



Fernando Zegarra Sánchez

Eficiência Energética de Veículos Elétricos Híbridos em Série

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2012



Fernando Zegarra Sánchez

Eficiência Energética de Veículos Elétricos Híbridos em Série

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Mauro Speranza Neto

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Fevereiro de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Fernando Zegarra Sánchez

Graduou-se em Engenharia Mecatrônica na *Universidad Nacional de Ingeniería*, Lima - Peru, em Julho de 2007. Desde 2007 até 2010 atuou como engenheiro de projetos e manutenção em diversas firmas peruanas, na área de subestações elétricas e maquinaria para mineração.

Ficha Catalográfica

Sánchez, Fernando Zegarra

Eficiência Energética de Veículos Elétricos Híbridos em Série / Fernando Zegarra Sánchez; orientador: Sergio Leal Braga. — Rio de Janeiro PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

v., 147 f: il. (color) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Eficiência do Veículo Elétrico Híbrido em Série. 3. Motor Embutido na Roda. 4. Economia do Recurso Energético. I. Braga, Sergio Leal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

Dedico este trabalho a minha mãe Berta, a meu tio Lidio e a toda minha família, pelo imenso amor e apoio desde meus primeiros anos de vida.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Sérgio Leal Braga pela confiança e parceria para a realização deste trabalho e de todo o mestrado.

A ANP - PRH 07 e à PUC - Rio, pelo suporte financeiro e auxílios concedidos para o desenvolvimento.

A Petrobras pelo apoio com o empréstimo do equipamento para medição do combustível, já que graças a ele atingiram-se os objetivos deste trabalho.

Ao meu amigo e engenheiro do LEV Giovanni Calfa Neto pela amizade, apoio e compressão durante o desenvolvimento do trabalho final. Agradeço de uma forma especial a ele já que muitas vezes, com sua experiência, me permitiu esclarecer algumas dúvidas e ter a oportunidade de aprender muitas coisas.

A minha mãe Berta e meu tio Lidio pela compressão, paciência e esforço realizado para ter a oportunidade de estudar neste país.

Ao meu amigo e responsável do LEV Julio Cuisano pela amizade, apoio no desenvolvimento do trabalho final.

Aos engenheiros Severino Wanderley e Nestor Cotelo pela grande amizade e apoio técnico na instalação dos sistemas eletrônicos necessários da bancada.

Aos meus colegas de trabalho Gustavo Viana, Marvin Chancán, Juan Carlos Valdez, Nestor Galvez e Leonardo Braga pela amizade, apoio incondicional e confiança durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos técnicos do LEV Gilson Coutinho e Gerson Silveiro pelo apoio durante a montagem dos equipamentos. Também um agradecimento aos funcionários do ITUC por brindar sua amizade e apoio para a conclusão de meu trabalho final.

Aos meus amigos de pós-graduação da PUC com os que passei bons momentos neste tempo: Nilton, Jose Francisco, Elder, Dario, Anthony, Darwin, Luís, Luís Alberto e Thomas.

Aos meus amigos brasileiros Gabriel, Fred, Pedro, Augusto, Rodolfo e Lucas pela amizade que tive com eles durante todo o período do mestrado e todos os bons momentos que passamos juntos.

Resumo

Sánchez, Fernando Zegarra; Braga, Sergio Leal. **Eficiência Energética de Veículos Elétricos Híbridos em Série**. Rio de Janeiro, 2012. 147p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesta dissertação apresenta-se a avaliação da eficiência energética do Veículo Elétrico Híbrido em Série mediante o desenvolvimento teórico de dois protótipos de sistemas de propulsão elétrica e o estudo experimental do consumo de combustível do veículo original. A análise experimental foi feita mediante o desenvolvimento de uma bancada de teste, composta principalmente por um dinamômetro de chassi, um piloto automático e um medidor de vazão de combustível, acompanhado de toda a eletrônica que fez possível a aquisição de dados em cada teste. Neste estudo desenvolvem-se dois modelos teóricos de arquitetura para o sistema de propulsão do VEH, o primeiro composto de quatro motores, cada um embutido nas rodas do veículo, e o segundo composto por dois motores, cada um embutido nas rodas do eixo traseiro do veículo. Existem diversos procedimentos para poder embutir um motor na roda do veículo, o que se deve ter em conta é o peso, a potência e a eficiência na transmissão de potência. No desenvolvimento teórico do sistema de propulsão em cada roda, faz-se necessário o uso do redutor cicloidal, o qual permite uma redução de 3:1 até 119:1 em um só estágio com uma eficiência de transmissão de 93%, conjuntamente com um motor de corrente contínua sem escovas, o qual tem uma alta densidade de potência. Os resultados da avaliação do sistema de propulsão elétrica dos protótipos mostram que o modelo de quatro motores nas rodas é mais eficiente em comparação com o modelo de dois motores embutidos nas rodas. Isto se deve ao fato do segundo modelo ser mais pesado, já que precisa uma maior quantidade de baterias e além disso de motores mais robustos. Na avaliação do consumo energético do VEH em comparação com o modelo original a gasolina, obtiveram-se resultados interessantes referentes à economia na utilização do recurso energético. O VEH teve um comportamento melhor em ciclos urbanos que em ciclos de estrada e a economia do recurso energético alcança 57,6% quando se testa com ciclos urbanos e 11,4% em ciclos de estrada.

Palavras-chave

Eficiência do Veículo Elétrico Híbrido em Série Motor Embutido na Roda Economia do Recurso Energético

Abstract

Sánchez, Fernando Zegarra; Braga, Sergio Leal (Advisor). **Energy Efficiency of Series Hybrid Electric Vehicles**. Rio de Janeiro, 2012. 147p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation presents the evaluation of the energy efficiency of a series hybrid electric vehicle through the theoretical development of two electric propulsion systems and an experimental study of fuel consumption of the original vehicle. The experimental analysis was done by a test setting, consisting mainly by a chassis dynamometer, an autopilot system and a fuel flowmeter, all connected to the data acquisition system. In this study it was developed two theoretical models of propulsion systems for HEV. The first one consists of four in-wheel motors and the second one consists of two in-wheel motors on the rear axle. There are various methods for embedding a motor in the wheel. It is necessary to consider the weight, power and transmission efficiency. In the theoretical model it was considered a cycloidal reducer, which allows a reduction of 3:1 to 119:1 in one stage with an efficiency of 93%, together with a brushless DC motor, which has a high power density. The results of the evaluation of the electric propulsion systems show that the model with four in-wheel motors is more efficient than the model with two in-wheel motors. This is a consequence of the fact that the second model is heavier, because it needs a bigger amount of batteries and more robust motors. In the evaluation of the HEV energy consumption in comparison with the original gasoline model, it was observed interesting results regarding the energy savings. The HEV presents better performance in urban cycles that in road cycles, saving 57,6% of the consumed energy in urban cycles and 11,4% in road cycles.

Keywords

Efficiency of Series Hybrid Electric Vehicle In-Wheel Motor Saving of Energy Resource

Sumário

Sumário das notações	14
1 Introdução	17
1.1 Objetivo	19
1.2 Poluição Atmosférica	20
1.2.1 Fatores de Emissão	20
1.2.2 Sumário das Emissões por Tipo de Gás	21
1.3 Descrição da Dissertação	22
2 Revisão Bibliográfica	25
2.1 A influência do Parque Automotor	25
2.1.1 Poluição Produzida pelos Veículos Leves	26
2.1.2 Economia do Recurso Energético	29
2.2 Veículos Híbridos	30
2.2.1 Veículos Híbridos Elétricos	31
2.2.2 Sistema de Tração Elétrica	35
2.2.3 Esforço de Tração e Requerimento de Transmissão	42
2.2.4 Consumo de Energia	48
2.2.5 Motor Elétrico de Tração	50
2.2.6 Bateria	56
2.2.7 Redutor Cicloidal	58
2.3 Ciclos de Condução	60
2.3.1 Ciclos de Condução Urbano	60
2.3.2 Ciclo de Condução de Estrada	62
3 Aparato Experimental	64
3.1 Equipamentos e Dispositivos de Medição e Controle	66
3.1.1 Veículo Peugeot 3008 1.6	66
3.1.2 Dinamômetro de Chassis AVL - ZÖLLNER 48	69
3.1.3 Sistema Autopiloto SAP2000 (Robô Stähle)	71
3.1.4 Medidor de Vazão Mássica	74
3.1.5 Ventilador Axial	75
3.2 Sistema de Controle e Aquisição de dados	76
3.2.1 Sistema de Controle	77
3.2.2 Sistema de Aquisição de Dados	79
4 Modelamento Teórico do Veículo Elétrico Híbrido	81
4.1 Forças que atuam sobre o Veículo	82
4.2 Sistema Híbrido Elétrico	84
4.2.1 Sistema de Transmissão	85
4.2.2 Sistema de Armazenamento de Energia	86
4.2.3 Sistema de Geração de Energia Elétrica	88
4.2.4 Eficiência Energética	89

5	Resultados e Discussões	92
5.1	Avaliação da Eficiência para cada tipo de veículo	92
5.1.1	Avaliação da Eficiência mediante o Ciclo New York City Cycle	92
5.1.2	Avaliação dos Protótipos mediante o Ciclo Japan 10-15	95
5.1.3	Avaliação dos Protótipos mediante o Ciclo Japan 11	97
5.1.4	Avaliação dos Protótipos mediante o Ciclo FTP-72	99
5.1.5	Avaliação dos Protótipos mediante o Ciclo EPA Highway	101
5.2	Avaliação da Eficiência Energética do VEH	103
5.2.1	Avaliação do VEH mediante o Ciclo New York City Cycle	104
5.2.2	Avaliação do VEH mediante o Ciclo Japan 10-15	106
5.2.3	Avaliação do VEH mediante o Ciclo Japan 11	107
5.2.4	Avaliação do VEH mediante o Ciclo FTP-72	108
5.2.5	Avaliação do VEH mediante o Ciclo EPA Highway	110
5.3	Análise do Consumo a Velocidade Constante	111
6	Conclusões e Recomendações	115
6.1	Conclusões	115
6.2	Recomendações Finais para Trabalhos Futuros	117
	Referências Bibliográficas	118
A	Eficiência do Motor Elétrico	122
A.1	Eficiência do Motor LEM200 D127	122
A.2	Eficiência do Motor Hitor UQM380	123
B	Software de Simulação do Consumo Energético do VEH	125
C	Análise das Incertezas	138
C.1	Análise na Medição de Variáveis	138
C.2	Propagação das incertezas	139
C.3	Incerteza dos Dados Aquisitados	139
C.3.1	Velocidade	139
C.3.2	Vazão de Combustível	140
C.4	Incerteza das Grandezas Calculadas	140
C.4.1	Força Aerodinâmica	140
C.4.2	Força de Rolamento	141
C.4.3	Força de Aceleração	142
C.4.4	Força Total	143
C.4.5	Potência Fornecida ao Veículo	144
C.4.6	Potência Regenerativa	145
C.4.7	Energia	146

Lista de figuras

2.1	Emissões relativas de poluentes por tipo de fonte - 2009.	26
2.2	Thomas Edison e o Veículo Elétrico da Detroit Electric 1913.	31
2.3	Classificação dos Veículos Elétricos Híbridos.	32
2.4	Configuração de Arquitetura em Série de um VEH.	33
2.5	Configuração de uma Arquitetura em Paralelo.	34
2.6	Configuração de uma Arquitetura Série - Paralelo.	35
2.7	Conversão de um VC a um VE.	36
2.8	Configuração Conceitual de um Veículo Elétrico.	37
2.9	Tipos de Configurações de Sistemas de Tração Elétrica.	38
2.10	Motor, Caixa de Engrenagem e Diferencial.	40
2.11	Motor - Planetário e Transmissão Compacta.	40
2.12	Motor Embutido na Roda Mediante o Redutor Cicloidal.	41
2.13	Características típicas de um motor elétrico de rotação variável.	42
2.14	Força de Tração em função da Velocidade, para um motor de tração com $x=2$, e uma transmissão de três marchas.	43
2.15	Forças que atuam sobre um veículo em movimento.	44
2.16	Potência versus Fator de Velocidade.	47
2.17	Ciclo de Condução comum para a Norma SAE J227a.	48
2.18	Sistema Típico de Propulsão Elétrica.	50
2.19	Classificação dos tipos de motores elétricos	52
2.20	Esquema de um Motor de Corrente Contínua	53
2.21	Tipos de Motores de Relutância Variável.	54
2.22	Célula Prismática AMP20	56
2.23	Esquema da Engrenagem K-H-V tipo Planetária	59
2.24	Estrutura Básica do Redutor Cicloidal.	59
2.25	The New York City Cycle Driving Schedule - EPA NYCC	61
2.26	Japanese 10-15 Dynamometer Driving Schedule	61
2.27	Japanese 11 Dynamometer Driving Schedule	62
2.28	EPA Urban Dynamometer Driving Schedule (FTP-72)	63
2.29	EPA Highway Fuel Economy Test Driving Schedule	63
3.1	Bancada de Teste.	65
3.2	Dimensões (mm) do Veículo Peugeot 3008 1.6.	66
3.3	Fotografias do Veículo Peugeot 3008 1.6 no Dinamômetro de Chassis.	67
3.4	Dinamômetro AVL - ZÖLLNER 48.	69
3.5	Robô Stähle SAP2000.	72
3.6	Sistema de Aquisição da Vazão de Combustível.	74
3.7	Interface de Configuração do DFL-ELETR.	76
3.8	Ventilador DES.47 SV.490.B12.	76
3.9	Tela da Interface de Usuário do Dinamômetro AVL - ZÖLLNER 48	78
3.10	Tela da Interface de Usuário do Robô Stähle SAP2000	79
3.11	Tela da Interface de Usuário do Dinamômetro AVL - ZÖLLNER 48, Aquisição de Dados	80

5.1	Comportamento da Potência fornecida ao veículo durante o percurso - NYCC	93
5.2	Comportamento da Potência Regenerada pelo conjunto de motores elétricos durante o percurso - NYCC	93
5.3	Comportamento da Energia na Bateria durante 120 vezes o percurso - NYCC	94
5.4	Comportamento da Potência do Gerador durante 120 vezes o percurso - NYCC	94
5.5	Comportamento da Potência fornecida ao veículo durante o percurso - JP10-15	95
5.6	Comportamento da Potência Regenerada pelo conjunto de motores elétricos durante o percurso - JP10-15	95
5.7	Comportamento da Energia na Bateria durante 80 vezes o percurso - JP10-15	96
5.8	Comportamento da Potência do Gerador durante 80 vezes o percurso - JP10-15	96
5.9	Comportamento da Potência fornecida ao veículo durante o percurso - JP11	98
5.10	Comportamento da Potência Regenerada pelo conjunto de motores elétricos durante o percurso - JP11	98
5.11	Comportamento da Energia na Bateria durante 140 vezes o percurso - JP11	99
5.12	Comportamento da Potência do Gerador durante 140 vezes o percurso - JP11	99
5.13	Comportamento da Potência fornecida ao veículo durante o percurso - FTP-72	100
5.14	Comportamento da Potência Regenerada pelo conjunto de motores elétricos durante o percurso - FTP-72	100
5.15	Comportamento da Energia na Bateria durante 55 vezes o percurso - FTP-72	101
5.16	Comportamento da Potência do Gerador durante 55 vezes o percurso - FTP-72	102
5.17	Comportamento da Potência fornecida ao veículo durante o percurso - EPA Highway	102
5.18	Comportamento da Potência Regenerada pelo conjunto de motores elétricos durante o percurso - EPA Highway	103
5.19	Comportamento da Energia na Bateria durante 100 vezes o percurso - EPA Highway	104
5.20	Comportamento da Potência do Gerador durante 100 vezes o percurso - EPA Highway	104
5.21	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 4 motores vs Veículo convencional - NYCC	105
5.22	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 2 motores vs Veículo convencional - NYCC	105
5.23	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 4 motores vs Veículo convencional - JP10-15	106
5.24	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 2 motores vs Veículo convencional - JP10-15	107

5.25	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 4 motores vs Veículo convencional - JP11	108
5.26	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 2 motores vs Veículo convencional - JP11	108
5.27	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 4 motores vs Veículo convencional - FTP-72	109
5.28	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 2 motores vs Veículo convencional - FTP-72	110
5.29	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 4 motores vs Veículo convencional - EPA Highway	111
5.30	Energia Fornecida ao Sistema - Veículo com 2 motores vs Veículo convencional - EPA Highway	111
5.31	Consumo de Combustível do Veículo Convencional e do VEH	114
A.1	Mapa de Eficiência do Motor (Torque).	123
A.2	Mapa de Eficiência do Motor (Potência).	124

Lista de tabelas

1.1	Emissões e Remoções de CO ₂ no Brasil	21
1.2	Emissões e remoções de CH ₄ no Brasil	23
2.1	Evolução da Frota Veicular no Brasil (2000-2008)	27
2.2	Estimativa de emissão das fontes de poluição do ar na RMSP em 2009.	27
2.3	Frota veicular do Brasil em 2010	28
2.4	Economia de Operação de um Veículo com Propulsão Elétrica.	29
2.5	Ciclos de Condução Normalizada (SAE J227a).	49
2.6	Comparação entre os quatro tipos de motores elétricos	55
2.7	Tipos de Bateria e suas Características	57
3.1	Características Gerais do Peugeot 3008.	68
3.2	Características do Robô Stähle SAP2000.	73
3.3	Características Gerais do Ventilador DES.47 SV.490.B12.	77
4.1	Características do Motor LEM200 D127.	86
4.2	Características do Motor Hitor UQM380.	87
4.3	Níveis de Energia no Sistema de Armazenamento de Energia	88
5.1	Consumo e Eficiência - NYCC	92
5.2	Consumo e Eficiência - Japan 10-15	97
5.3	Consumo e Eficiência - Japan 11	97
5.4	Consumo e Eficiência - FTP-72	101
5.5	Consumo e Eficiência - EPA Highway	103
5.6	Custo da Energia por cada 100 km de percurso - NYCC	106
5.7	Custo da Energia por cada 100 km de percurso - JP10-15	107
5.8	Custo da Energia por cada 100 km de percurso - JP11	109
5.9	Custo da Energia por cada 100 km de percurso - FTP-72	109
5.10	Custo da Energia por cada 100 km de percurso - EPA Highway	110
5.11	Análise de Consumo de Combustível	112
5.12	Eficiência do Veículo Convencional em Regime Constante	113
A.1	Motor: 971974, Modelo: LEM200 D127	122

Sumário das notações

Símbolos Romanos

a	Aceleração
A_f	Área frontal do Veículo
Ah	Ampères - hora
AK	Associação da Industria Automotiva Alemã
ATEX	Atmospheres Explosives
C_D	Coefficiente de Arrasto Aerodinâmico
CA	Corrente Alterna
CC	Corrente Continua
CE	Carter e Evaporativas
CH ₄	Metano
C_XH_Y	Representação Geral dos Hidrocarbonetos
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CSA	Cloud Security Alliance
d	Fator de Rendimento do Veículo
efi	Eficiência do Motor Elétrico
F	Força
Fr	Freagem
f_r	Coefficiente de Resistência ao Rolamento
g	Gravidade
gi	Grau de Inclinação da Estrada
H ₂	Gás Hidrogênio
HU	Unidade de Espessura
GLP	Gás de Petróleo Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
h_g	Altura do 'O'
HC	Hidrocarbonetos não Queimados
i	Relação de Transmissão de Engrenagens
I_w^*	Inércia a ser simulada
ic	Corrente
L	Comprimento Entre os Centros das Rodas
L	Indutância
L_a	Comprimento do 'O' ao Centro da Roda Dianteira

L_b	Comprimento do 'O' ao Centro da Roda Traseira
Li	Lítio
m	Massa do combustível
\dot{m}	Vazão Mássica de Combustível
M	Massa do Veículo
MP	Material Particulado
MRV	Motor de Relutância Variável
NMVOG	Compostos Orgânicos Voláteis não Metânicos
N	Normal
N	Velocidade de Rotação
'O'	Centro de Gravidade do Veículo
OTC	Operação de Transferência de Combustível
P	Potência
PE	Potência Elétrica
PHEV	Veículo Elétrico Híbrido Ligados na Tomada
PN	Pneus
r_d	Radio das Rodas Motrizes
R_g	Inércia Básica do Dinamômetro de Chassis
R_w	Peso de Referencia do Veículo
R^2	Coefficiente de Determinação
RPM	Revoluções por Minuto
s	Slip
s_m	Slip Nominal do Motor
t_a	Tempo de aceleração
T	Torque
Tr	Tração nas rodas
TEV	Tubo de escapamento do Veículo
V	Velocidade
VC	Veículo Convencional
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
x	Relação de Velocidade do Motor
Z	Numero de Lóbulos
Zn	Zinco

Símbolos Gregos

α	Ângulo da Pendente de Subida
β	Fator de Freagem Regenerativa
η_{ene}	Eficiência Energética
η_m	Eficiência do Motor
η_t	Eficiência de Transmissão
δ	Fator de Correção de Massas
ω_m	Velocidade de Rotação
ρ_a	Densidade do Ar
θ	Posição Angular do Rotor

Sub-índice

<i>a</i>	Resistência Aerodinâmica
<i>arr</i>	Arraste
<i>b</i>	Base (Referente à Velocidade)
<i>bat</i>	Bateria
<i>ent</i>	Entrada
<i>ext</i>	Externo
<i>f</i>	Final (Referente à Velocidade)
<i>g</i>	Caixa de Marcha
<i>int</i>	Interno
<i>m</i>	Motor
<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>net</i>	Neto
<i>o</i>	Diferencial
<i>r</i>	Resistência ao Rolamento
<i>rd</i>	Roda Dianteira
<i>reg</i>	Regenerada
<i>rt</i>	Roda Traseira
<i>s</i>	Síncrono (Referente ao Motor)
<i>sai</i>	Saída
<i>t</i>	Tração
<i>x</i>	Resistência à Aceleração