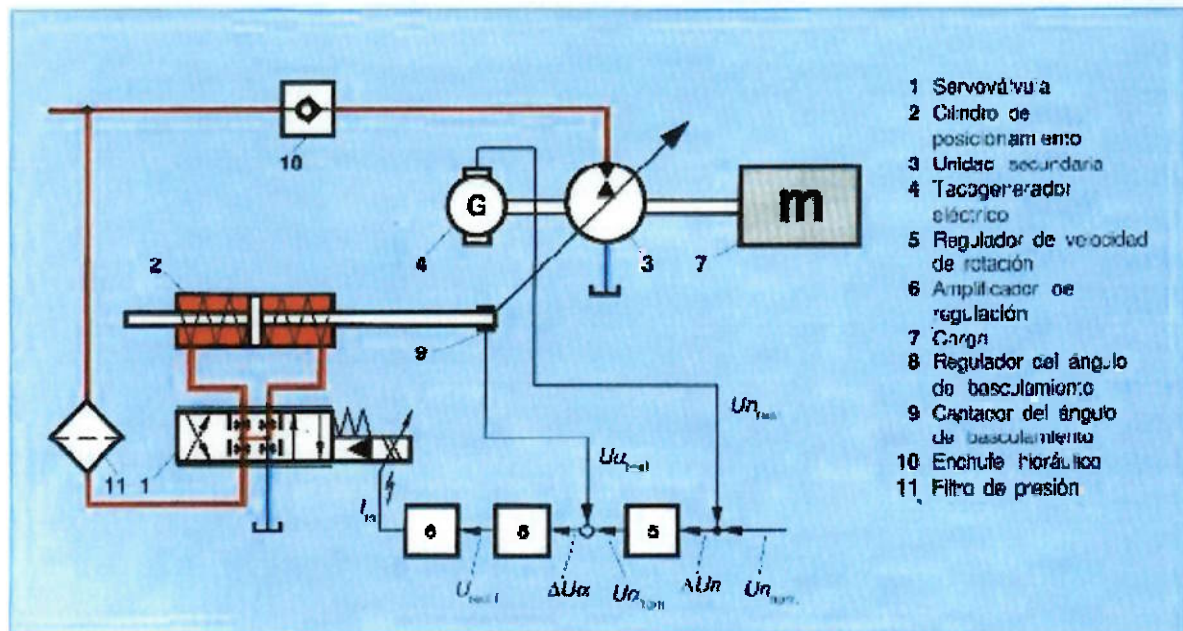


Figura 4.21 – Diagrama básico de um regulador de rotação

Fonte : Kordac (2003)

Abaixo segue um breve resumo de cada componente e sua função;

Ítem 1 – Válvula proporcional : A válvula proporcional é um componente eletro-hidráulico. Sua função no sistema é permitir a passagem do óleo de pilotagem, que será responsável pelo deslocamento do cilindro de basculamento da bomba.

Recebe este nome em virtude do deslocamento do embolo em função de um sinal progressivo de comando.

Por exemplo: a válvula possui uma eletrônica que pode receber um comando analógico de  $\pm 10$  V. Com  $+10$  V a válvula estará com o seu embolo deslocado em 100 % do seu curso para a direita, se recebe-se um sinal de  $+5$  V, o embolo é deslocado apenas 50 % do seu curso total para a direita. Da mesma forma ocorre quando o sinal é  $-10$  V, o que difere é que temos o embolo deslocado 100 % do seu curso para a esquerda, se o sinal fosse  $-5$  V, temos 50 % do seu curso deslocado para a esquerda. Para a regulação de rotação da bomba a característica de deslocamento do embolo da válvula em forma progressiva de acordo com um comando é importante pois permite um controle e infinitas posições do cilindro de basculamento da bomba de pistão variável.

Ítem 2 – Cilindro de basculamento : O cilindro de basculamento é o responsável pelo movimento da viga basculante da bomba (maiores detalhes vide item 4.4.2). Com o deslocamento da viga basculante é provocado a variação do volume geométrico da bomba. Nas equações 4.8 e 4.9 é possível observar que a variação do volume geométrico  $V_g$  resulta em variações do valor de rotação e torque da bomba.

Ítem 3 – Bomba de pistão axial variável : Vide item 4.4.2.

Ítem 4 – Tacômetro : O tacômetro é um instrumento que pode ser digital ou analógico.

Ele é montado diretamente no eixo da bomba.

Integrado a ele existe um interruptor centrífugo. A função do tacômetro no exemplo da figura 4.21 é medir o número de rotação desenvolvido pela bomba e o interruptor centrífugo é emitir um sinal elétrico em caso de sobre-rotação. Caso ocorra sobre-rotação do sistema, decisões de segurança deverão ser realizadas pelo sistema.

Itens 5, 6 e 7 – Estes componentes em conjunto formam o regulador de rotação eletrônico do sistema da figura 4.21. O item 5 é o regulador de velocidade e rotação. O item 6 é o amplificador de regulação. O item 7 é o regulador de ângulo de basculamento. O processo de regulação é iniciado por meio de um comando de rotação proveniente do controlador. O valor de rotação  $U_n$  real em Volt, informado pelo tacômetro 4 é comparado com o valor  $U_{ref}$  em Volt proveniente do controlador, e a diferença de tensão é enviada ao regulador de velocidade e rotação (5). O regulador de rotação emite um comando  $U_{\alpha 1}$ , ou seja, um comando para o cilindro de basculamento buscar o ângulo  $\alpha$ .

O sinal  $U_{\alpha 1}$  proveniente do regulador (5) será comparado com o sinal  $U_{\alpha 2}$  proveniente do transdutor de posição (9). O regulador do ângulo de basculamento (7), por meio da comparação dos sinais  $U_{\alpha 1}$  e  $U_{\alpha 2}$  envia um sinal de tensão  $U_{regul}$  para o amplificador (6). A tensão  $U_{regul}$  será convertida em sinal de corrente elétrica  $I_m$  a válvula (1) e o cilindro de basculamento buscará o ângulo  $\alpha$  conforme o comando  $U_{ref}$ . Note que temos um comando de referência e o mesmo sempre é comparado com a real posição do cilindro e rotação da bomba, de posse disto, torna-se possível um controle com comando sendo corrigido em função das condições reais.

Item 8 – Carga acoplado a bomba

Item 9 – O transdutor de posição têm a função de ler a posição do cilindro de basculamento.

A eletrônica de regulação interage com a eletrônica de controle basicamente os seguintes dados;

- Valor real de rotação  $n_{real}$ ;
- Valor de referência de rotação  $n_{ref}$ ;
- Valor real do ângulo de basculamento  $\alpha_{real}$ ;
- Valor referencial do ângulo de basculamento  $\alpha_{ref}$ ;

Juntamente com o regulador eletrônico, existe o controlador eletrônico.

Nos sistemas hidráulicos em paralelo entende-se que o ângulo  $\alpha$  deve ser o item a ser monitorado e controlado devido ao fato do mesmo estar associado a posição do cilindro de basculamento e conseqüentemente com o volume geométrico e torque. Portanto, ao invés de usarmos um comando de rotação, é aplicado um comando para ângulo de basculamento.

Conforme Kordac (2003), por meio do comando  $\alpha_{comm}$  é possível relacionar o mesmo com as equações de torque. Contudo, o exemplo da figura 4.21 é útil, pois os instrumentos e grandezas de controle são similares, a diferença está no envio do comando, isto é, em vez de enviar um sinal de comando referencial para rotação, é enviado um sinal para ângulo de basculamento.

O comando  $\alpha_{comm}$  será enviado pelo controlador para a bomba e resultará no basculamento do cilindro.

As equações abaixo descritas demonstram como Kordac (2003) define os equacionamentos para comando de basculamento da bomba.

Por meio da equação 4.12 é possível encontrar uma relação entre a posição do cilindro 2 com o volume geométrico da bomba.

$$V_g = 2 * r_z * A_k * \tan \alpha \quad \text{Equação (4.12)}$$

Onde ;

$A_k$  = Área do pistão em  $\text{cm}^2$

$r_z$  = raio geométrico do tambor dos cilindros

$V_g$  = Volume geométrico em  $\text{cm}^3$

$\alpha$  = Ângulo de basculamento em  $^\circ$

Com o volume geométrico, aplicamos o mesmo na equação 4.13 e o resultado será o torque M.

$$M = \frac{\Delta p * V_g}{20 * \pi} * \eta_{mh} \quad \text{Equação (4.13)}$$

M = Momento tursor em Nm

$\eta_{mh}$  = Rendimento hidráulico mecânico

$\Delta p$  = Diferencial de pressão

Com as equações 4.12 e 4.13, isolamos o valor  $\alpha$  e com isto podemos construir a equação 4.14 para  $\alpha_{comm}$  com a bomba atuando em forma de motor.

$$\alpha_{comm} = \frac{\Delta T 2_{comm} + \Delta v}{p_{act}} * CM \quad \text{Equação (4.14)}$$

$\alpha_{comm}$  = Comando do ângulo de basculamento

CM = Fator de perda com operação no modo de motor

MT2comm = Comando do valor de torque Nm

pact = Valor atual de pressão

MV = Valor dependente de torque, valor de correção

Atuando a bomba conforme gerador de energia, temos a equação 4.15;

$$\alpha_{comm} = \frac{\Delta T 2_{comm} - \Delta v}{p_{act}} * CG \quad \text{Equação (4.15)}$$

Onde;

CG = Fator de perda com operação no modo de gerador

As equações 4.14 e 4.15 descrevem o valor de comando, representado por  $\alpha_{comm}$ . Este comando pode ser analógico ou digital dependendo do controlador.

Com isto, é possível enviar um sinal de comando conforme a necessidade do sistema, relacionando o mesmo com o torque desejado  $MT2_{comm}$ , modulando os valores do ângulo de basculamento da bomba.

O sistema pode possuir malha fechada, ou seja, o comando pode ser conferido por meio de um transdutor de posição ou captador do ângulo de basculamento, item 9 da figura 4.21. Com isto o sistema pode reconhecer a real posição do cilindro de basculamento (item 2) e corrigir a posição do mesmo caso necessário. Nota-se que nas equações aparecem fatores de perda como as variantes CG e CM que devem ser consideradas no processamento do comando do ângulo de basculamento.

#### **4.4.4 Estratégias de gerenciamento da potência**

Além do controle de torque é necessário estipular a estratégia de gerenciamento da potência do veículo de forma a se obter a melhor relação possível entre o uso da energia recuperada pelo sistema regenerativo e o envio desta energia para o sistema de tração do veículo. Estas estratégias são definidas pelos projetistas e devem buscar melhor uso da energia regenerada de forma a obter a maior economia possível de combustível.

##### **4.4.4.1 Estratégias de gerenciamento de potência somente na aceleração**

Na figura 4.22 podemos visualizar um modelo básico de estratégia de gerenciamento de potência para um veículo híbrido hidráulico em paralelo.



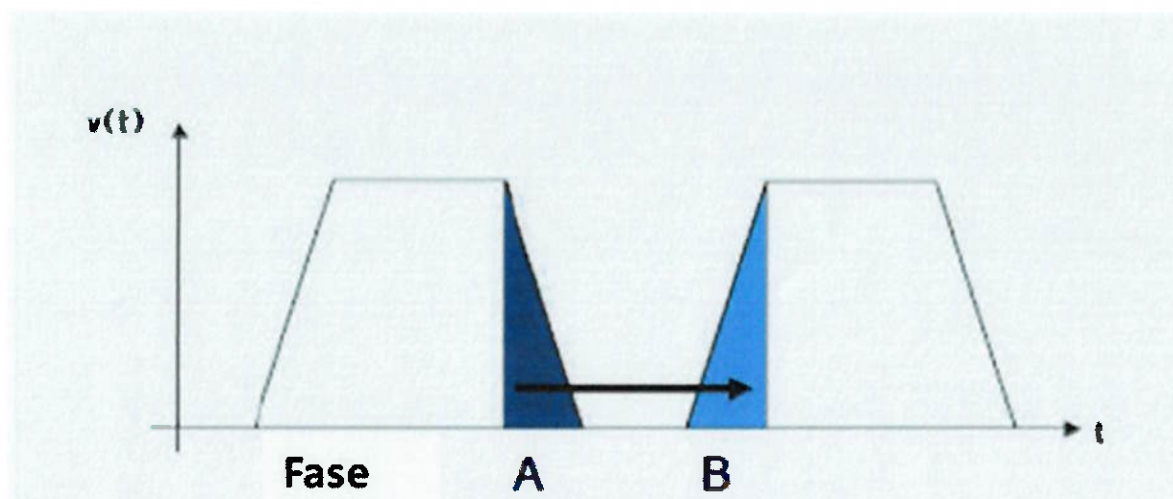


Figura 4.22–Estratégia simplificada de controle

Fonte: Baseado em figura Haller Umweltsysteme GmbH & Co (2009)

Na estratégia adotada são encontradas duas fases principais.

Na fase A temos a desaceleração do veículo, ou seja, no eixo Y temos a velocidade sendo reduzido a 0 por meio da frenagem, esta energia é captada e enviada ao acumulador.

Na fase B temos o acréscimo de velocidade por meio do descarregamento de energia do acumulador.

O objetivo desta estratégia é somente usar o sistema hidráulico para movimentar o veículo a partir de uma condição estacionada. O controle neste caso deverá reconhecer quantidade de energia hidráulica acumulada, comparar com o nível de energia em forma de torque necessária para movimentar o veículo e tomar a decisão de acionar ou não o sistema conforme a possibilidade.

#### **4.4.4.2 Estratégias de gerenciamento de potência na aceleração e potência assistida com o uso de 50 % da carga do acumulador**

Nesta estratégia de gerenciamento, o sistema híbrido hidráulico paralelo pode participar nas fases de aceleração, desaceleração e atuar como potência extra.

Wu et al. (2002) explica este modelo de estratégia que foi usado inicialmente em um veículo com as características abaixo descritas;

- Caminhão modelo International série 4700
- Massa com veículo carregado : 7340 kg

- Massa do sistema híbrido hidráulico paralelo instalado : 272 kg
- Motor Diesel V8, 7.3 L, potência de 157 kW à 2400 rpm

A estratégia de controle é importante pois os acumuladores hidráulicos possuem alta densidade de potência, elevada capacidade de absorção e descarga de energia, porém possui baixa densidade de energia (maiores detalhes vide item 4.1). Devido a isto, relativa baixa de densidade de energia requer alguns cuidados estratégia de controle (WU et al,2002).

Na figura 4.23 é representado um gráfico de torque x rotação do motor.

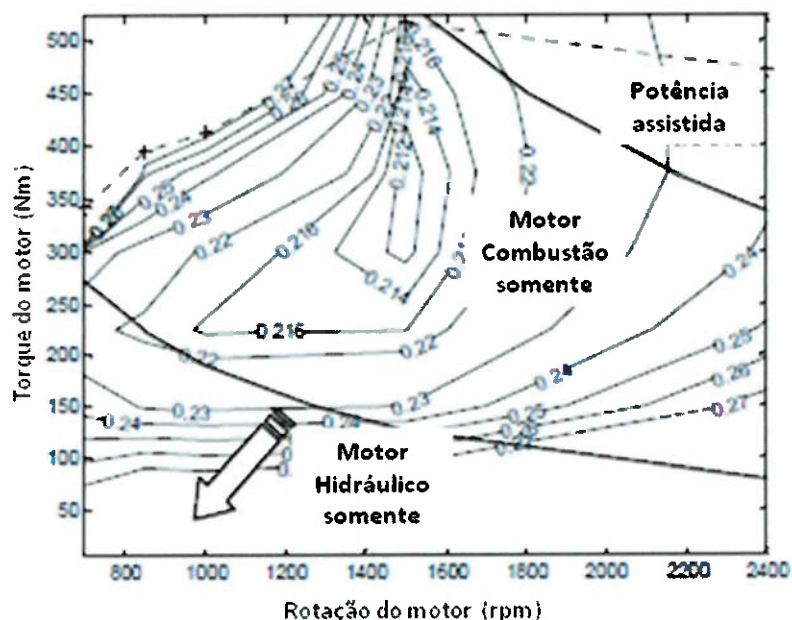


Figura 4.23 –Rotação do motor x torque

Fonte: Baseado no gráfico Wu et al.(2002)

Na figura 4.23, existem duas linhas que dividem o gráfico em 3 áreas, a linha inferior representa uma potência de 25 kW, a superior representa uma potência de 85 kW. Quando o veículo necessita desenvolver um torque e rotação abaixo da curva de 25 kW, toda a potência é fornecida pelo motor hidráulico.

Quando o veículo necessita desenvolver torque e rotação na região limitada pelas curvas de 25 kW e 85 kW, ou seja, na região entre elas, somente o motor a combustão fornece a demanda de potência necessária.

Acima de 85 kW, ambos os sistemas de fornecimento de energia atuam em conjunto.

Na figura 4.24, podemos ver 3 curvas relativas ao exemplo da figura 4.23. As curvas são geradas de forma simultânea, porém representam diferentes informações para o veículo usado como exemplo por Wu et al..

A curva 4.24 (a) representa o aumento de velocidade, estabilização da mesma e redução de velocidade em função do tempo.

A curva 4.24 (b) representa a quantidade de potência usada na aceleração, a participação em cada trecho do sistema hidráulico, do motor a combustão e a recuperação de energia na frenagem.

A curva 4.24 (c) representa a condição do estado de carga do acumulador. No exemplo do veículo de Wu et al.(2002), a especificação do acumulador é conforme descrito abaixo;

Volume máximo de gás (SOC=0): 100 L

Volume mínimo de gás (SOC=1): 50 L

Pressão de pré carga : 125 bar

Máxima pressão de trabalho : 360 bar

Quando o acumulador está carregado de óleo pressurizado, ou seja, alta densidade de potência armazenada, o valor de SOC é 1.

Quando o acumulador está vazio, o valor de SOC é 0.

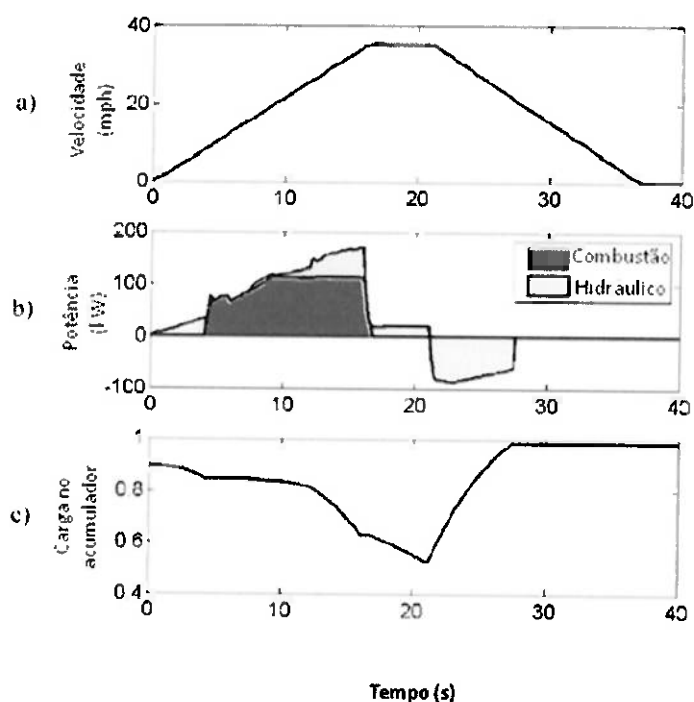


Figura 4.24, curvas a, b e c – Estratégia de gerenciamento de potência

Fonte : Wu et al. (2002)

Como podemos verificar na figura 4.24 (b), a intenção é usar o sistema hidráulico paralelo no início do movimento, na condição de potência assistida e na desaceleração. O acumulador em nenhum momento tem a sua capacidade de carga abaixo de 50 %, ou seja, a estratégia pretendeu não trabalhar com acumulador na condição vazia ou inferior a 50 % de carga.

Segundo Wu et al. (2002) o sistema de gerenciamento apresentado resultou em economia de 15,6 % à 32,3 % de economia de combustível. O resultado varia em função das condições de percurso do veículo e pontos de eficiência do sistema hidráulico e do motor a combustão.

#### **4.4.4.3 Estratégias de gerenciamento de potência na aceleração e potência assistida com uso da capacidade total da carga do acumulador**

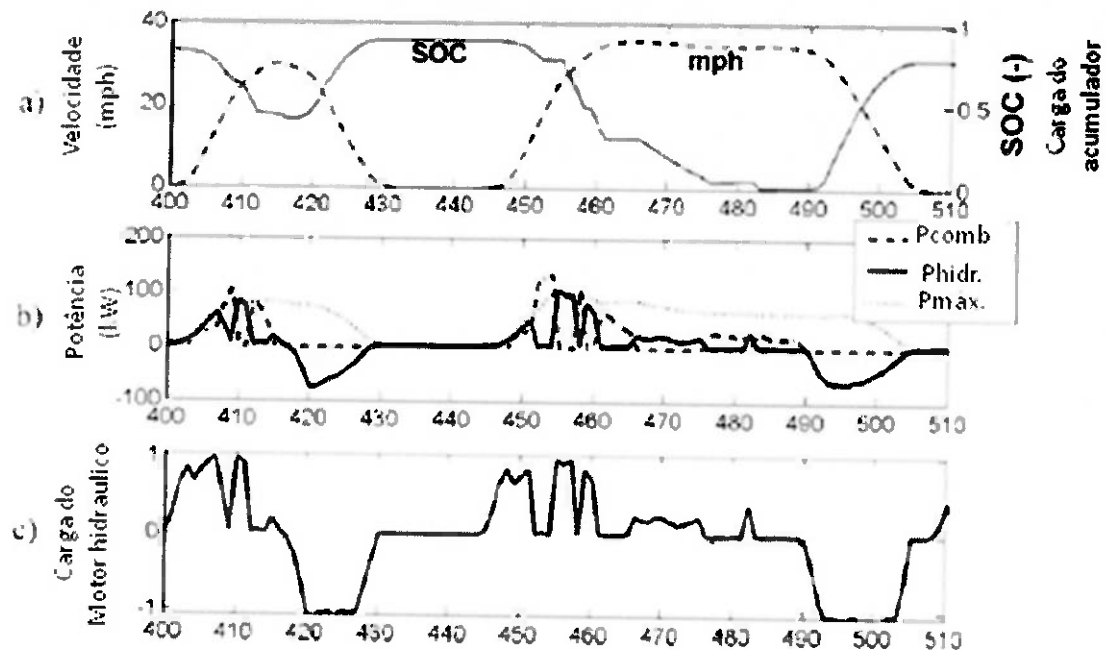
Continuando a abordagem do veículo descrito no item 4.4.4.2, foi possível notar dois pontos relevantes;

- 1) O uso de ambos os sistemas de fornecimento de energia ao mesmo tempo
- 2) O uso de 50 % da capacidade do acumulador

Um estudo desenvolvido por Wu et. al. (2002) foi orientado no sentido de melhorar o gerenciamento de energia do veículo apresentado no item 4.4.4.2, fazendo um maior uso da carga do acumulador.

Contudo esta estratégia de gerenciamento de potência apresentou resultados por meio de simulação em ambiente computacional fazendo uso dos programas MATLAB e SIMULINK.

Através de implementação de regras e estratégias de controle, Wu et al. (2002) obteve os resultados conforme a figura 4.25.



$P_{comb}$  = Potência do motor a combustão

$P_{hydr}$  = Potência do motor hidráulico

$P_{m\acute{a}x}$  = Potência máxima disponível

Figura 4.25 – Comportamento do veículo durante um intervalo de 400 – 510 segundos através da proposta de estratégia de gerenciamento DP

Fonte: Wu et al.(2002)

Na curva da figura 4.25 (a), temos o comportamento da velocidade e a variação de carga disponível no acumulador.

Podemos notar que no momento de aumento de velocidade a carga do acumulador é reduzida a níveis próximos a mínima condição de carga de 125 bar. Quando a velocidade diminuiu, é possível observar o aumento de carga no acumulador.

A alternância da utilização da potência por meio do motor hidráulico e do motor a combustão é registrada na figura 4.25 (b).

Nos momentos de início de aceleração do veículo, busca-se realizá-la por meio do motor hidráulico, porém no gerenciamento adotado, é considerada a ação do motor a combustão nos momentos em que a energia hidráulica é reduzida próximo ao valor mínimo.

Provavelmente Wu et al. fez uso de um critério de segurança pois ao analisarmos o instante próximo à 410 segundos, é possível identificar que a carga do motor na figura 4.25 (c) vai a zero, na figura 4.25 (b) o motor a combustão supri uma demanda

de potência de aproximadamente 100 kW, mas na 4.25 (a) vemos que o acumulador possui 50 % de carga ainda disponível.

No momento de aumento de velocidade iniciado próxima à 445 s, é demonstrado um comportamento diferente em relação a primeira situação de aumento de velocidade. No instante 445 s é realizado um aumento de velocidade por meio do motor hidráulico com uma potência próxima a 25 kW, após isto, o motor hidráulico têm a sua carga próxima a zero, o motor a combustão fornece sozinho uma potência próxima a 100 kW, quando o veículo atinge próxima à 30 mph, o motor hidráulico atua até o uso da carga disponível no acumulador, que atinge o ponto de mínima carga disponível no instante próximo de 483 s.

Esta proposta de Wu et al. sugere um uso maior do acumulador do que a descrita no item 4.4.4.2 com o uso simultâneo em um espaço curto de tempo das duas fontes de energia. Este modelo apresenta uma maior alternância das fontes de energia em relação ao modelo do veículo do item 4.4.4.2.

#### **4.4.4.4 Modelo básico de operação da propulsão híbrida elétrica**

Embora o capítulo 4 aborde a tecnologia híbrida hidráulica, este item tem o objetivo de apresentar um básico o modo de operação de um híbrido elétrico paralelo afim de contribuir ao tema gerenciamento de potência de sistemas híbridos paralelos hidráulicos.

Por meio da figura 4.26, podemos visualizar um esquema de uma propulsão híbrida elétrica paralela e na tabela 4.4 o modo de operação.

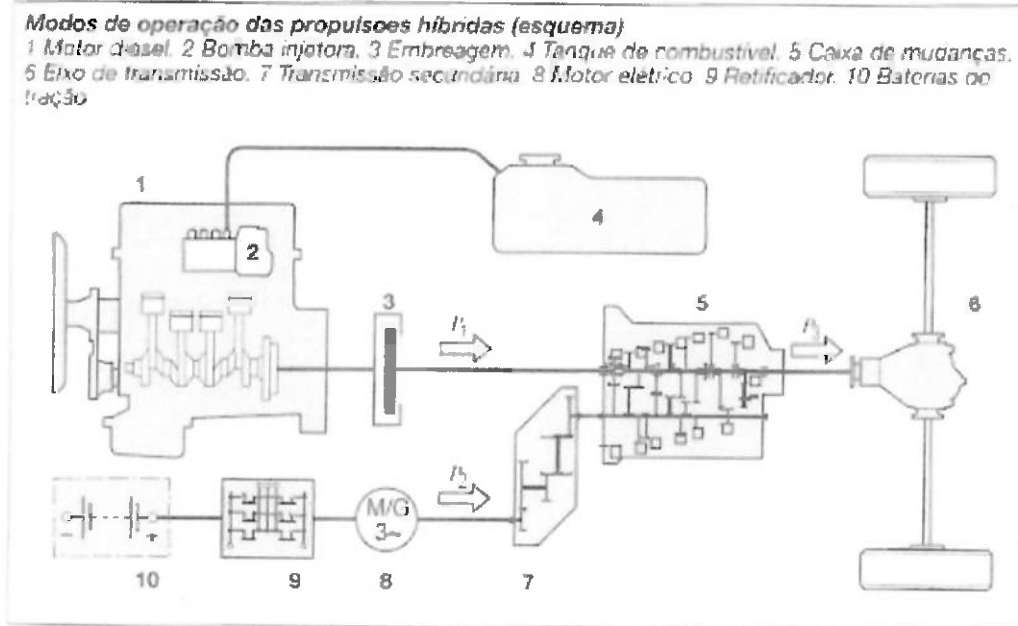


Figura 4.26 – Modos de operação das propulsões híbridas  
 Fonte: Bosch (2005)

Tabela 4.4 – Modo de operação das propulsões híbridas

Nº	Modo de operação	Motor Diesel P1	Motor Elétrico P2	Veículo P3
1	Propulsão através do motor Diesel	▶	○	▶
2	Propulsão através do motor elétrico	○	▶	▶
3	"Kick-down" Potência máxima da propulsão	▶	▶	▶
4	Propulsão através do motor Diesel com carregamento das baterias de tração	▶	◀	▶
5	Aproveitamento da frenagem	○	◀	◀
6	Carregamento das baterias de tração com o veículo parado	▶	◀	○

Legenda:

○ – Não acionado

▶ - fornecendo potência

◀ - recuperando potência

Fonte : Bosch (2005)

Conforme tabela 4.4, o sistema híbrido elétrico considera atuação em conjunto dos sistemas elétrico e a combustão no momento de potência máxima na estratégia de gerenciamento de potência assim como a estratégia apresentada no item 4.4.4.2 .

Em relação as estratégias dos sistemas híbridos hidráulicos paralelos, é apresentado no modo de estratégia da tabela 4.4, um recurso adicional na estratégia de controle dos híbridos elétricos, que é a possibilidade de carregamento das baterias quando o veículo está parado e com o motor ligado.

A princípio, a estratégia geral considerada no modo de operação híbrido paralelo elétrico assemelha-se ao do híbrido paralelo hidráulico.

Contudo a diferença está nas propriedades de armazenamento de energia, descarga de energia, densidade de potência, densidade de energia. Como são sistemas com diferentes naturezas de armazenagem e propriedades, os tempos de carga e descarga dos sistemas paralelos híbridos elétricos e hidráulicos bem como o momento de atuação devem ser considerados nos critérios de controle e regulação.

#### **4.5 SEGURANÇA HIDRÁULICA**

No sistema híbrido hidráulico paralelo, alguns fatores de segurança devem ser considerados no projeto.

Os quesitos de controle e comando de emergência devem ser arquitetados e considerados na lógica de segurança. Para tanto, os recursos eletrônicos básicos foram descritos no item 4.4.4.

No que tange ao sistema hidráulico, na ocorrência de qualquer anormalidade no funcionamento do sistema, os quesitos de segurança na diagramação do circuito hidráulico deve garantir;

- Isolamento do acumulador de pressão com a bomba/motor
- Despressurização do sistema
- Garantia que nunca o máximo limite de pressão será atingindo

Estes quesitos são alcançados por meio do correto uso de válvulas na diagramação hidráulica do equipamento.





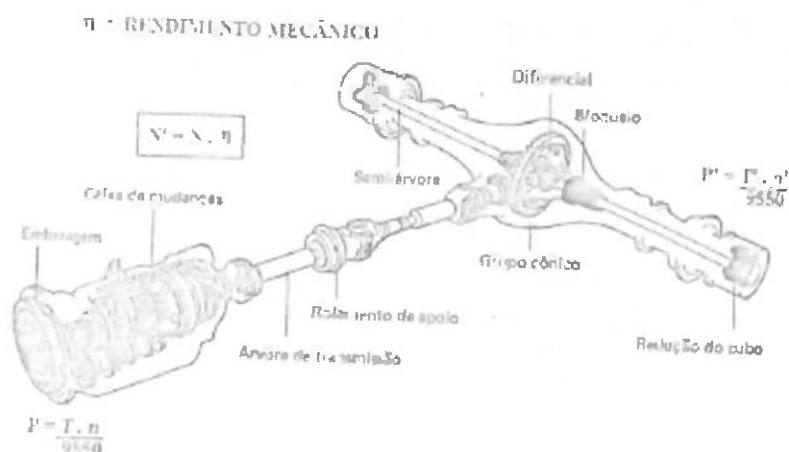


Figura 4.27 – Componentes do trem de força  
Fonte : Argachoy (2005)

Na figura 4.27, podemos identificar os componentes básicos que formam um sistema de trem de força. Por meio destes componentes, a energia gerada pelo motor a combustão é transmitida as rodas dos veículos, promovendo desta forma a aceleração e o movimento do mesmo.

Argachoy descreve que as relações de grandezas mecânicas básicas podem ser definidas conforme a equação abaixo;

$$P = \frac{T \cdot n}{9550}$$

Equação (4.16)

Onde;

P = Potência

T = Torque em Nm

n = rotação em RPM

O sistema híbrido hidráulico é montado no sistema de trem de força do veículo na árvore de transmissão. Mecanicamente faz se necessário uma adaptação mecânica para acoplagem da embreagem do sistema hidráulico.

Desta forma, num veículo originalmente com propulsão à combustão, é possível ser introduzido o sistema hidráulico em paralelo por meio desta adequação e montagem. Contudo é importante mencionar que faz se necessário um sistema de controle eletrônico capaz de fazer com que os dois sistemas de embreagem, tanto a embreagem conectada ao motor a combustão quanto a embreagem do sistema hidráulico possam trabalhar separadamente ou até mesmo em conjunto.

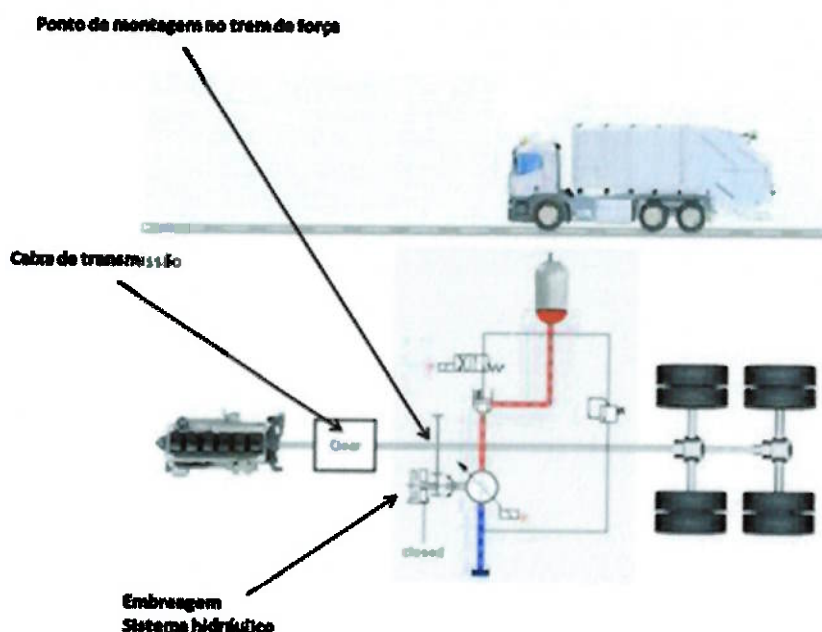


Figura 4.28 – Sistema híbrido hidráulico montado em veículo  
 Fonte: Baseado em figura BASELEY ( 2007)

Na figura 4.29 podemos visualizar uma imagem da bomba e do sistema de transmissão e embreagem acoplado ao eixo do veículo.

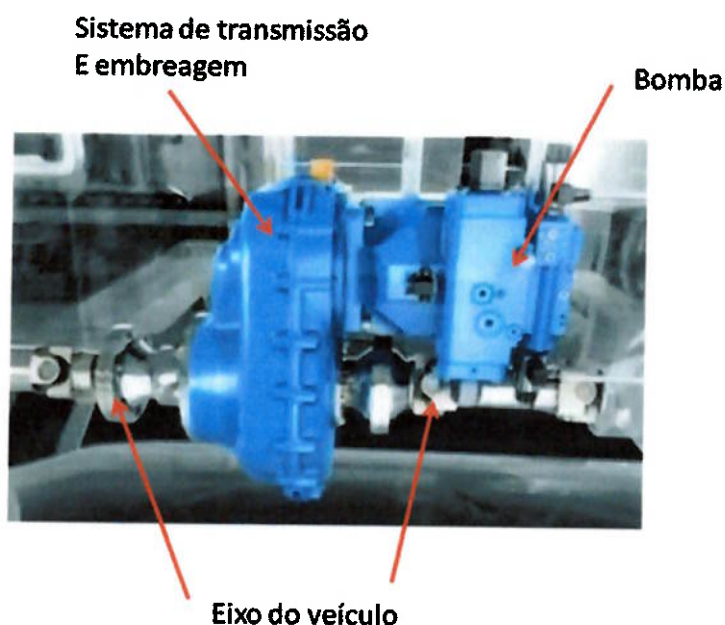


Figura 4.29 – Sistema híbrido hidráulico montado em veículo

Fonte: Baseado no vídeo HRB. Disponível em: [www.youtube.com](http://www.youtube.com) - Update: Hydrostatic Regenerative Braking System HRB (parallel) from Rexroth. Acesso em : 26.04.2009

## 4.7 ACELERAÇÃO

O estudo da capacidade de aceleração do veículo é importante para o projeto do sistema híbrido, pois é um dos fatores que direcionam o conhecimento das grandezas para o dimensionamento do sistema.

O máximo desempenho de aceleração de um veículo é limitado por dois fatores principais, que no caso são a potência máxima disponível no motor e a capacidade de tração das rodas.

A principal fonte de potência nos veículos automotivos atualmente são os motores a combustão.

Conforme o Gillespie, a relação entre a potência do motor com a massa do veículo é uma das principais grandezas para se determinar o desempenho de aceleração. De uma forma simplificada, a capacidade de aceleração pode ser apresentada por meio da segunda lei de Newton conforme abaixo descrito;

$$M * a_x = F_x \quad \text{Equação (4.17)}$$

Isolando a aceleração, a equação 4.17 se transforma na equação 4.18.

$$a_x = \frac{1}{M} * F_x \quad \text{Equação (4.18)}$$

Tendo em vista que a potência mecânica pode ser o produto da força pela velocidade, podemos descrever a equação 4.19.

$$a_x = \frac{g}{V} * \frac{HP}{W} \quad \text{Equação (4.19)}$$

Onde;

$a_x$  = aceleração na direção x

$M$  = massa do veículo =  $W/g$

$W$  = peso do veículo

$g$  = aceleração da gravidade

$V$  = velocidade

$HP$  = potência

$F_x$  = Força trativa nas rodas

Obs.: Nesta pesquisa, a nomenclatura HP será trocada pela nomenclatura N

Desta forma, por meio da equação 4.19, Gillespie explica que é possível observar a velocidade atuando como um denominador, desta forma, isto representa que conforme a velocidade aumenta, diminui a capacidade de aceleração.

As equações apresentadas neste item não consideram fatores de rendimentos e forças resistivas do meio para com o veículo, contudo, as mesmas servem como informação básica para o cálculo e dimensionamento da potência do sistema de tração, por meio dos dados de massa do veículo, velocidade e aceleração pretendida.

Por meio das equações apresentadas, as mesmas serão usadas para dimensionamento do sistema híbrido paralelo do veículo de estudo no capítulo 5.

#### 4.8 FRENAGEM

O desempenho de frenagem também tem o seu equacionamento baseado na segunda lei de Newton.

Para a tecnologia híbrida hidráulica, seu estudo é importante para o conhecimento das grandezas envolvidas, assim sendo, é possível mensurar o potencial de recuperação de energia.

De acordo com o Gillespie (1992), assumindo que as forças atuantes no veículo serão constantes no momento da frenagem, que a desaceleração é constante e que não existem forças ou resistências externas, como por exemplo, resistência aerodinâmica é possível obter relações de grandezas baseando-se na segunda lei de Newton, que fornecem resultados importantes dos valores envolvidos na frenagem.

Por meio da equação 4.20, é possível obter a desaceleração linear na direção x.

$$Dx = \frac{F_{xt}}{M} = \frac{dV}{dt} \quad \text{Equação (4.20)}$$

Onde;

$Dx$  = desaceleração linear na direção x

$F_{xt}$  = Forças de desaceleração total atuante no veículo na direção longitudinal

A equação 4.20, conforme Gillespie pode ser integrada tendo em vista que o fator  $F_{xt}$  é constante, isto implica em que é possível realizar uma integração para a

desaceleração (sob as condições descritas no início deste item) da velocidade inicial  $V_0$  até a velocidade final  $V_f$ .

$$\int_{V_0}^{V_f} dV = -\frac{Fxt}{M} \int_0^{ts} dt \quad \text{Equação (4.21)}$$

$$V_0 - V_f = \frac{Fxt}{M} * ts \quad \text{Equação (4.22)}$$

Onde;

$V_0$  = velocidade inicial

$V_f$  = velocidade final

$ts$  = tempo da variação de velocidade  $V_0$  para  $V_f$

Gillespie explica que conforme a relação dada por  $V=dx/dt$ , substituindo este termo com o "dt" na equação (4.21), a solução da integral fornece a seguinte equação;

$$\frac{V_0^2 - V_f^2}{2} = \frac{Fxt}{M} * X \quad \text{Equação (4.23)}$$

Onde;

$X$  = distância percorrida durante a desaceleração

A equação 4.23 é importante, pois por meio dela podemos determinar a distância percorrida na frenagem.

No caso em que a desaceleração resultará na total parada do veículo, ou seja,  $V_f$  é igual a zero e  $X$  é a distância percorrida, o Gillespie nomeia esta distância como SD, cujo equacionamento é descrito conforme a equação 4.24.

$$SD = \frac{V_0^2}{2 * \frac{Fxt}{M}} = \frac{V_0^2}{2 * Dx} \quad \text{Equação (4.24)}$$

Onde;

SD = distância percorrida na frenagem quando  $V_f$  é igual a 0

Para o tempo de mudança de velocidade, isto é, tempo que  $V_0$  chega a  $V_f$ , que é igual a zero, pode ser descrita a equação a seguir;

$$t_s = \frac{V_0}{\frac{F_{xt}}{M}} = \frac{V_0}{Dx} \quad \text{Equação (4.25)}$$

Onde;

$t_s$  = tempo para o veículo desacelerar e alcançar a velocidade 0

Relativo à energia na frenagem, toda ela precisa ser absorvida pelos freios. Sua grandeza advém da energia cinética do veículo, que é relacionada com a velocidade e com a massa do mesmo.

$$\text{Energia} = \frac{M}{2} (V_0^2 - V_f^2) \quad \text{Equação (4.26)}$$

Quanto à potência dissipada na frenagem, a mesma é equivalente a velocidade  $V_0$  dividida pelo tempo  $t_s$  para se atingir a velocidade  $V_f$  requerida.

$$\text{Potência} = \frac{M}{2} * \frac{V_0^2}{t_s} \quad \text{Equação (4.27)}$$

Existem forças produzidas pelo veículo no momento da frenagem que devem ser considerados no dimensionamento do sistema, como por exemplo resistência ao rolamento, resistência aerodinâmica e a rampa da via onde o veículo percorre.

De acordo com a Gillespie, a rampa da via contribui diretamente no esforço de frenagem. O esforço adicional ao esforço de frenagem é representado por meio da equação 4.28.

$$R_g = W \sin \theta \quad \text{Equação (4.28)}$$

Onde;

$R_g$  = Esforço adicional de frenagem em função do grau da via, resistência à subida e força de descida  
 $\theta$  = ângulo da via

A equação 4.28 também representa a resistência à subida e força de descida do veículo.

Os ângulos das vias apresentam conforme o Gillespie, a seguinte relação;

$\theta$  (radianos) = diferencial de altura/distância percorrida

Gillespie explica que um resultado de 0,04 ou 4% (que também significa rampa da via) será equivalente a uma desaceleração de + ou - 0,04g.

Com os equacionamentos apresentados neste item, é possível mensurar o quanto de energia pode ser absorvida no sistema de frenagem.

#### **4.9 RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO DO VEÍCULO**

A pesquisa limitará a análise da dinâmica veicular ao movimento linear.

Um fator importante para compor a análise do dimensionamento do sistema hidráulico são as resistências ao movimento do veículo. A quantidade de potência que deve ser transmitida por meio das rodas de acionamento para colocar o veículo em movimento varia conforme as resistências abaixo descritas;

- Resistência ao rolamento
- Arrasto aerodinâmico
- Resistência à subida e força de descida

Os equacionamentos apresentados nos sub-itens do capítulo 4.9 representam a teoria de dinâmica veicular conforme o Manual de Tecnologia Automotiva da Bosch (2005) e o autor Gillespie.

##### **4.9.1 Resistência ao rolamento**

Conforme Manual de Tecnologia Automotiva da Bosch (2005), resistência ao rolamento "FRo" é o produto dos processos de deformação que ocorrem entre o pneu e a superfície da estrada, representada pela equação 4.29.



$$FRo = f * M * g * \cos \alpha$$

Equação (4.29)

Onde;

FRo = Resistência ao rolamento

f = Coeficiente de resistência ao rolamento

M = massa do veículo

 $\alpha$  = ângulo gradiente da pista

g = aceleração da gravidade

#### 4.9.2 Arrasto aerodinâmico

O arrasto aerodinâmico considera a resistência imposta pelo ar frente as condições geométricas transversais do veículo na direção do seu movimento.

A equação da resistência do arrasto aerodinâmico é representada pela equação 4.30.

$$FL = \rho * c * A * (v + v_0)^2$$

Equação (4.30)

Onde;

FL = Arraste aerodinâmico

 $\rho$  = densidade do ar

c = Coeficiente de arrasto

A = Seção transversal maior do veículo

v = velocidade do veículo

v0 = velocidade de proa

#### 4.9.3 Resistência à subida e força de descida

A resistência à subida e força de descida são relacionadas com o ângulo gradiente da pista, também relacionado com o nome de rampa e declividade do solo.

A resistência a subida é representado equação 4.28 do item 4.8.

Para subida, a convenção de sinal da resistência é positivo, para descida, a convenção do sinal é negativo.

#### 4.9.4 Potência da resistência ao movimento

Para que o veículo consiga ser acionado, é necessária uma potência capaz de vencer as resistências ao movimento dentro de uma velocidade desejada.

A equação 4.31 representa a potência da resistência ao movimento.

$$P_w = (FRo + FL + Rg) * v$$

Equação 4.31

Onde;

$P_w$  = Potência da resistência ao movimento

$FRo$  = Resistência ao rolamento

$FL$  = Arrasto aerodinâmico

$Rg$  = Resistência à subida e força de descida

De posse das equações apresentadas no ítem 4.9 e os seus respectivos sub-itens, torna-se possível analisar o veículo tanto no quesito aceleração e desaceleração, como também relativo a potência necessária de resistência ao movimento.

## **CAPÍTULO 5**

### **PROPOSTA DO ANTEPROJETO**

#### **5.1 METODOLOGIA DE PESQUISA PARA PROPOSTA DO ANTEPROJETO**

A metodologia de pesquisa utilizada é o estudo de caso conforme descrito na introdução: “O estudo de caso é a metodologia de pesquisa escolhida em função dos custos e tempo para construção de um protótipo para avaliação real”.

Por meio do capítulo 4, foi apresentado o histórico da tecnologia híbrida hidráulica para veículos, o funcionamento do sistema, a descrição dos principais componentes, alguns aspectos teóricos para o dimensionamento de determinados componentes e fundamentos da dinâmica veicular referente à aceleração e desaceleração.

As informações obtidas pela bibliografia e referências pesquisadas serão utilizadas para a proposta de um anteprojeto para um modelo de caminhão coletor compactador de lixo que atua no sistema de coleta de resíduos domiciliares na cidade de São Paulo.

O capítulo 5 descreve o objeto de estudo, o ambiente, as condições de trabalho do veículo, elaboração da proposta de um anteprojeto de pesquisa e análises quantitativas dos possíveis benefícios que o sistema híbrido hidráulico paralelo pode fornecer no que diz respeito a emissões e economia de combustível.

Todas as informações constantes neste capítulo têm como referências informações relativas a veículos que realizam a coleta de resíduo sólido domiciliar (RSD), conforme Limpurb.

##### **5.1.1 Hipótese simplificadora**

A pesquisa realiza uma avaliação de um sistema de acumulo e descarga de energia paralela ao sistema convencional do veículo. Assim sendo, será uma análise de balanço e interação de energia e potência entre os dois sistemas

Entre os dois sistemas, o estudo irá considerar a interação, avaliando a potência e energia de entrada e saída entre ambos.

O caminhão coletor compactador em estudo será considerado como um sistema, e o sistema híbrido hidráulico paralelo outro, desta forma, as grandezas estudadas serão as interações envolvendo massas totais, velocidade, aceleração e desaceleração do sistema do caminhão coletor compactador com o sistema híbrido hidráulico, desconsiderando desta forma, as perdas e efeitos que ocorrem no interior dos sistemas, ou seja, será uma análise da fronteira entre ambos os sistemas.

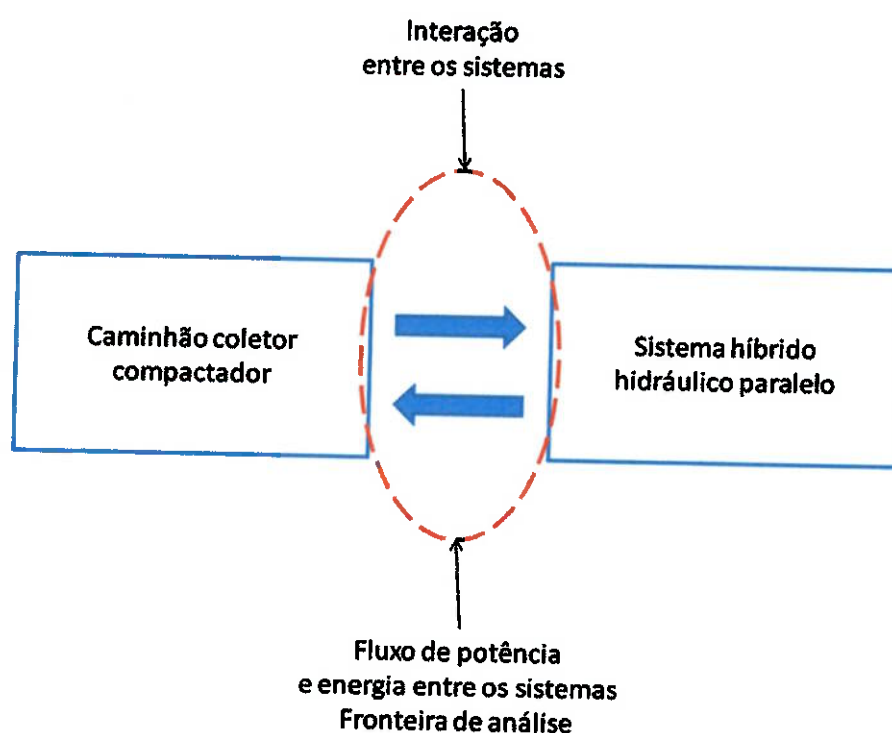


Figura 5.1 – Interação entre os sistemas – Objeto de estudo e sistema híbrido hidráulico paralelo

## 5.2 DETALHAMENTO DO OBJETO DE ESTUDO

Os dados coletados foram por meio do Instrumento de Coleta de Dados (ICD) – Anexo 1 deste trabalho. A pesquisa foi feita em conjunto com uma empresa de coleta de lixo atuante no Município de São Paulo.

A pesquisa teve como objetivo coletar informações técnicas do caminhão de coleta de lixo bem como as condições operacionais de trabalho do veículo.

O questionário foi explicado pelo autor deste trabalho ao entrevistado, que respondeu as informações possíveis de serem fornecidas, respeitando os princípios de segurança da informação conforme política da empresa.

### **5.2.1 Perfil da empresa pesquisada**

A empresa pesquisada atua na coleta seletiva de lixo no Município de São Paulo. A mesma realiza coleta de lixo domiciliar bem como serviços especializados de coleta como por exemplo lixo hospitalar.

O centro de operações da empresa está situado na cidade de São Paulo. Além da matriz, a empresa dispõe de mais uma base de operações para realizar a coleta de lixo. A região de operação segue a divisão conforme Contrato de Concessão Serviços Divisíveis da Secretaria de Serviços – Departamento de Limpeza Urbana da Prefeitura de São Paulo.

A empresa pesquisada é responsável pelo agrupamento Sudeste composto por 18 subprefeituras.

A empresa tem 2500 funcionários. A frota é composta por 180 veículos divididos nas 2 bases de operações. Uma localizada na região Sul e outra na região Leste. A empresa realiza a coleta de aproximadamente 50 % dos resíduos produzidos na cidade.

### **5.2.2 Objeto de estudo – Características do veículo**

O estudo de caso analisa o caminhão coletor compactador usado no serviço de coleta de lixo domiciliar. As informações provenientes do ICD serão usadas para o dimensionamento do anteprojeto de pesquisa. Desta forma, seguem informações do veículo em estudo;

- Veículo : Caminhão coletor compactador

- Peso Variante : 12 toneladas vazio, 22 toneladas carregado
- Potência do motor de combustão interna : Modelos com 220 cv e 250 cv
- Combustível : Diesel
- Caçamba : Capacidade para armazenar 19 m<sup>3</sup> de lixo compactado.



Figura 5.2 – Caminhão coletor compactador  
Fonte : Ecourbis (2010) – Disponível em : [www.ecourbis.com.br](http://www.ecourbis.com.br)

### 5.2.3 Condições de trabalho do objeto de estudo

Os caminhões coletores compactadores ficam localizados nas bases operacionais. Conforme o planejamento de coleta de lixo, os caminhões saem da base operacional até a localização onde será realizado o serviço.

A área de atuação dos caminhões é planejada e dividida nos chamados setores. Dentro de um setor, a equipe de coleta de lixo, composta por funcionários e a unidade mecanizada (caminhão) realiza os serviços de coleta. Por exemplo : A subprefeitura da Vila Mariana é dividida em 4 setores (áreas) de atuação conforme informação colhida pelo ICD.

Quando a unidade mecanizada tem toda a sua capacidade de carga compactada utilizada, o veículo se dirige as estações de transferências.

As estações de transferências são locais destinados para que os caminhões coletores compactadores despejem a material coletado, ou seja, possam realizar o transbordo do lixo. Este material é transferido para outro tipo de caminhão, que levará o material coletado para os aterros sanitários.



A



B



C



D

A – Caminhão coletor compactador descarregando o lixo  
 B – Local de transferência do lixo  
 C – Vista externa da Estação de Transferência Vergueiro  
 D – Veículo para transporte do lixo até os aterros sanitários  
 Figura 5.3 – Estação de Transferência Vergueiro  
 Fonte : Limpurb

As estações de transferência diminuem o percurso realizado pelo caminhão coletor compactador, reduzindo desta forma, as distâncias dos bairros até o ponto de transbordo do lixo, conseqüentemente, economizando gastos operacionais conforme a Limpurb.

No município de São Paulo existem 3 pontos de transbordo, sendo;

- Transbordo Ponte Pequena ( Bom Retiro)
- Transbordo Vergueiro (Ipiranga)
- Transbordo Santo Amaro (Santo Amaro)

Fonte : Limpurb

Uma vez transbordado o lixo, os veículos de transferência levam o material para o aterro sanitário.

Para o SHHP, a existência dos pontos de transbordo é um fator favorável a atuação de veículos com freio regenerativo hidráulico, tendo em vista que a sua atuação é concentrada dentro da cidade, fazendo que os mesmos desenvolvam um ciclo urbano de deslocamento com eventos de parar e andar.

O caminhão coletor compactador de lixo desempenha ao longo do percurso, variados níveis de velocidades, distâncias, eventos de frenagem, variações da carga coletada e número de viagens para realização da coleta no setor. Todos estes fatores dependem das condições de trânsito, quantidade de lixo a ser coletado, sincronismo entre a equipe manual de coleta com a unidade mecanizada, etc.

Devido aos fatores variantes, é grande a dificuldade em encontrar uma uniformidade de ciclo de trabalho para um caminhão, até mesmo dentro de um mesmo roteiro e percurso de coleta.

Contudo, para torna-se possível um conhecimento aproximado das condições de trabalho de um veículo serão consideradas as seguintes informações coletadas no ICD;

- Média de viagens realizada pelo caminhão coletor compactador : 2,33 viagens
- Quantidade média de quilômetros rodados na coleta : 22 km
- Variação de velocidade do caminhão coletor compactador no momento da coleta : 3 à 10 km/h
- Velocidade de deslocamento máxima do veículo : 60 à 70 km/h

As informações acima descritas são ponderações médias e estimativas. Esta situação deve-se aos fatores variantes.

### **5.3 CONSIDERAÇÕES PARA O ESTUDO DO ANTEPROJETO DE SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO PARA CAMINHÃO COLETOR COMPACTADOR**

Além das informações descritas no item 5.2, alguns dados adicionais serão considerados no cálculo para dimensionamento do anteprojeto.

Devido a não possibilidade de acesso aos registros de tacôgrafos dos caminhões coletores compactadores, não fornecidos em detrimento da política de segurança da informação e em respeito as questões de confiabilidade, serão adotados alguns requisitos técnicos adicionais para elaboração do dimensionamento da capacidade de armazenamento de energia do sistema híbrido hidráulico paralelo.



O dimensionamento irá considerar as condições de trabalho do objeto de estudo descrita no item 5.2, informações referenciadas no capítulo 4 e algumas considerações de tráfego no Município de São Paulo.

### 5.3.1 Trajeto

No item 5.2.3 foi descrito que os caminhões coletores compactadores realizam em média 2,33 viagens, entre as áreas de coleta e os pontos de transbordo. Além disto, foi informado um percurso aproximado de 22 km por viagem.

Contudo, não é possível estipular a distâncias entre os eventos de início de movimento do veículo até o evento de frenagem, retornando o mesmo a condição de parado.

Esta informação é necessária, pois é por meio dos eventos de início de movimento do veículo bem como a frenagem e parada do mesmo que possibilitará mensurar o potencial total de armazenamento de energia.

Assim sendo, esta pesquisa analisará percursos médios para ciclo de movimento e parada com as distâncias de 60 m, 75 m, 100 m e 150 m, ou seja, no momento em que o veículo inicia o movimento até o momento em que o mesmo retorna a condição de parado, as distâncias médias consideradas serão as acima definidas.

Estas distâncias são apenas considerações para efeito de análise, sendo que na realidade, a mesma pode ser maior ou menor dependendo das condições de trabalho.

### 5.3.2 Aceleração de desaceleração

Conforme estudo apresentado pela Kliffiken (2007), valores típicos para aceleração e desaceleração de veículos utilitários do porte do objeto de estudo situam-se entre  $1,0 \text{ m/s}^2$  a  $1,5 \text{ m/s}^2$ .

Por meio do diagrama da figura 5.4 abaixo, considerando uma velocidade de 30 km/h e um tempo de frenagem média de 6 s, com base na figura 5.4, conseguimos obter uma taxa constante de aceleração e desaceleração de  $1,4 \text{ m/s}^2$ .

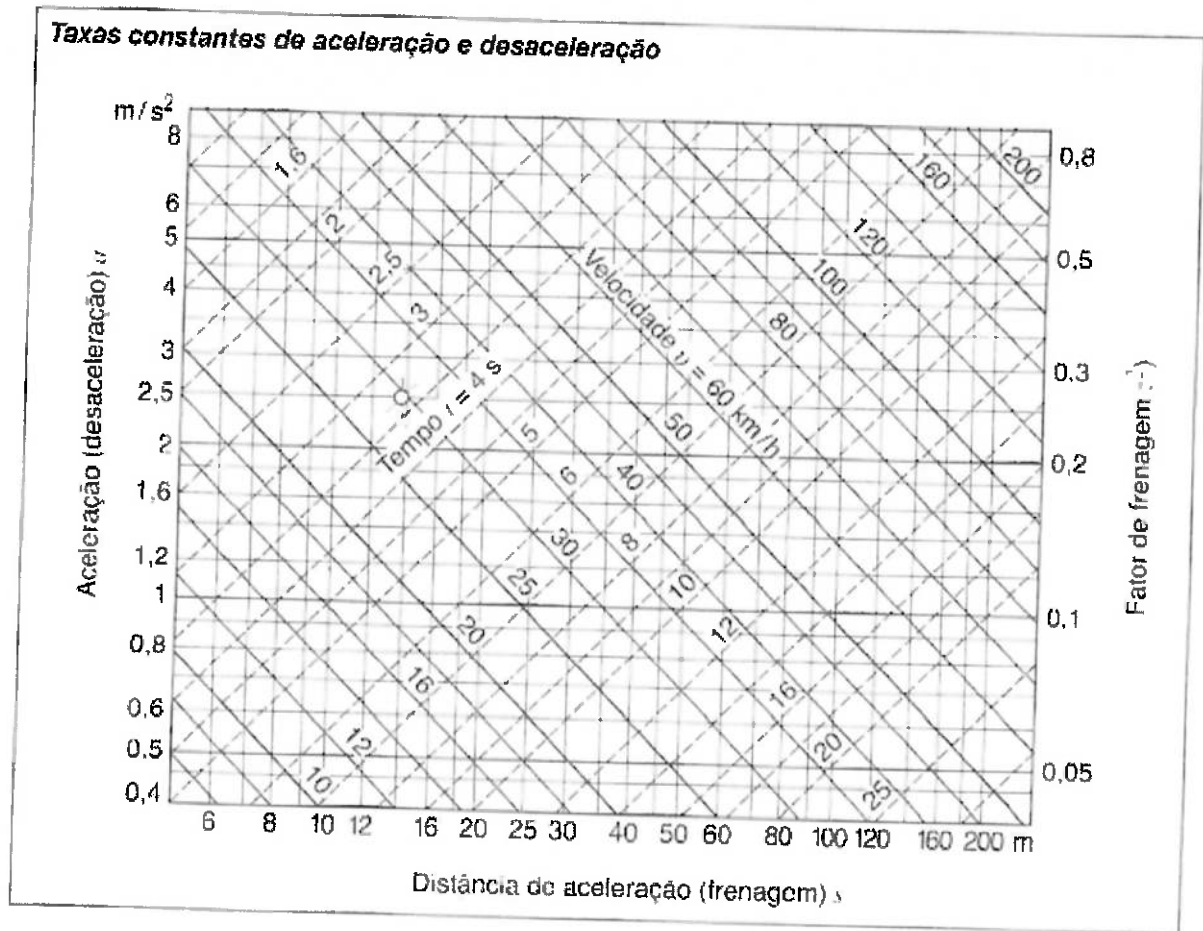


Figura 5.4 – Taxas constantes de aceleração e desaceleração  
 Fonte: Manual de Tecnologia Automotiva – Bosch (2005)

Considerando a velocidade de 10 km/h do objeto de estudo conforme item 5.2.3 com um tempo de aceleração e desaceleração de 4 s, a taxa de aceleração e desaceleração conforme diagrama da figura 5.4 situa-se em torno de  $0,8 m/s^2$

O valor de aceleração e desaceleração adotado na pesquisa será de  $1,2 m/s^2$ , pois se entende que este seja um valor intermediário entre as máximas e mínimas taxas de aceleração e desaceleração referenciadas nesta pesquisa. Além disso, será considerada a condição de aceleração e desaceleração uniforme.

### 5.3.3 Velocidade de trabalho

Considerando as velocidades de trabalho apresentadas no item 5.2.3 bem como as velocidades apresentadas nos protótipos estudados no capítulo 4, o anteprojeto adotará para cálculo inicial, uma velocidade de 30 km/h.

Contudo, a determinação da velocidade de alcance do anteprojetado possivelmente poderá ser diferente de 30 km/h, pois os fatores de velocidade média do veículo na cidade de São Paulo também serão considerados.

Embora a velocidade máxima de trabalho no momento em que o caminhão exerce a coleta conforme o ICD seja de 10 km/h, entende-se que dimensionar um sistema com velocidades superiores a 10 km/h, como por exemplo 30 km/h, proporcionam uma solução com maior capacidade para armazenamento de energia com relativa margem de segurança.

Além disso, é possível estar alinhado com os critérios de velocidade considerados nos protótipos apresentados no capítulo 4.

#### 5.4 CÁLCULO DE POTÊNCIA DO OBJETO DE ESTUDO PARA O SISTEMA HÍBRIDO HIDRÁULICO PARALELO

A determinação da potência do caminhão coletor compactador considera os seguintes dados, previamente apresentados nos itens 5.2 e 5.3.

$$a_x = 1,2 \text{ m/s}^2$$

$$V_0 = 0 \text{ km/h [0 m/s]}$$

$$V_f = 30 \text{ km/h [8,33 m/s]}$$

$$t_0 = 0 \text{ s}$$

$$M = 22000 \text{ kg [condição de veículo carregado]}$$

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

Por meio da equação 5.1, e com os dados acima apresentados, temos que;

$$N = \frac{a_x * V_f * W}{g} \quad \text{Equação (5.1)}$$

$$N = \frac{1,2 * 8,33 * 215600}{9,8}$$

$$N = 219912 \frac{Nm}{s}$$

Onde;

N = Potência de para deslocamento na direção X considerando os fatores aceleração e velocidade.

Sendo que 219912 Nm/s é igual à 219,912 kW.

Com base no cálculo acima, a potência do sistema híbrido paralelo será de 220 kW.

### 5.5 CÁLCULO DO TEMPO DE DESACELERAÇÃO $t_s$

Por meio da equação 5.2, e com os dados abaixo descritos considerando a situação de frenagem, segue o cálculo para  $t_s$ .

$$Dx = 1,2 \text{ m/s}^2$$

$$V_0 = 30 \text{ km/h [8,33 m/s]}$$

$$V_f = 0 \text{ km/h [0 m/s]}$$

$$t_s = \frac{V_0}{Dx}$$

Equação (5.2)

$$t_s = \frac{8,33}{1,2}$$

$$t_s = 6,94 \text{ s}$$

Onde;

$Dx$  = desaceleração linear na direção X

$t_s$  = tempo para o veículo desacelerar e alcançar a velocidade 0

### 5.6 CÁLCULO DA DISTÂNCIA MÍNIMA DE FRENAGEM $S_d$

Por meio da equação 4.24, e considerando os dados abaixo descritos, apresenta-se o cálculo de  $S_d$ .

$$Dx = 1,2 \text{ m/s}^2$$

$$V_0 = 30 \text{ km/h [8,33 m/s]}$$

$$S_d = \frac{8,33^2}{2 * 1,2}$$

$$S_d = 28 \text{ m}$$

## 5.7 CÁLCULO DA POTÊNCIA DE FRENAGEM

Nesta pesquisa, foi adotado mesmo valor para aceleração e desaceleração, desta forma e de acordo com os dados abaixo descritos, seguem os valores de potência de frenagem.

$$M = 22000 \text{ kg}$$

$$V_0 = 30 \text{ km/h [8,33 m/s]}$$

$$t_s = 6,94 \text{ s}$$

$$\text{Potência} = \frac{22000}{2} * \frac{8,33^2}{6,94}$$

$$\text{Potência} = 109982 \text{ W}$$

$$\text{Potência} = 109,9 \text{ kW}$$

## 5.8 CÁLCULO PARA ACUMULAÇÃO DE ENERGIA

Por meio dos dados abaixo apresentados e da equação 5.3, temos o cálculo da energia de acumulação, tendo como base os resultados do movimento de frenagem

$$\text{Potência de frenagem} = 109,9 \text{ kW} = 109900 \text{ W}$$

$$t_s = 6,94 \text{ s}$$

$$E_{acc} = ? \text{ [energia para acumulação de energia]}$$

$$E_{acc} = \text{Potência de frenagem} * t_s$$

Equação (5.3)

$$E_{acc} = 109900 * 6,94$$

$$E_{acc} = 762700 \text{ Nm}$$

$$E_{acc} = 762,7 \text{ kJ}$$

## 5.9 CÁLCULO DO VOLUME DO ACUMULADOR

Com os resultados obtidos nos cálculos de potência de frenagem (item 5.7) e energia de frenagem (5.8) que o sistema híbrido hidráulico pode absorver no momento da frenagem é possível dimensionar o tamanho nominal dos acumuladores hidráulicos. Primeiramente será calculado o volume  $V_1$  do gás  $N_2$ , isto é, o volume no qual teremos a pressão  $P_1$ , que é a pressão mínima de trabalho especificada para o sistema. Com o resultado de  $V_1$ , será efetuado o cálculo de  $V_0$ , que representa o tamanho nominal dos acumuladores de pressão de bexiga.

Por meio dos dados abaixo descritos e da equação 4.5, será realizado o cálculo estimativo do volume necessário do sistema de acumuladores.

Alguns dados adotados têm como referências os protótipos apresentados no capítulo 4.

$p_2$  = pressão máxima de trabalho 330 bar

$p_1$  = pressão mínima de trabalho estipulada em 120 bar

Acc = Capacidade de energia de acumulação = 762,7 kJ, sendo que 1 J é igual a 1 Nm

$n$  = expoente politropico para  $N_2 = 1,6$

$V_0$  = Volume do gás em L (volume nominal dos acumuladores hidráulicos)

$V_1$  = Volume do gás em L na pressão  $p_1$

$$V_1 = \frac{E_{acc} * (1 - n)}{p_1 * 10^2 * \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-n}{n}} \right]} \quad \text{Equação (4.5)}$$

$$V_1 = \frac{762,7 * 10^3 * (1 - 1,6)}{120 * 10^2 * \left[ 1 - \left( \frac{120}{330} \right)^{\frac{1-1,6}{1,6}} \right]}$$

Realizando o cálculo de  $V_1$ , encontramos o resultado de um volume total de 82,66 l de gás  $N_2$ . Desta forma, por meio da equação 4.6, calcula-se o volume nominal do acumulador  $V_0$ .

$$V_0 = \frac{82,66}{0,85}$$

$$V_0 = 97,24 \text{ L}$$

O resultado de  $V_0$  implica na utilização de 2 acumuladores de 50 l. Este resultado significa que temos, em termo de acumulo de energia, um sistema que de acordo com a teoria da compressibilidade do gás de Boyle, um sistema capaz de acumular 762,7 kJ, com uma potência de 220 kW para ser usado no momento de aceleração do caminhão coletor compactador, capaz de desenvolver uma velocidade de até 30 km/h com uma carga total (massa do veículo mais material compactado) de 22 ton.

Os resultados acima observados consideraram, o momento de início de movimentação, ou seja, energia e potência necessária para colocar o veículo em movimento, sob o aspecto da aceleração, e a energia de frenagem conforme explicado nos itens 4.7 e 4.8 por meio da teoria do Gillespie.

Porém, cada acumulador comercial com volume nominal de 50 L, construído em aço, possui uma massa unitária de aproximadamente 123 kg (catálogo Bosch Rexroth RE 50170/01.09), totalizando 246 kg (2 acumuladores).

Desta forma, pretende-se nos itens a seguir, avaliar as condições operacionais do veículo na cidade de São Paulo, sob os aspectos da aceleração e desaceleração, bem como a potência de resistência ao movimento e as condições de declividade do município.

Assim sendo, será possível verificar se o uso de acumuladores com 50 L são suficientes ou não e se possivelmente possa ser usado acumuladores de menores volumes nominais, o que promove a redução de massa do sistema híbrido hidráulico paralelo a ser dimensionado para veículo em estudo.

## **5.10 CÁLCULOS DA POTÊNCIA DE ACELERAÇÃO, POTÊNCIA DE FRENAGEM, ENERGIA DE ACUMULAÇÃO, VOLUME DE N<sub>2</sub> , FORÇA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE E CONDIÇÕES DE DECLIVIDADE**

O conhecimento das condições operacionais do veículo na cidade de São Paulo devem ser levados em consideração na análise de dimensionamento do sistema híbrido hidráulico paralelo, pois entende-se possivelmente que, com conhecimento das condições de trabalho e informações que digam respeito a operação do veículo vão proporcionar uma decisão de um projeto mais adequado ao município.

Por meio dos cálculos efetuados nos itens 5.4 até o item 5.9, os resultados forneceram a necessidade inicial de um sistema de acumuladores com capacidade de armazenamento total de 97,24 L de gás N<sub>2</sub>, considerando uma velocidade de 30 km/h e o veículo trabalhando com a carga máxima de 22 ton.

Contudo, as informações das condições operacionais do objeto de estudo, bem como possíveis condições de tráfego desenvolvida no Município de São Paulo serão avaliadas para uma melhor determinação do tamanho dos acumuladores.

Desta forma, por meio do item 5.10 e os seus respectivos sub-itens, pretende-se apresentar uma tabela com os cálculos das potências de aceleração, potências de frenagem, energia de acumulação e volume de N<sub>2</sub> necessário em função de diferentes valores de velocidades, partindo dos valores de velocidades coletados pelo ICD, velocidades médias no Município de São Paulo e valores referenciados nos protótipos apresentados no capítulo 4.

Além disso, será considerado o fator de nível de declividade médio das vias para estimar a potência de resistência ao movimento e o valor máximo de velocidade de acordo com as condições topográficas analisados nesta pesquisa.

### **5.10.1 Condições de tráfego na cidade de São Paulo**

Conforme informado no ICD e no item 5.2, o caminhão coletor compactador trabalha dentro de uma faixa de 3 à 10 km/h na realização do trabalho de coleta, com possibilidade de alcance de velocidades máximas entre 60 à 70 km/h.



Por meio de uma análise de estudos relativos à velocidade média realizada por veículos no Município São Paulo, torna-se possível encontrar informações que indicam grandezas de velocidades médias estimadas.

Um estudo realizado entre os anos de 1991 e 1993 por Brito e Paula (NT 162/93 CET) buscou demonstrar as velocidades médias desenvolvidas por veículos durante um ano em rotas formadas pelas seguintes vias:

- Vias arteriais: abrange total ou parcialmente as avenidas Paulista, Rebouças, Eusébio

Matoso, Brasil e 9 de julho.

- Vias coletoras: ruas Pamplona, Estados Unidos, Cardeal Arcoverde, Sampaio Vidal,

Groenlândia, Venezuela, Bela Cintra, Al. Santos e São Carlos do Pinhal.

Na pesquisa, Brito e Paula (1993) explica que as velocidades classificadas como de fluxo livre foram coletadas sem a obrigação de periodicidade, porém sempre registradas no sábado às 07:30 da manhã com condições meteorológicas adequadas.

O resultado da pesquisa obteve a seguinte tabela.

Tabela 5.1 – Velocidades médias do trânsito nas rotas permanentes (vias arteriais e coletoras)

MÊS/ANO	VELOCIDADE MÉDIA (KM/H)			
	VIAS ARTERIAIS		VIAS COLATERAIS	
	MANHÃ	TARDE	MANHÃ	TARDE
Abril/91	18,4	12,9	15,9	11,2
Maio/91	19,4	12,6	16,5	11,9
Junho/91	17,2	13,0	17,1	11,2
Julho/91	26,2	15,8	21,0	15,1
Agosto/91	18,1	11,7	15,9	10,1
Setembro/91	17,5	12,6	15,9	11,7
Outubro/91	18,6	13,7	16,5	13,7
Novembro/91	18,3	13,3	14,8	11,5
Dezembro/91	20,7	12,7	18,2	11,3
Janeiro/92	23,1	18,2	20,8	15,9
Fevereiro/92	19,0	13,3	15,6	12,5
Março/92	15,7	13,2	13,8	12,0
Abril/92	16,6	11,5	13,9	12,3
Maio/92	16,5	12,0	15,5	13,0
Junho/92	20,3	13,1	15,0	13,0
Julho/92	24,5	13,9	20,8	15,1
Agosto/92	18,6	12,6	14,8	10,7
Setembro/92	18,6	13,9	14,8	11,7
<b>FLUXO LIVRE</b>				
Janeiro/92		34,0		26,5
Março/92		31,8		28,1
Junho/92		35,3		27,5
Agosto/92		34,6		27,5

Obs:

- Média dos dias pesquisados
- Fluxo livre: medida realizada sábado pela manhã, das 7h45 às 8h30.
- Comprimento da rota – vias arteriais: 24,331km
- Comprimento da rota – vias coletoras: 14,392km

Fonte: Brito e Paula (1993)

Por meio da tabela 5.1, podemos obter as seguintes médias das velocidades, considerando os 18 meses estudados no período de Abril/91 à Setembro/92.

Médias

- Vias arteriais – período da manhã : 19,3 km/h
- Vias arteriais – período da tarde : 13,3 km/h
- Vias colaterais – período da manhã : 16,5 km/h
- Vias colaterais – período da tarde : 12,4 km/h
- Vias arteriais – período da manhã – fluxo livre : 33,9 km/h
- Vias colaterais – período da manhã – fluxo livre : 27,4 km/h

Por meio da tabela 5.2, podemos encontrar as velocidades médias em momentos de pico monitoradas em São Paulo até 2008.

Tabela 5.2 – Velocidade média no Trânsito no Município de São Paulo

Velocidade Média no Trânsito (km/h)  
Município de São Paulo  
1980, 1991 e 2000 a 2008

Período/Sentido	1980	1991	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Pico da manhã (Bairro/Centro)	27,1	24,6	20,4	19,7	19,9	23,2	19,3	18,5	18,3	17,0	17,3
Pico da tarde (Centro/Bairro)	24,9	20,2	19,4	19,5	18,1	19,7	17,7	16,7	16,8	14,2	14,8

Fonte: Companhia de Engenharia de Tráfego/CET - Relatório de Desempenho – Velocidades.

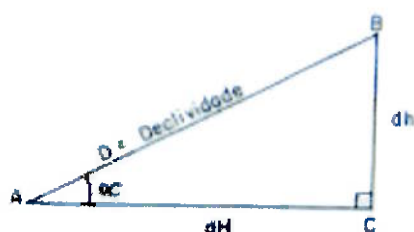
Elaboração : SEMPLA/DIPRO

Os caminhões coletores compactadores no presente ano desta pesquisa buscam realizar os serviços nos períodos vespertinos ou noturnos, porém também executam limpeza nos horários nos períodos da manhã e tarde conforme planejamento.

Com as referências obtidas, as grandezas das velocidades médias, numa análise geral e considerando o tráfego nas vias arteriais e colaterais, podemos possivelmente concluir que se situam entre 14 a 30 km/h.

### 5.10.2 Condições de declividades no Município de São Paulo

Conforme o Manual de Noções Básicas de Cartografia do IBGE (1989), declividade é a relação entre a diferença de altura entre dois pontos e a distância horizontal entre esses pontos.



dh = Diferença de altura BC (Equidistância vertical)

dH = Distância horizontal AC (distância entre os pontos)

D = Declividade

Figura 5.4 – Representação trigonométrica da declividade

Fonte : IBGE (1989)

Desta forma, temos a seguinte relação;

$$D = \frac{dh}{dH} \quad \text{Equação (5.4)}$$

A tangente expressa o coeficiente angular de uma reta em relação ao eixo das abscissas, assim descreve-se a equação 5.5.

$$tg\alpha = \frac{dh}{dH} \quad \text{Equação (5.5)}$$

Quando a declividade é expressa em percentual, o resultado é conhecido como rampa.

$$rampa = tg\alpha * 100 = \frac{dh}{dH} * 100 \quad \text{Equação (5.6)}$$

A declividade é uma informação importante, a mesma influência no desempenho de aceleração e desaceleração do veículo conforme explicado no item 4.8, sendo um esforço adicional a ser considerado.

Para veículos hidráulicos híbridos, melhor será o desempenho e economia de combustível, sob o aspecto de declividade, em locais com declividades no qual o sistema consiga fornecer a potência necessária para a movimentação do veículo. Quanto menor for o nível de alternância de declividade das vias, maior será a regularidade e uso da energia regenerada.

No caso do objeto de estudo, o veículo pode trabalhar nas regiões Sul e Leste do Município de São Paulo conforme representado pela figura 5.5.

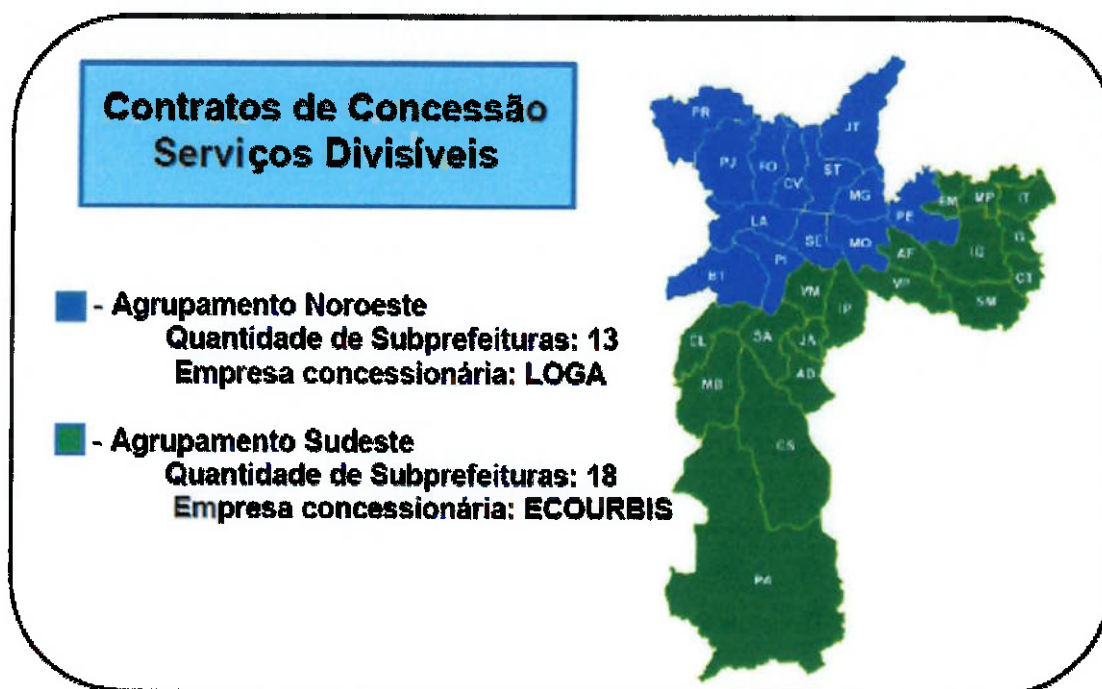


Figura 5.5 – Mapa de São Paulo – Divisão da região do sistema de coleta de lixo – Contrato de concessão de serviços divisíveis

Fonte : Secretaria Municipal de Serviços – Departamento de limpeza urbana – Prefeitura de São Paulo

As regiões Sudeste e Noroeste têm condições de declividade conforme o mapa representado na figura 5.6.

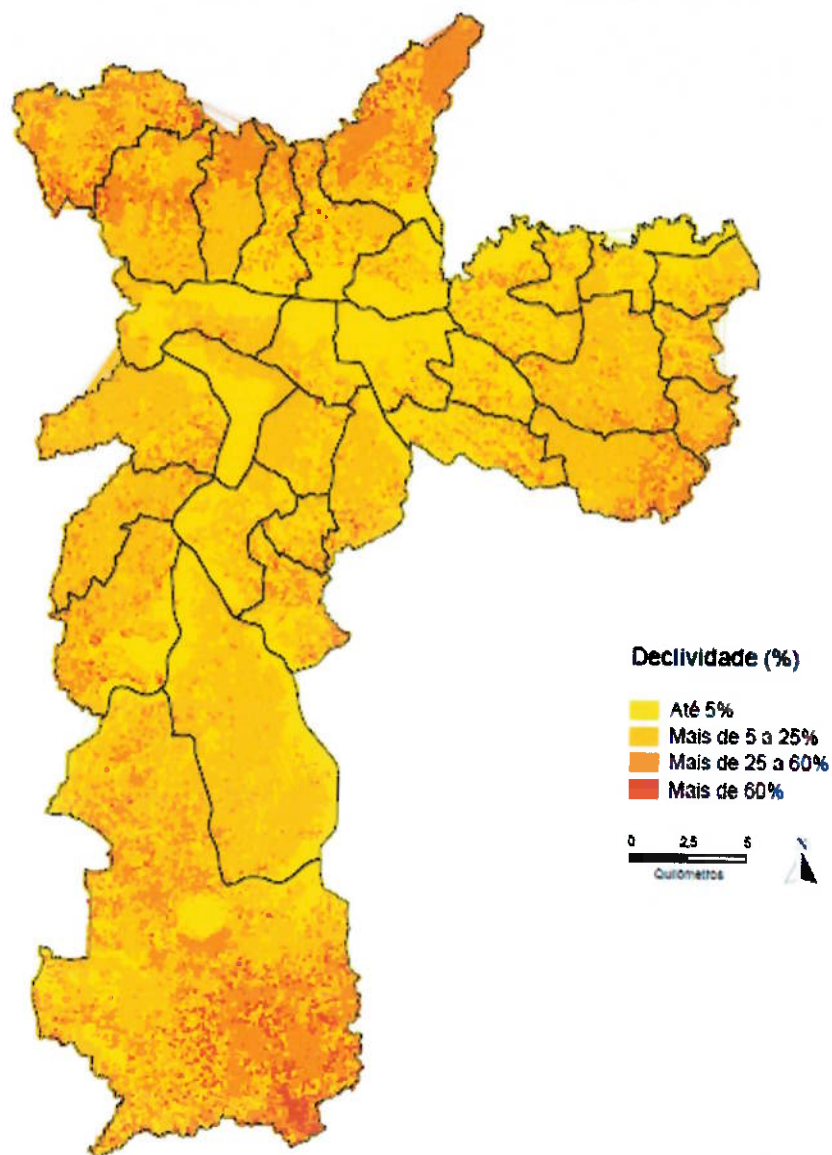


Figura 5.6 – Mapa de Declividade do Município de São Paulo em (%)

Fonte: Prefeitura da Cidade de São Paulo; Secretaria Municipal de Planejamento – Sempla e Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente – SVMA. Com base em: PMSP & IPT. Carta Geotécnica do Município de São Paulo, 1992.

Conforme visualização na figura 5.6, o Município de São Paulo tem em sua maior parte, condições de declividade de 0 até 25 %. Nos extremos das regiões Sul e Norte detectam-se condições de declividades mais acentuadas, com valores de declividade em torno de 25 até mais de 60 %.

### 5.10.3 Tabela com cálculos estimados da potência de aceleração, potência de frenagem, energia acumulada e volume de N<sub>2</sub>

De posse dos dados descritos nos itens 5.10.1 e 5.10.2 e com as equações descritas por meio das referências indicadas nesta pesquisa no capítulo 4, apresentam-se na tabela 5.3 os resultados estimados de potência de aceleração, potência de frenagem, energia acumulada e volume de N<sub>2</sub> dos acumuladores em função da velocidade, desconsiderando as perdas de resistência ao movimento, considerando pista plana e a hipótese simplificadora do item 5.1.

Tabela 5.3 - Cálculos estimados da potência de aceleração, potência de frenagem, energia de acumulada e volume de V0 do sistema de acumuladores

Velocidade do veículo (km/h)	Potência para aceleração (kW)	ts - tempo de desaceleração (s)	Potência de frenagem (kW)	Eacc - Energia de acumulação (kJ)	V1 volume de N2 (L)	V0 - Volume do sistema de acumuladores (L)
3,0	22,0	0,7	11,0	7,6	0,8	1,0
5,0	36,7	1,2	18,3	21,2	2,3	2,7
10,0	73,3	2,3	36,7	84,9	9,2	10,8
15,0	110,0	3,5	55,0	191,0	20,7	24,4
20,0	146,7	4,6	73,3	339,5	36,8	43,3
25,0	183,3	5,8	91,7	530,5	57,5	67,6
30,0	220,0	6,9	110,0	763,9	82,8	97,4
35,0	256,7	8,1	128,3	1039,7	112,7	132,6
40,0	293,3	9,3	146,7	1358,0	147,2	173,2
45,0	330,0	10,4	165,0	1718,8	186,3	219,2
50,0	366,7	11,6	183,3	2121,9	230,0	270,6
55,0	403,3	12,7	201,7	2567,5	278,3	327,4
60,0	440,0	13,9	220,0	3055,6	331,2	389,6
65,0	476,7	15,0	238,3	3586,0	388,7	457,2
70,0	513,3	16,2	256,7	4159,0	450,8	530,3

Dados de entrada;  
 $a_x = 1,2 \text{ m/s}^2$   
 $M = 22000 \text{ kg}$   
 $g = 9,8 \text{ m/s}^2$   
 $p_1 = 120 \text{ bar}$   
 $p_2 = 330 \text{ bar}$   
 $n = 1,6$   
 $D_x = 1,2 \text{ m/s}^2$

Conforme os resultados apresentados, o aumento da velocidade significa que, maior será o volume de gás necessário no sistema de acumuladores.

A tabela 5.3 representa uma análise considerando as condições de aceleração e frenagem do veículo. É possível por meio dos cálculos apresentados, conhecermos o volume dos acumuladores, a capacidade de acúmulo de energia bem como potência do sistema em função da velocidade apresentados na tabela.

#### 5.10.4 Cálculo da potência de resistência ao movimento

Por meio das equações apresentadas no capítulo 4 e adotando a máxima velocidade de trabalho no momento da coleta de lixo de 10 km/h conforme o ICD, segue o cálculo de potência de resistência ao movimento em função da variação do grau de declividade da pista.

Tabela 5.4 - Cálculo da potência de resistência ao movimento

Declividade (%)	Velocidade (km/h)	Arco tangente (rad)	Fro (N)	Fst (N)	FL (N)	Fw (N)	Potência de resistência ao movimento (kW)
0	10	0,00	2156	0	20	2176	6
5	10	0,05	2153	10767	20	12940	36
10	10	0,10	2145	21453	20	23618	66
15	10	0,15	2132	31982	20	34134	95
20	10	0,20	2114	42283	20	44417	123
25	10	0,24	2092	52291	20	54402	151
30	10	0,29	2065	61952	20	64037	178
35	10	0,34	2035	71224	20	73278	204
40	9,5	0,38	2002	80072	20	82094	220
45	9	0,42	1966	88475	20	90461	220
50	8	0,46	1928	96419	20	98368	220
55	7	0,50	1889	103902	20	105811	220
60	7	0,54	1849	110925	20	112794	220

Dados de entrada;

$f = 0,01$  (Coeficiente de resistência ao rolamento para pneus pneumáticos de caminhão em concreto e asfalto – Fonte : Bosch 2005)

$M = 22000$  kg

$g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>

$A = 5,2$  m<sup>2</sup> (Cálculo estimativo da seção transversal do veículo – baseado nas dimensões encontradas no catálogo do modelo de caminhão 17220 Tractor da Volkswagen)

$c = 1,15$  (Coeficiente médio de arrasto aerodinâmico para caminhões entre 0,80 à 1,5 – Fonte : Bosch 2005)

$\rho = 1,202$  kg/m<sup>3</sup> (densidade do ar a 200 m de altitude do nível do mar – Fonte : Bosch 2005)



A tabela 5.4 demonstra que conforme o aumento da declividade, maior será a resistência ao movimento do veículo. A tabela foi construída considerando os níveis de declividades existentes no Município de São Paulo conforme o mapa da figura 5.6.

Além disso, foram incluídos os dados de entrada referenciados no campo observação da tabela.

Os cálculos mostraram a necessidade de aumento da potência em função do grau de declividade. A construção da tabela limitou a potência até 220 kW, ou seja, a partir deste valor, foram mantidas as condições de aumento de declividade e o valor da potência foi fixado em 220 kW conforme explicado anteriormente, porém, para compensar o não aumento da potência e crescente aumento de declividade, adotou-se diminuir o fator velocidade para declividades acima de 40 %.

A força de resistência do arrasto foi mantida no valor da condição de maior velocidade tendo em vista que é uma grandeza relacionada a velocidade e não sofre interferência do grau de declividade conforme demonstrado no seu equacionamento.

Os resultados da tabela 5.4 mostram que o sistema poderá, dentro das condições de dados de entrada consideradas no cálculo, alcançar diferentes valores máximos de velocidades dependendo do grau de declividade da via. Isto mostra que o veículo terá diferentes desempenhos, por exemplo, não conseguirá desenvolver velocidade superior à 10 km/h a partir de uma declividade de 40 %.

Isto é uma informação importante, pois indica os limites de velocidades possíveis de serem realizadas pelo sistema híbrido hidráulico paralelo sob o aspecto da declividade.

Desta forma, por meio da consideração topográfica do município de São Paulo, é possível uma melhor análise das condições operacionais e uso da potência hidráulica disponível no sistema, no caso do cálculo da tabela 5.4, uma potência de 220 kW.

Tendo em vista que uma declividade de 0 % proporciona um maior desenvolvimento de velocidade, em torno de 30 km/h, uma declividade de 40 %, a velocidade máxima de alcance será menor que 10 km/h.

## 5.11 DETERMINAÇÃO DO VOLUME PARA O ACUMULADOR DO ANTEPROJETO

Após a análise do efeito da potência de resistência ao movimento do veículo, por meio do item 5.10.4, foi possível perceber o quanto o fator de declividade influencia no desempenho de velocidades máximas do veículo.

Relembrando, os cálculos usados na construção da tabela 5.4, foi considerando uma potência máxima disponível no sistema híbrido hidráulico paralelo de 220 kW.

Foi visto também que, o veículo consegue trabalhar, dentro das condições pré-estabelecidas para os cálculos, com uma declividade de até 40 %, exercendo uma velocidade máxima de aproximadamente 10 km/h. Declividades acima de 40 %, a velocidade deve ser reduzida.

Nas condições acima descritas, o anteprojeto teria necessidade de usar 2 acumuladores com volume comercial  $V_0$  de 50 L conforme cálculo do item 5.9.

Contudo, no item 5.9 foi descrito que os fatores operacionais devem ser levados em consideração para uma verificação se o tamanho dos acumuladores estão corretos e se existe a possibilidade de redução do volume dos mesmos, afim de reduzir o peso do SHHP.

Portanto, o item 5.11 tem como objetivo, proceder cálculos, fazendo uso dos dados das condições de tráfego do município em conjunto com o aspecto de declividade.

A aferição do tamanho do acumulador terá como referência a velocidade média desenvolvida por veículos no município de São Paulo, que conforme as referências descritas no item 5.10.1, situa-se em torno de 22 km/h e as velocidades de trabalho no momento da coleta de 3 à 10 km/h ( conforme ICD).

Com as informações pesquisadas serão realizadas análises com diferentes valores de velocidades para que assim possa chegar a melhor relação entre volume/peso do acumulador versus capacidade de velocidade operacional.

Primeiramente, a análise inicia fixando uma velocidade máxima de 20 km/h, peso bruto de 215600 N (22000 kgf).

Analisando as grandezas de aceleração e frenagem, a tabela 5.3 mostra uma necessidade de volume  $V_0$  de 43,3 L. com uma potência de aceleração de 143 kW.

Contudo, conforme a tabela 5.5, sob o aspecto da potência de resistência ao movimento, a partir de uma declividade de 25 %, a velocidade operacional de 10 km/h, em função da potência de 143 kW, começa a ter valores menores que 10 km/h pelo fato de ser necessária uma potência maior do que a disponível (143 kW).

Tabela 5.5 - Cálculo da potência de resistência ao movimento – Potência limitada a 146 kW

Declividade (%)	Velocidade (km/h)	Arco tangente (rad)	Fro (N)	Fst (N)	FL (N)	Fw (N)	Potência de resistência ao movimento (kW)
0	10	0,00	2372	0	20	2392	7
5	10	0,05	2369	10767	20	13155	37
10	10	0,10	2360	21453	20	23833	66
15	10	0,15	2345	31982	20	34348	95
20	10	0,20	2326	42283	20	44628	124
25	10	0,24	2301	52291	20	54611	146
30	8	0,29	2272	61952	20	64244	146
35	7	0,34	2238	71224	20	73482	146
40	6	0,38	2202	80072	20	82294	146
45	6	0,42	2163	88475	20	90657	146
50	5	0,46	2121	96419	20	98560	146
55	5	0,50	2078	103902	20	106000	146
60	5	0,54	2034	110925	20	112979	146

Dados de entrada:

$f = 0,01$  (Coeficiente de resistência ao rolamento para pneus pneumáticos de caminhão em concreto e asfalto – Fonte : Bosch 2005)

$M = 22000$  kg

$g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>

$A = 5,2$  m<sup>2</sup> (Cálculo estimativo da seção transversal do veículo – baseado nas dimensões encontradas no catálogo do modelo de caminhão 17220 Tractor da Volkswagen)

$c = 1,15$  (Coeficiente médio de arrasto aerodinâmico para caminhões entre 0,80 à 1,5 – Fonte : Bosch 2005)

$\rho = 1,202$  kg/m<sup>3</sup> (densidade do ar a 200 m de altitude do nível do mar – Fonte : Bosch 2005)

Uma potência de 146 kW seria suficiente considerando que maior parte da região do Município de São Paulo situa-se em áreas com declividades inferiores a 25 %. Porém, atualmente, os veículos coletores compactadores possuem a tendência de trabalhar em horários onde o tráfego de veículos é menor, tendo um potencial para desenvolver uma velocidade média superior a 20 km/h em seus deslocamentos. Considerando o estudo descrito no item 5.10.1, onde foi possível mensurar uma velocidade de fluxo livre em vias colaterais de aproximadamente 27 km/h, torna-se possível adotar uma velocidade de 25 km/h para cálculo da potência de aceleração bem como uma verificação na potência de resistência ao movimento.

Por meio da tabela 5.3, para uma velocidade de 25 km/h, é necessário uma potência de 183 kW e um volume V0 nos acumuladores de 67,6 L. Com este valor limite de potência, é construída a tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Cálculo da potência de resistência ao movimento – Potência limitada a 183 kW

Declividade (%)	Velocidade (km/h)	Arco tangente (rad)	Fro (N)	Fst (N)	FL (N)	Fw (N)	Potência de resistência ao movimento (kW)
0	10	0,00	2372	0	20	2392	7
5	10	0,05	2369	10767	20	13155	37
10	10	0,10	2360	21453	20	23833	66
15	10	0,15	2345	31982	20	34348	95
20	10	0,20	2326	42283	20	44628	124
25	10	0,24	2301	52291	20	54611	152
30	10	0,29	2272	61952	20	64244	178
35	9	0,34	2238	71224	20	73482	183
40	8	0,38	2202	80072	20	82294	183
45	7	0,42	2163	88475	20	90657	183
50	7	0,46	2121	96419	20	98560	183
55	6	0,50	2078	103902	20	106000	183
60	6	0,54	2034	110925	20	112979	183

Dados de entrada;

$f = 0,01$  (Coeficiente de resistência ao rolamento para pneus pneumáticos de caminhão em concreto e asfalto – Fonte : Bosch 2005)

$M = 22000$  kg

$g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>

$A = 5,2$  m<sup>2</sup> (Cálculo estimativo da seção transversal do veículo – baseado nas dimensões encontradas no catálogo do modelo de caminhão 17220 Tractor da Volkswagen)

$c = 1,15$  (Coeficiente médio de arrasto aerodinâmico para caminhões entre 0,80 à 1,5 – Fonte : Bosch 2005)

$\rho = 1,202$  kg/m<sup>3</sup> (densidade do ar a 200 m de altitude do nível do mar – Fonte : Bosch 2005)

Considerando que possivelmente, os veículos coletores compactadores estudados trabalhem com velocidade de deslocamento médio em torno de 25 km/h, velocidade esta próxima a velocidade média em vias colaterais mencionadas no item 5.10.1.

Verificando a potência de resistência ao movimento, cuja condição de velocidade máxima de trabalho de 10 km/h no trajeto de coleta de lixo, consegue com uma potência de resistência ao movimento limitado a 183 kW, trabalhar em declividades com até 30%, entende-se que possivelmente o uso de dois acumuladores de 35 L sejam adequados frente às condições de trabalho existente no Município de São Paulo com base nas referências apresentadas nesta pesquisa.

## 5.12 DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA BOMBA

O cálculo do tamanho da bomba considera as equações descritas no item 4.4.2.2 e 4.4.2.3 bem como os valores abaixo descritos;

- Potência = 183 kW
- rotação da bomba = 2000 RPM
- Pressão = 330 bar

Desconsiderando perdas e rendimentos, por meio da equação 4.11 obtemos uma bomba com uma capacidade de vazão de 332 L/min.

Com um sistema de embreagem que trabalhe com rotação de 2000 RPM, uma bomba com um volume geométrico de 166 cm<sup>3</sup> será suficiente para suprir a demanda de potência definida no item 5.11.

Tendo em vista os dados de pressões e o volume V<sub>0</sub> de 70 litros adotados nos cálculos, precisamos preencher os acumuladores com um volume de óleo 30 litros. (vide anexo 3)

Dividindo-se este volume pela vazão disponibilizada pela bomba, o tempo total de carregamento do volume de óleo nos acumuladores será de aproximadamente 5 s. Este tempo de preenchimento pode ser realizado de forma contínua ou dividida, ou seja, é possível preencher os acumuladores em mais de um evento de frenagem.

## 5.13 CIRCUITO HIDRÁULICO

Por meio dos cálculos efetuados nos itens 5.11 e 5.12, e a teoria apresentada no capítulo 4, torna-se possível propor um esquema hidráulico básico para o anteprojeto conforme figura 5.7 e o Anexo 2.

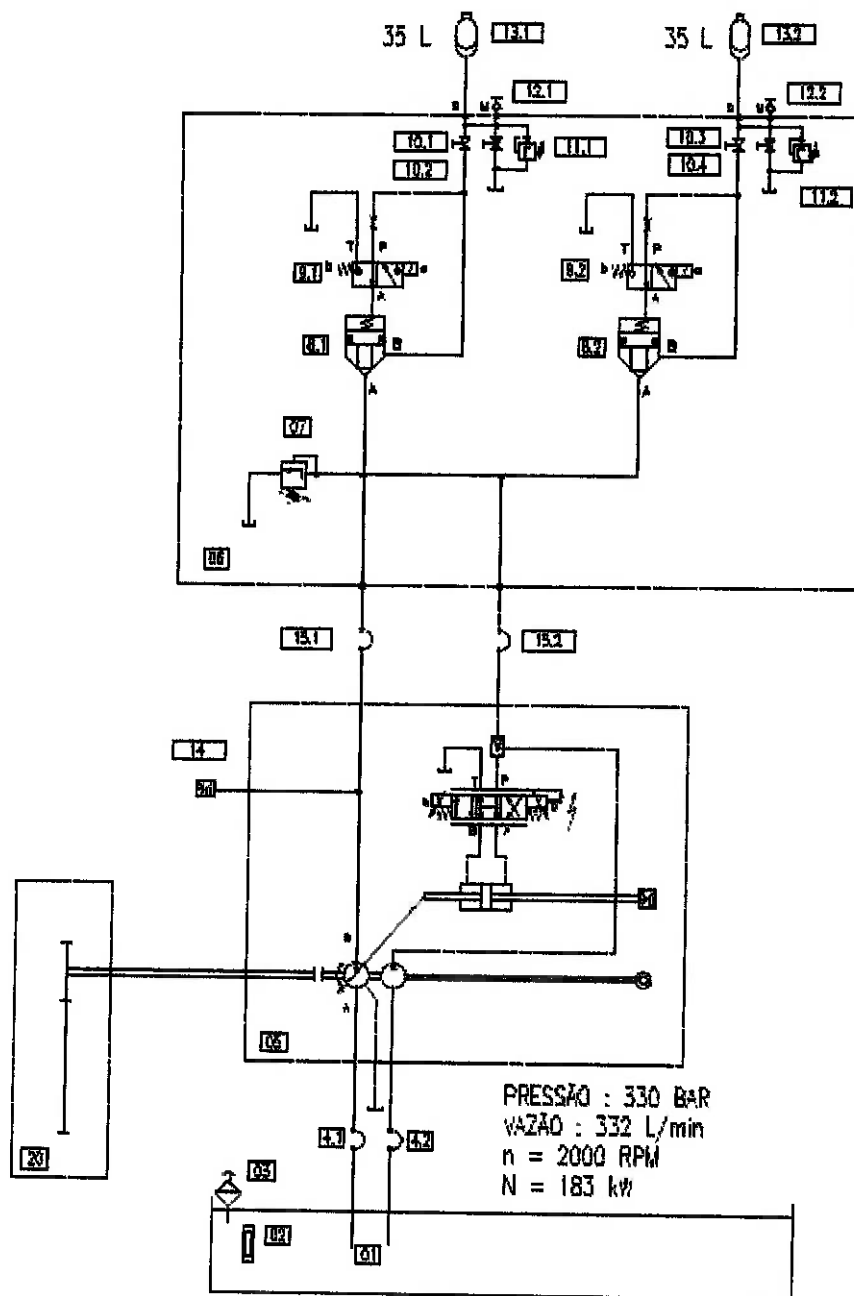


Figura 5.7 – Esquema hidráulico básico para sistema híbrido hidráulico paralelo

## **5.14 ANÁLISE QUANTITATIVA**

O objetivo deste item é realizar uma análise quantitativa dos possíveis benefícios que o sistema híbrido hidráulico pode oferecer.

Contudo, a análise será feita sob dois aspectos.

O primeiro aspecto é em relação à possível quantidade de potência de frenagem regenerada. Esta análise leva em consideração a teoria de frenagem apresentada no capítulo 4.

O segundo aspecto é em relação ao percurso total desenvolvido, preço do combustível, consumo e o critério de limite máximo de economia de combustível limitado em até 25 %, valor este apresentado pelos protótipos mencionados no capítulo 4.

### **5.14.1 Condições e critérios para análise**

Para a realização da análise quantitativa dos benefícios que o sistema híbrido hidráulico pode oferecer, serão utilizadas algumas informações e critérios para os cálculos.

A distância média percorrida pelo veículo no roteiro de coleta será de 22 km conforme descrito no item 5.2.3.

O percurso será plano, com declividade de 0%.

Será considerado que um veículo realiza uma média de 2,33 viagens conforme o ICD.

Será adotado como um ciclo de movimento de aceleração e frenagem, o caminhão coletor compactador com velocidade inicial de 0 km/h, atingindo velocidade média de 6,5 km/h e depois freando até a velocidade de 0 km/h. A velocidade de 6,5 km/h é a média da soma de 10 km/h e 3 km/h, velocidades estas conforme o ICD.

Do potencial total de frenagem, somente 15 % será computado como energia regenerada, pois após os 15 % de curso do pedal de freio, considera-se que o veículo atua com o sistema convencional de freios.

Da energia de frenagem a ser regenerada, será adotado um rendimento de 71 % para a devolução da energia captada para as rodas, conforme referência do item 4.1, figura 4.4

O veículo trabalhará 26 dias por mês, com 7,33 hora/dia (FONSECA;GONZAGA ,2006).

O consumo de combustível médio considerado para um veículo sem o sistema híbrido hidráulico paralelo será de 1,78 km/L, valor este extraído dentro do consumo médio previsto para este tipo de veículo conforme Fonseca;Gonzaga (2006).

O preço do litro do Diesel é de R\$ 1,98 (ANP, Dezembro de 2009)

#### 5.14.1.1 Análise da potência de frenagem regenerada

Considerando as equações de desaceleração e frenagem, bem como os rendimentos e as condições descritas no item 5.14.1, por meio da tabela é possível mensurar a quantidade total de potência de frenagem a ser regenerada.

Tabela 5.7 – Análise da potência de frenagem regenerada

ciclo de aceleração e frenagem (m)	Percurso de trabalho/viagem (km)	Número de viagens	Total de distância percorrida (km)	Velocidade de coleta (km/h)	ts (s)	Potência total de frenagem (kW)	Potência de frenagem regenerada - 15% (kW)	Total de potência regenerada (kW)	Total de potência regenerada líquida - 71% (kW)
60,0	22,0	2,33	51,3	6,5	1,5	23,8	3,6	3054,2	2168,5
100,0	22,0	2,33	51,3	6,5	1,5	23,8	3,6	1832,5	1301,1
150,0	22,0	2,33	51,3	6,5	1,5	23,8	3,6	1221,7	867,4
200,0	22,0	2,33	51,3	6,5	1,5	23,8	3,6	916,3	650,6
250,0	22,0	2,33	51,3	6,5	1,5	23,8	3,6	733,0	520,4
300,0	22,0	2,33	51,3	6,5	1,5	23,8	3,6	610,8	433,7

Dados de entrada;

M = 22000 kg

$Dx = 1,2 \text{ m/s}^2$

Por meio da tabela 5.7, quanto mais eventos de frenagens o veículo realizar, maior será o total de potência de frenagem regenerada.



A potência regenerada deve ser usada durante as movimentações do veículo, preferencialmente em declividades igual a zero até o limite de 30% conforme dimensionamento do item 5.11.

#### 5.14.1.2 Análise da economia de combustível

Conforme as condições descritas no item 5.14.1, é possível por meio dos cálculos logo a seguir, demonstrar um possível potencial total de economia de combustível anual.

Cálculos

$D_m = \text{Distância média /viagem} = 22 \text{ km}$

$N_v = \text{Número médio de viagens} = 2,33$

$\text{Total de quilômetros realizados} = 22 * 2,33 = 51,3 \text{ km}$

Consumo estimado de combustível sem sistema híbrido hidráulico (km/L) = 1,78 km/l

$\text{Total de combustível consumido} = 51,3/1,78 = 28,8 \text{ l}$

$F_c = \text{Fator de redução de consumo de combustível} = 0,25 \text{ (25\%)}$

$\text{Economia de combustível estimada (25\%)} = 28,8 * 0,25 = 7,2 \text{ l}$

$\text{Preço do Diesel (R\$/L)} = \text{R\$ } 1,98 \text{ R\$/L}$

$\text{Economia monetária} = 1,98 * 7,2 = \text{R\$ } 14,26$

Portanto, por meio dos cálculos apresentados dentro das condições estabelecidas, o veículo poderá economizar até R\$ 14,26 a cada 2,33 viagens com 22 km cada.

Estendendo os cálculos para um número maior de veículos e um período de tempo anual, é apresentada a seguinte análise;

Dados de entrada

$\text{Distância média /viagem} = 22 \text{ km}$

$\text{Número médio de viagens} = 2,33$

Consumo estimado de combustível sem sistema híbrido hidráulico (km/L)=  
1,78 km/L

Preço do Diesel (R\$/L) = R\$/L 1,98

Quantidade de dias trabalhados = 26

Frota = 180

Quantidade de meses = 12

Economia anual monetária =  $(22 \cdot 2,33 / 1,78) \cdot 1,98 \cdot 26 \cdot 180 \cdot 12 \cdot 0,25$

Economia anual monetária = R\$ 800.554,48

Com uma redução de 25 % no consumo de combustível, calcula-se uma economia monetária anual de R\$ 800.554,48 para uma frota de 180 caminhões.

O preço do Diesel impacta nos resultados, portanto, quanto maior for o valor do litro do combustível, maior será a economia para o frotista. Da mesma forma, quanto maior a quilometragem desenvolvida pelo veículo, mais rápido será o retorno do investimento.

## 5.15 INVESTIMENTO

Por meio do material pesquisado, os custos atuais que envolvem um sistema híbrido hidráulico paralelo não é divulgado. Isto se deve a fatores como volume de produção, custos de desenvolvimento e instalação. Além disto, tem o fato de que o retorno do investimento está relacionado com os custos do combustível, possíveis restrições por meio das leis e incentivos fiscais.

Contudo, conforme Marshall (2008), operadores europeus requisitam retorno de investimento deste tipo de tecnologia em no máximo 4 anos, sendo este um indicativo de que o projeto deve prever esta condição de valor e procurar reduzir os custos para se adequar as expectativas máximas de retorno no menor tempo possível.

A partir do quarto ano, conforme descrito por Marshall (2008), a economia de combustível reverte-se em redução de custos para o frotista.

No capítulo 4 também temos a referência de tempo para retorno de investimento descrita por Gray (2006) entre 2 e 3 anos.

Conforme tabela de custos para sistemas de coleta de lixo, a Confederação Nacional dos Municípios – CNM, é indicado que um veículo coletor compactador apresenta uma vida útil média de 8 anos para cálculo de depreciação.

No estudo de Fonseca;Gonzaga (2006), a vida útil é estimada em 60 meses (5 anos) nos demonstrativos de cálculos de depreciação.

Estando o veículo com uma vida útil entre 5 à 8 anos de uso (período este usado para cálculo de depreciação), desejando-se um retorno de investimento em no máximo 4 anos, o sistema representará vantagens monetárias analisando o quesito economia de combustível.

#### **5.16 ANÁLISE SOB O ASPECTO DA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE POLUENTES**

A redução de emissões de poluentes torna-se possível por meio da economia de combustível e menor consumo obtido pela tecnologia híbrida hidráulica paralela. Isto significa que, caso o sistema consiga reduzir o consumo de Diesel, menor será a poluição gerada.

Para realizar uma análise e contribuição que esta tecnologia pode oferecer para reduzir as emissões no município de São Paulo, a análise sobre o aspecto da poluição atmosférica considerará a economia potencial de 25 % de redução do consumo, grandeza esta utilizada no item 5.14.1.2, o total de litros estimado economizado e o número total da frota.

Além disso, serão usados os fatores de emissões (FE) conforme os resultados encontrados nas tabelas 5.8 e 5.9 por meio dos estudos de poluição atmosférica realizada em túneis na cidade de São Paulo conforme estudo Saldiva et al (2007).

Estas tabelas indicam os fatores de emissões estimativos para veículos pesados que fazem uso do Diesel como combustível nos túneis Jânio Quadros e Maria Maluf. No qual é possível correlacionar à quantidade de emissões geradas por quantidade de combustível utilizado.

Na tabela 5.8 é indicado uma estimativa da quantidade média de NOx e CO gerada considerando os dois túneis. Nela, será usada a informação de gramas de emissões por litro consumido por veículos pesados.

Tabela 5.8 – Fatores de emissões para os compostos NOx e CO medidos nos túneis JQ e MM em 2004

Composto	FE – Veículos leves		FE – Veículos pesados	
	g/l	g/km	g/l	g/km
CO	121 ± 19	14.6 ± 2.3	44 ± 10	20.6 ± 4.7
NOx	13,5 ± 2.3	1.6 ± 0.3	48 ± 21	22.3 ± 9.8

Onde;

JQ = Túnel Jânio Quadros

MM = Túnel Maria Maluf

Fonte : Saldiva et al. (2007)

Na tabela 5.9 a seguir, são apresentados os resultados de BC (BLACK CARBON), MP (material particulado) e PG (partículas grossas). Valores estes encontrados nos dois túneis, no caso o Jânio Quadros e Maria Maluf.

O termo BC significa conforme Saldiva et al. (2007) os compostos que são medidos através da sua capacidade de absorver radiação visível. Nessa condição o termo BC é em geral aplicado para designar vários produtos da combustão incompleta e inclui cinzas e carvão, tendo na sua composição carbono na forma elementar. O BC é emitido de forma primária nos processos de combustão e concentra-se na fração fina do material particulado.

Contudo, a tabela 5.9 mostra os resultados de fatores de emissões de mg por km (e desvios padrões) desenvolvidos.

Tabela 5.9 – Fatores de emissões calculados para o BC, MP2,5, PG e MP10 nos túneis Jânio Quadros e Maria Maluf, amostrados em 2004

	BC (mg/km)	MP10 (mg/km)	PG (mg/km)	MP2,5 (mg/km)
Veículos leves	16 (5)	197 (118)	127 (67)	92 (20)
Veículos pesados	462 (112)	755 (401)	715 (585)	588 (364)

Fonte : Saldiva et al (2007)

Partículas grossas (PG) conforme Saldiva et al (2007) tem em grande parte ressuspensão de poeira do solo induzida pelo movimento do veículo, portanto, não será usado na análise.

Para que possamos realizar o potencial de redução de emissões na frota de caminhão coletor compactador, serão convertidos os resultados dos fatores de emissões da tabela 5.9 para g/l, a intenção é promover uma análise sob a mesma unidade da tabela 5.8.

Desta forma, conforme o item 5.14.1.2, foi considerado que o veículo desenvolve 1,78 km/l.

Multiplicando o consumo médio pelos dados da tabela 5.9, temos a tabela 5.10. Não serão considerados os valores de desvio padrão em parênteses na tabela 5.9.

Tabela 5.10 – Fatores de emissões calculados para o BC, MP2,5, PG e MP10 nos túneis Jânio Quadros e Maria Maluf, amostrados em 2004 multiplicados por um consumo médio de 1,78 km/l

	BC (mg/l)	PM10 (mg/l)	PG (mg/l)	PM2,5 (mg/l)
Veículos leves	28,5	350,6	226,0	163,76
Veículos pesados	822,3	1343,9	1272,7	1046,6

Fonte : Baseado em tabela Saldiva et al (2007)

Realizando o produto da equação 5.7, com os fatores de emissões das tabelas 5.8, tabela 5.10 e os dados de entrada abaixo descritos, temos como resultado a tabela 5.11, onde é indicada a potencial redução de emissões de poluentes da frota.

#### Dados de entrada

Dm = Distância média /viagem = 22 km

Nv = Número médio de viagens = 2,33

Qd = Quantidade de dias trabalhados = 26

F = Frota = 180

Qm = Quantidade de meses = 12

FEp = Fator de emissão do poluente = g/l

RE = Redução de emissão

Fc = Fator de redução de consumo = 0,25 (25%)

Cm = Consumo médio = 1,78 km/l

$$RE = (Dm * Nv / Cm) * Qd * F * Qm * FEp * Fc$$

Equação 5.7

Tabela 5.11 – Redução de emissão total anual em toneladas

	BC	MP10	MP2,5	CO	Nox
Fator de emissão g/l	0,822	1,343	1,046	44	48
Redução de emissão total anual (ton/ano)	0,33	0,54	0,42	17,79	19,41

Observação : Análise para uma população de 180 caminhões coletores compactadores

A tabela 5.11 descreve uma projeção de redução de poluentes utilizando como fonte de informação os fatores de emissões dos túneis Jânio Quadros e Maria Maluf (não foram considerados os valores de desvio padrão em parênteses na tabela).

A opção do uso dos fatores de emissões do estudo de Saldiva et. al. (2007) nesta pesquisa é importante. Os túneis são locais de confinamento de gases, não permitindo, portanto, uma dispersão natural dos gases como um ambiente aberto.

Fazer a correlação dos fatores de emissões com as hipóteses de consumo por quilômetro e redução potencial de 25 % em economia de combustível permite uma quantificação da de uma possível redução de emissões que a frota de 180 caminhões pode ter usando a tecnologia hidráulica híbrida paralelo.

## 6 DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES

### 6.1 INTRODUÇÃO

Tecnologias para redução de emissões de poluentes estão na pauta de discussões da sociedade atualmente.

A relevância ao tema e o seu grau de importância vem de encontro a um momento no qual a sociedade discute as melhores práticas para o desenvolvimento sem agredir o meio ambiente.

Quando realiza-se uma análise tecnológica, é importante a elaboração de pesquisas com informações que forneçam subsídios para a viabilidade ou não da solução proposta.

Desta forma, a pesquisa realizada neste trabalho buscou discutir a tecnologia híbrida hidráulica paralela para caminhões pesados, mais especificamente, um caminhão coletor compactador por meio de estudo de caso e procurou analisar com um objeto de estudo, os benefícios que possam ser oferecidos ao Município de São Paulo.

A pesquisa mostrou 4 pontos relevantes para verificação da tecnologia híbrida hidráulica, sendo;

- Causa e problema de ordem social causada por emissões veiculares na cidade de São Paulo.
- Análise das principais tecnologias para redução das emissões veiculares.
- Estudo da tecnologia híbrida hidráulica; Histórico e fundamentos físicos para elaboração de um dimensionamento para um sistema híbrido hidráulico paralelo.
- Dimensionamento de um sistema híbrido hidráulico paralelo para um caminhão coletor compactador utilizado no sistema de coleta de lixo do Município de São Paulo e análise quantitativa dos possíveis benefícios.

## 6.2 POLUIÇÃO E SAÚDE PÚBLICA

As emissões veiculares são as principais fontes de gases nocivos para a saúde pública na cidade de São Paulo.

Relativo aos índices atuais de emissões veiculares normalizados no Brasil, no que diz respeito a veículos do ciclo Diesel, estamos na fase P-5, equivalente a Euro III. Atualmente na Europa, a regulamentação segue os índices pelo Euro V, sendo que estão em fase de estudo e implementação, os índices relativo a fase Euro VI.

A classificação atual da qualidade do ar referenciada pela tabela 2.5 (Efeitos a saúde de acordo com a qualidade do ar) é questionada por pesquisadores de saúde pública em estudos relacionados a epidemiologia. Foi possível encontrar indícios e resultados nos quais indicam que mesmo a qualidade do ar estando dentro de uma qualidade satisfatória, foi evidenciado aumento dos níveis de atendimentos hospitalares relacionados a eventos de maior concentração de gases emitidos por veículos.

Os gases emitidos somente por um veículo não constituem um problema, mas a junção de milhares de veículos em circulação causam problemas para a saúde pública.

Foi possível por meio da pesquisa do Saldiva et.al (2007) obter um custo social monetário atrelado a emissões provenientes de veículos com motores a combustão interna do ciclo Diesel, na ordem de U\$\$ 5 bilhões de dólares americanos anuais em 6 cidades brasileiras, sendo que deste total, projeta-se um custo social a cidade de São Paulo na ordem de U\$\$ 3,5 bilhões de dólares americanos.

Em razão disso, foi possível constatar que a poluição atmosférica ocasionada por veículos automotores traz cada vez mais, problemas a saúde pública, e o problema tem a sua situação agravada, na medida que a cidade de São Paulo tem a sua frota circulante aumentada.

Portanto, foi possível verificar que para a cidade de São Paulo, a poluição proveniente de veículos é um agravante ao desenvolvimento social e a saúde da população no qual, a sociedade em si deve motivar as pesquisas direcionadas a soluções que possam minimizar a emissão de agentes poluentes e gases que provocam o efeito estufa.



O Governo do Estado de São Paulo, por meio do decreto 52.469 – Compensação de emissões em áreas saturadas e em vias de saturação e a lei 13798 (Política Estadual de Mudanças Climáticas), demonstra uma atitude de maior controle perante as emissões veiculares bem como abertura de incentivos e viabilização de novos empreendimentos dentro de áreas com saturamento de poluição.

Em particular, o Município de São Paulo possui saturação de material particulado e ozônio, e está em vias de saturação de monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio.

Com esta atitude, o poder público inicia um processo que motiva novas pesquisas e soluções para redução das emissões veiculares.

Contudo, fica evidenciada a necessidade de maior controle de emissões de gases poluentes emitidos por veículos. Atualmente, o Município de São Paulo realiza a inspeção veicular para todos os veículos com registro na cidade.

Porém, deve se discutir também um maior controle de gases emitidos por veículos na condição móvel, ou seja, o veículo realizando o percurso pelas ruas da cidade, pois desta forma, teremos a condição de emissões em função das cargas reais que os veículos são submetidos no dia a dia.

Além disso, o levantamento de emissões veiculares deve cada vez mais, buscar correlacionar os gases emitidos com algum dado de desempenho veicular, por exemplo, grama de emissões/litro de combustível ou grama de emissões/quilometro realizado.

Assim sendo, no que tange a poluição, o Brasil adota atualmente fases e regulamentações ambientais menos rigorosas em relação a Europa.

Os índices de emissões propostos pelas resoluções atualmente vigentes no Brasil, mesmo estando dentro da classificação de nível satisfatório afetam a saúde pública conforme estudos apresentado no capítulo 2.

Por meio de levantamento quantitativo em pesquisas relacionadas ao tema saúde pública, é possível mensurar o impacto monetário a sociedade.

O fator que motiva a viabilização de novas tecnologias está no surgimento de decretos e leis, que propõem rigores maiores de controle dos agentes poluentes bem como motiva e incentiva melhores práticas para um crescimento sustentável.

Fica portando, caracterizado um problema de saúde pública a ser solucionado com uma motivação para soluções de redução de emissões cada vez mais incentivada pelo poder público.

De posse deste cenário, temos então um ambiente propício e receptivo a novas tecnologias.

### **6.3 TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES VEÍCULARES**

Antes da pesquisa abordar a tecnologia dos sistemas hidráulicos para redução de emissões de veículos pesados, foi necessário descrever importantes frentes de pesquisa atualmente discutidas pela sociedade. Isto se deve por meio da constatação da pouca existência de artigos, periódicos, literatura e divulgação de sistemas híbridos hidráulicos.

Desta forma, sob uma visão mais abrangente, estudar outras frentes de pesquisas possibilita indicar e posicionar a tecnologia híbrida hidráulica no que tange ao seu uso como possível solução de redução de emissões.

A importância da discussão relativa a tecnologia híbrida hidráulica deve ser relevante para a sociedade.

A mesma deve entrar no tema de discussões sobre soluções para redução de emissões, algo que atualmente não se evidencia na sociedade brasileira.

Foi importante na pesquisa, colher informações das tendências de desenvolvimento das tecnologias para redução de emissões de poluentes para suportar algumas análises.

Atualmente, busca-se o aperfeiçoamento da tecnologia dos motores a combustão interna, melhorando os sistemas de queima de combustível e tratamentos dos gases gerados pela combustão.

Em paralelo, a melhoria da qualidade do combustível e a possibilidade do uso de novas fontes de energia produzidas a base de biomassas somam-se como importantes fatores que contribuem para que os motores a combustão interna continuem a ser uma tecnologia viável para a sociedade.

Aliado ao acima descrito, acredita-se que no Brasil exista um direcionamento a adotar no país, uma matriz energética baseada no petróleo e biomassa para veículos automotores.

Discute-se, porém, se todas as inovações relativas a tecnologia dos motores e combustíveis seriam suficientes para cobrir todos os anseios da sociedade, que cada vez mais, exige soluções que utilizam melhor toda a energia gerada por um veículo.

Os motores a combustão interna tem potencial de melhoria por meio de combustíveis mais limpos, nos processos de queima e no tratamento dos gases gerados, porém não conseguem, por exemplo, captar energia perdida em eventos de frenagem, que acaba, sendo dispersada de forma térmica pelos freios.

Em razão disto, analisam-se tecnologias como os veículos elétricos, híbridos e movidos a célula combustível.

Veículos elétricos e movidos a célula combustível são as tecnologias que propiciam nível de emissão zero.

Os veículos elétricos possuem o desafio da busca por uma maior autonomia, carga e recarga das baterias, bem como tempo de vida útil.

Os veículos movidos a célula combustível usam o hidrogênio como fonte de fornecimento de elétrons por meio de reação eletro-química. Os desafios desta tecnologia estão no complexo armazenamento do hidrogênio na sua forma pura num veículo.

Em razão disto, a tecnologia de células a combustível aparece como uma solução para um melhor armazenamento da fonte de energia, porém, a reação eletro-química promove desafios e algumas implicações que precisam serem desenvolvidas. A extração do elétron proveniente de células a base de etanol que requer uma pureza e baixa geração de CO é um dos exemplos.

Os híbridos elétricos em série e paralelo são as tecnologias atuais mais difundidas na sociedade.

Os seus desafios estão no desenvolvimento de baterias no que tange peso e durabilidade. Contudo, quando se discutem veículos elétricos, é importante analisar a matriz energética adotada no país, isto é, a geração de energia deve ser suficiente para fornecer a demanda da sociedade e adicionalmente, alimentar a frota de veículos elétricos ou híbridos elétricos. Esta energia elétrica adicional também deve ser proveniente de fontes renováveis como hidroelétricas, geradores eólicos, etc.

## 6.4 TECNOLOGIA HÍBRIDA HIDRÁULICA

Analisando a tecnologia híbrida hidráulica, a mesma tem como vantagem alto valor de potência específica, o que favorece o seu uso em sistemas urbanos com ciclos de para e anda, direcionada a veículos pesados.

Por meio do diagrama de Ragone, em comparação com as baterias, no que tange a captação de energia de frenagem de grandes massas, os acumuladores hidráulicos possuem maior capacidade de regenerar as energias provenientes dos freios.

No que diz respeito a autonomia, a tecnologia híbrida hidráulica paralela não é indicada tendo em vista a baixa energia específica. No quesito autonomia, os veículos híbridos elétricos são mais recomendados.

Contudo, para o ciclo urbano, de para e anda, os acumuladores possuem bom desempenho de captação e absorção de energia em veículos pesados. Aliado a isto, foi constatado que componentes hidráulicos possuem elevado rendimento e vida útil, sendo também uma tecnologia bastante disseminada na sociedade.

De posse destas características, a tecnologia hidráulica foi também direcionada como uma possível solução para redução de emissões veiculares.

Por meio do histórico apresentado, veículos híbridos hidráulicos paralelos conseguem oferecer uma economia média de consumo de combustível em até 25 % em veículos pesados, por meio da recuperação da energia de frenagem.

Veículos híbridos, tanto hidráulicos como elétricos, possuem a condição de ser adicionado a qualquer solução que envolva melhorias nos sistemas de motores de combustão interna e combustíveis, isto significa que podemos ter motores mais eficientes, combustíveis menos poluentes unidos a um sistema de recuperação de energia dos freios.

O histórico dos veículos híbridos hidráulicos no capítulo 4 apresentou casos de sucesso.

Os casos de protótipos apresentados motivam um estudo de viabilidade desta tecnologia e concluí que esta é uma das tecnologias que possa reduzir emissões de poluentes e prover maior economia de combustível, principalmente para veículos pesados com condições de trabalho para e anda dentro do município de São Paulo.

Tendo em vista, a confirmação de sucesso do uso da hidráulica como solução para redução de poluentes em países como Alemanha e E.U.A, foi realizado um estudo e proposta de anteprojeto para um caminhão coletor compactador que trabalho no sistema de coleta de lixo domiciliar na cidade de São Paulo no capítulo 5.

Toda a tecnologia deve ter o seu dimensionamento e avaliação de viabilidade atrelada as condições de trabalho que o veículo será submetido.

Desta forma, a pesquisa levantou os fatores, as condições de trabalho e a topografia da cidade de São Paulo para assim, por meio das teorias da hidráulica, principalmente da lei de Boyle e o uso de equações da dinâmica veicular horizontal, dimensionar um sistema híbrido hidráulico para o município.

Foram levados em consideração no dimensionamento final do sistema, uma velocidade máxima de alcance do sistema hidráulico de 25 km/h (para rampa de 0%), velocidade esta compatível com os estudos de velocidades médias alcançadas no município de São Paulo.

Atrelado a isto, foi avaliado as condições de rampas da cidade de São Paulo por meio dos mapas de declividade, no qual resultou em um projeto capaz de mover o veículo carregado em 22 ton em rampas com até 30 % a uma velocidade máxima de 10 km/h.

Por meio do anexo 2 é apresentado um esquema hidráulico, no qual com a utilização dos componentes atualmente usados nos sistemas adotados em outros países, fornece uma adição de peso ao veículo de 450 kg.

Importante salientar que veículos com o sistema híbrido hidráulico paralelo, mesmo com o aumento da massa em função da adição dos componentes, conseguiram obter economia de combustível de até 25 %.

Tecnicamente, baseado no estudo de caso, histórico da tecnologia e dos fundamentos físicos que envolvem teorias comprovadas da dinâmica e da hidráulica, os veículos híbridos hidráulicos são adequados e indicados a ser uma das soluções levada em consideração para redução de emissões de poluentes.

No que diz respeito ao caminhão coletor compactador, avaliando uma frota de 180 caminhões, dentro das condições de trabalho apresentadas, temos um potencial de economia anual monetária em gastos com combustíveis na ordem de R\$ 800.554,48 anuais.

Paralelo a isto, foi estimado a redução dos gases poluentes emitidos por veículos que usam o Diesel, baseado em fatores de emissões levantados em túneis na

cidade de São Paulo, baseado na relação emissão (em massa) por litro de combustível.

A redução potencial dos gases nocivos emitidos pelos motores a Diesel reverte-se em melhoria da qualidade do ar na cidade de São Paulo, bem como convertem-se em benefícios de compensação previstos no Decreto 52469/2007.

Por meio da análise quantitativa realizada, para que a tecnologia seja viável, os custos de investimento devem prover um retorno de no máximo 3 anos para os frotistas, baseando-se numa vida útil de 5 anos para cálculo de depreciação, sendo este, um desafio aos fabricantes detentores desta tecnologia.

Contudo, a contribuição para a melhoria ao meio ambiente é bem vinda tendo em vista os custos sociais a saúde pública provocada por gases poluentes de veículos automotores.

A tecnologia híbrida hidráulica tem pontos a serem melhorados, principalmente no que diz respeito a peso.

É recomendado pesquisas que possam tornar viável o uso de acumuladores com fibras de carbono e uso de aramidas, também conhecidos como acumuladores de composite. Estes materiais resistem as pressões usadas no sistema hidráulico e promovem uma redução de até 80 % de peso em relação aos acumuladores convencionais (HYDAC ,2010).

Isto significa, por exemplo, que os 2 acumuladores de 35 L calculados no item 5, se forem convencionais, pesam em torno de 170 kg, contudo, usando acumuladores de composite, com o potencial de redução de 80 % do peso, podemos agregar, na expectativa mais otimista, somente 34 kg em massa de acumulador no veículo.

Além dos acumuladores, o uso de materiais como alumínio na construção do bloco hidráulico, onde são montadas as válvulas do sistema, bem como suportes usados na montagem do sistema no veículo podem favorecer a redução total do peso agregado do sistema hidráulico ao veículo.

No que tange ao rendimento, por meio da figura 4.4 (Análise de rendimento de captação e fornecimento de energia para caminhão de entrega classe 6) temos a possibilidade de aperfeiçoar o sistema de recuperação da energia de frenagem, buscando recuperar os 15 % da energia perdida dentro do sistema hidráulico, devolvendo para as rodas do veículo um maior nível de energia, aumentando o valor de 71 % da energia de frenagem captada que retorna para as rodas.

Relativo a fluídos, atualmente são utilizados óleos minerais a base de petróleo que possuem condições de reciclagem e recondicionamento.

Além disso, é motivado o desenvolvimento do uso de fluídos usado em sistemas hidráulicos biodegradáveis ou a base de água como emulsões e glicóis.

Os óleos biodegradáveis, como por exemplo, os conhecidos como HEES (Óleo hidráulico sintético a base de ésteres) são indicados para uso em locais sensíveis a contaminação, sendo atualmente usados por veículos com tração hidrostática fora de estrada, atuantes em áreas sensíveis a poluição.

Para o domínio da tecnologia e dirigibilidade de um caminhão coletor compactador, acredita-se que não será de grande dificuldade aos operadores devido ao fato da tecnologia hidráulica já ser presente nos cilindros do sistema compactador, bem como entende-se que o motorista deste tipo de veículo recebe qualificação para manipulação dos sistemas e recursos atuais existentes nos veículos.

O sistema híbrido hidráulico em conjunto com uma transmissão automática promove redução de emissões, economia de combustível conforme os resultados apresentados nos capítulos 4 e 5, bem como, um maior conforto ao motorista por meio da transmissão automática.

A adição do freio regenerativo não agrega dificuldades a um profissional qualificado, e sim, o torna um agente treinado para melhoria do meio ambiente.

De posse do acima descrito, tendo em vista o potencial de desenvolvimento e resultados obtidos, a pesquisa oferece a sociedade uma maior discussão sobre o uso do freio regenerativo hidráulico para veículos pesados que trabalhem dentro da cidade de São Paulo.

Resultados como, por exemplo, o demonstrado na tabela 6.1, motiva a discussão, verificação, construção e teste de um protótipo conforme o sugerido no anteprojeto no capítulo 5 na cidade de São Paulo.

Com o uso de um sistema híbrido hidráulico paralelo em um caminhão coletor compactador em teste na Alemanha, procurou-se comparar a economia de combustível simulado em um ambiente computacional, com resultados de economia obtida pelo protótipo em teste real equipado com o sistema híbrido hidráulico paralelo.

Tabela 6.1 – Comparação entre os resultados simulados em ambiente computacional e resultados reais medidos em caminhão coletor compactador em teste na Alemanha - economia de combustível com sistema híbrido hidráulico paralelo da empresa Bosch Rexroth - HRB

	Veículo sem HRB Absoluto (L)	Veículo com sistema HRB Absoluto (L)	Economia Absoluta (L)
Simulação computacional	0,111	0,080	0,031
Valores medidos no percurso de teste pelo protótipo	0,108	0,077	0,032
Diferença entre a simulação e os resultados coletados do veículo testado	2,78 %	3,90 %	-3,13 %

Kliffken et. Al (2009)

Na tabela 6.1, podemos verificar que os valores estimados em ambiente computacional foram próximos aos encontrados no protótipo realizando um ciclo de teste, no qual o percurso teve eventos de frenagem a cada 100 m.

Os resultados acima comprovam o potencial que a energia hidráulica pode oferecer na contribuição para economia de combustível.

No que tange a emissões de poluentes, a construção de um protótipo real oferece a possibilidade da construção de curvas de emissões em função da velocidade.

Conforme o capítulo 4, foram apresentadas estratégias de controle no qual foi observado o uso da potência hidráulica principalmente no início do movimento do veículo.

No momento de início de aceleração, os veículos emitem maiores índices de emissões de poluentes.

No gráfico 6.1, é apresentada uma curva estimativa de emissão de material particulado (MP) em função da velocidade para ônibus e caminhões.



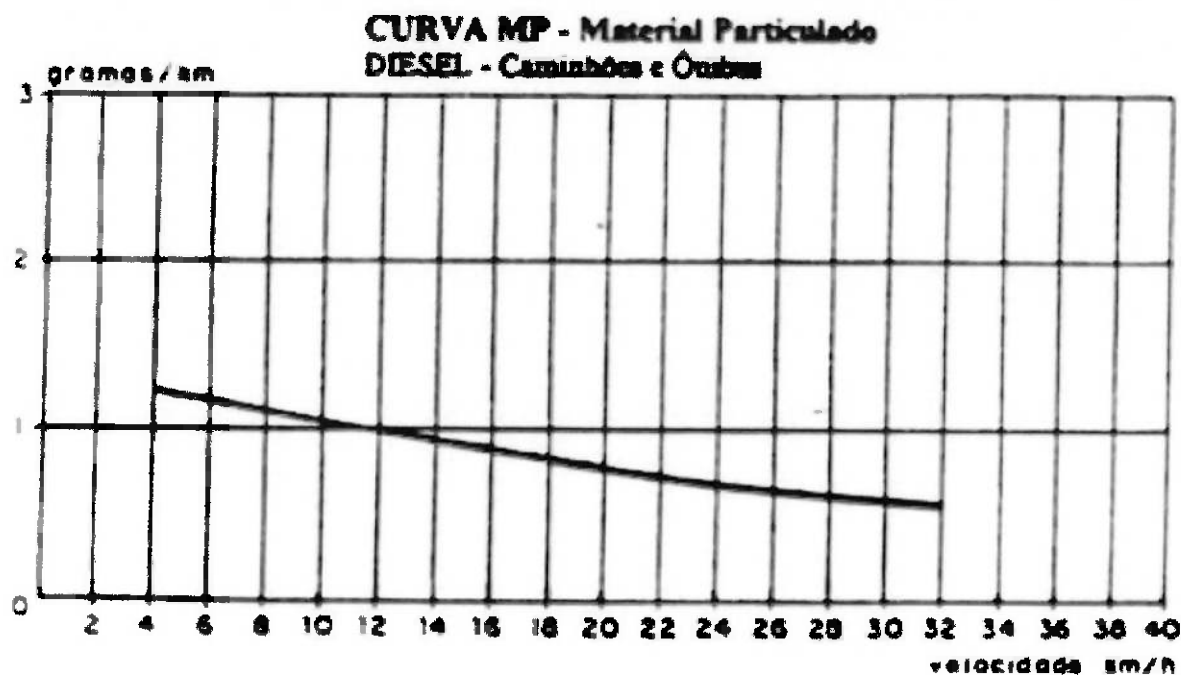


Gráfico 6.1 – Curva MP – Material Particulado – Motor de combustão interna do ciclo Diesel – Caminhões e Ônibus

Fonte : Braz (1993)

Entre 4 à 32 km/h observamos uma variação de emissão de material particulado em função da velocidade de aproximadamente 1,2 g/km à 0,6 g/km respectivamente.

Quanto maior a velocidade, menor o índice de emissão de material particulado.

A elaboração de gráficos, como o exemplo apresentado, permite a possibilidade de se comparar emissões de veículos com motorização convencional (apresentado no gráfico 6.1) com veículos equipados com sistemas híbridos.

Importante salientar que a estratégia de controle eletrônico do sistema híbrido (abordado no capítulo 4) deve buscar economia de combustível e desempenho de emissões.

O sistema híbrido atua principalmente no momento da aceleração, no caso do anteprojeto proposto, o mesmo pode movimentar o veículo para até 25 km/h (em rampa 0%).

Neste cenário, com a construção de um protótipo, pode-se avaliar por meio de uma curva de tipo (exemplo do gráfico 6.1), o quanto de melhoria o sistema híbrido pode oferecer no que tange a emissões na partida.

Além disso, o não uso do motor a combustão no momento da aceleração poderá proporcionar novos desenvolvimentos e estratégias para o sistema de injeção e combustão nos motores Diesel no momento em que o sistema híbrido atuar.

A construção de um protótipo real utilizando um sistema híbrido hidráulico permite a avaliação do uso da energia de frenagem em ciclos urbanos.

A anteprojeto proposto, em caso de construção de um protótipo para trabalho no município de São Paulo tem a oportunidade de utilizar as boas práticas já testadas em veículos desenvolvidos em outros países, bem como já ser construído e concebido, utilizando acumuladores de composite, componentes hidráulicos preparados para atuar com fluídos biodegradáveis e materiais como alumínio na construção de blocos hidráulicos e suportes do sistema no veículo.

## 7 CONCLUSÃO

A pesquisa teve como objetivos gerais realizar o dimensionamento de um sistema híbrido hidráulico paralelo para um caminhão coletor compactador e uma análise quantitativa dos benefícios que os sistema pode oferecer em relação a economia de combustível e redução de emissões para o Município de São Paulo.

O objetivo do dimensionamento do SHHP foi possível mediante ao conhecimento e informações do caminhão coletor compactador utilizado no sistema de coleta de lixo, condições operacionais, tráfego e declividade existentes na cidade de São Paulo. Além disto, as teorias da hidráulica, a lei de Boyle e as equações da dinâmica veicular horizontal foram usadas para a realização dos cálculos.

O dimensionamento concluiu a necessidade do uso de 2 acumuladores de pressão com 35 L. Os acumuladores foram dimensionados para armazenar uma energia de 530,5 kJ, com capacidade de fornecer uma potência de 183 kW. A pressão máxima do sistema foi dimensionada para 330 bar.

O dimensionamento resultou no uso de uma bomba/motor capaz de trabalhar com uma vazão de 332 L/min com uma rotação de 2000 RPM.

Com uma bomba com volume geométrico de 166 cm<sup>3</sup> é possível carregar os acumuladores num tempo de 5 segundos. Os acumuladores podem ser carregados com um ou mais evento de frenagem.

Por meio dos cálculos realizados, o caminhão coletor compactador consegue alcançar uma velocidade de 25 km/h em rampa de 0% com uma carga de 22 ton. O mesmo sistema é capaz de realizar uma partida em rampa de até 30 %, limitado a uma velocidade de 10 km/h.

O objetivo da análise quantitativa avaliou o potencial de economia de combustível que pode ser alcançado por um sistema híbrido hidráulico, bem como a redução de emissões usando como base os fatores de emissões na sua unidade massa por litro de combustível.

Para uma frota de 180 caminhões, desenvolvendo 51,26 km diários, é possível estimar uma economia anual monetária de R\$ 800.554,48 e a redução de consumo anual de 404320 L.

A alta potência específica dos acumuladores é a principal característica que faz com que a hidráulica, munida dos avanços da eletrônica embarcada de regulação e controle torne possível o controle de torque e atuação paralela deste sistema em conjunto com o motor a Diesel usado no caminhão coletor compactador.

Comparando a potência específica dos acumuladores hidráulicos em relação as baterias elétricas, por meio do diagrama de Ragone observa-se que os acumuladores têm potência específica entre 2000 à 300000 W/kg. As baterias elétricas possuem potência específica entre 10 à 300 W/kg.

Alto valor de potência específica significa melhor regeneração de energia, bem como liberação da mesma ao sistema. Em função desta propriedade, para veículos pesados com trabalho em ciclos urbanos é indicado o uso de acumuladores hidráulicos.

A análise quantitativa da pesquisa relativo a poluição obteve referencias onde descreve que atualmente os índices de poluições são nocivos a saúde pública e que existem leis que motivam, cada vez mais, a adoção e pesquisas relativos a tecnologia de redução de emissões veiculares.

Fazendo a correlação do consumo de combustível em litros, com os fatores de emissões com a unidade g/l, concluiu-se para uma frota de 180 caminhões a possibilidade de reduzir as emissões conforme os resultados da tabela 5.11 – Redução de emissão total anual em toneladas.

Desta forma, com o dimensionamento do sistema e a análise quantitativa desenvolvida, conclui-se que os principais objetivos de pesquisa foram alcançados.

Com os resultados apresentados por meio do estudo de caso, concluí-se que o Brasil, em particular, o município de São Paulo, deve analisar como uma das soluções para redução de emissões para veículos com ciclo urbano pesado, a tecnologia híbrida hidráulica.

Desta forma, abre-se a oportunidade de desenvolver, assim como Alemanha e E.U.A, estudos relativos a freios regenerativos hidráulicos na cidade de São Paulo.

A possibilidade de avaliar esta tecnologia promove uma avaliação mais abrangente no uso de sistemas alternativos. Atualmente temos em São Paulo estudos de utilitários envolvendo propulsões híbridas elétricas e a célula combustível.

A pesquisa recomenda para o desenvolvimento de um protótipo deste sistema em um caminhão coletor compactador, um projeto que faça uso de óleo biodegradável, acumuladores de composite e materiais como alumínio para redução do peso do agregado.

Recomenda-se também um controle eletrônico capaz de aproveitar a energia hidráulica nas partidas do veículo, bem como um gerenciamento e tratamento dos gases de escape provocados pelo motor a Diesel em baixas velocidades, principalmente no momento em que o sistema híbrido estiver atuando.

Com a pesquisa desenvolvida, a tecnologia hidráulica híbrida está alinhada com a idéia de ser uma solução para redução de emissões de poluentes e economia de combustível. Existem melhorias a serem buscadas, principalmente a redução de peso e o uso de fluidos biodegradáveis.

Contudo, é possível concluir o trabalho descrevendo que os fatores analisados na pesquisa mostraram argumentações fundamentadas em teorias da engenharia, análise de condições operacionais na cidade de São Paulo e resultados de protótipos construídos em outros países.

Por meio destas informações e registros, em caso de desenvolvimento de um protótipo em São Paulo, abrimos novas possibilidades para economia e redução de emissões em veículos coletores compactadores, promovendo a abertura de novas pesquisas, alinhamento com o conhecimento vindo de outros países e melhoria de projeto frente aos desenvolvimentos realizados na Europa e E.U.A.

## REFERÊNCIAS

CETESB. **Emissões**. Disponível em :

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/emissoes/introducao>> Acesso em: 18 jan.2009.

BRAGA, A.L.F et al. **Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil**. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 23 Sup 4:S570-S578, 2007.

SWAMINATHAN, S. **Veículos híbridos: futuro por Frost & Sullivan**. 2007. Disponível em : < <http://www.e-thesis.inf.br>>. Acesso em: 02 Maio.2008.

RANDY, F. **Automotive: Hybrids vs. Clean Diesels**. 2008. Disponível em: <<http://www.designnews.com/article/CA6538352.html>>. Acesso em: 02 Maio.2008.

TOYOTA. **Prius. 2006** . Disponível em : <<http://www.toyota.pt>> . Acesso em: 02 Maio.2008.

INSTITUTE FOR THE ANALYSIS OF GLOBAL SECURITY. **EPA Displays the First Advanced Hydraulic Hybrid Vehicle Energy Security**. 2004. Disponível em: <<http://www.iags.org/n033104t3.htm>>. Acesso em : 02 Maio.2008.

AZUAGA, D. **Danos ambientais causados por veículos leves no Brasil**. 2000 .p.6. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

GOUVEIA.N et al. **Hospitalizações por causas respiratórias e cardiovasculares associadas à contaminação atmosférica no Município de São Paulo, Brasil**. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 22(12):2669-2677, dez, 2006

MARTINS.L.C et AL . **Relação entre poluição atmosférica e atendimentos por infecção de vias aéreas superiores no município de São Paulo: avaliação do rodízio de veículos.** Revista Brasileira. Epidemiologia. 220 Vol. 4, Nº 3, 2001

BRAGA.A.L.F et al. **Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil.** Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 23 Sup 4:S570-S578, 2007

JUNGER.W.L; LEON.A.P. **Poluição do ar e baixo peso ao nascer no Município do Rio de Janeiro, Brasil, 2002.** Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 23 Sup 4:S588-S598, 2007

SÃO PAULO (ESTADO). **Decreto Nº 52.469, de 12 de dezembro de 2007 de São Paulo.** Altera a redação de dispositivos do Regulamento aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente, confere nova redação ao artigo 6º do Decreto nº 50.753, de 28 de abril de 2006, e dá providências correlatas. Palácio dos Bandeirantes, 12 de dezembro de 2007. Publicado em: 13/12/2007. São Paulo.

KOMATSU.C.A; ALVARES JR.O.M. **Decreto 52.469 – Compensação de emissões em áreas saturadas e em vias de saturação.** Seminário: Tendências e o Futuro das Emissões Veiculares: Impacto na Saúde, Legislação e Tecnologia. 2009, São Paulo. Disponível em : <<http://www.aea.org.br/aea2009/eventos/2009/31.php>>. Acesso : 10.abr.2009.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resolução SMA 42, de 26/06/2008 – ÁREAS SATURADAS DECRETO ESTADUAL 52.469/07.** Disponível em : [http://www.fiesp.com.br/ambiente/area.../classificacao\\_municipios\\_2007.pdf](http://www.fiesp.com.br/ambiente/area.../classificacao_municipios_2007.pdf). Acesso em : 31.jan.2009

SÃO PAULO (ESTADO) . **Lei 13798, de 09 de Novembro de 2009 – Estado de São Paulo.**

Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC. Palácio dos Bandeirantes, aos 9 de novembro de 2009. Publicado em: 10/11/2009. São Paulo

BRUNETTI.F.;GARCIA.O. **Apostila de Motores de Combustão Interna**. Faculdade de Engenharia Industrial (FEI), 1992.

AUGUSTO.L.C. **Frota Brasileira de Veículos a Diesel Classificação e Localização**. Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva - SIMEA 2008, São Paulo. Não publicado.

MARTINS.C. **Diesel alimenta lobby da poluição**. Disponível em: [http://www.sescsp.org.br/sesc/revistas\\_sesc/pb/artigo.cfm?Edicao\\_Id=318&Artigo\\_Id=5006&IDCategoria=5726&reftype=1](http://www.sescsp.org.br/sesc/revistas_sesc/pb/artigo.cfm?Edicao_Id=318&Artigo_Id=5006&IDCategoria=5726&reftype=1) >. Acesso em: 30.jan.2010.

HEDBERG.R. **Scania's engine strategic**. Disponível em: [http://www.voev.ch/dcs/users\\_/6/05.04.19\\_3\\_SCANIA.pdf](http://www.voev.ch/dcs/users_/6/05.04.19_3_SCANIA.pdf) >. Acesso em : 03.mar.2009

CASSIDY.P. **DPF, SCR and EGR Technologies: Meeting Euro V and Euro VI Regulations**. Seminário: Tendências e o Futuro das Emissões Veiculares: Impacto na Saúde, Legislação e Tecnologia. 2009, São Paulo. Disponível em : <http://www.aea.org.br/aea2009/eventos/2009/31.php>>. Acesso : 10.abr.2009.

MITSUBISHI. **Automático Stop & Go (AS&G)**. Disponível em: [http://www.mitsubishi.pt/Noticias /noticias\\_Detail.asp?i=1234970540](http://www.mitsubishi.pt/Noticias /noticias_Detail.asp?i=1234970540)>. Acesso em : 15.mar.2009

JUNIOR.H.J. **A Indústria Automobilística e o Atendimento às Regulamentações Brasileiras de Emissões**. Seminário: Tendências e o Futuro das Emissões Veiculares: Impacto na Saúde, Legislação e Tecnologia. 2009, São Paulo. Disponível em : <http://www.aea.org.br/aea2009/eventos/2009/31.php>>. Acesso : 10.abr.2009.



COWAN.R. **Escaping Lock-in: the Case of the Electric Vehicle (Technology Forecasting and Social Change, 1996)**. University of Western Ontario and Staffan Hultén, Stockholm School of Economics.1996. Disponível em : <http://www.cgl.uwaterloo.ca/~racowan/escape.html>. Acesso em: 18.abr.2009

BRAIN.M. **Como funcionam os carros elétricos**. Disponível em : <http://carros.hsw.uol.com.br/carros-eletricos.htm>. Acesso em: 18.abr.2009

EMADI.A et al. **Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 54, No. 3, Mai. 2005.

SHUKLA.A.K. et al. **An appraisal of electric automobile power sources**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2001.Disponível em : <http://www.elsevier.com/locate/rser>. Acesso em : 18.jan.2009

LINARDI.M et al.. **Tecnologia de células a combustível**. Química nova, 23(4). 1999.

SCHLAPBACH.L. **Hydrogen-storage materials for mobile applications**. Macmillan Magazines Ltd. Nature, vol. 414, 2001.

GRAY.C.L. **Hydraulic Hybrids**. EPA Hybrid Truck Initiative.HARC Texas.out.2006. Disponível em : <http://files.harc.edu/Projects/Transportation/HydraulicHybridsGray.pdf>. Acesso em: 02.mai.2008.

KLIFFKEN. M.G et.al. **Kosten bremsen und Umwelt schonen mit hydraulischem Hybridantrieb**. ATZhoffhighway.Springer Automotive Media GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden offhighway.Mar.2009

BOSCH REXROTH. **Hydrostatic Regenerative Braking System - Parallel Hybrid (add-on)** .2008.

BOHLMANN.B. **Hybrid Hydraulic System Development for Commercial Vehicles.** SCAQMD Hydraulic Hybrid Forum. nov.2007.

SCOTT.D. **Hydrobus, Gyrobus.** Popular Science. The Times Mirror Magazines.abr.1980.

KLIFFKEN. M.G et.al. **Hydrostatisch Regeneratives Bremssystem (HRB).** Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Informationstagung des VDMA und der Universität Karlsruhe (TH).fev. 2007.

MARSHALL.O. **Refuse collection vehicle with hydraulic hybrid drive from Rexroth.** Disponível em : [http://www.boschrexroth.com/corporate/en/press/press\\_releases/product\\_information/mobile\\_hydraulics/archive\\_2008/pi\\_063\\_08/PI-063-08\\_HRB-Haller-IFAT\\_en\\_final.pdf](http://www.boschrexroth.com/corporate/en/press/press_releases/product_information/mobile_hydraulics/archive_2008/pi_063_08/PI-063-08_HRB-Haller-IFAT_en_final.pdf). Acesso em : out.2008

HALLER UMWELTSYSTEME GMBH & CO. **x2c-SERIES HALLER.** Registr. 1 - 3 12277 Berlim, Alemanha. Disponível em : <http://www.haller-umweltsysteme.de>. Acesso em: set.2009.

LINSINGEN.I.V. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos.** Editora da Universidade Federal de Santa Catarina. 2 edição. 2003.

BOSCH REXROTH. **Bladder-type accumulator.** RE50170/01.09. Lohr am Main, Alemanha. Disponível em : <http://www.boschrexroth.com>. Acesso em : ago. 2009.

KORDAC.R. **Hydrostatic drives with control of the secondary unit.** The hydraulic Trainer, Volume 6. Bosch Rexroth Ag – Service Automation didactic D-64711 Erbach. 2º edição.2003.

WU.B et al. **Optimization of Power Management Strategies for a Hydraulic Hybrid Medium Truck.** Proceedings of the 2002 Advanced Vehicle Control Conference, Hiroshima, Japão, set. 2002. Universidade de Michigan.

**BOSCH. Manual de Tecnologia Automotiva.** Editora Edgard Blucher.25ª edição alemã.2005.

**MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. NR 13- Caldeiras e vasos de pressão.** Redação dada pela Portaria SSST n.º 23, de 27 de dezembro de 1994. Atualização conforme portaria SIT n.º 57, de 19 de junho de 2008.

**ARGACHOY.C. Sistemas de Embreagem & Caixas de Transmissão.** Apostila da disciplina ME 991 – Transmissão I do curso de Engenharia Mecânica com Ênfase em Mecânica Automobilística – UNIFEI.

**BASELEY. Intelligent Hydraulic Drive™ (IHD™).** Bosch Rexroth. Nov.2007.

**GILLESPIE.T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics.** Publicado por : Society of Automotive Engineers,Inc. 400. Commonwealth Drive Warrendale, PA. 15096-0001. Fev.1992.

**LIMPURB. Meio ambiente e limpeza urbana. Diretrizes para a cidade de São Paulo.** Prefeitura do Município de São Paulo.

**BRITO M.V; PAULA.M.E.B. Nota técnica 162/93: Variação da Velocidade Média no Trânsito de São Paulo.** Mar.93.

**SEMPLA/DIPRO. Lentidão Média no Trânsito.** Disponível em: <[http://sempla.prefeitura.sp.gov.br/infocidade/htmls/12\\_velocidade\\_media\\_no\\_transito\\_1980\\_600.html](http://sempla.prefeitura.sp.gov.br/infocidade/htmls/12_velocidade_media_no_transito_1980_600.html)>. Acesso em: 27.mar.2010

**IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Noções Básicas de Cartografia.** Edição de 1989.

SECRETARIA MUNICIPAL DE SERVIÇOS – DEPARTAMENTO DE LIMPEZA URBANA – PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Gestão dos Resíduos Sólidos na Cidade de São Paulo.** Disponível em : <[www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/10/pref\\_saopaulo.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/10/pref_saopaulo.pdf)>. Acesso em : 13.fev.2010.

SÃO PAULO. Prefeitura da Cidade de São Paulo; Secretaria Municipal de Planejamento – Sempla e Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente – SVMA. Com base em: PMSP & IPT. Carta Geotécnica do Município de São Paulo, 1992. **Mapa 2 – Maciços de solo e rocha/ Declividade do Município de São Paulo.1992. Escala : 1:100.000.**

VOLKSWAGEN CAMINHÕES. **17220 Tractor.** São Paulo 2006.

FONSECA.A.M;GONZAGA.V.C. **Metodologia para auditoria de serviços de limpeza urbana, com enfoque nos custos de coleta de resíduos sólidos urbanos.** Tribunal de Contas do Estado de Minas Gerais. XI Simpósio Nacional de Auditoria de Obras Públicas. Belo Horizonte.2006.

ANP (Agência Nacional de Petróleo). **Levantamento de Preços.** Disponível em: <[http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo\\_Quatro\\_Combustiveis.asp](http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Quatro_Combustiveis.asp)>. Acesso em : 22.nov.2009

SALDIVA.P et.al. **Emissões de poluentes atmosféricos por fontes móveis e estimativa dos efeitos em saúde em 6 regiões metropolitanas brasileiras.** LPAE – Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo. Versão 3. nov.2007.

CNM. Confederação Nacional dos Municípios . **Planilha de Custos Coleta, transporte e destinação.** Disponível em : < [http://portal.cnm.org.br/sites/8200/8232/PLANILHA\\_COLETA\\_TRANSPORTE\\_E\\_DESTINACAO\\_D.pdf](http://portal.cnm.org.br/sites/8200/8232/PLANILHA_COLETA_TRANSPORTE_E_DESTINACAO_D.pdf)>. Acesso em : 15.mar.2010.

**KARDEC, A. Brasil & Etanol:Exportando saúde para o mundo.** ANP : Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Seminário Tendências e o Futuro das Emissões

Veiculares: impacto, legislação e tecnologia AEA. São Paulo. Disponível em : <http://www.aea.org.br/aea2009/eventos/2009/31.php>. Acesso : 10.abr.2009.

**KREMER, F. Perspectivas de Fornecimento de Combustíveis para o Brasil.** Petrobrás. Seminário Tendências e o Futuro das Emissões Veiculares: impacto, legislação e tecnologia AEA. São Paulo. Disponível em : <http://www.aea.org.br/aea2009/eventos/2009/31.php>. Acesso : 10.abr.2009.

**HYDAC. Accumulator Technology.Product Catalogue. E 30.000.0/04.09.** Disponível em : <http://www.hydac.com>. Acesso: 17.abr.2010

**CATERPILLAR. Biodegradable Hydraulic Oil (HEES). PEHP6047-01. E.U.A, 1997.**

**BRAZ, J.T. Emissão de gases poluentes / curvas tipo.** Disponível em : <http://cetsp1.cetsp.com.br/pdfs/nt/NT165.pdf>. Acesso em : 17.abr.2010.

**HATAMI, H. Coletânea de fórmulas hidráulicas.** Bosch Rexroth 24.nov.2005

## Instrumento de Coleta de Dados - ICD

Aluno : Rodrigo Silveira Rodrigues

Número USP : 6594842

Data da realização da pesquisa : \_\_\_\_\_

**Perfil da empresa pesquisada**

Empresa: \_\_\_\_\_

Localização : \_\_\_\_\_

Ramo de atuação : \_\_\_\_\_

Número de funcionários : \_\_\_\_\_

Tamanho da frota : \_\_\_\_\_

Informações adicionais da frota :

**Objeto de Pesquisa**

Modelo do veículo : \_\_\_\_\_

Peso variante : \_\_\_\_\_

Potência do motor de combustão interna \_\_\_\_\_

Combustível : \_\_\_\_\_

Utilização : \_\_\_\_\_

**Descritivo do percurso médio de trabalho do veículo :**

**Velocidades médias de trabalho :**

Disponibilizado registros de tacôgrafo :                      SIM ( ) Não ( )

**Informações adicionais :**

**Observações :**

As informações contidas neste ICD serão usadas como dados para elaboração da pesquisa acadêmica do aluno Rodrigo Silveira Rodrigues, número de matrícula 6594842 do curso de Mestrado - modalidade Engenharia Automotiva da Escola Politécnica de São Paulo - USP

**Dados do entrevistado (opcional) :**

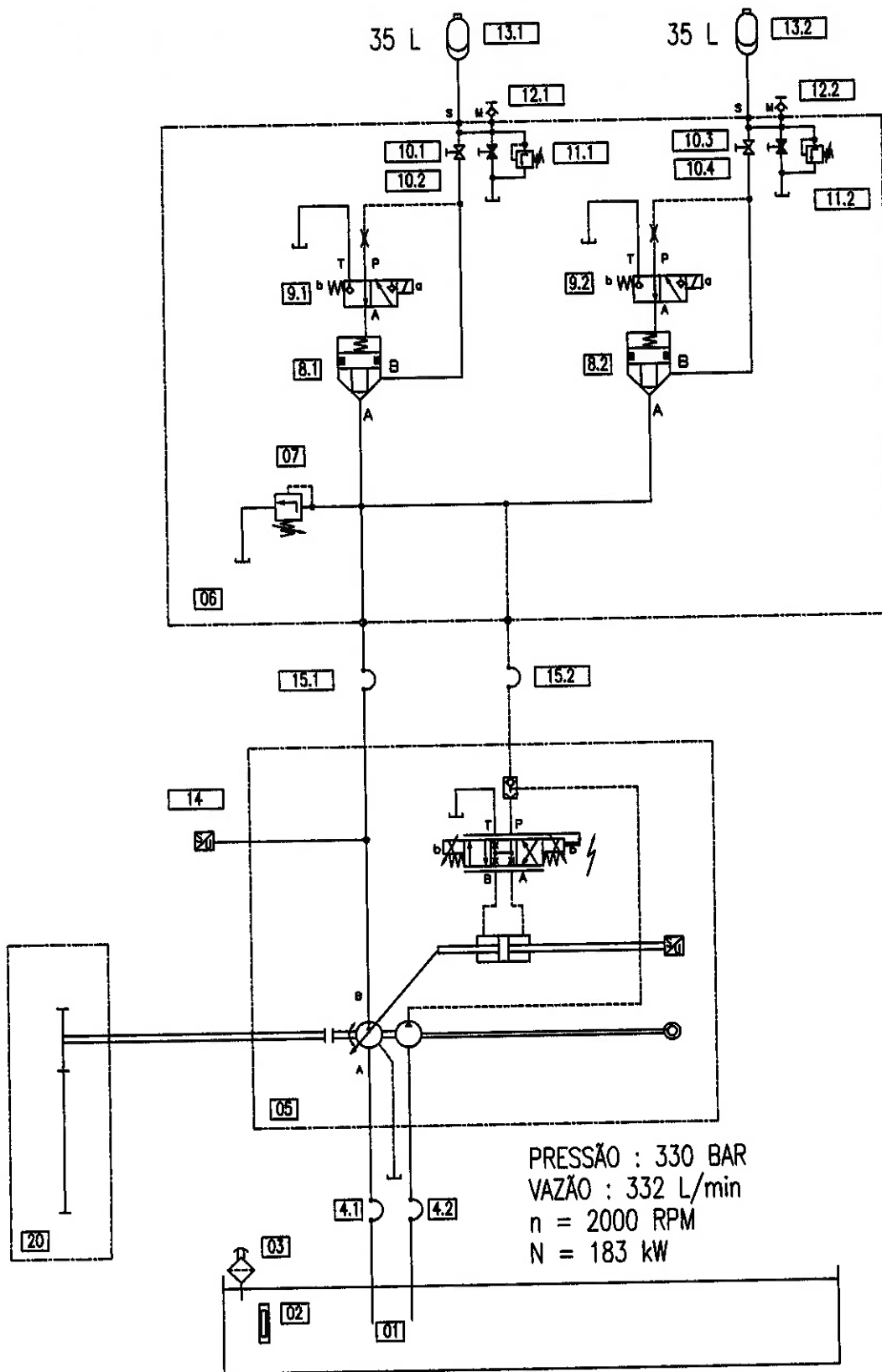
Nome : \_\_\_\_\_

Cargo : \_\_\_\_\_

Assinatura : \_\_\_\_\_



# ANEXO 2 - ESQUEMA HIDRÁULICO BÁSICO



PRESSÃO : 330 BAR  
 VAZÃO : 332 L/min  
 n = 2000 RPM  
 N = 183 kW

## ANEXO 2 – LISTA DE PEÇAS BÁSICA

20	1	EMBREAGEM	
15	2	MANGUEIRA DE ALTA PRESSÃO 330 BAR	COEF.SEG.4
14	1	TRANSDUTOR DE PRESSÃO	
13	2	ACUMULADOR HIDRÁULICO	35 L
12	2	TOMADOR DE PRESSÃO	
11	2	VÁLVULA LIMITADORA DE PRESSÃO	
10	4	REGISTRO ESFÉRICO	
9	2	VÁLVULA DIRECIONAL DE ASSENTO	35 L
8	2	VÁLVULA CARTUCHO – ELEMENTO LÓGICO	TN 25
7	1	VÁLVULA LIMITADORA DE PRESSÃO	330 BAR
6	1	BLOCO HIDRÁULICO	
5	1	BOMBA DE PISTÕES AXIAIS COM ELETRÔNICA DE COMANDO PROPORCIONAL 166 cm <sup>3</sup>	
4	2	MANGUEIRA DE BAIXA PRESSÃO PARA SUCCÃO	
3	1	FILTRO DE AR	
2	1	VISOR VISUAL DE NÍVEL	Obs
1	1	RESERVATÓRIO DE PLÁSTICO	100 L
POS	QTD	Denominação	Obs

CAD-ORIGINAL: ALTERAÇÕES SOMENTE POSSÍVEIS PELO CAD

## ANEXO 3

### CÁLCULO DO TEMPO DE CARREGAMENTO DOS ACUMULADORES

$$\Delta V = V_0 * \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} * \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}}\right]$$

$$p_0 = 0,9 * p_1$$

Fonte : Hatami (2005)

Onde

$\Delta V$  = Variação de volume de óleo em L

$V_0$  = Volume do gás em L

$p_0$  = Pressão do gás em bar no volume  $V_0$

$V_1$  = Volume do gás em L na pressão  $p_1$

$p_1$  = Pressão mínima de trabalho do acumulador em bar no volume  $V_1$

$V_2$  = Volume do gás em L na pressão  $p_2$

$p_2$  = Pressão máxima de trabalho do acumulador em bar no volume  $V_2$

$k$  = compressão adiabática

Dados de entrada

$$V_0 = 70 \text{ L}$$

$$p_1 = 120 \text{ bar}$$

$$p_2 = 330 \text{ bar}$$

$$k = 1,4$$

$$p_0 = 0,9 * 120$$

$$p_0 = 108 \text{ bar}$$

$$\Delta V = 70 * \left(\frac{108}{120}\right)^{\frac{1}{1.6}} * \left[1 - \left(\frac{120}{330}\right)^{\frac{1}{1.6}}\right]$$

$$\Delta V = 70 * \left(\frac{108}{120}\right)^{\frac{1}{1.6}} * \left[1 - \left(\frac{120}{330}\right)^{\frac{1}{1.6}}\right]$$

$$\Delta V = 30,72 L$$