



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Escola de Engenharia

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Társis Prado Barbosa

**“MODELAGEM E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DA  
ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS/HIDRÁULICOS HÍBRIDOS COM MOTOR  
FLEX VISANDO ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL E O AUMENTO DA VIDA ÚTIL  
DA BATERIA”**

Belo Horizonte

2020

Társis Prado Barbosa

**“MODELAGEM E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DA  
ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS/HIDRÁULICOS HÍBRIDOS COM MOTOR  
FLEX VISANDO ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL E O AUMENTO DA VIDA ÚTIL  
DA BATERIA”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Horta Gutiérrez – Universidade Federal de Minas Gerais

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva – Universidade Federal de São João Del-Rei

Belo Horizonte

2020

B238m	<p>Barbosa, Társis Prado.</p> <p>Modelagem e análise de estratégias de gerenciamento da energia em veículos elétricos/hidráulicos híbridos com motor flex visando economia de combustível e o aumento da vida útil da bateria [recurso eletrônico] / Társis Prado Barbosa. - 2020.</p> <p>1 recurso online (221 f.: il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Juan Carlos Horta Gutiérrez. Coorientador: Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 126-221. Bibliografia: f. 117-125.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Simulação (computadores) - Teses. 3. Motores - Teses. 4. Veículos elétricos híbridos – Teses. I. Horta Gutiérrez, Juan Carlos. II. Silva, Leonardo Adolpho Rodrigues da. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621 (043)</p>
-------	---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [epgmec@demec.ufmg.br](mailto:epgmec@demec.ufmg.br)

**"MODELAGEM E ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE GERENCIAMENTO DA  
ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS/HIDRÁULICOS HÍBRIDOS COM  
MOTOR FLEX VISANDO ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL E O AUMENTO DA  
VIDA ÚTIL DA BATERIA"**

**TÁRSIS PRADO BARBOSA**

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Projeto e Sistemas".

Tese aprovada no dia 20 de fevereiro de 2020.

Por:

**Prof. Juan Carlos Horta Gutierrez**

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

**Prof. Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva**

Coorientador - Universidade Federal de São João Del-Rei/ UFSJ

**Dr. Jony Javorski Eckert**

Pesquisador da Universidade Estadual de Campinas/ UNICAMP

**Prof. Luís Carlos Monteiro Sales**

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/PUC-MINAS

**Prof. Fabricio José Pacheco Pujatti**

Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

**Prof. Antonio Augusto Torres Maia**

Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG



*À minha mãe, Irene da Cunha Prado Barbosa (in memoriam).*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela vida, por tudo que Ele me proporcionou, sem Ele, nada do que se fez teria sido possível. Aos meus pais, Waldeir e Irene que são os meus maiores exemplos de dedicação e conduta. Ao meu irmão, Esdras, no qual sempre tentei me espelhar, não é só um irmão, mas um verdadeiro amigo. À minha querida esposa, meu único e eterno amor, Sâmea, pessoa que me apoiou neste trabalho e que acreditou que eu seria capaz de concluir as metas estabelecidas.

Agradeço à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, por fomentar o desenvolvimento de novos conhecimentos e novas tecnologias.

Agradeço aos Professores do DEMEC/UFMG e NIPEM/UFSJ, em especial aos Professores Juan Carlos Horta Gutiérrez e Leonardo Adolpho Rodrigues da Silva, que além de orientadores, se tornaram amigos, presentes nos desafios e também nas vitórias conquistadas.

Ao Prof. Fabrício José Pacheco Pujatti pelas valiosas contribuições técnicas na realização deste trabalho.

Ao Pesquisador Jony Javorski Eckert da Unicamp por aceitar dividir um pouco da sua experiência e anos de pesquisa na área veicular, tendo fornecido dicas e materiais de suporte para o trabalho.

À todos os colegas da UFSJ, com os quais tenho a felicidade de trabalhar e receber ricos conselhos.

Agradeço também ao colegiado do PPGMEC – UFMG, em especial ao Prof. Marco Túlio Correa de Faria que nos ajudou sobremaneira para viabilizar a defesa na data pretendida e à secretaria do programa, em especial na pessoa da Marina, que está sempre ajudando e resolvendo questões dos alunos do programa de pós-graduação.

À todas as pessoas que de alguma forma contribuíram e me ajudaram a chegar a conclusão desta Tese,

**MUITO OBRIGADO!**

“Quando aceitamos nossos limites, conseguimos ir além deles”

(Albert Einstein)

## RESUMO

Este trabalho propõe modelar diferentes veículos híbridos conjugando as tecnologias elétrica e hidráulica e apresentar soluções de controle e de gerenciamento da energia que utilizem as vantagens proporcionadas pela sinergia entre estas tecnologias. No atual cenário automobilístico há um grande foco no aumento da eficiência energética dos veículos. Neste contexto, soluções para a redução dos custos com transporte podem se refletir no custo final dos produtos, na redução da dependência de combustíveis fósseis e na redução dos níveis de emissões de gases poluentes. Os sistemas de transmissão híbridos hidráulicos utilizam acumuladores hidropneumáticos para armazenar energia ao invés de baterias ou capacitores e, embora menos conhecidos, podem oferecer várias vantagens em comparação com os sistemas híbridos elétricos. Para a modelagem e estudo das diferentes arquiteturas de trens de potência foi criado um pacote computacional em C++. O veículo híbrido hidráulico modelado operando com etanol no ciclo urbano padrão indicou a possibilidade de reduzir o consumo de combustível em cerca de 23% em relação ao veículo convencional, apesar do aumento da massa embarcada (estimada em 249 kg) em virtude da operação do motor de combustão em regiões de maior eficiência e de menor vazão de combustível. No modelo do veículo híbrido elétrico e hidráulico se observou que, com as estratégias de gestão da energia utilizadas, a vida útil da bateria em termos do número de ciclos de carga poderia ser aumentada 17% em relação a vida da bateria do Toyota Prius e ainda mantendo o nível de emissão de CO<sub>2</sub> em um valor estimado de 72 g/km. Por fim, foram feitas suposições para calcular o custo total de propriedade dos modelos criados em um período de 5 anos.

**Palavras-chave:** simulação veicular; veículo híbrido elétrico/hidráulico; gerenciamento da energia; custo total de propriedade; motor flex

## ABSTRACT

This work proposes to model different hybrid vehicles combining electrical and hydraulic technologies and to present control and energy management solutions that utilize the advantages provided by the synergy between these technologies. In the current automotive scenario there is a strong focus on increasing vehicles energy efficiency. In this context, solutions for reducing transportation costs can be reflected in the final products cost, reduced fossil fuel dependence and pollutant gases emissions. Hybrid hydraulic transmission systems use hydropneumatic accumulators to store energy rather than batteries or capacitors and, although less well known, may offer several advantages compared to hybrid-electric systems. A computational package in C++ was created for the modeling and to study different powertrain architectures. The modeled hybrid hydraulic vehicle operating with ethanol under the standard urban driving-cycle indicates 23% fuel saving over the conventional vehicle, despite the increase in shipped mass (estimated at 249 kg) operating the engine at higher efficiency and lower fuel consumption zones. With the power management strategies adopted with the hybrid electric and hydraulic model battery life was improved 17% over the battery life of the Toyota Prius in terms of the number of charge cycles while still maintaining the estimated CO<sub>2</sub> emission level at 72 g/km. Finally, assumptions were made to calculate the total cost of ownership of the created models for 5 years.

**Keywords:** vehicle simulation; electric/hydraulic hybrid vehicle; energy management; total cost of ownership; flex fuel engine

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração conceitual do trem de potência de um veículo híbrido. Adaptado de Ehsani <i>et al.</i> (2018). .....	29
Figura 2: Configuração geral de trens de potência híbridos. Adaptado de Ibrahim (2011). ....	30
Figura 3: Trem de potência de veículos híbridos elétrico e hidráulico em série, com motores acoplados diretamente nas rodas – adaptado de Achten, P. a. J. <i>et al.</i> (2008). .....	31
Figura 4: Ônibus urbano com transmissão mecânica ( <i>power split</i> ) em conjunto com (a) transmissão hidrostática ou (b) hibridização hidráulica (Macor <i>et al.</i> , 2017). .....	35
Figura 5: Curvas de rendimento das unidades hidráulicas fabricadas pela empresa INNAS (Ibrahim, 2011). .....	36
Figura 6: Veículo elétrico com sistema hidráulico de frenagem regenerativa (Yang; Luo; Li, 2017). .....	37
Figura 7: Modelo de um veículo convencional de passageiros. ....	44
Figura 8: Curvas de torque e potência máxima do Motor D4D (a), mapa de consumo específico – Gasolina E22 (b) e mapa de consumo específico – Etanol E100 (c). .....	45
Figura 9: Velocidade de referência e velocidade do modelo construído (a); erro de velocidade do modelo (b); consumo de combustível em litros (c). .....	50
Figura 10: Variação do consumo de combustível com a adição de 30 kg na massa original do veículo. ....	51
Figura 11: Consumo de gasolina e etanol obtidos das simulações no ciclo NBR 6601. ....	52
Figura 12: Pontos de operação do motor flex com gasolina (a) e etanol (b). .....	52
Figura 13: Veículo híbrido hidráulico - arquitetura em série. ....	54
Figura 14: Mapa de eficiência – motor/bomba FCVP28 de deslocamento variável. ....	57
Figura 15: Blocos da unidade de controle do VHH. ....	60
Figura 16: Controle de velocidade do modelo do VHH. ....	62
Figura 17: Regras de controle dos modos de operação do VHH. ....	62
Figura 18: Controlador do acionamento da borboleta do MCI. ....	63
Figura 19: Fator de compensação do comando da borboleta do MCI em função do SOC. ....	64
Figura 20: Curvas de torque de referência em função da rotação do MCI: mapa de consumo específico operando com gasolina (a) e etanol (b). ....	64
Figura 21: Controladores do ajuste do deslocamento volumétrico da bomba. ....	65

Figura 22: Sinais de entrada e saída dos blocos do VHH.....	66
Figura 23: Velocidade de referência e do VHH (a); erro de velocidade do modelo (b); variação do estado de carga do acumulador hidráulico (c).....	67
Figura 24: Velocidade de referência e do VHH (a); erro de velocidade do modelo (b). ....	68
Figura 25: Variação do <i>SOC</i> – ciclo duplicado e modelo do VHH operando com gasolina....	69
Figura 26: Consumo de combustível do VHH operando com gasolina. ....	69
Figura 27: Pontos de operação do motor flex operando com gasolina: veículo convencional (a) e VHH (b).....	71
Figura 28: Pontos de operação do motor flex com etanol: veículo convencional (a) e VHH (b). ....	72
Figura 29: Variação do <i>SOC</i> e do Modo de operação em função do ciclo de condução.....	73
Figura 30: Variação da energia nos componentes do VHH – ciclo NBR 6601. ....	74
Figura 31: Pontos de operação do motor/bomba. ....	75
Figura 32: Mapa de eficiência e pontos de operação – motor Prius 1.5.....	77
Figura 33: Modelo do VEHH. ....	79
Figura 34: Fluxo de potência e sistema de transmissão dos motores e da bomba.....	80
Figura 35: Blocos da unidade de controle do VEHH. ....	84
Figura 36: Regras de controle dos modos de operação do VEHH. ....	85
Figura 37: Sistema de controle da máquina de indução trifásica. ....	86
Figura 38: Cálculo do torque de referência do motor elétrico.....	86
Figura 39: Torque do motor elétrico em função do estado de carga do acumulador. ....	86
Figura 40: Comando da borboleta do MCI em função do estado de carga da bateria.....	88
Figura 41: Controlador do acionamento da borboleta do MCI. ....	88
Figura 42: Controlador do deslocamento volumétrico da bomba. ....	88
Figura 43: Curva utilizada para obtenção do torque de referência da bomba. ....	89
Figura 44: Sinais de entrada e saída dos blocos do modelo do VEHH. ....	90
Figura 45: Velocidade de referência e do modelo do VEHH (a); erro de velocidade do modelo (b); consumo de gasolina em litros (c). ....	91
Figura 46: Variação do <i>SOC</i> do acumulador – VEHH operando com gasolina.....	92
Figura 47: Pontos de operação do motor com gasolina: veículo convencional (a) e VEHH (b). ....	94
Figura 48: Variação do <i>SOC</i> e do modo de operação em função do ciclo de condução. ....	95
Figura 49: Variação do estado de carga da bateria. ....	96
Figura 50: Variação da energia nos componentes do VEHH.....	96

Figura 51: Pontos de operação do motor/bomba – VEHH operando com etanol. ....	98
Figura 52: Pontos de operação dos motores elétricos do VEHH e do Prius. ....	99
Figura 53: Vida útil de uma célula de íon-lítio em função do <i>DOD</i> . ....	100
Figura 54: Ciclos de recarga da bateria. ....	101
Figura 55: Ciclos de recarga – ambos os modelos com baterias de NiMH.....	102
Figura 56: Pontos de operação – motor flex do VEHH operando com gasolina.....	103
Figura 57. Simulação do VEHH no ciclo estrada NBR 7024. ....	108
Figura 58. Modo de operação e <i>SOC</i> do VEHH no ciclo NBR 7024.....	108
Figura 59. TCO dos modelos sem subsídio.....	113
Figura 60. TCO dos modelos com subsídio. ....	113
Figura 61. Análise do TCO em função do tempo com subsídios.....	114
Figura 62. Análise do TCO do Prius em função do tempo com subsídios.....	114
Figura 63: Forças atuantes em um veículo de tração dianteira. Adaptado de Chen (2015)..	127
Figura 64: Coeficiente de arrasto em diferentes modelos de veículos (Gillespie, 1992). ....	128
Figura 65: Coeficiente de resistência ao rolamento obtido em função da pressão de calibração dos pneus (Gillespie, 1992).....	129
Figura 66: Elementos básicos do trem de potência de um veículo automotor. Adaptado de Gillespie (1992). ....	131
Figura 67: Ciclo de condução NBR 6601. Adaptado do Advisor. ....	135
Figura 68: Ciclo de condução NBR7024. Adaptado do Advisor. ....	135
Figura 69: Esquema conceitual de uma transmissão hidrostática (adaptado de Ibrahim (2011)). .....	136
Figura 70: Motor/bomba de prato inclinado (adaptado de Hydraulicspneum (2015))......	138
Figura 71: Variação de estado de um acumulador de bexiga mediante a pressão e o volume do gás (Louvigny; Nzisabira; Duysinx, 2007).....	141



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estratégia de trocas de marcha em função da velocidade do veículo (NBR 6601)..	46
Tabela 2: Autonomia – Nissan March 2013 (Pbev, 2019). .....	47
Tabela 3: Dados utilizados no modelo computacional do veículo convencional.....	48
Tabela 4: Resultados obtidos com diferentes combustíveis – ciclo NBR 6601. ....	51
Tabela 5: Parâmetros iniciais utilizados para os cálculos analíticos do sistema híbrido hidráulico. .....	55
Tabela 6: Parâmetros dos componentes hidráulicos selecionados para o modelo do VHH.....	58
Tabela 7: Valores de massa utilizados nos componentes do modelo computacional. ....	59
Tabela 8: Comparação dos resultados com diferentes combustíveis – ciclo NBR 6601. ....	70
Tabela 9: Variação da energia nos componentes do VHH operando com gasolina.....	74
Tabela 10: Variação da energia nos componentes do VHH operando com etanol. ....	75
Tabela 11: Análise de eficiência do modelo convencional – Nissan March 2013.....	76
Tabela 12: Resultados obtidos pelo Advisor para o Toyota Prius 2003.....	77
Tabela 13: Valores de massa utilizados no modelo do VEHH.....	83
Tabela 14: Comparação dos resultados com diferentes combustíveis – ciclo NBR 6601. ....	93
Tabela 15: Variação da energia nos componentes do VEHH operando com gasolina. ....	97
Tabela 16: Variação da energia nos componentes do VEHH operando com etanol. ....	98
Tabela 17: Os 10 carros mais vendidos em 2019 (Febabreve, 2019).....	105
Tabela 18: Variação do preço do seguro do Toyota Prius (Seguroauto, 2019).....	106
Tabela 19: Média de consumo de combustível dos diferentes modelos.....	109
Tabela 20: Emissões de CO <sub>2</sub> [g/km].....	110
Tabela 21: TCO [R\$] dos veículos estudados (sem subsídios). ....	111
Tabela 22: TCO [R\$] dos veículos estudados com subsídios do governo. ....	112
Tabela 23 – Equações gerais do motor/bomba hidráulicos (Ibrahim, 2011; Guzzella e Sciarretta, 2012).....	137

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAA – Associação Americana de Veículos Automotores

BSFC – *brake specific fuel consumption*

CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono

CVT – *continuously variable transmission*

DOD – profundidade de descarga da bateria (*depth of discharge*)

DP – programação dinâmica

DPVAT - seguro de danos pessoais causados por veículos automotores de vias terrestres

EGE – estratégia de gestão da energia

FC – *floating cup*

FTP – *Federal Test Procedure*

GA – algoritmo genético

GPS – *global positioning system*

HESS – *hydraulic electric synergy system*

HEV – hybrid electric vehicle

HWFET - *Highway Fuel Economy Driving Schedule*

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPVA – imposto sobre a propriedade de veículos automotores

LiFePO<sub>4</sub> – fosfato de lítio-ferro

MCI – motor de combustão interna

ME – motor elétrico

MG – Minas Gerais

N<sub>2</sub> – nitrogênio

NBR – Norma Brasileira

NEDC – *New European Driving Cycle*

NiMH – níquel metálico

NO<sub>x</sub> – óxidos de nitrogênio

PBEV – Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PCI – poder calorífico inferior

PI – proporcional e integral

PWM – *pulse width modulator*

QSS – *quasistatic simulation tools*

RAM – *random access memory*

RB – *rule-based*

SOC – estado de carga do acumulador (*state of charge*)

SVPWM – *space vector pulse width modulator*

TCO – *total cost of ownership* (custo total de propriedade)

VEH – veículos elétricos híbridos

VEHH – veículo elétrico hidráulico híbrido

VHH – veículo híbrido hidráulico

VSI – *voltage source inverter*

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a_{req}$  – aceleração solicitada nas rodas do eixo de tração do veículo
- $a_x$  – aceleração tangencial
- $A$  – área frontal do veículo
- $A_{urb}^{corr}$  – fator de correção de consumo no ciclo urbano
- $A_{est}^{corr}$  – fator de correção de consumo no ciclo estrada
- $A_{urb}$  – consumo de combustível do veículo sem correção no ciclo urbano
- $A_{est}$  – consumo de combustível do veículo sem correção no ciclo estrada
- $b$  – comando efetivamente realizado pelo atuador do corpo de borboleta do motor de combustão interna
- $b^*$  – comando da borboleta fornecido pelo controlador
- $b_{compensação}$  – fator de compensação para o comando da borboleta
- $c$  – distância entre o eixo traseiro e o centro de gravidade
- $C_d$  – coeficiente de arrasto
- $D_A$  – arrasto aerodinâmico
- $D_{ano}$  – distância total percorrida por ano em quilômetros
- $D_P$  – deslocamento volumétrico da bomba
- $D_{P,max}$  – máximo deslocamento volumétrico da bomba
- $D_M$  – deslocamento volumétrico do motor/bomba hidráulico
- $D_{M,max}$  – máximo deslocamento volumétrico do motor
- $dt$  – passo de tempo
- $E$  – tensão de alimentação disponível no barramento
- $f_0$  – coeficiente de força resistiva de ordem zero obtido em teste de desaceleração livre
- $f_2$  – coeficiente de força resistiva de ordem dois obtido em teste de desaceleração livre
- $f_r$  – coeficiente de resistência ao rolamento
- $F_x$  – força nas rodas para tracionar o veículo
- $F_{x,max}$  – força máxima que pode ser transmitida no contato pneu pista
- $g$  – aceleração da gravidade
- $h$  – altura do centro de gravidade do veículo
- $i$  – relação de transmissão

$i_1$  – relação de transmissão entre o eixo do motor de combustão interna e o eixo da bomba  
 $i_2$  – relação de transmissão entre o eixo do motor elétrico e o eixo da bomba  
 $i_{s\alpha\beta}$  – corrente no estator da máquina elétrica no referencial  $\alpha$  e  $\beta$   
 $i_{s\alpha\beta}^*$  – corrente de referência do estator da máquina elétrica no referencial  $\alpha$  e  $\beta$   
 $i_{sdq}$  – corrente no estator da máquina elétrica no referencial dq  
 $i_{sdq}^*$  – corrente de referência no estator da máquina elétrica no referencial dq  
 $I_{bat}$  – corrente da bateria  
 $I_e$  – inércia do motor de combustão interna  
 $I_t$  – inércia da transmissão  
 $I_d$  – inércia do diferencial  
 $I_w$  – inércia das rodas e pneus do veículo  
 $J$  – inércia rotativa do conjunto moto-bomba  
 $k_I$  – ganho integral do controlador do comando da borboleta  
 $k_{IB}$  – ganho integral do controlador do deslocamento volumétrico da bomba  
 $k_{IM}$  – ganho integral do controlador do deslocamento volumétrico do motor/bomba  
 $k_{PA}$  – ganho proporcional do controlador do deslocamento volumétrico da bomba  
 $k_{IA}$  – ganho integral do controlador do deslocamento volumétrico da bomba  
 $k_{PB}$  – ganho proporcional do controlador do deslocamento volumétrico da bomba  
 $k_{PM}$  – ganho proporcional do controlador do deslocamento volumétrico do motor/bomba  
 $k_{PME}$  – ganho proporcional utilizado para obtenção do torque de referência do motor elétrico  
 $k_P$  – ganho proporcional do controlador do comando da borboleta  
 $L$  – distância entre eixos  
 $L_{NiMH}$  – vida da bateria de níquel-metálico em ciclos de recarga  
 $L_s$  – indutância própria do enrolamento do estator  
 $m$  – massa efetiva do veículo  
 $M$  – indutância mútua do motor elétrico  
 $m_v$  – massa total do veículo  
 $n$  – número de mols do gás  
 $N_t$  – relação de transmissão  
 $N_d$  – relação de transmissão do diferencial  
 $P_0, P_1, P_2$  – pressão de gás no interior do acumulador de pressão  
 $P$  – é o número de pares de pólos do motor elétrico  
 $P_{comb}$  – preço do combustível por litro

$P_{min}$  – pressão mínima de operação do acumulador hidráulico  
 $P_{máx}$  – pressão máxima de operação do acumulador hidráulico  
 $P_{pré-carga}$  – pressão de pré-carga do acumulador hidráulico  
 $P_{psi}$  – pressão do pneu  
 $Q_P$  – vazão volumétrica da bomba hidráulica  
 $Q_{m/b}$  – vazão volumétrica do motor/bomba hidráulico  
 $r$  – raio dos pneus do veículo  
 $R$  – constante universal dos gases perfeitos  
 $R_{cidade}$  – porcentagem do percurso realizado em âmbito urbano  
 $R_{estrada}$  – porcentagem do trajeto realizado em estrada  
 $R_i$  – resistência interna da bateria  
 $R_\theta$  – força induzida pela gravidade ao dirigir em pista com ângulo de inclinação  $\theta$   
 $R_x$  – força de resistência a rolagem dos pneus  
 $S_a, S_b, S_c, \overline{S}_a, \overline{S}_b, \overline{S}_c$  – chaves do inversor de frequência  
 $SOC_{bateria}$  – estado de carga da bateria  
 $SOC_{b\_min}$  – estado de carga mínimo estipulado para a bateria  
 $SOC_{min}$  – estado de carga mínimo estipulado para o acumulador hidráulico  
 $SOC_{máx}$  – estado de carga máximo estipulado para o acumulador hidráulico  
 $SOC_{bateria}^{anterior}$  – estado de carga na iteração anterior da simulação  
 $T_{bomba}$  – torque de carga do eixo da bomba  
 $T_{Bomba}^*$  – torque de referência para o cálculo do deslocamento da bomba  
 $T_{MCI}$  – torque fornecido na saída do eixo do motor de combustão interna  
 $T_{MCI}^*$  – torque de referência para cálculo do comando da borboleta  
 $T_{ME}$  – torque fornecido na saída do eixo do motor elétrico  
 $T_{ME}^*$  – torque de referência da máquina elétrica enviado para o inversor de frequência  
 $T_{cl}$  – torque transmitido pela embreagem  
 $T_d$  – torque solicitado  
 $T_L$  – torque de carga do motor elétrico  
 $T_t$  – torque de entrada da transmissão (caixa de marchas)  
 $T_{req}$  – torque solicitado no eixo de tração para movimentar o veículo  
 $V$  – velocidade atual  
 $V^*$  – velocidade de referência

$V_0, V_1, V_2$  – volume ocupado pelo gás no interior do acumulador para diferentes níveis

$v_{as}, v_{bs}, v_{cs}$  – tensões trifásicas medidas no estator da máquina elétrica

$V_{acul}$  – volume total do acumulador hidráulico

$V_{aumento}$  – velocidade do veículo para o aumento da marcha

$V_{bateria}$  – tensão atual da bateria

$V_c$  – velocidade de referência do ciclo de condução

$V_{ci}$  – velocidade instantânea do ciclo de condução de referência

$V_i$  – velocidade instantânea do veículo

$V_{nom}$  – tensão nominal da bateria

$V_{redução}$  – velocidade do veículo para a redução da marcha

$v_{sd}^*, v_{sq}^*$  – valores de tensão de referência da máquina elétrica no referencial dq

$v_{s\alpha\beta}$  – tensões trifásicas no estator da máquina elétrica no referencial  $\alpha$  e  $\beta$

$v_{sdq}$  – tensões trifásicas no estator da máquina elétrica no referencial dq

$V_w$  – velocidade do vento na direção do movimento do veículo

$\bar{V}_c$  – velocidade média do ciclo padrão

$\bar{V}$  – velocidade média do modelo no trajeto.

$W_{1-2}$  – trabalho realizado do estado 1 para o estado 2

$W$  – peso do veículo

$w_{MCI}$  – rotação do motor de combustão interna

$w_{MCI}^*$  – rotação de referência do motor de combustão interna

$\dot{w}_{MCI}$  – derivada da rotação angular do motor de combustão interna

$w_{ME}$  – rotação do motor elétrico

$w_{mec}$  – rotação no eixo de entrada da bomba do veículo elétrico hidráulico híbrido

$w_{min}$  – rotação mínima de operação do motor de combustão interna

$w_{MCI\_aumento}$  – rotação do MCI para realizar o aumento da marcha

$w_{MCI\_redução}$  – rotação do MCI para realizar a redução da marcha

$x_P$  – parcela do deslocamento volumétrico da bomba hidráulica

$x_M$  – parcela do deslocamento volumétrico do motor/bomba hidráulico

$\forall_f$  – volume de fluido hidráulico no interior do acumulador

$\alpha$  – aceleração angular do eixo do conjunto moto-bomba

$\alpha_{MCI}$  – sinal de controle destinado ao MCI

$\alpha_d$  – sinal de controle destinado ao sistema HESS

$\beta_0, \beta_1$  e  $\beta_2$  – coeficientes do modelo que estima a vida de células de níquel-metálico

$\Delta E_c$  – variação da energia cinética

$\Delta p_P$  – diferencial de pressão entre a entrada e a saída da bomba

$\Delta p_M$  – diferencial de pressão entre a entrada e a saída do motor

$\Delta T$  – variação do tempo

$\Delta V$  – variação da velocidade do veículo

$\lambda_r$  – fluxo magnético no rotor

$\mu$  – aderência pneu-pista

$\eta_{hm,P}$  – rendimento hidrodinâmico e mecânico da bomba

$\eta_{hm,M}$  – rendimento hidrodinâmico e mecânico do motor

$\eta_{td}$  – eficiência do trem de potência

$\eta_{v,P}$  – rendimento volumétrico da bomba

$\eta_{v,M}$  – rendimento volumétrico do motor

$\rho$  – densidade do ar

$\theta$  – ângulo de inclinação da pista

$\omega_M$  – velocidade angular do eixo do motor/bomba

$\omega_P$  – velocidade angular do eixo da bomba



# SUMÁRIO

1. Introdução.....	23
1.1. Apresentação.....	23
1.2. Relevância.....	24
1.3. Objetivos.....	27
1.3.1. Objetivo Geral.....	27
1.3.2. Objetivos Específicos.....	27
1.4. Contribuições.....	27
2. Veículos híbridos elétricos e hidráulicos.....	29
2.1. Arquitetura de veículos híbridos.....	29
2.2. Estado da arte.....	33
2.2.1. Modelagem e simulação de veículos.....	33
2.2.2. Estratégias de gerenciamento de energia.....	39
2.3. Síntese e discussão.....	41
3. Pacote de simulação veicular em código aberto.....	43
3.1. Modelo de um veículo convencional.....	43
3.2. Teste e validação do pacote computacional - modelo de um veículo convencional considerando dados de <i>coast down</i> .....	48
4. Modelo de um Veículo Híbrido Hidráulico de pequeno porte.....	54
4.1. Modelagem de um VHH Série.....	54
4.2. Detalhamento dos sistemas de controle e gerenciamento da energia.....	60
4.3. Teste do modelo do Veículo Híbrido Hidráulico implementado.....	66
4.3.1. Estudo da eficiência do trem de potência do VHH proposto e comparações com o veículo convencional e com o Toyota Prius (2003).....	73
4.4. Ponderações finais sobre o modelo proposto do VHH.....	78
5. Estudo de um veículo elétrico hidráulico híbrido (VEHH).....	79

5.1.	Modelagem do VEHH .....	79
5.2.	Detalhamento dos sistemas de controle e gerenciamento da energia .....	82
5.3.	Teste do modelo do VEHH implementado .....	90
5.3.1.	Estudo da eficiência do trem de potência do VEHH – comparações com o VHH e com o Toyota Prius (2003) .....	96
5.3.2.	Estudo sobre o comportamento da bateria do VEHH e comparações com a bateria do Prius (2003) .....	99
5.4.	Ponderações finais sobre o modelo do VEHH.....	103
6.	Estimativa do custo total de propriedade de veículos híbridos e das emissões de CO <sub>2</sub> . 105	
6.1.	Metodologia .....	106
6.1.1.	Preço de compra .....	106
6.1.2.	Preço do combustível no Brasil .....	106
6.1.3.	Seguro .....	106
6.1.4.	Taxas e licenciamento .....	107
6.1.5.	Distância percorrida por ano.....	107
6.1.6.	Pneus e manutenção.....	107
6.1.7.	Financiamento .....	107
6.1.8.	Consumo de combustível .....	108
6.1.9.	Preço por km.....	109
6.1.10.	Níveis de emissão de CO <sub>2</sub> .....	109
6.2.	Resultados e Síntese.....	110
7.	Conclusões e propostas para trabalhos futuros.....	116
	Referências Bibliográficas.....	118
	Apêndices .....	127
	Apêndice A – Dinâmica Veicular Longitudinal .....	127
	A.1 Arrasto aerodinâmico ( $D_A$ ) .....	127
	A.2 Força de resistência ao rolamento dos pneus ( $R_x$ ) .....	128
	A.3 Influência do ângulo de inclinação da pista ( $R_\theta$ ).....	129

A.4 Trem de potência, força de tração e aceleração do veículo .....	129
Apêndice B – Desaceleração livre em pista de rolamento - <i>coast down test</i> .....	133
Apêndice C – Ciclos de Condução Padronizados .....	134
Apêndice D – Transmissão hidrostática .....	136
Apêndice E – Acumuladores hidropneumáticos .....	139
Apêndice F – Código implementado para o cálculo dos parâmetros do motor de indução trifásico .....	143
Apêndice G – Artigo aceito para publicação na revista <i>Mechanics Based Design of Structures and Machines, an International Journal</i> – “ <i>Hydraulic hybrid passenger vehicle: fuel savings possibilities</i> ” .....	145
Apêndice H – Artigo submetido para a revista <i>Mechanics Based Design of Structures and Machines, an International Journal</i> – “ <i>Gear shifting optimization applied to a flex-fuel vehicle under real driving conditions</i> ” .....	178
Apêndice I – Artigo publicado no COBEM 2019 – “ <i>Vehicle selection methodology based on fuel economy for the user’s daily journey</i> ” .....	214
Apêndice J – Artigo publicado no Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica CIBIM 2019 – “ <i>Vehicle selection methodology based on fuel economy for the user’s daily journey</i> ” .....	219

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Apresentação

O uso de motores de combustão interna (MCI) em aplicações de tração veicular é hoje predominante, e assim deve permanecer pelos próximos anos, em especial nos países em desenvolvimento, em virtude da elevada autonomia proporcionada pela alta densidade de energia dos combustíveis fósseis. No Brasil, por exemplo, foram emplacados 2.046.645 veículos de passageiros que utilizam MCIs até o mês de novembro de 2019 (Febabreve, 2019).

Por outro lado, os veículos convencionais com motores de combustão interna apresentam desvantagens devido à baixa eficiência na conversão da energia química em trabalho mecânico e alta taxa de emissão de poluentes atmosféricos no processo de oxidação do combustível (Guzzella e Sciarretta, 2012). O consumo de combustível e o nível de emissões estão relacionados a tecnologia implementada no trem de potência e são afetados pelo trajeto que o veículo é submetido, pela regularidade das manutenções exigidas e pelo estilo de condução do usuário (Doucette e McCulloch, 2011; Suarez-Bertoa *et al.*, 2015).

Os órgãos de fomento e a própria indústria automobilística tem investido em pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de fontes alternativas de energia e equipamentos com maior eficiência energética através da integração de diferentes tecnologias (elétrica, mecânica, térmica ou hidráulica). Em destaque e com exemplos cada vez mais presentes no mercado estão os veículos elétricos híbridos (VEHs). Os VEHs são capazes de combinar a boa autonomia dos MCIs com a alta eficiência dos motores elétricos (Rydberg, 2009).

Além dos híbridos elétricos, vários outros sistemas híbridos foram criados como o híbrido a ar comprimido, o híbrido com volante de inércia, o híbrido hidráulico e o híbrido com célula de combustível (Wasbari *et al.*, 2017). A capacidade de integrar sistemas de controle e de gestão da energia com o dimensionamento otimizado dos principais componentes do trem de potência híbrido são áreas que requerem esforços em pesquisa e desenvolvimento (Ribau *et al.*, 2014).

Neste contexto, este trabalho apresenta um pacote de simulação computacional desenvolvido utilizando a linguagem de programação C++. O pacote possibilita a modelagem de diferentes arquiteturas do veículo e a simulação de estratégias de gerenciamento da energia das fontes primárias (baterias, MCI, etc.) e secundárias (geradores elétricos e acumuladores hidráulicos)

utilizando a abordagem (dinâmica) “*forward-facing*”, onde são calculados todos os estados de todas as variáveis do modelo a cada iteração da simulação. Além disso, são apresentados dois modelos de veículos de passageiros híbridos que combinam a tecnologia hidráulica e elétrica com o MCI flex operando tanto com gasolina quanto com etanol. São apresentadas as estratégias de controle e de gerenciamento da energia que foram implementadas e que demonstram potencial para a redução do consumo de combustível e também indicam a possibilidade de prolongar a vida útil das baterias no caso do veículo elétrico hidráulico híbrido (VEHH). Por fim, é apresentada uma análise do custo total de propriedade e as estimativas feitas em relação a emissão de CO<sub>2</sub> dos modelos implementados.

## **1.2. Relevância**

Os motores de combustão interna evoluíram drasticamente nas últimas duas décadas, em especial objetivando a redução dos níveis de emissões (Plotkin, 2009; Clenci *et al.*, 2014). Diversos estudos relacionados aos motores de combustão interna foram conduzidos tentando melhorar questões como: sistemas de entrada de ar (Clenci *et al.*, 2014; Millo *et al.*, 2014), injeção de combustível (Baratta e Rapetto, 2014), transferência de calor (Bohac; Baker; Assanis, 1996; Torregrosa *et al.*, 2006; Piedrahita, 2009; Broekaert *et al.*, 2016) e redução das dimensões da máquina térmica (Baêta *et al.*, 2018).

Entretanto, a alta dependência dos derivados de petróleo cria uma situação de fragilidade, pois estes recursos têm disponibilidade limitada e existem em regiões específicas, gerando recorrentes aumentos de preço e conflitos internacionais (Ehsani *et al.*, 2018). Neste contexto, novas normas e legislações têm sido criadas para a redução do consumo de combustíveis fósseis e para a redução de emissões, na tentativa de minimizar os danos ambientais. O decreto brasileiro INOVAR-AUTO de 2012 que finalizou em dezembro de 2017, por exemplo, propôs a redução do imposto sobre produtos industrializados (IPI) em veículos com menor consumo de combustível (Inovar-Auto, 2012).

No mesmo contexto, o programa Rota 2030 iniciado em 2018 tem como objetivo estabelecer diretrizes para a indústria automotiva visando principalmente a modernização do parque industrial, o aumento da eficiência energética da frota nacional e redução dos níveis de emissões veiculares (Malaquias *et al.*, 2019). No âmbito da eficiência energética e da redução das emissões de gases do efeito estufa, o etanol está sendo retomado como combustível estratégico. De acordo com as diretrizes do projeto, a alíquota do IPI de veículos híbridos, por exemplo,

será reduzida dos atuais 25% para uma faixa entre 7% e 20%, sendo atribuída uma redução extra de 2 pontos para os modelos que possibilitarem o uso do etanol.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e líder no desenvolvimento de tecnologias em prol da produção e utilização do etanol (Malaquias *et al.*, 2019). A substituição dos combustíveis fósseis por este biocombustível é uma opção promissora para o futuro da mobilidade que ainda está sendo pouco explorada. Portanto, este trabalho procura destacar novas soluções que viabilizam a utilização do etanol.

Uma das tendências da indústria para atender a demanda da sociedade por veículos mais eficientes e menos poluentes tem sido o desenvolvimento de trens de potência híbridos. Os veículos elétricos híbridos detêm características que os tornam atraentes face à propulsão convencional, conforme exposto abaixo (Corrêa, 2013):

- ✓ MCI menor (*downsizing*): os MCIs de veículos convencionais automotores no modo cruzeiro (mais utilizado) são muito maiores do que precisam ser. Pela adição de um ME para disponibilizar a potência parcial ou total durante as acelerações, um VEH pode ser equipado com um MCI menor e mais eficiente sem o comprometimento do desempenho em aceleração característico de um veículo convencional.
- ✓ Frenagem regenerativa: a frenagem regenerativa é um importante mecanismo de recuperação de energia utilizado na maioria dos modelos de VEHs. Este mecanismo recupera a energia que seria perdida durante a frenagem (dissipada na forma de calor) e a armazena em um sistema de estocagem de energia (como em baterias, por exemplo) para uso posterior do ME de tração.
- ✓ Potência fornecida sob demanda: outra característica que poupa energia e reduz emissões nos VEHs é a habilidade do MCI em permanecer temporariamente inativo (função *start-stop*) ou em modos de operação de baixa potência. Nesta situação, somente o ME é capaz de fornecer potência suficiente ao veículo para que ele se mova sem realizar a queima de combustível.
- ✓ Região de operação de menor consumo de combustível do MCI: em uma configuração de propulsão híbrida o MCI pode ser projetado para operar entre pontos de maior eficiência em um intervalo de operação reduzindo o consumo de combustível. Esta é uma característica presente nos denominados VEHs Série uma vez que o MCI acoplado a um gerador atua somente como fonte de energia para o ME e não como fonte direta de propulsão às rodas. Para o denominado VEH Paralelo, o MCI pode ser usado na tração das rodas em velocidades nas quais o seu funcionamento é otimizado e o nível

de emissões pode ser reduzido, características que podem ser interessantes para veículos que realizam o transporte no âmbito urbano.

O primeiro VEH reportado foi apresentado no Salão de Paris em 1899 (Wakefield, 1994). Apesar de terem surgido a quase 120 anos, os carros elétricos híbridos ainda necessitam de desenvolvimento, em especial na área das baterias. As soluções de transmissões híbridas hidráulicas são menos conhecidas, mas também oferecem uma alternativa eficiente e de alto desempenho relativamente à transmissão híbrida elétrica.

Um dos principais benefícios dos veículos híbridos hidráulicos (VHH) sobre os elétricos é a maior densidade de potência oferecida por seus meios de armazenamento de energia, em geral constituídos por acumuladores. Isso permite que os VHHs capturem praticamente toda a energia cinética disponível da frenagem. No caso dos híbridos elétricos, muitas vezes estes veículos adotam modos de operação voltados a dissipar parte da energia que poderia ser regenerada através dos freios de atrito devido à menor densidade de potência inerente em seus meios de armazenamento de energia. A desvantagem dos VHHs em comparação com os VEHs está no grande espaço ocupado pelos tanques dos acumuladores utilizados para armazenar a energia hidráulica (Sprengel *et al.*, 2015).

Veículos de pequeno porte híbridos hidráulicos ainda são pouco explorados na literatura, sendo a tecnologia hidráulica normalmente utilizada apenas em veículos pesados e máquinas que realizam o transporte e a movimentação de cargas (Jeff A. *et al.*, 2004; Bender; Bosse; Sawodny, 2014; Macor *et al.*, 2017). Tal tecnologia possui um nível elevado de maturidade e, se aplicada em um trem de potência híbrido, pode propiciar a redução do custo inicial de aquisição para o consumidor final em comparação com o custo dos atuais veículos elétricos híbridos disponíveis no mercado.

De forma resumida, com base no que foi tratado, duas abordagens principais podem ser tomadas para o desenvolvimento de veículos mais eficientes: 1- alterações físicas que envolvem o desenvolvimento de materiais novos e mais leves, a implementação de novos componentes adequadamente dimensionados e a modificação da configuração do veículo, incluindo sistemas hibridizados; 2- alterações nos sistemas de controle, envolvendo a implementação de estratégias de gestão da energia (EGE) otimizadas (Baptista *et al.*, 2010; Guerra *et al.*, 2012). Portanto, a proposta deste trabalho de modelar em um pacote computacional diferentes arquiteturas de trens de potência, com a combinação de diferentes tecnologias de propulsão e aplicando diferentes

estratégias de gerenciamento da energia pode contribuir para o desenvolvimento de novas soluções de veículos mais eficientes.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

Modelar e estudar sistemas de propulsão híbridos elétricos/hidráulicos com diferentes sistemas de controle e estratégias de gerenciamento da energia disponível visando a redução do consumo de combustível e/ou aumento da vida útil da bateria.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

1. Construir um pacote computacional em código aberto que permita o estudo de modelos multifísicos utilizando a abordagem de simulação *forward-facing*;
2. Realizar a validação dos modelos implementados com dados fornecidos pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular e pelo programa Advisor;
3. Analisar o custo total de propriedade e a viabilidade dos veículos híbridos modelados em comparação com o custo de veículos convencionais e híbridos disponíveis no mercado com a utilização de gasolina e etanol.

### **1.4. Contribuições**

Dois modelos completos de veículos híbridos foram projetados e simulados: a – veículo de passageiros híbrido hidráulico série; b – veículo de passageiros híbrido utilizando uma máquina elétrica, uma bateria, um MCI, um acumulador e a transmissão hidráulica. As principais contribuições obtidas com estes modelos são:

- ✓ Possibilidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis com a operação do MCI flex dos veículos híbridos propostos com etanol;



- ✓ Possibilidade de aumentar a vida útil da bateria de um veículo híbrido elétrico com a adição da tecnologia hidráulica estudada;
- ✓ Eventual redução do custo inicial de aquisição de um veículo híbrido com a utilização dos sistemas hidráulicos de elevada eficiência analisados;
- ✓ Apresentação detalhada dos controladores e das regras utilizadas para o gerenciamento da energia que foram estudadas e que podem ser facilmente implementadas em microcontroladores comerciais para realizar o controle de veículos híbridos em tempo real.

O pacote computacional implementado em C++ também sugere possibilidades de contribuição em vários âmbitos:

- ✓ Possibilidade de realizar simulações de trens de potência híbridos de sistemas multifísicos complexos em um espaço de tempo viável;
- ✓ Possibilidade de realização de simulações com variação do passo de cálculo na ordem de  $10^{-6}$  segundos, conforme exigido pela dinâmica eletromagnética das máquinas elétricas;
- ✓ Simulação de veículos empregando diferentes combustíveis, inclusive biocombustíveis;
- ✓ Possibilidade de execução do pacote computacional em ambiente Linux<sup>®</sup> e Window<sup>®</sup>;
- ✓ Armazenamento dos dados processados em arquivos .dat ou .txt, permitindo o pós-processamento dos resultados obtidos em programas convencionais (Matlab<sup>®</sup>, GNU Octave<sup>®</sup>, Excel<sup>®</sup>, etc.).

## 7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Os blocos implementados no pacote computacional para o estudo de veículos convencionais e híbridos permitiram a modelagem e simulação de diferentes arquiteturas de trem de potência combinando o motor de combustão interna com motores elétricos e hidráulicos. O pacote permitiu também a utilização de diferentes sistemas de armazenamento de energia (bateria e acumulador hidropneumático) e a criação de regras para o gerenciamento da energia disponível nos veículos modelados. A abordagem dinâmica (*forward-facing*) utilizada na construção dos modelos possibilita guardar e posteriormente analisar os estados de todas as variáveis de interesse e de todos os componentes dos modelos.

À partir dos modelos dos veículos híbridos criados foi possível simular a operação do MCI flex com diferentes combustíveis e avaliar novas possibilidades para a redução de consumo de combustível. O Veículo Hidráulico Híbrido apesar da massa extra dos seus componentes (estimada em 249 kg) mostrou possibilidades de reduzir o consumo de gasolina em 23,3% em relação ao veículo convencional no ciclo urbano padrão. A redução de consumo operando com etanol foi similar (22,6%). A arquitetura em série do VHH permite desacoplar o MCI da carga das rodas, permitindo a operação da máquina térmica em regiões de baixa rotação, elevado torque e baixa vazão de combustível. A eficiência da transmissão hidráulica do VHH no ciclo de condução NBR 6601 foi de 75% para a operação do MCI com gasolina e de 79% com etanol, sendo esta variação ocasionada pela operação da bomba hidráulica em maiores rotações quando operando com etanol (região mais eficiente).

Para construir a arquitetura do veículo elétrico hidráulico híbrido foi preciso modelar um motor elétrico, tendo se optado pela utilização de um motor de indução trifásico. Também foram modelados e disponibilizados no pacote os blocos da bateria e do inversor de frequência. Fazendo a comparação do consumo de combustível do VEHH com o VEH Toyota Prius 2003 se obteve uma redução de 36% na média de consumo de gasolina, apesar da massa extra adicionada (estimada em 125 kg).

Estudos com o modelo do VEHH foram realizados utilizando a mesma bateria do Prius 2003 para avaliar a possibilidade de aumentar a vida útil da bateria com a adição do acumulador hidráulico. Os resultados mostraram um aumento de 16,77% na vida útil da bateria em virtude da redução dos ciclos de carga e descarga mantendo uma redução de consumo de 14,44% em relação ao consumo simulado do Prius no Advisor. Apesar dos benefícios proporcionados pelo

VEHH, na análise dos custos realizada no Capítulo 6, o elevado custo inicial de tal arquitetura em relação ao custo do veículo convencional mostrou que tal projeto não seria viável sem subsídios governamentais. Em relação aos níveis de emissão de CO<sub>2</sub> os resultados obtidos pelo VEHH foram similares aos valores publicados pelo PBEV para o Prius 2019, aproximadamente 72 g/km.

Os modelos estudados com o acumulador hidropneumático como elemento de armazenamento de energia abrem possibilidades de eliminar ou reduzir a utilização das baterias de íon-lítio nos veículos híbridos. No caso do VHH, se conseguiu obter ganhos significativos de autonomia adicionando apenas componentes hidráulicos ao trem de potência convencional. A arquitetura proposta possui potencial para reduzir o custo total de fabricação e de propriedade (TCO) em comparação com os atuais veículos elétricos híbridos disponíveis no mercado, como foi demonstrado no capítulo 6. Além disso, a possibilidade de operar o MCI do VHH com etanol pode possibilitar a redução da dependência dos combustíveis fósseis e é um biocombustível que ainda está sendo pouco explorado para utilização nos VEHs.

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se os seguintes temas:

- ✓ Utilização do pacote computacional em conjunto com rotinas de otimização visando reduzir a especificação de potência dos componentes do VHH e do VEHH, buscando a redução dos custos iniciais de fabricação;
- ✓ Avaliação da possibilidade de utilização no VHH e no VEHH de um motor estacionário diesel operando com biocombustível e com menor especificação de potência que a utilizada neste trabalho (56,6 kW);
- ✓ Construção de um protótipo de um veículo híbrido hidráulico utilizando componentes hidráulicos comerciais para testar os modelos e as estratégias de controle propostas;
- ✓ Estudo dos níveis de emissões desde a produção do combustível até a sua conversão em trabalho nas rodas do VEHH para avaliar se a redução obtida dos gases do efeito estufa com essa arquitetura permite viabilizar financeiramente a sua utilização;
- ✓ Adição de mapas de emissões de gases poluentes no pacote de simulação;
- ✓ Realização de testes com o pacote de simulação criado em diferentes plataformas e sistemas operacionais visando avaliar e otimizar o seu desempenho e robustez.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abnt. 2012, "Light Road Motor Vehicles - Determination of Hydrocarbons, Carbon Monoxide, Nitrogen Oxides, Carbon Dioxides and Particulate Matter in the Exhaust Gas". NBR 6601

\_\_\_\_\_. 2014, "Road load measurement and dynamometer simulation using coast down techniques". Standards, B. a. O. T. NBR 10312

Achten, P.; Vael, G.; Brink, T.; Potma, J.; Schellekens, M., 2011, "Efficiency Measurements of the Hybrid Motor/Pump". The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'11. Tampere, Finland

Achten, P.; Vael, G.; Sokar, M. I.; Kohm; Auml; Scher, T. 2008. "Design and fuel economy of a series hydraulic hybrid vehicle". Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power, v. 2008, n. 7-1, p. 47-52,

Achten, P. a. J.; Vael, G. E. M.; Kohmäscher, T.; Sokar, M. I., 2008, "Energy efficiency of the Hybrid". International Fluid Power Conference 6. Dresden, Germany

Adel, B.; Youtong, Z.; Shuai, S. 2010. "Simulation and comparison of HEV battery control for best fuel economy and longer battery life". World Electric Vehicle Journal, v. 4, n. 2, p. 421-426,

Anderson, J. E.; Dicicco, D. M.; Ginder, J. M.; Kramer, U.; Leone, T. G.; Raney-Pablo, H. E.; Wallington, T. J. 2012. "High octane number ethanol-gasoline blends: Quantifying the potential benefits in the United States". Fuel, v. 97, p. 585-594, 2012/07/01/ ISSN 0016-2361.

Anp. Média de preço do combustível no Brasil. Disponível em: [http://preco.anp.gov.br/include/Resumo\\_Ultimos\\_Meses\\_Index.asp](http://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Ultimos_Meses_Index.asp). Acesso em: 01 de jan 2020, 2019.

Baêta, J. G. C.; Silva, T. R. V.; Netto, N. a. D.; Malaquias, A. C. T.; Filho, F. a. R.; Pontoppidan, M. 2018. "Full spark authority in a highly boosted ethanol DISI prototype engine". Applied Thermal Engineering, v. 139, p. 35-46, 2018/07/05/ ISSN 1359-4311.

Banerjee, P.; Ivantysynova, M. 2018. "Development of a Torque-Based Control Strategy for a Mode-Switching Hydraulic Hybrid Passenger Vehicle". SAE Technical Paper, p. 01-1007,

Baptista, P.; Ribau, J.; Bravo, J.; Silva, C.; Adcock, P.; Kells, A. 2010. "Fuel Cell Hybrid Taxi Wheel-to-Wheel Life-Cycle Analysis". World Electric Vehicle Journal v. Vol. 4, p. 000798,

Baratta, M.; Rapetto, N., 2014, "Fluid Dynamic and Numerical Aspects in the Simulation of Direct CNG Injection in Spark Ignition Engines". Computers & Fluids. 103: 215 - 233 p.

Barbosa, T. P.; Da Silva, L. a. R.; Pujatti, F. J. P.; Gutiérrez, J. C. H. 2020. "Hydraulic hybrid passenger vehicle: Fuel savings possibilities". Mechanics Based Design of Structures and Machines, p. 1-19, ISSN 1539-7734.

Barlow, T. J. **A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions: Version 3.** IHS, 2009.

Bender, F. A.; Bosse, T.; Sawodny, O. 2014. "An investigation on the fuel savings potential of hybrid hydraulic refuse collection vehicles". *Waste management*, v. 34, n. 9, p. 1577-1583, ISSN 0956-053X.

Bender, F. A.; Kaszynski, M.; Sawodny, O. 2013a. "Drive Cycle Prediction and Energy Management Optimization for Hybrid Hydraulic Vehicles". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 62, n. 8, p. 3581-3592, ISSN 0018-9545.

\_\_\_\_\_. 2013b. "Location-based energy management optimization for hybrid hydraulic vehicles" In: 2013 American Control Conference, 17-19 June 2013. p.402-407.

Bohac, S. V.; Baker, D. M.; Assanis, D. N., 1996, "A Global Model for Steady State and Transient S.I. Engine Heat Transfer Studies". SAE TECHNICAL PAPER SERIES. 960073

Breetz, H. L.; Salon, D. 2018. "Do electric vehicles need subsidies? Ownership costs for conventional, hybrid, and electric vehicles in 14 U.S. cities". *Energy Policy*, v. 120, p. 238-249, 2018/09/01/ ISSN 0301-4215.

Broekaert, S.; Demuyneck, J.; De Cuyper, T.; De Paepe, M.; Verhelst, S., 2016, "Heat Transfer in Premixed Spark Ignition Engines Part 1: Identification of the Factors Influencing Heat Transfer". *Energy*. 116: 380 - 391 p.

Buchwald, P.; Christensen, G.; Larsen, H.; Pedersen, P. S. 1979. "Improvement of Citybus Fuel Economy Using a Hydraulic Hybrid Propulsion System &#x2014; A Theoretical and Experimental Study". *SAE Transactions*, v. 88, p. 1042-1056, ISSN 0096736X, 25771531.

Chen, J.-S. 2015. "Energy Efficiency Comparison between Hydraulic Hybrid and Hybrid Electric Vehicles". *Energies*, v. 8, n. 6, p. 4697, ISSN 1996-1073.

Clenci, A. C.; Iorga-Simăn, V.; Deligant, M.; Podevin, P.; Descombes, G.; Niculescu, R. 2014. "A CFD (computational fluid dynamics) study on the effects of operating an engine with low intake valve lift at idle corresponding speed". *Energy*, v. 71, p. 202-217, ISSN 0360-5442.

Coimbra, C. D. L., 2014, "Hydraulic hybrid transmission system applied on urban buses, preliminary analysis of feasibility in Brazilian market. ". 23rd SAE Brasuk International Congress and display mobility Technology. São Paulo

Cole, D. E. **Elementary Vehicle Dynamics.** Department of Mechanical Engineering, the University of Michigan, 1972.

Conpet. Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular. Disponível em: <http://pbeveicular.petrobras.com.br/TabelaConsumo.aspx>. Acesso em: 01 de jan 2020, 2019.

Corrêa, F. C. 2013. "Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela". f. PhD - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, Brasil.

Da Silva, R. E.; Sobrinho, P. M.; De Souza, T. M. 2018. "How can energy prices and subsidies accelerate the integration of electric vehicles in Brazil? An economic analysis". *The Electricity Journal*, v. 31, n. 3, p. 16-22, 2018/04/01/ ISSN 1040-6190.

Detran. Taxas de licenciamento no Estado de São Paulo. Disponível em: <https://www.detran.sp.gov.br>. Acesso em: 01 de jan 2020, 2019.

Doe. Vehicle Cost Calculator. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/calc>. Acesso em: 01 de jan 2020, 2019.

Doucette, R.; Mcculloch, M. 2011. "A comparison of high-speed flywheels, batteries, and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle". *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 3, p. 1163-1170,

Eckert, J. J. 2017. "Desenvolvimento de bancada dinamométrica para validação da influência da estratégia de troca de marchas na dinâmica veicular longitudinal". f. PhD - Unicamp.

Eckert, J. J.; Santiciolli, F. M.; Bertoti, E.; Costa, E. D. S.; Corrêa, F. C.; Silva, L. C. D. a. E.; Dedini, F. G. 2018. "Gear shifting multi-objective optimization to improve vehicle performance, fuel consumption, and engine emissions". *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, v. 46, n. 2, p. 238-253, 2018/03/04 ISSN 1539-7734.

Eckert, J. J.; Santiciolli, F. M.; Yamashita, R. Y.; Corrêa, F. C.; Silva, L. C. A.; Dedini, F. G. 2019. "Fuzzy gear shifting control optimisation to improve vehicle performance, fuel consumption and engine emissions". *IET Control Theory & Applications*, v. 13, n. 16, p. 2658-2669, ISSN 1751-8652.

Ehsani, M.; Gao, Y.; Longo, S.; Ebrahimi, K. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles**. 3rd. Boca Raton: CRC Press., 2018. ISBN 9781498761772.

Febabreve. **Informativo - Emplacamentos 2019**. Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. São Paulo. 2019

García, A.; Monsalve-Serrano, J.; Martínez-Boggio, S.; Rückert Roso, V.; Duarte Souza Alvarenga Santos, N. 2020. "Potential of bio-ethanol in different advanced combustion modes for hybrid passenger vehicles". *Renewable Energy*, v. 150, p. 58-77, 2020/05/01/ ISSN 0960-1481.

Gillespie, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 9781560911999.

Guerra, T.; Bravo, J. M.; Ribau, J.; Silva, C. 2012. "The Influences of Energy Storage and Energy Management Strategies on Fuel Consumption of a Fuel Cell Hybrid Vehicle Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling" In: . IFAC Proceedings p.233-240.

Guzzella, L.; Sciarretta, A. **Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization**. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 9783642359132.

Heskitt, M.; Smith, T.; Hopkins, J. **Design & Development of the LCO-140H Series Hydraulic Hybrid Low Floor Transit Bus**. Federal Transit Administration. 2012

Hiremath, S. S.; Ramakrishnan, R.; Singaperumal, M., 2013, "Optimization of process parameters in series hydraulic hybrid system through multi-objective function". 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power; June 3-5; 2013; Linköping; Sweden: Linköping University Electronic Press; Linköpings universitet: 199-205 p.

Holmes, D. G.; Lipo, T. A. **Pulse width modulation for power converters : principles and practice / D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo**. Hoboken, NJ: John Wiley, 2003. ISBN 0471208140.

Hugosson, C., 1992, "Cumulo hydrostatic drive - a vehicle drive with secondary control.". Third Scandinavian International Conference on Fluid Power

Hui, S.; Lifu, Y.; Junqing, J. 2010. "Hydraulic/electric synergy system (HESS) design for heavy hybrid vehicles". Energy, v. 35, n. 12, p. 5328-5335, 2010/12/01/ ISSN 0360-5442.

Hutchinson, T.; Burgess, S.; Herrmann, G. 2014. "Current hybrid-electric powertrain architectures: Applying empirical design data to life cycle assessment and whole-life cost analysis". Applied Energy, v. 119, p. 314-329, 2014/04/15/ ISSN 0306-2619.

Hydac. Hydraulic Accumulators Catalog. Available at: <https://m.hydac.com/fileadmin/pdb/pdf/PRO00000000000000000000003000000051.pdf>. Access date: 01 Dec. 2017 2017.

Hydraulicspneum. 2015. "Hydraulic Pumps". Hydraulics & Pneumatics, v. 68, n. 12, p. 55-59, ISSN 0018814X.

Ibrahim, M. S. A. 2011. "Investigation of Hydraulic Transmissions for Passenger Cars". f. PhD - RWTH Aachen University, Aachen, Germany.

Inovar-Auto. **Programa de incentivo à inovação tecnológica e adensamento da cadeia produtiva de veículos automotores**. . INOVAR-AUTO. 2012

Jazar, R. N. **Vehicle Dynamics: Theory and Application**. Springer New York, 2013. ISBN 9781461485445.

Jeff A.; Dan B.; Jim B.; Mark D.; David H.; John K.; Joe M.; Kevin N.; Lois P.; Mark W. **Progress Report on Clean and Efficient Automotive Technologies 2004**

Kepner, R. P., 2002, "Hydraulic Power Assist – A Demonstration of Hydraulic Hybrid Vehicle Regenerative Braking in a Road Vehicle Application": SAE International

Kim, Y. J.; Filipi, Z., 2007, "Simulation Study of a Series Hydraulic Hybrid Propulsion System for a Light Truck": SAE International

Kumar, R.; Ivantysynova, M. 2011. "An Instantaneous Optimization Based Power Management Strategy to Reduce Fuel Consumption in Hydraulic Hybrids". International Journal of Fluid Power, v. 12, n. 2, p. 15-25, 2011/01/01 ISSN 1439-9776.

- Langari, R.; Jong-Seob, W. 2005. "Intelligent energy management agent for a parallel hybrid vehicle-part I: system architecture and design of the driving situation identification process". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 54, n. 3, p. 925-934, ISSN 1939-9359.
- Laresgoiti, I.; Käbitz, S.; Ecker, M.; Sauer, D. U. 2015. "Modeling mechanical degradation in lithium ion batteries during cycling: Solid electrolyte interphase fracture". *JOURNAL OF POWER SOURCES*, v. 300, p. 112-122, 2015/12/30/ ISSN 0378-7753.
- Lin, C.-C.; Filipi, Z.; Louca, L. S.; Peng, H.; Assanis, D.; Stein, J. L. 2004. "Modelling and control of a medium-duty hybrid electric truck". *International Journal of Heavy Vehicles Systems*, v. 11, p. 349-370,
- Lin, C.-C.; Peng, H.; Grizzle, J. 2004. "A stochastic control strategy for hybrid electric vehicles" In: *Proceedings of the 2004 American control conference*, IEEE, p.4710-4715.
- Louvigny, Y.; Nzisabira, J.; Duysinx, P., 2007, "Analysis of hydraulic hybrid vehicles and economical comparison with hybrid electric vehicles". *EET2007 European Ele-Drive Transportation Conference*. Bruxelles, Belgique
- Lynn, A.; Smid, E.; Eshraghi, M.; Caldwell, N.; Woody, D. 2005. "Modeling hydraulic regenerative hybrid vehicles using AMESim and Matlab/Simulink" In: *Enabling technologies for simulation science IX*, International Society for Optics and Photonics, p.24-41.
- Macor, A.; Benato, A.; Rossetti, A.; Bettio, Z. 2017. "Study and Simulation of a Hydraulic Hybrid Powertrain". *Energy Procedia*, v. 126, p. 1131-1138, 2017/09/01/ ISSN 1876-6102.
- Macor, A.; Tramontan, M. 2007. "Hydrostatic Hybrid System: System Definition and Application". *International Journal of Fluid Power*, v. 8, n. 2, p. 47-62, 2007/01/01 ISSN 1439-9776.
- Mahyiddin, S. H.; Mohamed, M. R.; Mustaffa, Z.; Khor, A. C.; Sulaiman, M. H.; Ahmad, H.; Rahman, S. A. 2016. "Fuzzy logic energy management system of series hybrid electric vehicle" In: *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, 14-15 Nov. 2016. p.1-6.
- Malaquias, A. C. T.; Netto, N. a. D.; Filho, F. a. R.; Da Costa, R. B. R.; Langeani, M.; Baêta, J. G. C. 2019. "The misleading total replacement of internal combustion engines by electric motors and a study of the Brazilian ethanol importance for the sustainable future of mobility: a review". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 41, n. 12, p. 567, 2019/11/18 ISSN 1806-3691.
- Maldonado, T.; Longo, L.; Pavão, J.; Voese, S. 2018. "Valeu a pena a compra? Análise do custo total de propriedade de veículos de passeio mais vendidos no Brasil" In: *XXV Congresso Brasileiro de Custos*, Vitória, ES.
- Markel, T.; Brooker, A.; Hendricks, T.; Johnson, V.; Kelly, K.; Kramer, B.; O'keefe, M.; Sprik, S.; Wipke, K. 2002. "ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling". *JOURNAL OF POWER SOURCES*, v. 110, n. 2, p. 255-266, 2002/08/22/ ISSN 0378-7753.



Mashadi, B.; Amiri-Rad, Y.; Afkar, A.; Mahmoodi-Kaleybar, M. 2014. "Simulation of automobile fuel consumption and emissions for various driver's manual shifting habits". Journal of Central South University, v. 21, n. 3, p. 1058-1066, 2014/03/01 ISSN 2227-5223.

Matheson, P.; Stecki, J. 2003. "Development and Simulation of a Hydraulic-Hybrid Powertrain for use in Commercial Heavy Vehicles". SAE Transactions, v. 112, p. 114-123, ISSN 0096736X, 25771531.

Millo, F.; Luisi, S.; Borean, F.; Stroppiana, A., 2014, "Numerical and Experimental Investigation on Combustion Characteristics of a Spark Ignition Engine with an Early Intake Valve Closing Load Control". Fuel. 121: 298 - 310 p.

**Mma. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013.** Ministério do Meio Ambiente, p.34-35. 2014

Mohan, G.; Assadian, F.; Longo, S. 2013. "Comparative analysis of forward-facing models vs backwardfacing models in powertrain component sizing" In: IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013), 6-7 Nov. 2013. p.1-6.

Motorreviewer. Nissan Leaf battery pack. Disponível em: [https://www.motorreviewer.com/ev\\_powertrain.php?id=1](https://www.motorreviewer.com/ev_powertrain.php?id=1). Acesso em: 16 de dez. 2019, 2019.

Neffati, A.; Caux, S.; Fadel, M. 2012. "Fuzzy switching of fuzzy rules for energy management in HEV". IFAC Proceedings Volumes, v. 45, n. 21, p. 663-668, 2012/01/01/ ISSN 1474-6670.

Nissan. Nissan March 2013 1.0 S Flex. Disponível em: <https://www.car.blog.br/2012/08/nissan-march-2013-10-s-flex-fotos-preco.html>. Acesso em: 25 de set. 2018, 2012.

Oecd. 2004, "Can Cars Come Clean? Strategies for low-emission vehicles, ". International Transport Forum: Organization for Economic Cooperation and Development

Oica. 2004."Proposal for a draft amendment to the 05 series of amendments to regulation No. 83 (emissions of M1 and N1 categories of vehicles)  
" In: World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29),

Omar, N.; Daowd, M.; Bossche, P. V. D.; Hegazy, O.; Smekens, J.; Coosemans, T.; Mierlo, J. V. 2012. "Rechargeable Energy Storage Systems for Plug-in Hybrid Electric Vehicles— Assessment of Electrical Characteristics". Energies, v. 5, n. 8, p. 2952-2988, ISSN 1996-1073.

Omar, N.; Monem, M. A.; Firouz, Y.; Salminen, J.; Smekens, J.; Hegazy, O.; Gaulous, H.; Mulder, G.; Van Den Bossche, P.; Coosemans, T.; Van Mierlo, J. 2014. "Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model". Applied Energy, v. 113, p. 1575-1585, 2014/01/01/ ISSN 0306-2619.

Pbev. Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular. Disponível em: <http://pbeveicular.petrobras.com.br/TabelaConsumo.aspx>. Acesso em: 18 de jun., 2019.

Piedrahita, C. a. R. **Contribución al Conocimiento del Comportamiento Térmico y la Gestión Térmica de los Motores de Combustión Interna Alternativos**. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2009.

Plotkin, S. E., 2009, "Examining Fuel Economy and Carbon Standards for Light Vehicles". *Energy Policy*. 37: 3843 - 3853 p.

Pourmovahed, A.; Baum, S. A.; Fronczak, F. J.; Beachley, N. H. 1988. "Experimental evaluation of hydraulic accumulator efficiency with and without elastomeric foam". *Journal of Propulsion and Power*, v. 4, n. 2, p. 185-192, 1988/03/01 ISSN 0748-4658.

Puddu, P.; Paderi, M. 2013. "Hydro-pneumatic accumulators for vehicles kinetic energy storage: Influence of gas compressibility and thermal losses on storage capability". *Energy (Oxford)*, p. 326-335, ISSN 0360-5442.

Rajagopalan, A.; Washington, G. **Intelligent control of hybrid electric vehicles using GPS information**. SAE Technical Paper. 2002. (0148-7191)

Renault. Motor D4D 1.0 16V Renault. Disponível em: <https://www.carrosnaweb.com.br/fichadetalhe.asp?codigo=6596>. Acesso em: 16 de out. 2018, 2013.

Rexroth. Axial Piston Variable Displacement Motor A2FM. Disponível em: <https://bit.ly/2SKwodb>. Acesso em: 30 de dez. 2019, 2019a.

\_\_\_\_\_. Axial Piston Variable Displacement Motor A6VM. Disponível em: [http://www.groupvh.dk/datasheets\\_productpdfs/A6VM\\_RE%2091%20604\\_1845659C-0F2C-4E6A-8589-B4C9B4CB0A14.pdf](http://www.groupvh.dk/datasheets_productpdfs/A6VM_RE%2091%20604_1845659C-0F2C-4E6A-8589-B4C9B4CB0A14.pdf). Acesso em: 16 de mai. 2019, 2019b.

Ribau, J.; Viegas, R.; Angelino, A.; Moutinho, A.; Silva, C. 2014. "A new offline optimization approach for designing a fuel cell hybrid bus". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 42, p. 14-27, 2014/05/01/ ISSN 0968-090X.

Rydberg, K.-E., 2009, "Energy Efficient Hydraulic Hybrid Drives". 11:th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'09, June 2-4, Linköping, Sweden

Sampaio, M. R.; Rosa, L. P.; D'Agosto, M. D. A. 2007. "Ethanol–electric propulsion as a sustainable technological alternative for urban buses in Brazil". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 11, n. 7, p. 1514-1529, 2007/09/01/ ISSN 1364-0321.

Sarvestani, A. S.; Safavi, A. A. 2009. "A novel optimal energy management strategy based on fuzzy logic for a Hybrid Electric Vehicle" In: 2009 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 11-12 Nov. 2009. p.141-145.

Seguroauto. Preço médio do seguro para diferentes modelos de veículos. Disponível em: <https://www.seguroauto.org/>. Acesso em: 01 de jan 2020, 2019.

Serrao, L.; Chehab, Z.; Guezennet, Y.; Rizzoni, G. 2005. "An aging model of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicles" In: 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 7-7 Sept. 2005. p.8 pp.

Sperry Vickers, I.; Hydraulics, S. **Industrial hydraulics manual**. [Troy, Mich.]: The School, 1982.

Sprenkel, M.; Bleazard, T.; Haria, H.; Ivantysynova, M. 2015. "Implementation of a novel hydraulic hybrid powertrain in a sports utility vehicle". IFAC-PapersOnLine, v. 48, n. 15, p. 187-194, ISSN 2405-8963.

Stecki, J.; Matheson, P. 2005. "Advances in automotive hydraulic hybrid drives" In: Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power, The Japan Fluid Power System Society, p.664-669.

Stelson, K. A.; Meyer, J. J.; Alleyne, A. G.; Hancey, B. 2008. "Optimization of a Passenger Hydraulic Hybrid Vehicle to Improve Fuel Economy". Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power, v. 2008, n. 7-1, p. 143-148,

Stroganov, A.; Sheshin, L. 2011. "Improvement of Heat-Regenerative Hydraulic accumulators.". Ventil, v. 17, p. 322-344,

Suarez-Bertoa, R.; Zardini, A. A.; Keuken, H.; Astorga, C. 2015. "Impact of ethanol containing gasoline blends on emissions from a flex-fuel vehicle tested over the Worldwide Harmonized Light duty Test Cycle (WLTC)". Fuel, v. 143, p. 173-182, 2015/03/01/ ISSN 0016-2361.

Tang, L.; Rizzoni, G.; Onori, S. 2015. "Energy Management Strategy for HEVs Including Battery Life Optimization". IEEE Transactions on Transportation Electrification, v. 1, n. 3, p. 211-222, ISSN 2372-2088.

Thomas, E. V.; Case, H. L.; Doughty, D. H.; Jungst, R. G.; Nagasubramanian, G.; Roth, E. P. 2003. "Accelerated power degradation of Li-ion cells". JOURNAL OF POWER SOURCES, v. 124, n. 1, p. 254-260, 2003/10/01/ ISSN 0378-7753.

Torregrosa, A.; Olmeda, P.; Degraeuwe, B.; Reyes, M., 2006, "A Concise Wall Temperature Model for D.I. Diesel Engines". Applied Thermal Engineering. 26: 1320-1327 p.

Toulson, E. R. 2008. "Evaluation of a hybrid hydraulic launch assist system for use in small road vehicles" In: 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 30 June-2 July 2008. p.967-972.

Toyota. Toyota apresenta primeiro protótipo de veículo híbrido flex do mundo Disponível em: <https://www.toyota.com.br/mundo-toyota/noticias/toyota-apresenta-primeiro-prototipo-de-veiculo-hibrido-flex-do-mundo/>. Acesso em: 14 de jan 2020, 2018.

Vael, G.; Achten, P.; Brink, T., 2009, "Efficiency of a Variable Displacement Open Circuit Floating Cup Pump". The 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP'09. Linköping, Sweden

Von Linsingen, I. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos**. 4ª. UFSC, 2013. ISBN 8532806465.

Wakefield, E. H. **History of the electric automobile : battery-only powered cars**. Warrendale, PA: Soc. of Automotive Engineers, 1994. ISBN 1560912995 9781560912996.

- Wang, M.; Han, J.; Dunn, J. B.; Cai, H.; Elgowainy, A. 2012. "Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use". *Environmental Research Letters*, v. 7, n. 4, p. 045905, 2012/12/01 ISSN 1748-9326.
- Wasbari, F.; Bakar, R. A.; Gan, L. M.; Tahir, M. M.; Yusof, A. A. 2017. "A review of compressed-air hybrid technology in vehicle system". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 67, p. 935-953, 2017/01/01/ ISSN 1364-0321.
- Webmotors. Preços de veículos no Brasil. Disponível em: <https://www.webmotors.com.br/>  
Acesso em: 01 de jan 2020, 2019.
- Wipke, K. B.; Cuddy, M. R.; Burch, S. D. 1999. "ADVISOR 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 48, n. 6, p. 1751-1761,
- Won, J.-S.; Langari, R. 2002. "Fuzzy torque distribution control for a parallel hybrid vehicle". *Expert Systems*, v. 19, n. 1, p. 4-10, ISSN 0266-4720.
- Wong, J. Y. **Theory of Ground Vehicles**. Wiley, 2001. ISBN 9780471354611.
- Wu, B.; Lin, C.-C.; Filipi, Z.; Peng, H.; Assanis, D. 2004. "Optimal Power Management for a Hydraulic Hybrid Delivery Truck". *Vehicle System Dynamics*, v. 42, n. 1-2, p. 23-40, 2004/12/01 ISSN 0042-3114.
- Yang, Y.; Luo, C.; Li, P. 2017. "Regenerative Braking Control Strategy of Electric-Hydraulic Hybrid (EHH) Vehicle". *Energies*, v. 10, n. 7, p. 1038,
- Zhao, Z. G.; Chen, H. J.; Zhen, Z. X.; Yang, Y. Y. 2014. "Optimal torque coordinating control of the launching with twin clutches simultaneously involved for dry dual-clutch transmission". *Vehicle System Dynamics*, v. 52, n. 6, p. 776-801, 2014/06/03 ISSN 0042-3114.
- Zhou, B.; Liu, X.; Cao, Y.; Li, C.; Chung, C. Y.; Chan, K. W. 2016. "Optimal scheduling of virtual power plant with battery degradation cost". *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 10, n. 3, p. 712-725, ISSN 1751-8695.