



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Mecânica**

**Samuel Filgueira da Silva**

**Otimização multiobjetivo do controle fuzzy  
e projeto de arquiteturas de trem de potência  
de veículos hibridizados plug-in**

CAMPINAS  
2022

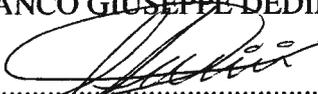
**Samuel Filgueira da Silva**

# **Otimização multiobjetivo do controle fuzzy e projeto de arquiteturas de trem de potência de veículos híbridos plug-in**

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini  
Coorientador: Dr. Jony Javorski Eckert

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO  
SAMUEL FILGUEIRA DA SILVA, E ORIENTADA  
PELO PROF. DR FRANCO GIUSEPPE DEDINI.

  
.....  
ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS  
2022**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Si38o Silva, Samuel Filgueira da, 1993-  
Otimização multiobjetivo do controle fuzzy e projeto de arquiteturas de trem de potência de veículos hibridizados plug-in / Samuel Filgueira da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Franco Giuseppe Dedini.  
Coorientador: Jony Javorski Eckert.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Veículos - Dinâmica. 2. Otimização multiobjetivo. 3. Controle ótimo. 4. Veículos elétricos híbridos. 5. Consumo de combustível. I. Dedini, Franco Giuseppe, 1957-. II. Eckert, Jony Javorski, 1988-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Multiobjective optimization of fuzzy control and plug-in hybrid vehicle powertrain architecture design

**Palavras-chave em inglês:**

Vehicles - Dynamics

Multi-objective optimization

Optimal fuzzy control

Hybrid electric vehicles

Fuel consumption

**Área de concentração:** Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

**Titulação:** Mestre em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Franco Giuseppe Dedini [Orientador]

Gregory Bregion Daniel

Gilberto Francisco Martha de Souza

**Data de defesa:** 14-09-2022

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-7768-0161>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/6638528824706858>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

# **Otimização multiobjetivo do controle fuzzy e projeto de arquiteturas de trem de potência de veículos hibridizados plug-in**

Autor: Samuel Filgueira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Coorientador: Dr. Jony Javorski Eckert

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

**Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini, Presidente**  
**Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**

**Prof. Dr. Gregory Bregion Daniel**  
**Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**

**Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza**  
**Universidade de São Paulo - USP**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 14 de setembro de 2022.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais.

## Agradecimentos

A Deus por tudo aquilo que Ele tem feito na minha vida, renovando minhas forças cada dia mais.

Aos meus pais, Francisca Maria Rodrigues Filgueira e Ivonaldo Regalado da Silva, pelo apoio e incentivo. Muito obrigado por todo amor e carinho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini, pela orientação, confiança no meu trabalho, pelo apoio técnico, pela grande oportunidade de desenvolver pesquisas no Laboratório de Sistemas Integrados (LabSIn) e por sempre promover um ambiente descontraído e de grande união.

Ao meu coorientador Dr. Jony Javorski Eckert, pela orientação, confiança no meu trabalho, disponibilidade diária, compreensão, dedicação, apoio técnico e, principalmente, pela amizade construída durante esse tempo. Muito obrigado pela grande parceria e por todos os ensinamentos durante este período de mestrado.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ludmila Corrêa de Alkmin e Silva, pelos ensinamentos, pela confiança depositada em meu trabalho e pelo apoio técnico em todos os projetos de pesquisa.

A todos os colegas do LabSIn, em especial a Áquila Chagas, Fabio Santiciolli, Maria Augusta Lourenço, Fabrício Silva, Jessica Gentile, Nathália Pinheiro e Matheus Miranda pela parceria nos diversos projetos de pesquisa e pela união no laboratório.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Cristina Correa pelos ensinamentos e apoio técnico em projetos de pesquisa.

Aos professores da banca de qualificação e de defesa, Prof. Dr. Gregory Bregion Daniel e Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, por todas as significativas contribuições ao longo dos exames.

Às Secretarias de Graduação e Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), pelo apoio e suporte.

À PETROBRAS pelo apoio financeiro provido ao longo do período de desenvolvimento deste projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*The credit belongs to the man who knows  
great enthusiasms, the great devotions;  
who spends himself in a worthy cause;  
who at the best knows in the end the  
triumph of high achievement, and who at  
the worst, if he fails, at least fails while  
daring greatly*

---

Theodore Roosevelt

## Resumo

DA SILVA, Samuel Filgueira. Otimização multiobjetivo do controle fuzzy e projeto de arquiteturas de trem de potência de veículos hibridizados plug-in. 2022. 154p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Veículos híbridos elétricos plug-in (PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) oferecem uma alternativa atraente para os sistemas de propulsão veiculares convencionais no que diz respeito ao cumprimento de normas e regulamentações modernas focadas na melhoria da qualidade do ar, eficiência energética e economia de combustível de veículos automotores. Este trabalho apresenta um estudo abrangente sobre otimização dos trens de potência de veículos hibridizados por meio de uma abordagem multicritério realizada pelo método de algoritmo genético de peso adaptativo interativo (i-AWGA - *Interactive Adaptive-Weight Genetic Algorithm*). A otimização tem como objetivo minimizar simultaneamente consumo de combustível, emissões de poluentes, tamanho da bateria, tempo de recarga, estado de saúde da bateria (SoH) e custos do kit de hibridização. Para esta análise, parâmetros do trem de potência elétrico tais como curvas de torque de motor elétrico e capacidade da bateria são otimizados. Além disso, controladores de lógica fuzzy para gerenciamento de potência entre motor de combustão interna e sistema de tração elétrica, bem como para a estratégia de troca de marchas, são incluídos na otimização multiobjetivo, definindo funções de pertinência, regras e pesos para controles otimizados. No estudo, o procedimento de otimização é aplicado nas arquiteturas veiculares SSHSP (*Single-Shaft Hybrid Series Powertrain*) e SAPHP (*Split-Axle Parallel Hybrid Powertrain*), de modo que se possa realizar uma análise comparativa entre as configurações híbridas em relação aos ganhos obtidos nos critérios de otimização propostos. Para a garantia de soluções robustas, o PHEV é otimizado para diferentes condições e perfis de ciclos de condução, dado pela combinação dos ciclos padrões FTP-75, HWFET e US06. A configuração SSHSP de melhor *trade-off* apresentou redução de 10,95% no consumo de combustível, associada a -16,71% de  $CO$ , -27,69% de  $HC$  e -48,32% de  $NO_x$ . Para a solução SAPHP mais comprometida com os critérios de otimização, houve diminuição do consumo em 23,42% e emissões de  $CO$  em 34,72%,  $NO_x$  em 52,33% e  $HC$  em 28,08%. Por fim, para a avaliação do desempenho da configuração otimizada em condições reais de ciclo, o PHEV também é simulado no ciclo de condução real baseado na cidade de Campinas, SP.

*Palavras-chave:* Veículos híbridos elétricos plug-in, Economia de combustível, Emissões de poluentes, Estado de saúde de bateria, controle fuzzy, Algoritmo genético de peso adaptativo interativo, SSHSP, SAPHP

## Abstract

DA SILVA, Samuel Filgueira. Multiobjective optimization of fuzzy control and plug-in hybrid vehicle powertrain architecture design. 2022. 154p. Master's Thesis. School of Mechanical Engineering, University of Campinas, Campinas.

Plug-in hybrid electric vehicles (PHEV) offer an attractive alternative to achieve the ambitious goals set by modern regulations focused on near-term air quality and fuel-efficient road transportation. This work provides a holistic study regarding the optimization of PHEV powertrain design, by means of a multi-criteria analysis carried out by the interactive adaptive-weight genetic algorithm approach (i-AWGA). The optimization aims to simultaneously minimize the PHEV's fuel consumption, exhaust emissions, electric powertrain size, battery state of health, charging time and hybridization kit costs. To achieve these objectives, several PHEV's design parameters are optimized such as electric motors' torque curves and battery capacity. Furthermore, the fuzzy logic controllers responsible for the engine/electric motors power management and gear shifting control are included in the multi-objective optimization in order to define the best membership functions, rules and respective weights. In the study, the optimization procedure is applied to SSHSP (Single-Shaft Hybrid Series Powertrain) and SAPHP (Split-Axle Parallel Hybrid Powertrain) architectures, so that a comparative analysis between the hybrid configurations can be carried out with respect to the gains obtained in the proposed optimization criteria. To guarantee robust solutions, the PHEV is optimized under different driving conditions and profiles, which are given by the combination of the FTP-75, HWFET and US06 driving cycles. The best trade-off SSHSP configuration yielded a reduction of 10.95% in fuel consumption, associated with -16.71% of  $CO$ , -27.69% of  $HC$  and -48.32% of  $NO_x$  emissions. Regarding the SAPHP solution most compromised with the optimization criteria, there was a decrease of 23.42% in equivalent fuel consumption, 34.72% in  $CO$ , 52.33% in  $NO_x$  and 28.08% in  $HC$ . Lastly, to evaluate the optimum PHEV performance, it is also simulated under a real-world driving cycle based on the Campinas city.

*Keywords:* Plug-in hybrid electric vehicles, Fuel economy, Exhaust emissions, Battery state of health, Fuzzy logic control, Interactive Adaptive-Weight Genetic Algorithm, SSHSP, SAPHP

## Lista de Ilustrações

1.1	Configuração em paralelo de veículo de hibridizado proposto . . . . .	41
1.2	Sistema de motorização auxiliar desenvolvido no Projeto Roda Elétrica . . . . .	42
1.3	Configuração SSHSP em estudo. Adaptado de Eckert <i>et al.</i> , 2021b . . . . .	43
1.4	Configuração em série de veículo hibridizado (Golden Motor, 2021) . . . . .	44
1.5	Análise comparativa entre veículo convencional e hibridizado em partida a frio do ciclo de condução FTP-75: Consumo, emissões e período de aquecimento do MCI . . . . .	48
2.1	Ciclo de condução combinado . . . . .	51
2.2	Força normal aplicada pela mola da embreagem . . . . .	53
2.3	Curva de torque máximo do motor de combustão interna (Eckert <i>et al.</i> , 2021b) . . . . .	56
2.4	Curva de torque máximo do motor elétrico . . . . .	57
2.5	Coeficiente de escorregamento do pneu $e$ em função do torque efetivo $T_{eff}^{diante,tras}$ (Eckert <i>et al.</i> , 2021b) . . . . .	58
2.6	Mapas do MCI obtidos pela ferramenta ADVISOR™ . . . . .	62
2.7	Mapa de eficiência do motor elétrico $\eta_{ME}$ . . . . .	63
2.8	Mapa de eficiência do inversor $\eta_{inv}$ . Adaptado de Rotering e Ilic, 2011 . . . . .	64
2.9	Esquematização da arquitetura SAPHP . . . . .	70
2.10	Esquematização da arquitetura SSHSP . . . . .	70
2.11	Controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência . . . . .	71
2.12	Funções de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência . . . . .	72
2.13	Controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas . . . . .	75
2.14	Funções de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas . . . . .	75
3.1	Fluxograma do procedimento de otimização . . . . .	87
4.1	Soluções ótimas da fronteira de Pareto (arquitetura SSHSP) . . . . .	90
4.2	Emissões ao longo do ciclo de condução para as soluções SSHSP analisadas . . . . .	92
4.3	Consumo e perfil do estado de carga da bateria ao longo do ciclo de condução para as soluções SSHSP analisadas . . . . .	94
4.4	Influência da profundidade de descarga nos resultados da população SSHSP . . . . .	94
4.5	Estratégia de troca de marchas do veículo convencional . . . . .	95
4.6	Estratégia de troca de marchas da solução $max(F_t)$ (SSHSP) . . . . .	96
4.7	Mapas de operação do MCI (convencional e arquitetura SSHSP) . . . . .	97
4.8	Funções de pertinência do controle <i>fuzzy</i> otimizado para troca de marchas (SSHSP) . . . . .	97
4.9	Funções de pertinência do controlador <i>fuzzy</i> otimizado para CGP (SSHSP) . . . . .	98
4.10	Soluções ótimas da fronteira de Pareto (arquitetura SAPHP) . . . . .	99
4.11	Emissões ao longo do ciclo de condução para as soluções SAPHP analisadas . . . . .	102

4.12	Consumo e perfil do estado de carga da bateria ao longo do ciclo de condução para as soluções SAPHHP analisadas . . . . .	103
4.13	Influência da profundidade de descarga nos resultados da população SAPHHP . . . . .	104
4.14	Estratégia de troca de marchas da solução $\max(F_t)$ (SAPHHP) . . . . .	105
4.15	Mapas de operação do MCI (convencional e arquitetura SAPHHP) . . . . .	106
4.16	Funções de pertinência do controlador <i>fuzzy</i> otimizado para CGP (SAPHHP) . . . . .	106
4.17	Funções de pertinência do controle <i>fuzzy</i> otimizado para troca de marchas (SAPHHP) . . . . .	107
4.18	Soluções ótimas da fronteira de Pareto (populações SAPHHP e SSHSP separadas)	108
4.19	Soluções ótimas da fronteira de Pareto (populações SAPHHP e SSHSP unificadas)	109
4.20	Gráfico de radar pentagonal: $\max(F_t)$ SSHSP $\times$ $\max(F_t)$ SAPHHP $\times$ convencional . . . . .	110
4.21	Gráfico de radar octogonal: $\max(F_t)$ SSHSP $\times$ $\max(F_t)$ SAPHHP . . . . .	111
4.22	Gráfico de radar octogonal: $\min(f_1)$ SSHSP $\times$ $\min(f_1)$ SAPHHP . . . . .	112
4.23	Gráfico de radar octogonal: $\min(f_2)$ SSHSP $\times$ $\min(f_2)$ SAPHHP . . . . .	112
4.24	Gráfico de radar octogonal: $\min(f_3)$ SSHSP $\times$ $\min(f_3)$ SAPHHP . . . . .	113
B.1	Gráfico de radar octogonal para configurações PHEV otimizadas com arquitetura SSHSP . . . . .	149
C.1	Gráfico de radar octogonal para configurações PHEV otimizadas com arquitetura SAPHHP . . . . .	150
D.1	Ciclo WLTC . . . . .	151
D.2	Ciclo Campinas . . . . .	151
D.3	Ciclo Campinas-São Paulo . . . . .	152
D.4	Ciclo Ouro Branco . . . . .	152
D.5	Ciclo Santa Maria . . . . .	152

## Lista de Tabelas

2.1	Especificações dos ciclos de condução em estudo. Adaptado de BARLOW <i>et al.</i> , 2009 . . . . .	52
2.2	Parâmetros do veículo simulado (Eckert <i>et al.</i> , 2019b) . . . . .	55
2.3	Dados de especificação do sistema de tração elétrico (Eckert <i>et al.</i> , 2020b) . . . . .	63
2.4	Dados de custos de motor elétrico e bateria íon-lítio 48V . . . . .	68
2.5	Regras do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência . . . . .	74
2.6	Regras do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas . . . . .	76
4.1	Resultados obtidos para configurações otimizadas de PHEV (arquitetura SSHSP) e veículo convencional . . . . .	91
4.2	Resultados obtidos para configurações otimizadas de PHEV (arquitetura SAPHP) e veículo convencional . . . . .	100
4.3	Resultados obtidos para ciclos alternativos . . . . .	115
4.4	Resultados obtidos para ciclo de vida e custos . . . . .	117
4.5	Análise comparativa entre diferentes procedimentos de otimização para veículos híbridos elétricos . . . . .	118
4.6	Estimativa do custo computacional . . . . .	120
A.1	Operador de mutação . . . . .	148

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### Letras Latinas

$\dot{m}_{CO}$	Vazão mássica de monóxido de carbono emitido	[g/s]
$\dot{m}_{fc}$	Vazão volumétrica de combustível	[l/s]
$\dot{m}_{HC}$	Vazão mássica de hidrocarbonetos emitidos	[g/s]
$\dot{m}_{NOX}$	Vazão mássica de óxidos de nitrogênio emitidos	[g/s]
$\mathbf{MF}_{GS}$	Vetor que descreve as funções de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$\mathbf{MF}_{PS}$	Vetor que descreve as funções de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$\mathbf{RW}_{GS}$	Vetor que descreve as regras, pesos e método de defuzzificação do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$\mathbf{RW}_{PS}$	Vetor que descreve as regras, pesos e método de defuzzificação do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$\mathbf{X}_1$	Vetor do cromossomo do primeiro membro selecionado	
$\mathbf{X}_2$	Vetor do cromossomo do segundo membro selecionado	
$\mathbf{X}_C$	Vetor do cromossomo gerado pelo cruzamento entre $\mathbf{X}_1$ e $\mathbf{X}_2$	
$\mathbf{X}_{M1}$	Vetor do cromossomo de mutação (proveniente do primeiro membro selecionado)	
$\mathbf{X}_{M2}$	Vetor do cromossomo de mutação (proveniente do segundo membro selecionado)	
$\mathbf{X}_{MC}$	Vetor do cromossomo de mutação (proveniente do cruzamento entre $\mathbf{X}_1$ e $\mathbf{X}_2$ )	
$A$	Amplitude da zona exponencial	[V]

$A_f$	Área frontal do veículo	[m <sup>2</sup> ]
$a_x$	Aceleração do veículo	[m/s <sup>2</sup> ]
$a_{req}$	Áceleração requerida	[m/s <sup>2</sup> ]
$B$	Inversa da constante de tempo da zona exponencial	[1/Ah]
$C$	Restrições das variáveis de projeto	
$C_2H_4O$	Acetaldeído	
$C_4H_6$	1,3-Butadieno	
$C_6H_6$	Benzeno	
$C_D$	Coeficiente de arrasto aerodinâmico	
$c_f$	Distância longitudinal do eixo dianteiro ao centro de gravidade	[m]
$c_r$	Distância longitudinal do eixo traseiro ao centro de gravidade	[m]
$C_{batt}$	Ciclo de vida da bateria	[ciclos]
$C_{sel}$	Número de indivíduos selecionados	
$CH_2O$	Formaldeído	
$Cl$	Número máximo de ciclos	
$CO$	Monóxido de carbono	
$CO^{ADV}$	Emissões de monóxido de carbono	[g/kWh]
$CO^{con}$	Emissões de monóxido de carbono do veículo convencional	
$CO^{factor}$	Fator de ponderação do monóxido de carbono	
$CO^{gkm}$	Quantidade emitida de monóxido de carbono durante o ciclo de condução por quilômetro	[g/km]
$CO^{MAK}$	Concentração máxima de monóxido de carbono para exposição humana	[mg/m <sup>3</sup> ]
$CO^{max}$	Valor máximo em emissões de monóxido de carbono na população de soluções	[g/km]

$CO^{min}$	Valor mínimo em emissões de monóxido de carbono na população de soluções [g/km]	
$CO^{QNT}$	Quantidade emitida de monóxido de carbono durante o ciclo de condução	[g]
$CO_2$	Dióxido de carbono	
$COR$	Coeficiente de correlação para desempenho	
$COR_{min}$	Coeficiente de correlação mínimo para desempenho (veículo convencional)	
$d$	Distância entre o cromossomo candidate e aquele selecionado em gerações anteriores	
$D_A$	Força de arrasto aerodinâmico	[N]
$D_z$	Método de defuzzificação	
$D_{iv}$	Fator diversidade	
$D_{z1}$	Método de defuzzificação do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$D_{z2}$	Método de defuzzificação do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$DoD$	Profundidade de descarga	[%]
$e$	Coeficiente de escorregamento dos pneus	
$E_F$	Fator de emissões	
$E_0$	Tensão constante do circuito equivalente da bateria	[V]
$E_{batt}$	Capacidade de energia da bateria	[kWh]
$E_{cost}$	Custo de energia elétrica	[\$/Ws]
$f_1$	Primeiro critério de otimização (consumo de combustível equivalente)	
$f_2$	Segundo critério de otimização (fator de emissões)	
$f_3$	Terceiro critério de otimização (fator do sistema elétrico)	
$F_C$	Consumo de combustível	[l]
$F_C^{ADV}$	Consumo específico de combustível	[g/kWh]

$f_j^{cand}$	Valor dos critérios de otimização para o cromossomo candidato	
$f_j^{max}$	Valor máximo do critério de otimização na população	
$f_j^{min}$	Valor mínimo do critério de otimização na população	
$f_j^{selec}$	Valor dos critérios de otimização para o cromossomo já selecionado	
$F_n$	Força normal aplicada pela mola entre placa e volante da embreagem	[N]
$F_t$	<i>Fitness</i> do cromossomo	
$F_{cost}$	Custo de combustível	[\$/l]
$F_C^{con}$	Consumo de combustível do veículo convencional	
$F_{eq}$	Consumo de combustível equivalente total	[l]
$F_{GS}$	Restrições de funções de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$F_{ME}$	Consumo de combustível equivalente para processo de recarga da bateria	[l]
$F_{PS}$	Restrições de funções de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_c$	Saída do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$G_n$	Marcha atual	
$G_{en}$	Número da geração	
$H$	Constante de número de ciclo	
$h$	Altura do centro de gravidade do veículo	[m]
$H_d$	Nível alto do controle <i>fuzzy</i>	
$HC$	Hidrocarbonetos	
$HC^{ADV}$	Emissões de hidrocarbonetos	[g/kWh]
$HC^{con}$	Emissões de hidrocarbonetos do veículo convencional	
$HC^{factor}$	Fator de ponderação dos hidrocarbonetos	

$HC^{gkm}$	Quantidade emitida de hidrocarbonetos durante o ciclo de condução por quilômetro	[g/km]
$HC^{MAK}$	Concentração máxima de hidrocarbonetos para exposição humana	[mg/m <sup>3</sup> ]
$HC^{max}$	Valor máximo em emissões de hidrocarbonetos na população de soluções	[g/km]
$HC^{min}$	Valor mínimo em emissões de hidrocarbonetos na população de soluções	[g/km]
$HC^{QNT}$	Quantidade emitida de hidrocarbonetos durante o ciclo de condução	[g]
$I$	Corrente elétrica de descarga da bateria	[A]
$I^*$	Corrente elétrica de baixa frequência	[A]
$I_d$	Inércia do diferencial	[kgm <sup>2</sup> ]
$I_e$	Inércia do motor a combustão	[kgm <sup>2</sup> ]
$I_t$	Inércia da caixa de marchas	[kgm <sup>2</sup> ]
$I_{batt}$	Corrente elétrica da bateria	[A]
$I_c$	Corrente elétrica de recarga da bateria	[A]
$I_c^a$	Corrente elétrica média de recarga da bateria durante meio ciclo	[A]
$I_{dis}^a$	Corrente elétrica média de descarga da bateria durante meio ciclo	[A]
$I_{Gn}$	Parâmetro de entrada da função de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$I_{ME}$	Inércia do motor elétrico	[kgm <sup>2</sup> ]
$I_{Pn}$	Parâmetro de entrada da função de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$I_{wf}$	Inércia das rodas e pneus dianteiros	[kgm <sup>2</sup> ]
$I_{wr}$	Inércia das rodas e pneus traseiros	[kgm <sup>2</sup> ]
$K$	Constante de polarização	[V/Ah]
$k$	$k$ -ésimo meio ciclo da bateria	

$K_{batt}$	Vida útil da bateria em quilômetros rodados	[km]
$L_i$	Limite inferior do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$L_s$	Limite superior do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$L_{batt}$	Vida útil da bateria	[h]
$L_d$	Nível baixo do controle <i>fuzzy</i>	
$M$	Massa do veículo	[kg]
$M_{batt}$	Massa da bateria	[kg]
$M_{con}$	Massa do veículo convencional (sem sistema de tração elétrica)	[kg]
$M_d$	Nível médio do controle <i>fuzzy</i>	
$M_{es}$	Massa do sistema de propulsão elétrico	[kg]
$M_{MEI}$	Massa (motor elétrico + inversor)	[kg]
$N$	Número de discos da embreagem	
$N_d$	Relação de transmissão do diferencial	
$N_t$	Relações de transmissão da caixa de marchas	
$N_{ME}$	Relação de transmissão do sistema de polias para arquitetura SSHSP	
$NO_2$	Dióxido de nitrogênio	
$NO_x$	Óxidos de nitrogênio	
$NO_x^{ADV}$	Emissões de óxidos de nitrogênio	[g/kWh]
$NO_x^{con}$	Emissões de óxidos de nitrogênio do veículo convencional	
$NO_x^{factor}$	Fator de ponderação dos óxidos de nitrogênio	
$NO_x^{gkm}$	Quantidade emitida de óxidos de nitrogênio durante o ciclo de condução por quilômetro	[g/km]
$NO_x^{MAK}$	Concentração máxima de óxidos de nitrogênio para exposição humana	[mg/m <sup>3</sup> ]

$NO_x^{max}$	Valor máximo em emissões de óxidos de nitrogênio na população de soluções [g/km]	
$NO_x^{min}$	Valor mínimo em emissões de óxidos de nitrogênio na população de soluções [g/km]	
$NO_x^{QNT}$	Quantidade emitida de óxidos de nitrogênio durante o ciclo de condução [g]	
$O_{Gn}$	Parâmetro de saída da função de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$O_{Pn}$	Parâmetro de saída da função de pertinência do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$P_F$	Fator do sistema de propulsão elétrico	
$P_p$	Fator penalidade	
$P_S$	Número de membros da população	
$P_c$	Saída do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$P_{lim}$	Limite do número de membros da população	
$P_{ME}$	Potência do motor elétrico	[kW]
$Q$	Capacidade da bateria	[Ah]
$Q_{BOL}$	Capacidade da bateria no começo da vida	[Ah]
$Q_{EOL}$	Capacidade da bateria no fim da vida	[Ah]
$Q_{nom}$	Capacidade nominal da bateria	[Ah]
$R$	Resistência interna da bateria	[ $\Omega$ ]
$r$	Raio dinâmico dos pneus	[m]
$r_g$	Raio geométrico	[m]
$R_o$	Raio externo do disco da embreagem	[m]
$R_x$	Força de resistência à rolagem dos pneus	[N]
$R_{BOL}$	Resistência interna da bateria no começo da vida	[ $\Omega$ ]

$R_{EOL}$	Resistência interna da bateria no fim da vida	[ $\Omega$ ]
$R_{Gn}$	Regras do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$R_{int}$	Raio interno do disco da embreagem	[m]
$R_{Pn}$	Regras do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$R_{gmax}$	Limite superior da entrada/saída do controle <i>fuzzy</i>	
$R_{gmin}$	Limite inferior da entrada/saída do controle <i>fuzzy</i>	
$S_P$	Probabilidade de seleção de indivíduos	
$S_E$	Energia específica da bateria	[Wh/kg]
$SoC$	Estado de carga da bateria	[%]
$SoC_0$	Estado de carga inicial da bateria	[%]
$SoC_{final}$	Estado de carga da bateria após o fim do ciclo de condução	
$SoC_{final}$	Estado de carga final da bateria	[%]
$SoH$	Estado de saúde da bateria	
$t$	Intervalo de tempo de integração	[s]
$T_g$	Torque de entrada da caixa de marchas	[Nm]
$T_{\circ C}^{MCI}$	Temperatura do motor de combustão interna	[ $^{\circ}$ C]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[K]
$T_{cl}$	Torque máximo transmissível pela embreagem	[Nm]
$T_{disp}$	Torque disponível (arquitetura SSHSP)	[Nm]
$T_{disp}^{diant}$	Torque disponível para o eixo dianteiro	[Nm]
$T_{disp}^{MCI}$	Torque disponível do motor de combustão interna	[Nm]
$T_{disp}^{tras}$	Torque disponível para o eixo traseiro	[Nm]
$T_{eff}$	Torque efetivo (arquitetura SSHSP)	[Nm]
$T_{eff}^{diant}$	Torque efetivo para as rodas dianteiras	[Nm]

$T_{eff}^{MCI}$	Torque efetivo do motor de combustão interna	[Nm]
$T_{eff}^{ME}$	Torque efetivo do motor elétrico	[Nm]
$T_{eff}^{tras}$	Torque efetivo para as rodas traseiras	[Nm]
$T_{g,eff}$	Torque disponível (entrada da caixa de marchas) (arquitetura SSHSP)	[Nm]
$T_{max}$	Torque máximo do motor elétrico	[Nm]
$T_{max}^{diant}$	Torque máximo transmissível pelo contato pneu-solo (eixo dianteiro)	[Nm]
$T_{max}^{MCI}$	Torque máximo do motor a combustão	[Nm]
$T_{max}^{ME}$	Torque máximo disponível do motor elétrico	[Nm]
$T_{max}^{tras}$	Torque máximo transmissível pelo contato pneu-solo (eixo traseiro)	[Nm]
$T_{MCI}$	Torque do motor de combustão no instante de tempo	[Nm]
$T_{ME}$	Torque do motor elétrico	[Nm]
$T_{Pc}$	30% do torque máximo do motor (fase de potência constante)	[Nm]
$T_{ref}$	Temperatura ambiente nominal	[K]
$T_{req}$	Torque requerido	[Nm]
$T_{req}^{diant}$	Torque requerido para o eixo dianteiro	[Nm]
$T_{req}^g$	Torque requerido no eixo de entrada da caixa de marchas	[Nm]
$T_{req}^{ME}$	Torque requerido do motor elétrico	[Nm]
$T_{req}^{tras}$	Torque requerido para o eixo traseiro	[Nm]
$V$	Velocidade real do veículo	[m/s]
$V_{batt}$	Tensão dinâmica da bateria	[V]
$V_{cic}$	Velocidade desejada do ciclo de condução	[m/s]
$V_c$	Tensão máxima da bateria	[V]
$V_{nom}$	Tensão nominal da bateria	[V]
$W_b$	Distância entre eixos do veículo	[m]

$W_{Gn}$	Pesos do controle <i>fuzzy</i> para troca de marchas	
$W_{Pn}$	Pesos do controle <i>fuzzy</i> para gerenciamento de potência	
$x_{cyc}$	Distância percorrida pelo veículo	[km]

---

### Letras Gregas

$\Delta_t$	Passo de tempo de simulação	[s]
$\epsilon$	Fator de envelhecimento da bateria	
$\eta_{inv}$	Eficiência do inversor	
$\eta_{ME}$	Eficiência do motor elétrico	
$\eta_{td}$	Eficiência mecânica	
$\Gamma$	Custo total do sistema de propulsão elétrico	[US\$]
$\Gamma_{batt}$	Custo da bateria	[US\$]
$\gamma_c$	Fator expoente corrente de recarga da bateria	
$\gamma_{dis}$	Fator expoente corrente de descarga da bateria	
$\Gamma_{ME}$	Custo do motor elétrico	[US\$]
$\mu$	Coefficiente de atrito no contato pneu-solo	
$\mu_{cl}$	Coefficiente de atrito entre os discos da embreagem	
$\omega_{eff}^{MCI}$	Velocidade efetiva do motor de combustão interna	[rad/s]
$\omega_{eff}^{ME}$	Velocidade efetiva do motor elétrico	[rad/s]
$\omega_{MCI}$	Velocidade angular do motor de combustão no instante de tempo	[rad/s]
$\omega_{Pc}$	Velocidade do ME referente ao torque $T_{Pc}$ (fase de potência constante)	[rad/s]
$\omega_{Tc}$	Velocidade angular do motor elétrico (fase de potência constante)	[rad/s]
$\psi$	Constante de Arrhenius	
$\rho$	Densidade do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]

$\rho_g$	Densidade do combustível	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\xi$	Fator expoente da profundidade de descarga $DoD$	

---

### Sobrescritos

$a$	Média
$ADV$	Mapa de emissões do ADVISOR™
$cand$	Candidato
$diant$	Eixo dianteiro
$factor$	Fator de ponderação de poluentes atmosféricos
$gkm$	Gramas por quilômetro
$MAK$	Valor MAK de compostos químicos
$max$	Máximo
$min$	Mínimo
$QNT$	Quantidade de emissão de poluentes
$selec$	Selecionado
$tras$	Eixo traseiro

---

### Subscritos

$amb$	Ambiente
$batt$	Bateria
$BOL$	Condição de começo de vida da bateria
$C$	Consumo
$c$	Recarga
$cl$	Embreagem

<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>con</i>	Convencional
<i>cost</i>	Custo
<i>cyc</i>	Ciclo de condução
<i>d</i>	Diferencial
<i>dis</i>	Descarga
<i>disp</i>	Disponível
<i>E</i>	Específico
<i>e</i>	Motor de combustão interna
<i>EMI</i>	Motor elétrico + Inversor
<i>EOL</i>	Condição de fim de vida da bateria
<i>eq</i>	Equivalente
<i>f</i>	Frontal
<i>fc</i>	Taxa de consumo de combustível
<i>g</i>	Combustível (gasolina)
<i>HC</i>	Hidrocarbonetos
<i>i</i>	Inferior
<i>int</i>	Interno
<i>inv</i>	Inversor
<i>j</i>	Critério de otimização
<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>nom</i>	Nominal
<i>NOX</i>	Óxidos de nitrogênio

<i>o</i>	Externo
<i>ref</i>	Referência
<i>s</i>	Superior
<i>t</i>	Caixa de marchas
<i>td</i>	Trem de potência
<i>w</i>	Rodas e pneus
<i>wf</i>	Rodas e pneus dianteiros
<i>wr</i>	Rodas e pneus traseiros

---

### **Abreviações**

cons.	Consumo
equiv.	Equivalente
ext.	Externo
int.	Interno
min.	Mínimo

---

### **Siglas**

ADVISOR	<i>Advanced Vehicle Simulator</i>
BAT	<i>Biologische Arbeitsstoff-Toleranzwerte</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BOL	<i>Beginning of Life</i>
CA	Corrente Alternada
CAA	<i>Clean Air Act</i>
CARB	<i>California Air Resources Board</i>

CC	Corrente Contínua
CG	Centro de Gravidade
CGP	Controle do Gerenciamento de Potência
DFG	<i>Deutsche Forschungsgemeinschaft</i>
ECMS	<i>Equivalent Consumption Minimization Strategy</i>
EKA	<i>Expositionsäquivalente für krebserzeugende Arbeitsstoffe</i>
EOL	<i>End of Life</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
FTP-75	<i>Federal Test Procedure at urban driving</i>
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
HESS	<i>Hybrid Energy Storage System</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test Cycle</i>
i-AWGA	<i>Interactive Adaptive-Weight Genetic Algorithm</i>
JN1015	<i>Japan 1015 driving cycle</i>
LabSIn	Laboratório de Sistemas Integrados
LOM	<i>Largest of Maximum</i>
MAK	<i>Maximale Arbeitsplatzkonzentration</i>
MCI	Motor de combustão interna
ME	Motor Elétrico
MOM	<i>Middle of Maximum</i>
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>

OPEC	<i>Organization of Petroleum Exporting Countries</i>
PAH	<i>Polynuclear Aromatic Hydrocarbons</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
PPE	<i>Posição do Pedal da Embreagem</i>
PZEV	<i>Partial-Zero-Emission Vehicle</i>
S-PMA	<i>Ácido S-fenilmercaptúrico</i>
SAPHP	<i>Split-Axle Parallel Hybrid Powertrain</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
SOM	<i>Smallest of Maximum</i>
SSHSP	<i>Single-Shaft Hybrid Series Powertrain</i>
US06	<i>Supplemental Federal Test Procedure</i>
USABC	<i>U.S. Advanced Battery Consortium</i>
VE	<i>Veículo Elétrico</i>
VHE	<i>Veículo Híbrido Elétrico</i>
WOT	<i>Wide-Open Throttle</i>
ZEV	<i>Zero Emission Vehicle</i>

# Sumário

<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>30</b>
1.1 Histórico da eletrificação veicular . . . . .	32
1.2 Trabalhos correlacionados . . . . .	35
1.2.1 Dissertações e teses do grupo LabSIn . . . . .	38
1.3 Sistemas de hibridização . . . . .	39
1.3.1 Projeto Roda Elétrica (Arquitetura SAPHP) . . . . .	40
1.3.2 Configuração híbrida em série: Arquitetura SSHSP ( <i>Single-Shaft Hybrid Series Powertrain</i> ) . . . . .	43
1.4 Trabalhos base publicados pelo LabSIn . . . . .	44
1.5 Motivação . . . . .	46
1.6 Objetivos . . . . .	48
1.7 Contribuições do trabalho . . . . .	49
1.8 Divisão do trabalho . . . . .	50
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>51</b>
2.1 Ciclo de condução . . . . .	51
2.2 Dinâmica longitudinal do veículo . . . . .	52
2.2.1 Torque máximo transmissível pela embreagem . . . . .	53
2.2.2 Torque máximo transmissível pelo contato pneu-solo . . . . .	54
2.2.3 Arquitetura SAPHP . . . . .	54
2.2.4 Arquitetura SSHSP . . . . .	58
2.3 Motor a combustão: Emissões e consumo . . . . .	60
2.4 Modelo do motor elétrico . . . . .	62
2.5 Modelo da bateria de íon-lítio . . . . .	64
2.5.1 Recarga da bateria . . . . .	66
2.5.2 Degradação da bateria . . . . .	66
2.6 Custo do kit de hibridização . . . . .	68
2.7 Controle baseado em lógica fuzzy . . . . .	69
2.7.1 Controle de gerenciamento de potência . . . . .	71
2.7.2 Controle de troca de marchas . . . . .	73
<b>3 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO</b>	<b>77</b>
3.1 Formulação do problema de otimização . . . . .	77
3.1.1 Consumo equivalente . . . . .	77
3.1.2 Fator de emissões de gases . . . . .	78
3.1.3 Fator elétrico . . . . .	81

3.2	Método i-AWGA ( <i>Interactive Adaptive-Weight Genetic Algorithm</i> ) . . . . .	81
3.2.1	Função objetivo . . . . .	81
3.2.2	Variáveis de projeto e restrições . . . . .	82
3.2.3	População inicial . . . . .	85
3.2.4	Seleção . . . . .	85
3.2.5	Crossover e mutação . . . . .	86
3.2.6	Limite de população e critério de convergência . . . . .	86
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>89</b>
4.1	Arquitetura SSHSP . . . . .	89
4.1.1	Análise dos controles otimizados da solução de melhor <i>trade-off</i> . . . . .	95
4.2	Arquitetura SAPHP . . . . .	98
4.2.1	Análise dos controles otimizados da solução de melhor <i>trade-off</i> . . . . .	104
4.3	Análise comparativa de configurações otimizadas com arquiteturas SSHSP e SAPHP . . . . .	107
4.3.1	Soluções ótimas analisadas . . . . .	107
4.3.2	Avaliação da robustez das configurações em ciclos de condução alternativos . . . . .	113
4.3.3	Análise de custos e ciclo de vida . . . . .	114
4.4	<i>Benchmarking</i> com trabalhos da literatura . . . . .	116
4.5	Estimativa do custo computacional . . . . .	119
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>121</b>
5.1	Trabalhos futuros . . . . .	122
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>124</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>147</b>
<b>A</b>	<b>– Tabela do operador de mutação</b>	<b>148</b>
<b>B</b>	<b>– Gráfico de radar para configurações otimizadas com arquitetura SSHSP</b>	<b>149</b>
<b>C</b>	<b>– Gráfico de radar para configurações otimizadas com arquitetura SAPHP</b>	<b>150</b>
<b>D</b>	<b>– Ciclos de condução alternativos</b>	<b>151</b>
<b>E</b>	<b>– Artigos publicados</b>	<b>153</b>
E.1	Periódicos . . . . .	153
E.2	Capítulo de livro . . . . .	154
E.3	Congressos . . . . .	154

# 1 INTRODUÇÃO

Políticas públicas que fomentam melhoria na qualidade do ar tem se tornado cada vez mais presentes no mundo devido ao impacto negativo que emissões de poluentes atmosféricos tem causado, em escala global, na saúde humana<sup>1</sup>, meio ambiente e estabilidade econômica (Rafaj *et al.*, 2018). Com isso, diversos acordos globais, que buscam estabelecer metas de desenvolvimento sustentável, têm sido realizados em tempos recentes. No Acordo de Paris (Mace; Horowitz, 2016; 2016), diversos países (incluindo o Brasil) se comprometeram a implementar medidas para redução de seus altos índices de emissão de gases poluentes nos anos seguintes. Na Agenda 2030 para Desenvolvimento Sustentável (UN, 2015), poluição do ar foi incluída como uma das temáticas essenciais a serem discutidas no plano de ação. O Pacto Ecológico Europeu, que consiste em um conjunto de iniciativas políticas que contribuem para energia limpa e indústria sustentável, tem como meta a redução das emissões de gases de efeito estufa para zero líquido até 2050 na União Europeia (European Commission, 2019).

Neste cenário, a descarbonização do setor automotivo tem papel crucial para minimizar tal problemática, tendo em vista que veículos convencionais movidos a motor de combustão interna (que representam parcela dominante dos veículos no cenário urbano como descrito por Singh *et al.*, 2018 e Lemme *et al.*, 2019) contribuem significativamente para poluição do ar urbano e consequentes impactos ambientais (Faiz; Odekanle *et al.*; Smit *et al.*, 1993; 2017; 2019), consumindo uma significativa parcela de combustíveis fósseis (Ehsani *et al.*, 2018), que estão previstos estarem disponíveis em escala consideravelmente reduzida em duas décadas caso o consumo de combustível continue a seguir a taxa global atual (Abolhassani *et al.*; Miller e Sorrell, 2003; 2013). Ao mesmo tempo, é previsto que o número de veículos no mundo dobre em 2050 (Hao *et al.*, 2016). Segundo OECD, 2017, o setor de transportes urbanos contribui em 23% das emissões globais de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), enquanto que no Brasil os valores são ainda maiores, consistindo em 45% das emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2017a).

Miao *et al.*, 2019 apresenta um estudo de caso sobre emissões de poluentes na China e explica que os óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) são de grande preocupação devido ao fato que eles estão entre os gases mais perigosos em grande quantidade emitida na atmosfera. Em seu trabalho, a atividade do setor de transportes é mostrada como um dos grandes contribuidores para a emissão de  $NO_x$ . Além disso, diversos estudos tem demonstrado que as emissões veiculares estão diretamente associadas à danos ambientais e saúde humana (Wang e Xie; Yang *et al.*; Wang *et al.*, 2009; 2018; 2019a). No que diz respeito a este último, de acordo com Frey, 2018, poluição oriunda do setor de transportes contribui, de maneira indireta, para ocorrência de 200 mil mortes por ano.

Dessa forma, normas de emissões rigorosas, que buscam veículos mais limpos e ecológicos, são aplicadas nos dias de hoje (Holjevac *et al.*; Holjevac *et al.*, 2019a; 2019b). Além

---

<sup>1</sup>De acordo com a Organização Mundial de Saúde, mais de 4 milhões de mortes prematuras são causadas no mundo pela exposição humana à poluição do ar (WHO, 2018)

disso, redução do consumo de energia no setor veicular é outro importante objetivo estabelecido pelas autoridades através de regulamentações governamentais que possam proporcionar cidades de caráter mais sustentável. Para atender os índices de emissões impostos por tais normas, a indústria automotiva tem desenvolvido novas tecnologias, estratégias de controle e combustíveis alternativos (Roso *et al.*, 2019a). Sendo assim, pesquisadores tem discutido sobre sistemas inovadores e modificações veiculares que possam proporcionar menores emissões de gases e maior economia de combustível. Dentre essas alternativas, pode-se citar a introdução de materiais especiais leves (Cheah, 2010), dispositivos para redução do coeficiente de arrasto (Mohamed-Kassim e Filippone; Bouilly *et al.*, 2010; 2015), reprojeto de pneu para diminuição da resistência ao rolamento (Aldhufairi e Olatunbosun; d’Ambrosio e Vitolo, 2018; 2019), modificação das relações de transmissão (Goharimanesh *et al.*; da Silva *et al.*, 2014; 2019) e *down-sizing* do motor (Turner *et al.*, 2014). Estudos também tem demonstrado que controle otimizado de estratégia de troca de marchas resulta em redução significativa de emissões e consumo de combustível (Eckert *et al.*; Eckert *et al.*; Barbosa *et al.*, 2016; 2019a; 2022).

De fato, a tendência de políticas industriais ecológicas tem sinalizado para uma eliminação gradual dos veículos movidos a combustível fóssil nas próximas décadas e sua substituição por tecnologia limpa para sistemas de propulsão (Meckling e Nahm, 2019). Dentre as potenciais alternativas para a resolução da problemática, pode-se destacar a eletrificação veicular, tendo em vista que esta tecnologia fornece benefícios significativos aos indicadores ambientais urbanos através de sua menor dependência dos combustíveis fósseis. O número considerável de novos estudos sobre propulsão eletrificada de veículos elucida esta atual necessidade por mobilidade sustentável, energeticamente eficiente e com baixos índices de carbono.

Neste sentido, veículos híbridos elétricos de recarga externa (ou em inglês PHEV: *Plug-in Hybrid Electric Vehicle*), que estão em um nível intermediário entre veículos convencionais e puramente elétricos (Lin *et al.*, 2010) e podem operar tanto em modo de sustentação de carga (preservação da bateria) como em modo de depleção de carga (Silva *et al.*, 2009), são uma alternativa promissora para sistemas de propulsão veicular. Isto se dá pelo fato que esta configuração híbrida pode efetivamente reduzir gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos (Singh *et al.*, 2018), bem como maximizar economia de combustível sem comprometer o desempenho do veículo (Björnsson *et al.*, 2018). No entanto, vale ressaltar que o processo de manufatura de baterias de veículos plug-in está associado com a emissão de poluentes do ar (Woody *et al.*, 2020), assim como o aumento da demanda de eletricidade gerada pela presença de estações de recarga pode causar impacto ambiental (Weiller, 2011).

No que diz respeito aos veículos puramente elétricos, esta configuração apresenta vantagens tais como baixo ruído e alta eficiência (Corno e Pozzato, 2019). Todavia, a autonomia dos VEs ainda é um grande desafio devido às limitações da tecnologia de baterias automotivas (Bi *et al.*, 2019), impedindo a difusão em massa no mercado global. Dessa forma, os PHEVs são uma alternativa mais adequada para rotas mais distantes, onde o motor de combustão está associado ao motor elétrico (ME) para melhorar o desempenho veicular (Zhang *et al.*, 2020a).

## 1.1 Histórico da eletrificação veicular

O desenvolvimento de veículos com tecnologia de propulsão eletrificada está diretamente correlacionado com a invenção das baterias elétricas (Wakefield; Westbrook e Westbrook; Sperling, 1993; 2001; 2013). Em 1800, a divulgação da primeira bateria foi dada pelo físico italiano Alessandro Volta, mostrando que energia química poderia ser armazenada e convertida em energia elétrica (Britannica, 2021). Em 1831, Faraday apresentou os princípios da indução eletromagnética, que serviriam como base para o desenvolvimento de motores elétricos, obviamente exigidos no projeto de sistemas de propulsão eletrificados. Ainda em meados da década de 1830, a primeira concepção do veículo elétrico à bateria é criada por inventores na Hungria, Holanda e Estados Unidos (DOE, 2014a).

No entanto, foi apenas no final do século XIX que o primeiro veículo elétrico (VE) comercial foi lançado sob o nome de Electrobat e projetado pelo engenheiro mecânico Henry G. Morris e o químico Pedro G. Salom. Electrobat era equipado com dois motores de 1,5 hp e alcançava velocidade máxima de 32 km/h. Sua autonomia era de 40 km, com tempo de recarga de 90 minutos (Ehsani *et al.*, 2018). Neste contexto, novos avanços técnicos foram alcançados, como por exemplo a invenção do freio regenerativo, desenvolvido por M. A. Darracq em um Mylord-Coupe 1897. Durante esse período, a eletrificação veicular alcançou seu auge, com os carros elétricos representando em torno de um terço dos veículos<sup>2</sup> presentes nas estradas americanas (DOE, 2014a). Os carros elétricos emergiram no mercado visto que estes tinham melhor dirigibilidade, não emitiam poluentes nem apresentavam ruídos, problemas comumente associados aos veículos da época movidos a gasolina e vapor. Todavia, vários fatores contribuíram com o fim da popularidade dos veículos elétricos no começo do século XX. Com a descoberta de reservas de petróleo no estado do Texas, o preço do combustível reduziu consideravelmente. Além disso, a estruturação do sistema de rodovias tornou inviável a comercialização de veículos com baixa autonomia e desempenho. Por fim, a produção em massa do Ford-T movido a gasolina proporcionou um veículo mais acessível financeiramente<sup>3</sup> e que independia dos problemas associados à falta de eletricidade fora dos grandes centros urbanos (Wakefield, 1993).

Os primeiros projetos relatados de veículos híbridos elétricos (VHE) foram apresentados no Salão de Paris em 1899 (Wakefield, 1998). Tais modelos foram desenvolvidos pela empresa belga Pieper e pela francesa Vedovelli and Priestly Electric Carriage Company. O veículo Pieper tinha configuração híbrida paralela com baterias chumbo-ácido que podiam ser carregadas pelo motor de combustão em regime de marcha lenta. O motor elétrico, em conjunto com a atuação do freio regenerativo, auxiliava o motor de combustão interna (MCI) em condições de alta demanda de potência. A empresa francesa, por sua vez, construiu a primeira arquitetura veicular híbrida em série, que era um projeto de triciclo com duas rodas traseiras propulsiona-

---

<sup>2</sup>O pico do número de veículos elétricos nos Estados Unidos foi atingido em 1912, com cerca de 30 mil de carros eletrificados (Høyer, 2008)

<sup>3</sup>Em 1912, o custo do carro movido a gasolina era de 650 dólares, enquanto um veículo elétrico tinha o preço de venda de 1750 dólares (DOE, 2014a)

das por motores elétricos independentes. Um motor a gasolina de 0,75 hp era acoplado a um gerador de 1,1 kW para carregamento das baterias (Khan e Kar, 2009). Além disso, Ferdinand Porsche, inventor da montadora de mesmo nome, também foi pioneiro em hibridização veicular, desenvolvendo o Lohner Porsche, que seria o primeiro veículo híbrido elétrico funcional, possuindo motores elétricos e freios em cada uma das quatro rodas (Porsche, 2011). Vale ressaltar que o objetivo dos primeiros HEVs limitava-se a auxiliar os motores a gasolina (que apresentavam baixo desempenho) ou ampliar a autonomia dos veículos puramente elétricos. A grande desvantagem desta configuração estava associada à dificuldade de controlar motores elétricos, o que geralmente resultava em regiões de baixa eficiência, incompatíveis com a operação de uma arquitetura veicular híbrida (Ehsani *et al.*, 2018). Devido a este fato, veículo automotor com propulsão híbrida permaneceu inviável para produção em série até meados da década de 1970, quando a tecnologia de conversores/controladores eletrônicos de potência começou a se desenvolver.

Além disso, a crise de petróleo de 1973, resultado do embargo de exportação de petróleo ao Estados Unidos e países europeus pela OPEC (*Organization of Petroleum Exporting Countries*) (Fletcher, 2013) e que causou um aumento expressivo no preço de combustível, despertou novamente o interesse por sistemas de propulsão elétricos. Neste cenário, regulamentações governamentais para o controle de emissões de poluentes atmosféricos começavam a ser estabelecidas pela CAA (*Clean Air Act*) nos Estados Unidos (EPA, 1970), alavancando a necessidade de fontes de energia mais limpas. Dessa forma, em 1975, Victor Wouk, representado pela sua empresa Petro Electric Motors, apresenta a configuração paralela híbrida elétrica do Buick Skylark para o *Federal Clean Car Incentive Program* oferecido pela EPA (*United States Environmental Protection Agency*) (Motors, 1975). Este veículo era equipado com um motor Mazda Wankel de 130 hp (acoplado a uma transmissão manual de três marchas), auxiliado por um motor elétrico CC (corrente contínua) com excitação separada de 20 hp e sistema de armazenamento de energia composto por oito baterias chumbo-ácido de 12 V (Motors; Ehsani *et al.*, 1975; 2018).

Vale destacar o cenário automotivo brasileiro na época, dado pelo lançamento, no Salão do Automóvel de São Paulo de 1974, do modelo Itaipu E-150 da Gurgel Motores, que seria o primeiro automóvel elétrico desenvolvido na América Latina. Tal veículo não recebeu produção em série, mas foi utilizado como base para o desenvolvimento do modelo furgão de tração eletrificada E-400, comercializado a partir de 1981. Todavia, o alto custo envolvido, baixa autonomia, bem como iniciativas governamentais da época que fomentavam a utilização de combustíveis alternativos (vide o Programa Nacional do Álcool) inviabilizaram um grande alcance de vendas desse modelo (Borba; SIMON, 2008; 2013).

Na década de 1990, eletrificação veicular volta a ganhar importância nos Estados Unidos, tendo em vista a demanda das normas governamentais relacionadas à segurança energética e redução da emissão de poluentes atmosféricos. Para atingir tais objetivos, o CARB (*California Air Resources Board*) implementou, em setembro de 1990, o programa ZEV (*Zero Emission Vehicle*), uma das políticas ambientais mais ousadas relacionadas ao transporte urbano até en-

tão (Collantes, 2006). A regulamentação estabelecia metas para que o percentual dos veículos comerciais leves no estado da Califórnia com emissão zero fosse gradualmente aumentado. Para 1998, a porcentagem requerida de ZEVs comercializados era de 2%. Em 2001 e 2003, essas porcentagens aumentariam para 5% e 10%, respectivamente. Contudo, a autonomia, custo e desempenho dos veículos elétricos a bateria (BEV - *Battery Electric Vehicle*) da época impossibilitaram o cumprimento da agenda planejada pelo CARB, que reconheceu que as iniciativas do programa seria muito ambiciosas. Mesmo após 10 anos do início do programa ZEV, o desempenho das baterias automotivas (seja elas chumbo-ácido ou níquel-hidreto metálico) estavam abaixo das metas de médio prazo projetadas pelo USABC (*U.S. Advanced Battery Consortium*). Com intuito de flexibilizar o programa e torná-lo mais factível com a realidade, o CARB insere a categoria de veículos com emissões parciais ou PZEV (*Partial-Zero-Emission Vehicle*) para cumprir as normas governamentais rigorosas de emissões impostas aos veículos convencionais (Bedsworth e Taylor, 2007).

O final da década de 90 foi então marcado por nova ascensão dos veículos híbridos. Em 1997, a Toyota lançou no Japão a primeira geração do Prius, se tornando o primeiro veículo híbrido elétrico de produção em massa do mundo. No primeiro ano de produção, 18 mil unidades do Toyota Prius foram vendidas (Saponara e Mihet-Popa, 2019). Em 1999, o Honda Insight foi o primeiro veículo híbrido comercializado em grande escala nos Estados Unidos. Modelos híbridos viriam também a ser desenvolvidos para produção em série por outras montadoras como, por exemplo, o Audi A4 Avant Duo, Ford Escape Hybrid, Ford Fusion Hybrid, Mercury Milan, Mercedes-Benz S400 BlueHYBRID, Saturn Aura Green Line etc.

No entanto, foi apenas na última década que sistemas de propulsão hibridizados ganharam alcance global e interesse das autoridades de diversos países, passando a ter relevância econômica, social, ambiental e política em todo mundo. O avanço na tecnologia de sistemas de armazenamento de energia e desenvolvimento da bateria de íon-lítio contribuiu para a mudança do patamar dos veículos híbridos no que diz respeito a sua autonomia. Dessa forma, o crescimento da necessidade por veículos automotores com baixa emissão e alta eficiência energética aponta que esta tecnologia estará cada vez mais presente na indústria automotiva moderna.

No cenário atual, os veículos eletrificados apresentam presença sólida no mercado automotivo dos Estados Unidos e Europa, por exemplo. Em 2019, o veículo de passageiros convencional mais vendido no mercado americano foi o Toyota Camry com 336.978 unidades (Capparella, 2020) contra 69.718 modelos híbridos (Toyota Prius) comercializados (Halvorson, 2020). O Tesla Model 3, por sua vez, foi o veículo puramente elétrico com maior número de vendas (160 mil) (Wagner, 2020). Na primeira metade de 2020, apenas os PHEVs representaram 3,5% do número total dos veículos registrados na Europa (ISI, 2020). Tais números são expressivos quando comparado ao começo do século e representa um crescimento considerável da quota de mercado dos veículos com tração eletrificada.

Pesquisadores tem desenvolvido estudos na área de veículos eletrificados em diferentes centros de pesquisa nas últimas décadas. A Universidade da Califórnia - Davis, onde está lo-

calizado o *Plug-in Hybrid and Electric Vehicle Research Center*, é pioneira em pesquisa de sistemas de propulsão veicular alternativos (Silva *et al.*; DOE, 2009; 2014b). Na última década, o EPRI (*Electric Power Research Institute*) desenvolveu metodologia para avaliação dos possíveis impactos ambientais dos PHEVs e intensidade de redução dos gases do efeito estufa como resultado do uso desta tecnologia (EPRI, 2007). O NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) conduz estudos de desempenho e emissões de caminhões e ônibus elétricos *plug-in*, avaliando a viabilidade de estações de carregamento (Prohaska *et al.*, 2016). Em outra análise, cientistas do *Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI* avaliaram a demanda por infraestrutura associada ao fornecimento de eletricidade para recarga de veículos elétricos na Alemanha e Estados Unidos (Gnann *et al.*, 2012) e estudaram o potencial de redução de emissões causada pela substituição de veículos convencionais por PHEVs (Plötz *et al.*, 2017). O ANL (*Argonne National Laboratory*), em parceria com o INL (*Idaho National Laboratory*), avaliou o desempenho de baterias automotivas sob diferentes temperaturas de atuação e investigou sistemas de veículos *plug-in* por meio de bancada de testes e *softwares*, simulando condições reais de condução do veículo (ANL, 2006). O programa FCVT (*FreedomCAR and Vehicle Technologies*) do Departamento de Energia dos Estados Unidos foi outra iniciativa de pesquisa para o avanço de tecnologias no setor de transportes ecológicos e energeticamente eficientes (DOE, 2007).

## 1.2 Trabalhos correlacionados

Nesta subseção, trabalhos relevantes sobre veículos eletrificados serão descritos. Como mencionado anteriormente, o PHEV, que difere dos veículos híbridos convencionais pela sua opção de uso da rede elétrica como fonte de energia, desperta cada vez mais interesse na área acadêmica, tendo em vista sua capacidade de redução substancial de consumo de combustível e geração de poluentes atmosféricos, que são fatores essenciais para atender regulamentações impostas por vários países atualmente (Policarpo *et al.*; Hill *et al.*; Linn e McConnell, 2018; 2019; 2019). Além disso, a autonomia ampliada dos veículos de recarga externa permite a redução de paradas para abastecimento, o que é bastante vantajoso sob a ótica dos consumidores (Silva *et al.*, 2009).

Apesar de seus benefícios evidentes, um veículo com tecnologia propulsora híbrida é um sistema complexo de comportamento não linear e a determinação de parâmetros de projeto para seu desempenho ótimo ainda é uma tarefa desafiadora (Zhang *et al.*, 2020b). Dessa forma, técnicas de otimização e controle representam ferramentas essenciais para determinação dos parâmetros otimizados de um trem de força de veículo híbrido *plug-in* (Amjad *et al.*, 2010). Através desses métodos, pesquisadores buscam a minimização do consumo de energia (Zheng *et al.*; Kim *et al.*, 2015; 2020), tamanho do sistema de tração elétrica (Redelbach *et al.*, 2014), autonomia (Björnsson *et al.*, 2018), consumo de combustível (Guo *et al.*; Eckert *et al.*; Li *et al.*, 2019; 2019b; 2021b), emissões de gases (Montazeri-Gh e Mahmoodi-K; Eckert *et al.*, 2016; 2020b) e

custo de ciclo de vida (Traut *et al.*, 2012).

Artigos científicos têm discutido a respeito de estratégias de mínimo consumo equivalente para PHEVs pelo método de programação dinâmica para busca de perfis de trajetórias otimizadas do estado de carga de bateria baseado em dados de rotas de tráfego urbano (Lei *et al.*; Guo *et al.*, 2019; 2019). Ao mesmo tempo, estratégias ótimas de gerenciamento de potência para veículos híbridos elétricos têm sido estudadas nos últimos anos (Xiong *et al.*, 2009). Zeng *et al.*, 2018 implementam PSO (*Particle Swarm Optimization*) para minimização de consumo de energia, contribuindo para um gerenciamento de energia efetivo de PHEVs.

Em outro estudo, Torres *et al.*, 2014 usam controlador otimizado baseado em regras para desenvolver estratégia de ramificação de potência para uma arquitetura veicular de quatro modos tipo PHEV, com intuito de se obter maior eficiência em consumo de combustível. Sistemas de gerenciamento de energia baseado em lógica fuzzy também são abordados por diversos estudos na literatura (Xiong *et al.*; Marzougui *et al.*; Eckert *et al.*, 2009; 2019; 2020a). No trabalho de Montazeri-Gh e Mahmoodi-K, 2016, algoritmo genético é introduzido para otimizar controlador de lógica fuzzy para gerenciamento de ramificação de potência entre MCI e ME baseado em análise de condições de tráfego (reconhecimento e predição), de maneira que consumo de combustível e índices de emissões possam ser mitigados.

O estudo desenvolvido por Zhou *et al.*, 2017, utiliza-se o método de otimização multiobjetivo, que é implementado para diferentes configurações de PHEV para maximizar economia de combustível e minimizar consumo de energia elétrica e tempo de aceleração. Desse modo, o desempenho de cada arquitetura veicular híbrida pode ser avaliada para cenários distintos, investigando qual configuração apresenta melhores resultados para os critérios de otimização propostos.

Além disso, o uso de estratégias de controle para troca de marchas com o objetivo de modificar o ponto de operação do motor de combustão para região mais eficiente (Barbosa *et al.*, 2022) se configura como alternativa para redução de consumo de combustível e emissões de poluentes atmosféricos (Eckert *et al.*; Eckert *et al.*, 2018a; 2019a). Guercioni e Vigliani, 2019 aplicam controlador proporcional integral para estratégia de troca de marcha de dois veículos híbridos elétricos série-paralelo equipado com transmissão manual automatizada e transmissão de dupla embreagem híbrida, comparando o desempenho dos sistemas de transmissão na redução da perda de torque durante trocas de marchas que pode levar a melhorias no desempenho veicular. Outra maneira efetiva de reduzir consumo e emissões é o aperfeiçoamento do modo de combustão, juntamente com tecnologia de propulsão híbrida (Benajes *et al.*, 2019).

No que diz respeito às emissões de gases, trabalhos têm sido realizados com intuito de se investigar o impacto dos veículos híbridos elétricos de recarga externa na redução de poluentes (de Souza *et al.*; Ehrenberger *et al.*; Benajes *et al.*, 2018; 2020; 2020). Pesquisadores também têm utilizado abordagem baseada em otimizações para controle preditivo de sistemas de propulsão hibridizados baseados em condições reais de tráfego para mitigar geração de gases de

escapamento (Montazeri-Gh e Mahmoodi-K; Hu *et al.*, 2016; 2020) e combustível consumido (Zheng *et al.*, 2015).

Silva *et al.*, 2009 introduzem uma metodologia baseada na norma SAE J1711 para determinar o consumo de combustível e emissões de poluentes de diferentes configurações veiculares híbridas (série e paralelo) e ciclos de condução distintos. Karaođlan *et al.*, 2019 avaliam os efeitos de relações de transmissão da unidade de acoplamento de torque (transmissão planetária), caixa de transmissão e diferencial de um trem de potência híbrido de configuração paralela. Além disso, o estudo realizado por Fontaras *et al.*, 2008 investiga a economia de combustível e emissões de gases de dois veículos híbridos elétricos (Toyota Prius II e Honda Civic Hybrid IMA) através de resultados experimentais sob diferentes ciclos.

Apesar de não ser o escopo do presente trabalho, vale pontuar que estudos da literatura tem abordado outros tipos de sistemas de propulsão híbridos. No trabalho de Barbosa *et al.*, 2020, uma arquitetura híbrida hidráulica é modelada para um veículo de passageiros, onde a potência do sistema hidráulico é fornecido por uma bomba hidráulica ou acumulador. No estudo, componentes do sistema de propulsão hidráulico são dimensionados por meio de ferramentas de otimização, gerando ganho de 37% em economia de combustível do MCI para o trem de potência otimizado. Bender *et al.*, 2014 desenvolveram um modelo dinâmico de caminhão de coleta com tecnologia híbrida hidráulica submetido a um ciclo de condução real da cidade de Stuttgart, indicando um potencial de redução de consumo de combustível de cerca de 20% quando comparado com caminhões convencionais movidos a diesel. Fathabadi, 2018, por sua vez, propôs a substituição do MCI de um PHEV por um módulo fotovoltaico e uma micro-turbina eólica como fontes de potência auxiliares de uma bateria de íon-lítio.

Tecnologia propulsora híbrida com células de combustíveis também vem sendo estudada na academia e indústria. O trabalho realizado por Zhou *et al.*, 2021 utiliza programação dinâmica para desenvolvimento de estratégia otimizada de gerenciamento de energia de FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*), de tal modo que o custo de operação do veículo possa ser minimizado. Em outro estudo, Ahmadi *et al.*, 2018 implementaram técnica de controle baseada em lógica *fuzzy* para o gerenciamento de energia entre bateria, ultracapacitor e sistema de célula de combustível de FCEV, otimizando parâmetros do controlador por meio de algoritmo genético (GA - *Genetic Algorithm*). No trabalho, foram observados ganhos em economia de combustível hidrogênio e desempenho. No cenário da indústria automotiva, pesquisadores da Nissan desenvolveram o sistema *e-Bio Fuel Cell*, que faz uso de célula SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) como fonte de energia, onde o hidrogênio é fornecido à célula por meio da reação química do combustível bioetanol com moléculas de água. O veículo utilizado para testes com esse sistema de propulsão tem capacidade para 700 kg de carga e autonomia de mais de 600 km (Nissan, 2016).

### 1.2.1 Dissertações e teses do grupo LabSIn

Nas últimas décadas, o Laboratório de Sistemas Integrados (LabSIn) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) vem desenvolvendo diferentes trabalhos em dinâmica veicular, sendo referência nacional em pesquisa na área. Sendo assim, esta subseção descreve projetos de pesquisas desenvolvidos no LabSIn nos últimos anos na área de estudo do presente trabalho.

No trabalho realizado por Souza, 2010, um modelo de dinâmica veicular longitudinal é desenvolvido para análise da demanda energética de um veículo híbrido. No estudo, foi possível identificar o potencial da tecnologia propulsora híbrida na melhoria de desempenho e consumo de combustível, bem como na redução no custo de utilização, apesar da implementação de um sistema híbrido esteja associado a um maior custo inicial envolvido. Em outro estudo, Eckert, 2013 compara os resultados de diferentes metodologias presentes na literatura para a análise da dinâmica longitudinal por meio de modelagem e simulação em ambiente MSC Adams™/ Simulink™. A demanda de potência do veículo é avaliada sob os ciclos de condução NBR6601 e NBR7024, determinando-se o consumo, influência da variação da massa do veículo e efeitos gerados pela implementação de um modelo de embreagem na co-simulação.

Corrêa, 2013 implementou controladores baseados em regras e em lógica *fuzzy* para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento de potência para veículo híbrido elétrico de configuração paralela com intuito de minimizar consumo de combustível e emissões de poluentes atmosféricos. Santiciolli, 2014, por sua vez, utilizou algoritmo genético para otimização de armazenadores de energia de veículos híbridos elétricos em função da capacidade tração elétrica, massa total do sistema e estado de carga final. O estudo é focado na redução de consumo de combustível e custo de rodagem, realizando simulações para quatro tipos de configurações, uma para o veículo convencional movido a gasolina e três modos de hibridização, dado pela variação na associação entre motores elétricos, baterias, ultracapacitores e *choppers*.

Em Costa, 2014, um modelo computacional de dinâmica veicular longitudinal descrito pela literatura é elaborado em ambiente Matlab/Simulink™, realizando o cálculo do consumo de combustível do veículo automotor antes e após hibridização. Para uma análise comparativa com resultados reais, um teste experimental de veículo hibridizado é realizado em um dinamômetro de chassis. No estudo de Eckert, 2017, um modelo de simulação com base em parâmetros reais de um veículo foi desenvolvido e estratégias de troca de marchas foram otimizadas por algoritmo genético com intuito de minimizar o consumo de combustível e melhorar o desempenho. Para avaliação das estratégias simuladas, uma validação experimental foi realizada em veículo de teste montado sobre bancada dinamométrica automotiva, submetido ao ciclo de condução urbano NBR6601. Bertoti, 2018 realizou caracterização dinâmica da bancada dinamométrica de rolos duplos do LabSIn, desenvolvendo modelo dinâmico não-linear com quatro graus de liberdade, no qual foi aplicadas técnicas de ajuste para se obter um modelo mais fiel ao comportamento dinâmico obtido pelo dinamômetro.

No trabalho de Yamashita, 2018, desenvolveram-se estratégias de controle otimizadas baseadas em lógica *fuzzy* para motorização independente nas rodas traseiras de veículos elétricos/híbridos, implementando o conceito de diferencial eletrônico para garantia de estabilidade. Com a aplicação do controlador, mesmo comportamento em manobras pode ser promovido para diferentes condições de operação (especialmente em condições de carregamento). Em Silva, 2020, parâmetros de controle em lógica *fuzzy* foram otimizados por processos de otimização baseados em algoritmo genético. No estudo, o controlador otimizado foi implementado em modelo veicular híbrido elétrico e puramente elétrico, verificando-se robustez do controlador com a variação de parâmetros do veículo tais como posição do centro de massa, bitolas dianteira e traseira e entre eixo.

### 1.3 Sistemas de hibridização

Este tópico visa destacar trabalhos relacionados a kits de hibridização veicular, os quais tem por objetivo converter veículos convencionais em híbridos por meio da adição de um sistema de motorização auxiliar.

Rizzo *et al.*, 2014 apresentam os desafios de projeto de um kit de conversão movido a baterias e painéis fotovoltaicos, com motores elétricos *in-wheel*. Este equipamento de conversão veicular híbrida, conhecido como HySolarKit, é patenteado pela UNISA (*Università degli Studi di Salerno*). De Luca *et al.*, 2015 descrevem o potencial de imersão no mercado automotivo deste kit de hibridização, destacando que a viabilidade de instalação do equipamento depende do custo da própria instalação, custo de carregamento e quilometragem percorrida semanalmente pelo consumidor. No estudo de Tiano *et al.*, 2018, a metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*) é aplicada para avaliação do consumo total de energia e emissões de gases de efeito estufa de diferentes alternativas de mobilidade, dentre elas o veículo hibridizado convertido com HySolarKit, que forneceu redução de até 20% em consumo de combustível. Pesquisadores do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), por sua vez, desenvolveram uma cadeia de suprimentos para a empresa de equipamentos de hibridização veicular XL Hybrids (agora conhecida como XL Fleet) (Causton, 2010). Em outra abordagem, Mariani *et al.*, 2022 desenvolveram uma estratégia de controle preditivo para freio regenerativo aplicado à arquiteturas veiculares hibridizadas. Neste estudo, os resultados do modelo de simulação indicaram uma recuperação de energia em até 18%.

Zulkifli *et al.*, 2013 estudaram uma configuração de kit de hibridização em paralelo com motores elétricos nas rodas traseiras, avaliando-se os impactos causados na economia de combustível pela eficiência e potência dos motores elétricos, tamanho do motor a combustão e tipo de veículo hibridizado. Para tal, um modelo veicular foi desenvolvido em ambiente computacional Matlab/Simulink™, com auxílio de dados disponíveis na ferramenta de simulação ADVISOR™. Em outro trabalho, Zulkifli *et al.*, 2012 discutem estratégias de controle de gerenciamento de energia para veículo hibridizado e descrevem o desenvolvimento de um protótipo

de sistema de motorização auxiliar para conversão de veículo convencional em híbrido elétrico.

O trabalho desenvolvido por Pisanti *et al.*, 2014 aborda os benefícios de veículos híbridos leves, convertidos por meio de um módulo de conversão pós venda. No estudo, metodologias de controle para sistema de propulsão hibridizado são descritas e um problema de otimização baseado no método de programação dinâmica é formulado para estratégia otimizada de gerenciamento de potência, onde a função objetivo é dada pelo consumo de combustível. Em ciclo urbano (FUDS – *Federal Urban Driving Schedule*), observou-se um ganho de 9% em consumo quando comparado com o veículo convencional. Em Zulkifli *et al.*, 2015, modos de operação de veículos hibridizados com configuração paralela do tipo TTR-IWM (*through-the-road-in-wheel*) são abordados, apresentando parâmetros do sistema e desafios decorrentes de estratégias de controle para distribuição de potência, de maneira que o consumo de combustível e emissões possam ser reduzidas.

Zeman e Lewis, 2012 investigaram o desempenho de dois veículos híbridos Toyota Prius 2008 convertidos em tecnologia plug-in. No teste experimental, foi escolhido o módulo de conversão híbrida plug-in Hymotion, comercializado pela A123 Systems e equipado com uma bateria de íon-lítion de 5 kWh. Para a conversão, a bateria foi conectada ao sistema de gerenciamento do veículo, de maneira que o acréscimo da capacidade da bateria fosse incorporado ao sistema híbrido já existente. O PHEV convertido resultou em um aumento na economia de combustível, saindo do consumo de 46 mpg (milhas por galão) do Toyota Prius convencional para 50 mpg pós conversão.

### 1.3.1 Projeto Roda Elétrica (Arquitetura SAPHP)

Projeto de pesquisa realizado entre 2009 e 2014, o Projeto Roda Elétrica teve como objetivo investigar soluções construtivas para o desenvolvimento de um kit de hibridização de baixo custo para aplicação em veículo de passeio sem que houvesse a necessidade de grandes modificações na estrutura mecânica do mesmo. Este projeto contou com a parceria da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Universidade de São Paulo (USP) campus São Carlos, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD), Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O projeto era baseado na arquitetura de veículo híbrido SAPHP (*Split-Axle Parallel Hybrid Powertrain*), conforme ilustrado pela Figura 1.1. Esta arquitetura híbrida permanece com o trem de potência convencional (motor a combustão, transmissão e diferencial) como meio propulsor das rodas dianteiras, enquanto são utilizados motores elétricos *in-wheel* para tracionar as rodas traseiras.

Configurações em paralelo de VHEs convencionais geralmente apresentam dois sistemas de propulsão (MCI e ME) conectados por meio de acoplador mecânico (de torque ou de velocidade), onde a potência total desenvolvida pelas fontes de potência é transmitida para o eixo de transmissão. A arquitetura SAPHP, por sua vez, apresenta sistemas de propulsão que podem

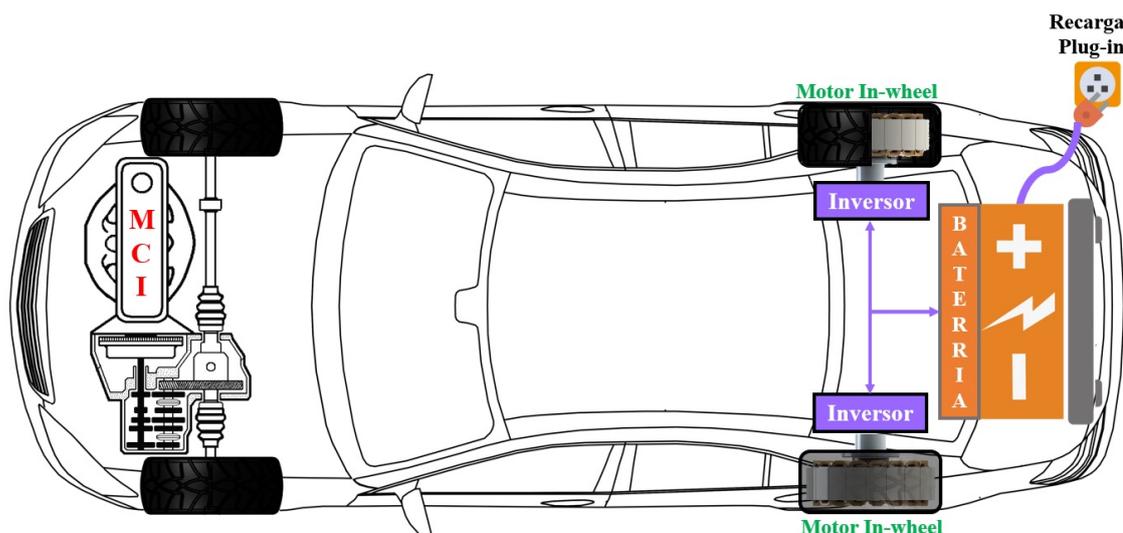


Figura 1.1: Configuração em paralelo de veículo de híbrido proposto

ser controlados de maneira independente, sem restrições de acoplamento entre eles. Tal característica oferece maior facilidade na conversão de veículos convencionais em híbridos elétricos por meio de um kit de hibridização, sem que haja a necessidade de modificações essenciais de projeto (Zulkifli *et al.*, 2012).

Visto que a topologia veicular proposta é do tipo híbrida elétrica plug-in, a bateria é recarregada majoritariamente pela rede elétrica. No entanto, os MEs também regeneram parte da energia cinética de frenagem, semelhante aos VHEs convencionais, gerando uma parcela de recarga à bateria.

O kit desenvolvido durante o projeto Roda elétrica visava a adaptabilidade, ou seja, a aplicação para diferentes modelos veiculares, de maneira que sua utilização resultasse em redução do consumo de combustível em condições de condução urbana. O projeto consistia na montagem de motores elétricos de baixa potência nas rodas traseiras do veículo, os quais eram acionados por um conjunto de baterias localizadas no porta mala do veículo, conforme mostra o diagrama da Fig. 1.1. Neste projeto, as baterias de chumbo-ácido foram escolhidas visto que estas são baterias de baixo custo, fácil manufatura em produção em larga escala, disponíveis em opções sem necessidade de manutenção, apresentando boa eficiência de recarregamento (acima de 70%) e boa reciclabilidade (Jung *et al.*, 2015).

No trabalho realizado por Costa, 2014, são descritos os resultados obtidos pelo protótipo do sistema de motorização auxiliar baseado em uma transmissão de polias e correias, desenvolvido para validação experimental do estudo. A Figura 1.2 ilustra o protótipo desenvolvido para testes em bancada dinamoétrica.

O protótipo do kit obteve ganhos substanciais na economia de combustível de um veículo equipado com motor 1.0L (quatro cilindros), apresentando uma redução de 30% em consumo em bancada dinamoétrica (Figura 1.2c) (Costa *et al.*, 2014). Tal redução do consumo foi notada principalmente em condições de operação do MCI em baixas velocidades, que estão localizadas



Figura 1.2: Sistema de motorização auxiliar desenvolvido no Projeto Roda Elétrica

em regiões de baixa eficiência.

Contudo, vale ressaltar as limitações do projeto. O protótipo desenvolvido serviu para validar o conceito do kit de hibridização proposto pelo estudo e realização de experimentos em bancada dinamométrica, entretanto se caracterizou como inviável para aplicações práticas. Isto se deve pelo posicionamento dos motores elétricos, instalados por meio de transmissão externo à roda, o que não seria adequado em condições reais de condução veicular. Para viabilizar o projeto do kit, a configuração deveria seguir a esquematização apresentada na Figura 1.1, com motores instalados entre as rodas e os cubos traseiros do veículo.

Devido o potencial demonstrado pela configuração abordada, esta configuração de veículo híbrido foi selecionada para ser estudada no presente trabalho. Em relação ao estado atual, existe campo para possíveis melhorias, principalmente no sistema de gerenciamento de potência entre os sistemas, avaliação das emissões resultantes além da possibilidade de otimização global do sistema de hibridização, visando melhorias de consumo de combustível, energia elétrica, redução do custo de produção e aumento da vida útil dos componentes.

### 1.3.2 Configuração híbrida em série: Arquitetura SSHSP (*Single-Shaft Hybrid Series Powertrain*)

Além da arquitetura apresentada no tópico anterior, existem outros modelos veiculares híbridos elétricos que podem ser encontrados em trabalhos publicados na literatura. Li *et al.*, 2016 descreveram uma configuração customizada de trem de potência híbrido do tipo *single-shaft* (MCI e um dos motores elétricos acoplados mecanicamente), no qual os modos paralelo, em série, puramente elétrico e convencional (apenas MCI) poderiam ser selecionados de acordo com o acionamento da embreagem entre o MCI e um dos MEs do trem de potência ou da atuação independente dos MEs do sistema de propulsão elétrico. Hageman e McLaughlin, 2018 discutem a viabilidade do acoplamento dos eixos do MCI e ME como alternativa de tecnologia propulsora híbrida para um UAV (Unmanned Aerial Vehicle) puramente elétrico, de maneira que as vantagens associadas a alta densidade de energia de combustíveis fósseis pudessem ser aproveitadas em um projeto da indústria aeroespacial.

Um dos tipos de configurações em série de veículo hibridizado é caracterizado pela transmissão de potência do motor elétrico por meio da correia do motor a combustão, complementando parcela do torque requerido do sistema. Este tipo de arquitetura propulsora híbrida elétrica plug-in é denominada SSHSP (*Single-Shaft Hybrid Series Powertrain*), equivalente ao General Motors eAssist (Hawkins *et al.*, 2012), conforme ilustrado pela Figura 1.3.

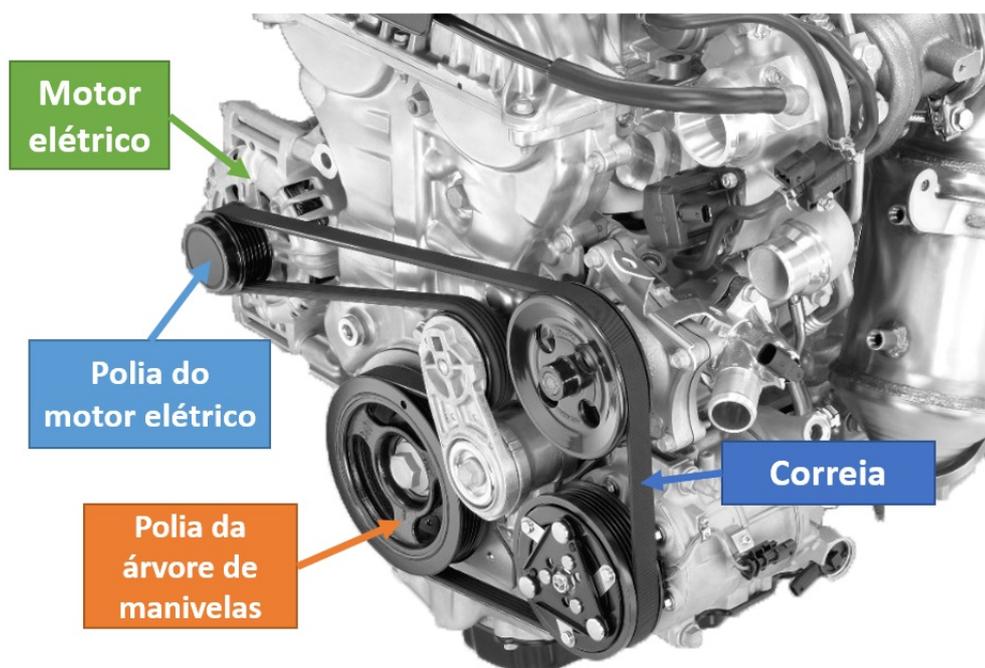


Figura 1.3: Configuração SSHSP em estudo. Adaptado de Eckert *et al.*, 2021b

Módulos de conversão híbrida pós-venda para veículos convencionais também apresentam este tipo de configuração em série para modelos comercializados no mercado, como mostrado nas Figuras 1.4a e 1.4b. A empresa chinesa Golden Motor comercializa o sistema mostrado na Figura 1.4 com motores elétricos com potência variando entre 3 kW a 20 kW.



(a) Motor elétrico de kit de hibridização em série



(b) Módulo de conversão híbrida instalado em veículo convencional

Figura 1.4: Configuração em série de veículo hibridizado (Golden Motor, 2021)

No presente trabalho, uma configuração SSHSP também será estudada, e comparada com o sistema hibridizado SAPHP (Subseção 1.3.1) no que diz respeito aos potenciais de ganhos em economia de combustível, índices de emissões de poluentes e vida útil da bateria. Para ambas as configurações, serão desenvolvidas estratégias otimizadas de distribuição de potência, levando-se em conta parâmetros e restrições de projeto na formulação do problema de otimização multiobjetivo; como será discutido mais adiante na Subseção 1.5.

#### 1.4 Trabalhos base publicados pelo LabSIn

O comparativo entre sistemas de hibridização veicular proposto tem como base uma série de trabalhos desenvolvidos pelo LabSIn nos últimos anos com objetivo de propor alternativas para reduzir consumo de combustível e emissões.

Nos trabalhos de Eckert *et al.*; Barbosa *et al.*, 2016; 2022, foi demonstrado que algoritmos de otimização são ferramentas importantes para analisar pontos ótimos de trocas de marchas durante ciclos de condução, gerando redução em consumo de combustível e melhoria em desempenho. No entanto, estratégias de troca de marchas que visam apenas a redução do consumo pode causar um aumento relevante nas emissões de gases, tendo em vista que o período de aquecimento do motor será prolongado em partida a frio, diminuindo, conseqüentemente, a eficiência do catalisador, conforme descrito em (Eckert *et al.*, 2018a). Tal problemática pode ser evitada pela implementação de um controlador que leve em conta a temperatura instantânea do motor durante as trocas, modificando a estratégia para condição de economia de combustível uma vez que o motor alcance melhor temperatura de operação (Eckert *et al.*; Eckert *et al.*, 2019a; 2021c). Eckert *et al.*, 2021a obtiveram soluções otimizadas de estratégias de troca

de marchas implementadas em interface GSI (Gear Shift Indicator), que auxilia o motorista de veículos equipados com transmissão manual. Testes experimentais realizados em bancada dinâmométrica de chassis mostraram que a melhor solução encontrada pelo algoritmo genético teve redução de 6,4% em consumo de combustível.

Santiciolli *et al.*, 2015 implementaram o método NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm – II*) para otimização da estratégia de troca de marchas, com funções objetivos contrastantes focadas na maximização do desempenho e redução do consumo de combustível. No trabalho de Eckert *et al.*, 2019a, um controle otimizado para estratégia de troca de marchas aplicado em veículos convencionais é desenvolvido, reduzindo o consumo de combustível em 19,72% e emissões de hidrocarbonetos (*HC*), monóxido de carbono (*CO*) e óxidos de nitrogênio (*NO<sub>x</sub>*) em 12,90%, 29,20% e 17,02%, respectivamente. Em outra análise, ganhos foram também obtidos pela otimização da caixa de transmissão, diferencial e tamanho do pneu, o qual resultou em 1,98% de melhoria em economia de combustível, juntamente com a redução de 9,87% em *CO*, 1,18% em *NO<sub>x</sub>* e 3,35% em *HC* (Eckert *et al.*, 2021c).

No estudo de Eckert *et al.*, 2020a, é proposto o uso de dois sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS – *Hybrid Energy Storage System*) em veículo elétrico, sendo um para rodas dianteiras, tracionadas por dois motores elétricos *in-wheel*, e outro para rodas traseiras, propulsadas por um único motor elétrico acoplado a uma transmissão diferencial. Otimização multiobjetivo baseado em i-AWGA (*Interactive Adaptive-Weight Genetic Algorithm*) foi formulada com intuito de minimizar tamanho do HESS e maximizar autonomia do veículo elétrico. Para tal, parâmetros de projeto tais como curvas de torque do motor elétrico, capacidade e tensão da bateria, tipo de ultracapacitor para sistema de propulsão dianteira e traseiro foram otimizados. Funções de pertinência, regras e pesos de controlador baseado em lógica *fuzzy* para gerenciamento de potência também foram incluídos no cromossomo do algoritmo genético.

Em outra abordagem, Eckert *et al.*, 2018b otimizaram HESS de VE tracionado por motores elétricos *in-wheel* em cada uma das rodas para minimização da massa total de bateria e ultracapacitor e maximização de desempenho e autonomia do sistema de propulsão elétrico. No trabalho de Silva *et al.*, 2021c, uma estratégia de controle baseada em regras é implementada para ramificação de potência entre as fontes de energia do HESS de um veículo puramente elétrico tracionado por motores elétricos acoplados nas rodas dianteiras e único motor elétrico conectado a um diferencial para propulsão das rodas traseiras. Em Corrêa *et al.*, 2020, foi desenvolvido controle para o gerenciamento de um sistema híbrido de armazenamento de energia (banco de baterias e supercapacitores) por meio de lógica *fuzzy*, com intuito de maximizar a autonomia do veículo elétrico, sem que ocorram perdas no desempenho.

Além disso, sistemas de motorização auxiliar implementados em veículos convencionais são estudados. No estudo desenvolvido por Eckert *et al.*, 2019b, foram apresentadas configurações ótimas para kit de hibridização veicular, onde curvas de torque de motores elétricos *in-wheel*, tamanho de bateria e porcentagem de ramificação de potência entre motor elétrico e MCI foram otimizados por meio de algoritmo genético, resultando em redução de tempo de

aceleração, consumo de combustível e de energia elétrica para sete cenários distintos de custo de energia e gasolina. Em Eckert *et al.*, 2020b, a combinação de configuração tipo PHEV e controle de troca de marchas gerou o ganho de 22,55% em economia no consumo, bem como diminuição da emissão de poluentes atmosféricos (-28,4% de  $CO$ , -33,55% de  $NO_x$  e -19,11% de  $HC$ ), quando comparado com um veículo convencional movido a gasolina equipado com mesmo motor de combustão, caixa de transmissão e diferencial. No estudo, o modelo do veículo foi submetido a um ciclo de condução real da cidade de Campinas-SP.

No entanto, em ambos os trabalhos mencionados no parágrafo anterior, há limitações quanto ao gerenciamento de potência entre os sistemas de propulsão do PHEV, visto que este é dado por uma porcentagem constante encontrada pelo método de otimização. Neste sentido, a implementação de uma estratégia de controle para o gerenciamento de energia resultaria em maiores reduções em consumo energético e emissões de gases.

## 1.5 Motivação

Estudos da literatura tem demonstrado que veículos convencionais movidos a gasolina apresentam menor eficiência energética e envolvem maior custo operacional quando comparado com configurações de trens de potência com tecnologia propulsora híbrida elétrica adequadamente projetadas (Torres *et al.*, 2014). Em outro artigo, Dong *et al.*, 2020 apresentaram uma análise comparativa entre veículo propulsionado por MCI e PHEV, onde este último apresentou maior economia de energia devido ao uso do sistema de tração elétrico e frenagem regenerativa.

Como mencionado anteriormente, veículos híbridos elétricos de recarga externa apresentam vantagens até mesmo quando comparados com VHEs convencionais (fonte geradora de energia proveniente apenas do MCI), tendo em vista sua maior capacidade de bateria e autonomia mais prolongada. Todos esses fatores, juntamente com os baixos índices de emissões e menor consumo de combustível que permitem o cumprimento de acordos globais e normas governamentais cada vez mais rigorosas, tornam o desenvolvimento de projetos de pesquisa na área de PHEVs de grande valia para o âmbito social, político e ambiental.

Entretanto, vale ressaltar os desafios relacionados ao projeto de PHEVs. Apesar do progresso atual em desempenho de baterias gerado pelo aumento da energia específica, sistemas de armazenamento de energia ainda consistem em parcela relevante do custo associado aos PHEVs (Xie *et al.*, 2020), fazendo com que a degradação de baterias no decorrer dos ciclos presente, portanto, caráter oneroso (Nguyen *et al.*, 2021). Por outra perspectiva, o processo de fabricação de baterias para veículos eletrificados está relacionado com geração de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos (Woody *et al.*, 2020). Dessa forma, o aumento da vida útil da bateria é essencial para garantir a viabilidade da aplicação em larga escala de PHEVs no que diz respeito ao impacto ambiental. Além disso, o estudo de Li *et al.*, 2019 explica que a degradação de fontes de potência tem influência direta em estratégias de controle de gerenciamento de energia. Devido a este fato, a mitigação do envelhecimento de sistemas de armazenamento de energia

tem papel importante na otimização de arquiteturas veiculares hibridizadas, evitando substituição prematura de baterias, que é causada principalmente por regime de descarga excessiva e picos de corrente (Bai *et al.*, 2019).

O tempo de recarga é outro fator que tem impacto significativo no custo e viabilidade de PHEVs (Hu *et al.*, 2017). Um grande número de veículos híbridos elétricos de recarga externa em grandes cidades pode gerar problemáticas relacionadas à falta de infraestrutura de recarregamento e instabilidade de sistemas de potência (Li *et al.*, 2018). Para atender a demanda de energia para recarga dos PHEVs, pesquisadores apontam que maior fornecimento de eletricidade seria necessário (Peterson e Michalek, 2013). Tal acréscimo em geração de energia elétrica, quando oriunda de plantas de potência poluentes, está associado à produção de gases de efeito estufa e consequente impacto ambiental (Weiller; Dong e Lin, 2011; 2012). No Brasil, a matriz elétrica é originada majoritariamente de fontes de energia renováveis, representando a parcela de 83%, dentre os quais 63,8% provêm de hidroeletricidade (MME, 2020). No entanto, de acordo com Almeida *et al.*, 2019, usinas hidrelétricas podem até mesmo exceder as emissões de carbono de plantas de potência movidas a combustíveis fósseis.

Como mencionado na Subseção 1.3, módulos de conversão híbrida para veículos convencionais vêm sendo comercializados nos últimos anos. No entanto, é importante ressaltar que, se por um lado, a modificação da região de operação do motor a combustão por meio da introdução de um sistema de motorização auxiliar pode resultar em redução de consumo de combustível; por outro, pode gerar um aumento significativo de emissões de poluentes atmosféricos. Isto é causado por sistemas de propulsão elétrico incorporados a veículos convencionais sem o devido controle no gerenciamento de energia entre as fontes de potência. A Figura 1.5 apresenta uma comparação entre um veículo convencional e uma versão hibridizada do mesmo veículo, em que um motor elétrico de 5 kW foi introduzido em série com o MCI (configuração similar a Figura 1.4a).

As simulações, que são realizadas no decorrer da partida a frio do ciclo de condução urbano FTP-75, indicam que o veículo hibridizado obteve uma redução de 22,25% em emissões de  $NO_x$ , bem como um ganho de 24,77% em economia de combustível, conforme ilustrado pelas Figuras 1.5a e 1.5d, respectivamente.

No entanto, a adição do kit de hibridização também levou ao aumento de 7,16% em  $HC$  e 26,09% em  $CO$ , como mostrado nas Figuras 1.5b e 1.5c. Tal fato pode ser explicado pelo tempo mais prolongado de aquecimento do MCI (Figura 1.5d) e consequente diminuição da eficiência do catalisador. Dessa forma, sistemas de controle que levam em conta a temperatura do MCI são essenciais para o desenvolvimento de veículos hibridizados que atendam normas de emissões.

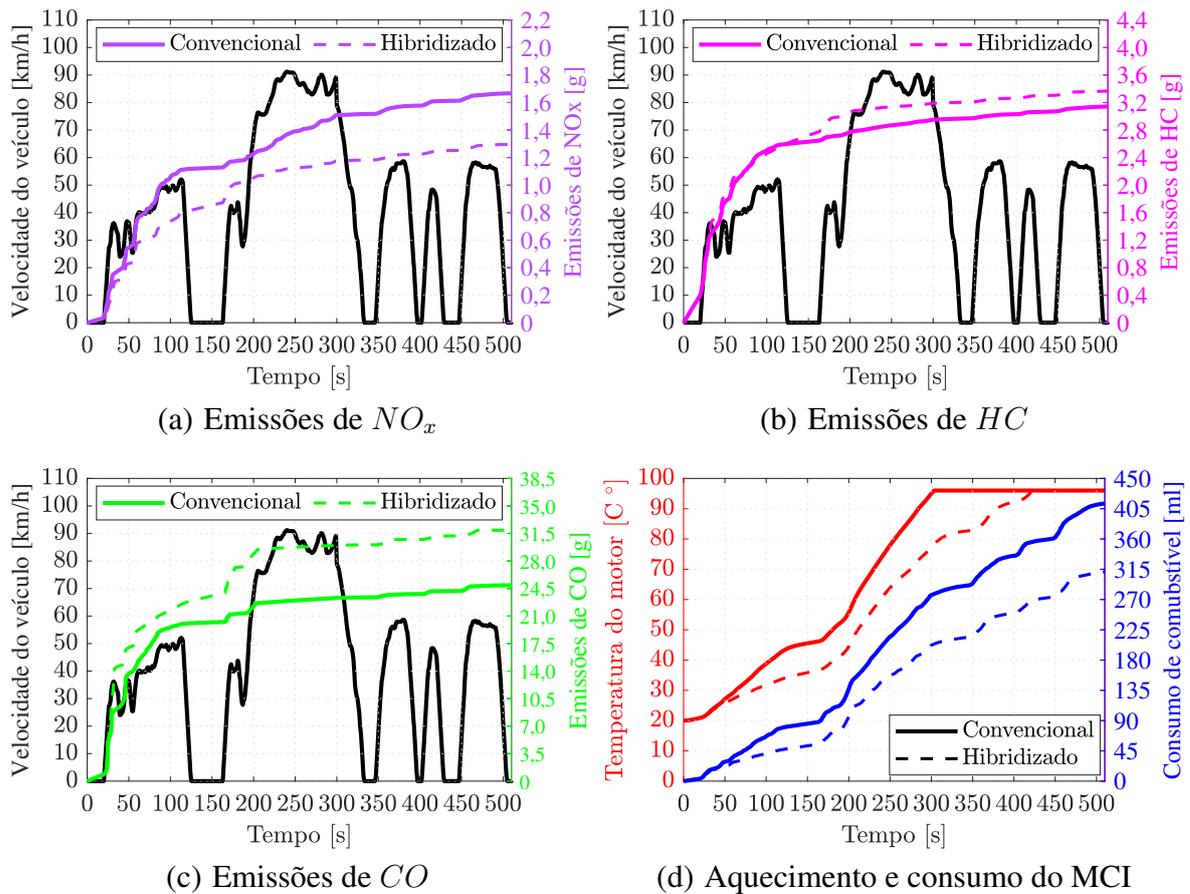


Figura 1.5: Análise comparativa entre veículo convencional e hibridizado em partida a frio do ciclo de condução FTP-75: Consumo, emissões e período de aquecimento do MCI

## 1.6 Objetivos

Neste contexto, o presente trabalho visa realizar abordagem multicritério por meio do método i-AWGA (Gen *et al.*, 2008) para análise comparativa entre as configurações otimizadas em série e paralelo de um veículo hibridizado (convertido em PHEV através de um kit de hibridização). As funções-objetivo são focadas na minimização de consumo equivalente (quantidade total de consumo de combustível e energia elétrica), emissões de poluentes atmosféricos, tamanho do sistema de tração elétrico, degradação de bateria, tempo de recarga e custo de aquisição e ciclo de vida.

A otimização multiobjetivo foi implementada considerando diferentes parâmetros de projeto do sistema de propulsão elétrico tais como capacidade da bateria e curva de torque dos motores elétricos, levando em conta restrições construtivas de projeto. Além disso, controladores baseados em lógica fuzzy para estratégia de troca de marchas e gerenciamento de potência entre motor a combustão e sistema de tração elétrico são, de igual modo, otimizados pelo algoritmo genético, o qual define valores de funções de pertinência, regras e seus respectivos pesos, conforme descrito por Eckert *et al.*, 2020a. O modelo veicular é simulado sob a combinação dos ciclos padrões de condução FTP-75 (NBR 6061), HWFET (NBR 7024) e US06, de maneira que

possam ser garantidas configurações robustas de PHEV que atendam diferentes condições de condução.

## 1.7 Contribuições do trabalho

Diversas pesquisas na área de veículos híbridos elétricos têm sido realizadas atualmente. Todavia, poucos estudos na literatura envolvem otimização de PHEVs levando em conta, simultaneamente, consumo energético, emissões de poluentes atmosféricos, tamanho de sistema de tração elétrico, tempo de recarga, degradação de sistemas de armazenamento de energia e custos de ciclo de vida. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo otimizar parâmetros de projeto de trem de potência de um veículo hibridizado por meio de abordagem multiobjetivo onde todos os fatores citados anteriormente são considerados.

Durante o estudo, será realizada uma análise comparativa de configurações otimizadas em série (SSHSP) e paralelo (SAPHP) de veículos hibridizados equipados com mesmo motor a combustão, caixa de transmissão e diferencial. O foco do projeto se configura em ponderar as vantagens e desvantagens de ambas as arquiteturas de propulsão híbridas em estudo, avaliando o potencial de cada uma delas como possíveis alternativas para redução de consumo e emissões de poluentes de veículo convencional submetido à diferentes perfis de condução.

Neste trabalho, modelos de dinâmica veicular longitudinal e método de otimização desenvolvidos previamente pelo grupo LabSIn (conforme mencionado na Subseção 1.4) são unificados e utilizados como ponto de partida do trabalho.

Baterias de chumbo-ácido foram utilizadas em módulos de hibridização desenvolvidos em estudos anteriores no laboratório, como descrito na Subseção 1.3.1. Contudo, baterias íon-lítio, que apresentam maiores densidades de energia específica e volumétrica que outras baterias recarregáveis, vem apresentando redução significativa em preços nos últimos anos (Lee, 2020), tornando-as cada vez mais atrativas para aplicações em projetos de VHEs e PHEVs. Dessa forma, neste estudo, analisar-se-á o desempenho de baterias íon-lítio como sistemas de armazenamento de energia dos PHEVs otimizados.

Além disso, controladores baseados em lógica fuzzy são implementados para distribuição de potência e estratégia de troca de marchas e otimizados de acordo com o método desenvolvido por Eckert *et al.*, 2019a. Por fim, dentre as principais contribuições da presente dissertação, podem-se citar:

- Análise quantitativa e qualitativa do impacto de gases poluentes emitidos ( $HC$ ,  $CO$  e  $NO_x$ ) na saúde humana e meio ambiente, admitindo pesos respectivos a cada um deles para o cálculo do fator de emissões, uma das funções-objetivo da otimização multiobjetivo;
- Implementação de controle otimizado para gerenciamento de energia entre as fontes de potência do PHEV;
- Introdução de modelo de degradação de bateria íon-lítio, de maneira a evitar grande pro-

fundidade de descarga e picos de corrente que reduzem a vida útil do sistema;

- Análise de custos dos kits de hibridização selecionados pela otimização.
- Análise comparativa entre arquiteturas veiculares híbridas em série e em paralelo, no que diz respeito ao consumo, emissões de gases, custo e ciclo de vida do sistema.

## 1.8 Divisão do trabalho

O presente trabalho é dividido em 5 capítulos. No Capítulo 1, foram apresentados trabalhos relevantes, contextualização acerca do tema, motivação e contribuições do estudo realizado. O Capítulo 2 descreve o modelo de simulação, detalhando o cálculo de dinâmica longitudinal, bem como os subsistemas do PHEV: motor a combustão, motores elétricos, inversores e bateria. O Capítulo 2 ainda apresenta os controladores baseado em lógica *fuzzy* para estratégias de gerenciamento de energia e trocas de marcha. O Capítulo 3 introduz a formulação do problema de otimização baseado no método i-AWGA. Os resultados e discussões das configurações otimizadas obtidas são abordados no Capítulo 4. As conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são então apresentadas no Capítulo 5. Por fim, uma seção de Apêndices é introduzida para apresentação de informações complementares.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar características do modelo de simulação aplicado no presente trabalho, seus respectivos subsistemas e equações governantes implementadas em plataforma computacional. Além disso, controladores baseados em lógica *fuzzy* utilizados para estratégias de troca de marchas e gerenciamento de potência são detalhados, descrevendo os parâmetros que serão incluídos na formulação da otimização proposta.

### 2.1 Ciclo de condução

Como mencionado anteriormente, o modelo veicular será avaliado sob os ciclos padrões de condução combinados FTP-75 (cenário urbano para testes de emissões, equivalente ao ciclo NBR 6061 como descrito em ABNT, 2012), HWFET (auto-estrada, com mesmo perfil de condução do NBR 7024 detalhado em ABNT, 2010) e US06 (alta demanda de potência e velocidade). Vale destacar que a distinção dos perfis de condução de cada um dos ciclos permite a robustez de configurações otimizadas de PHEV para variados cenários, como será discutido no Capítulo 4.

A Figura 2.1 ilustra o ciclo de condução combinado, no qual é possível observar uma fase de partida a frio do FTP-75 (em azul), fase estabilizada do ciclo (em verde) e partida a quente (em bordô) após o desligamento do MCI por 634 segundos. Com o fim do ciclo urbano, inicia-se o perfil de velocidade para auto-estrada HWFET ou NBR 7024 (em amarelo), caracterizada por velocidade média mais alta e nenhuma parada desde o início da rota. Por fim, é introduzido o ciclo US06 (em roxo), destinado para condições de condução em alta demanda de potência. A título de informação, a Tabela 2.1 descreve os parâmetros que caracterizam cada um dos ciclos padronizados utilizados no presente trabalho.

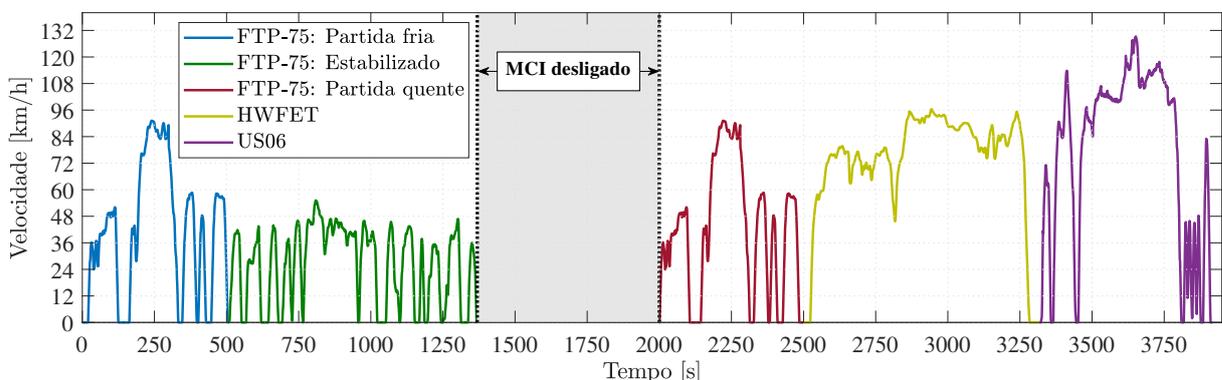


Figura 2.1: Ciclo de condução combinado

Deste modo, o comportamento do motorista é representado pelo cálculo da aceleração requerida  $a_{req}$  [m/s<sup>2</sup>], que é dada pela diferença entre a velocidade atual do modelo  $V(t)$  [m/s] e a velocidade desejada  $V_{cic}(t + \Delta t)$  [m/s] (perfil do ciclo de condução em um passo de tempo  $\Delta t$ ).

Tabela 2.1: Especificações dos ciclos de condução em estudo. Adaptado de BARLOW *et al.*, 2009

Parâmetros do ciclo de condução	Ciclo de condução padrão		
	FTP-75 (NBR 6061)	HWFET (NBR 7024)	US06
Distância total [km]	17,786	16,503	12,893
Tempo total [s]	1874	765	596
Velocidade média [km/h]	34,2	77,7	77,9
Velocidade máxima [km/h]	91,09	96,32	128,9
Tempo em aceleração [%]	36,45	34,51	36,24
Tempo em desaceleração [%]	30,63	27,45	35,91
Tempo em frenagem [%]	20,44	8,24	21,48
Tempo parado [%]	12,86	0,13	2,18
Número de paradas	16	1	5
Tempo parado [s]	241	1	13
Paradas por quilômetro	0,9	0,06	0,39

frente da simulação), dividido pelo passo de tempo  $\Delta_t$  [s], como apresentado na Equação (2.1).

$$a_{req}(t) = \frac{V_{cic}(t + \Delta_t) - V(t)}{\Delta_t} \quad (2.1)$$

## 2.2 Dinâmica longitudinal do veículo

Neste estudo, as equações de dinâmica longitudinal veicular, baseadas nas forças de resistência ao movimento conforme descrito por Gillespie, 1992, são implementadas em ambiente computacional Matlab<sup>TM</sup>/Simulink<sup>TM</sup>. Além disso, modelos para o cálculo da força máxima transmissível da embreagem e do contato pneu-solo são introduzidos aos equacionamentos de dinâmica longitudinal, conforme descrito por Eckert *et al.*, 2019a.

O torque requerido  $T_{req}$  [Nm] para propulsionar o veículo é determinado pela Equação (2.2), em função da força de resistência à rolagem dos pneus  $R_x$  [N], força aerodinâmica  $D_A$  [N], massa do veículo  $M$  [kg], aceleração requerida  $a_{req}$  [m/s<sup>2</sup>] e raio dinâmico dos pneus  $r$  [m].

$$T_{req} = (R_x + D_A + M a_{req})r \quad (2.2)$$

A força resistiva associada à rolagem dos pneus  $R_x$  é dada pela Equação (2.4). O cálculo do arrasto aerodinâmico  $D_A$  [N], por sua vez, é aproximado por meio da Equação (2.3), de acordo com a densidade do ar  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], coeficiente de arrasto  $C_D$  e área frontal projetada do veículo  $A_f$  [m<sup>2</sup>]. O raio dinâmico do pneu é definido como 98% do raio geométrico do pneu  $r_g$  [m] (Genta e Morello, 2009) e corrigido por um fator  $kv$  (Equação (2.5)), que varia em função da velocidade do veículo  $V$ .

$$D_A = \frac{1}{2}\rho V^2 C_D A_f \quad (2.3)$$

$$R_x = 0,0981 \left( 1 + \frac{2.24 V}{100} \right) M \quad (2.4)$$

$$r = 0,98r_g(1 + 0.01kv) \quad (2.5)$$

### 2.2.1 Torque máximo transmissível pela embreagem

Um dos fatores limitantes para a performance do veículo é dado pelo processo de troca de marchas, onde a embreagem limita o torque entregue à caixa de transmissão. Conforme proposto por Kulkarni *et al.*, 2007, o torque máximo transmissível pela embreagem  $T_{cl}$  [Nm] pode ser definido em função do número de discos de embreagem  $N$ , coeficiente de atrito entre os discos  $\mu_{cl}$ , força normal da mola entre placa e volante da embreagem  $F_n$  [N] e raios dos discos interno  $R_{int}$  [m] e externo  $R_o$  [m]. Neste trabalho, a força normal  $F_n$  varia de acordo com a posição do pedal de embreagem (PPE) (Figura 2.2) seguindo o procedimento de troca de marchas descrito por Barbosa *et al.*, 2022, o qual define que o processo inicia com o desacoplamento do MCI da caixa de transmissão em 0,3 s (PPE = 0 mm a PPE = 100 mm). Em seguida, a troca de marcha ocorre em 0,2 s (PPE = 100 mm), com posterior reacoplamento gradual da embreagem em 0,5 s (PPE = 100mm a PPE = 0 mm). Vale ressaltar que este modelo de pressão uniforme foi aplicado anteriormente em trabalhos publicados e será utilizado no presente estudo com intuito de se obter a mesma base de comparação.

$$T_{cl} = \frac{2}{3}\mu_{cl}F_n N \frac{R_o^3 - R_{int}^3}{R_o^2 - R_{int}^2} \quad (2.6)$$

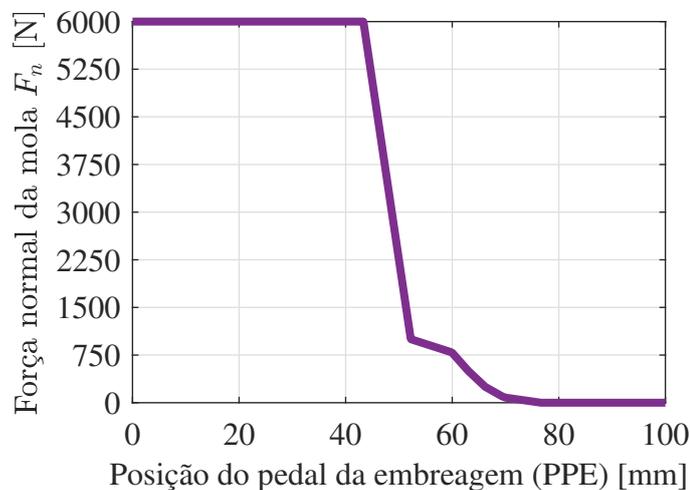


Figura 2.2: Força normal aplicada pela mola da embreagem

### 2.2.2 Torque máximo transmissível pelo contato pneu-solo

Outro fator de restrição ao desempenho em aceleração do veículo está associado ao limite de tração do pneu. Para as rodas dianteiras, o torque transmissível no contato pneu-solo pode ser expresso em função da distância entre eixos  $W_b$  [m], altura do centro de gravidade  $h$  [m], aceleração da gravidade  $g$  [m/s<sup>2</sup>], coeficiente de atrito no contato pneu-solo  $\mu$  e distâncias longitudinais dos eixos dianteiro  $c_f$  [m] e traseiro  $c_r$  [m] ao centro de gravidade (CG) do veículo, conforme descrito pela Equação (2.7) (Jazar, 2008).

$$T_{max}^{diant} = r\mu \left( \frac{Mg c_r - Mh a_{req}}{2W_b} \right) \quad (2.7)$$

Além disso, vale ressaltar que, para a arquitetura SAPHP, também é calculado o torque transmissível para as rodas traseiras  $T_{max}^{tras}$  [Nm] (Equação (2.8)), visto que esta configuração de PHEV apresenta tração dianteira (MCI) e traseira (sistema de propulsão elétrico dado pelos motores *in-wheel*).

$$T_{max}^{tras} = r\mu \left( \frac{Mg c_f + Mh a_{req}}{2W_b} \right) \quad (2.8)$$

### 2.2.3 Arquitetura SAPHP

A partir desta subseção, serão descritas as particularidades dos equacionamentos da dinâmica longitudinal para as configurações híbridas em estudo. Isto é devido ao fato que variáveis que caracterizam o comportamento dinâmico do veículo são calculadas de maneiras distintas para cada arquitetura, como será abordado mais adiante.

Uma vez definida a demanda de torque (Equação (2.2)), o controle *fuzzy* para gerenciamento de energia (que será apresentado na subseção 2.7) ramifica a potência requerida entre as fontes de energia. Sendo assim,  $T_{req}$  pode ser expresso como a soma dos torques requeridos para os sistemas de propulsão dianteiro (MCI)  $T_{req}^{diant}$  [Nm] e traseiro (MEs)  $T_{req}^{tras}$  [Nm], como demonstrado pela Equação (2.9). A condição estabelecida pela Equação (2.10) define o valor de  $T_{req}^{tras}$ , que é igual ao  $T_{req}$  quando o torque máximo disponível pelo ME  $T_{max}^{ME}$  é maior ou igual ao torque requerido. O torque  $T_{req}^{diant}$ , por sua vez, pode então ser dado pela diferença entre  $T_{req}$  e  $T_{req}^{tras}$  (Equação (2.11)).

$$T_{req} = T_{req}^{diant} + T_{req}^{tras} \quad (2.9)$$

$$T_{req}^{tras} = \begin{cases} T_{req} \times P_c, & \text{se: } T_{req} > T_{max}^{ME} \\ T_{req}, & \text{se: } T_{req} \leq T_{max}^{ME} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$T_{req}^{diant} = T_{req} - T_{req}^{tras} \quad (2.11)$$

Tabela 2.2: Parâmetros do veículo simulado (Eckert *et al.*, 2019b)

Parâmetros	Posição da caixa de transmissão				
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
Relação de transmissão ( $N_t$ )	4,27	2,35	1,48	1,05	0,8
Inércia da caixa de marchas ( $I_t$ ) [ $\text{kgm}^2$ ] $\times 10^{-3}$	1,7	2,2	2,9	3,9	5,4
Inércia do MCI ( $I_e$ ) [ $\text{kgm}^2$ ]	0,1367				
Inércia do diferencial ( $I_d$ ) [ $\text{kgm}^2$ ]	9,22E-04				
Inércia das rodas ( $I_w$ ) [ $\text{kgm}^2$ ]	2				
Relação de transmissão do diferencial ( $N_d$ )	4,87				
Eficiência mecânica ( $\eta_{td}$ )	0,9				
Massa total do veículo ( $M$ ) [kg]	980				
Área frontal do veículo ( $A$ ) [ $\text{m}^2$ ]	1,8				
Coefficiente de arrasto ( $C_d$ )	0,33				
Raio geométrico dos pneus (175/70 R13) ( $r_g$ ) [m]	0,2876				
Coefficiente de atrito de pico (estático) do pneu ( $\mu$ )	0,9				
Distância entre eixos ( $L$ ) [m]	2,443				
Altura do centro de gravidade ( $h$ ) [m]	0,53				
Centro de gravidade ao eixo traseiro ( $c_r$ ) [m]	1,460				
Centro de gravidade ao eixo dianteiro ( $c_f$ ) [m]	0,983				
Coefficiente de atrito da embreagem ( $\mu_{cl}$ )	0,27				
Raio ext. dos discos da embreagem ( $R_o$ ) [mm]	95				
Raio int. dos discos da embreagem ( $R_{int}$ ) [mm]	67				
Número de discos ( $N$ )	2				
Valores do fator $k_v(V)$					
Velocidade do veículo $V$ [m/s]	0	16,67	25	33,33	41,67
Fator $k_v(V)$	0	0	0,1	0,2	0,4

O torque requerido para o motor a combustão  $T_{req}^{MCI}$  [N] pode então ser calculado em função do valor obtido  $T_{req}^{diant}$ . As relações de transmissão da caixa de marchas  $N_t$  e do diferencial  $N_d$ , bem como a eficiência do trem de potência  $\eta_{td}$ , devem ser consideradas, conforme apresentado pela Equação (2.12). De igual modo, as inércias do MCI  $I_e$  [ $\text{kgm}^2$ ], caixa de marchas  $I_t$  [ $\text{kgm}^2$ ], diferencial  $I_d$  [ $\text{kgm}^2$ ] e rodas dianteiras  $I_{wf}$  [ $\text{kgm}^2$ ] também representam uma parcela do  $T_{req}^{MCI}$ . Neste estudo, os parâmetros do modelo (Tabela 2.2) são baseados em um veículo com MCI 1.0L, 4 cilindros.

$$T_{req}^{MCI} = \frac{T_{req}^{diant}}{N_t N_d \eta_{td}} + ((I_e + I_t)(N_t N_d)^2 + I_d N_d^2 + I_{wf}) \frac{a_{req}}{r} \quad (2.12)$$

Deste modo, como expresso pela Equação (2.13), o torque entregue ao eixo de entrada da caixa de transmissão  $T_g$  [Nm] é determinado de acordo com a regra do valor mínimo entre os torques  $T_{req}^{MCI}$ ,  $T_{cl}$  (Equação (2.6)) e  $T_{max}^{MCI}$ . Este último representa a curva de torque máximo do motor a combustão, ou seja, em WOT (*Wide-Open Throttle*), conforme ilustrada pela Figura 2.3.

Caso o torque requerido  $T_{req}$  exceda o valor do  $T_{max}^{MCI}$ , ocorrerá, portanto, uma redução

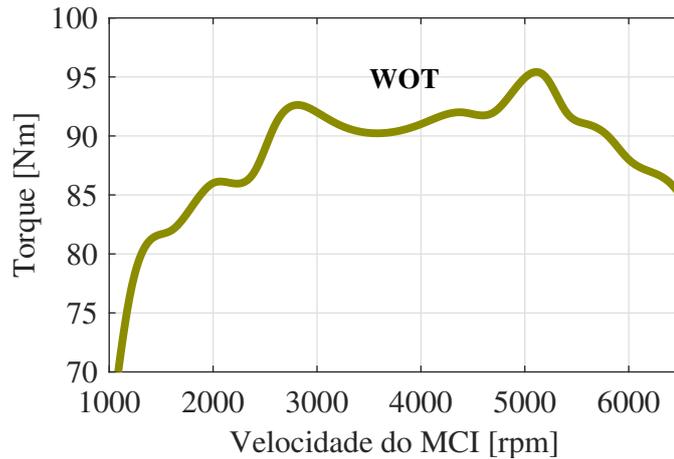


Figura 2.3: Curva de torque máximo do motor de combustão interna (Eckert *et al.*, 2021b)

de desempenho do veículo.

$$T_g = \min \{ T_{req}^{MCI}, T_{max}^{MCI}, T_{cl} \} \quad (2.13)$$

Além disso, o torque disponível pelo sistema de propulsão dianteiro  $T_{disp}^{diant}$  [Nm] (aqui representado apenas pelo motor de combustão interna) para as rodas pode ser definido pela Equação (2.14).

$$T_{disp}^{diant} = T_g N_t N_d \eta_{td} - ((I_e + I_t)(N_t N_d)^2 + I_d N_d^2 + I_{wf}) \frac{a_{req}}{r} \quad (2.14)$$

Entretanto, vale ressaltar que o torque transmissível pelo contato pneu-pista se caracteriza como um fator limitante para o desempenho veicular. Portanto, o torque efetivo entregue às rodas dianteiras  $T_{eff}^{diant}$  [Nm] é dado pela Equação (2.15).

$$T_{eff}^{diant} = \min \{ T_{disp}^{diant}, T_{max}^{diant} \} \quad (2.15)$$

No que diz respeito ao sistema de tração elétrica, a demanda de torque para cada um dos motores elétricos *in-wheel*  $T_{req}^{ME}$  [Nm] é determinado por meio da Equação (2.16), onde a inércia das rodas traseiras  $I_{wr}$  [kgm<sup>2</sup>] é considerada. Analogamente ao MCI, os motores elétricos são limitados pela curva máxima de torque  $T_{max}^{ME}$  [Nm], conforme descrito na Figura 2.4. Os parâmetros da curva mostrada na Figura 2.4 são otimizados pelo algoritmo genético, como será abordado no Capítulo 3.

$$T_{req}^{ME} = \frac{T_{req}^{tras} + I_{wr} \frac{a_{req}}{r}}{2} \quad (2.16)$$

Com a comparação entre  $T_{req}^{ME}$  e  $T_{max}^{ME}$  para a determinação do valor mínimo entre estes torques, pode-se calcular o torque dos motores elétricos, que é calculado pela Equação (2.17). O torque disponível para rodas traseiras é, dessa forma, dado pela Equação (2.18).

$$T_{ME} = \min \{ T_{req}^{ME}, T_{max}^{ME} \} \quad (2.17)$$

$$T_{disp}^{tras} = 2T_{ME} - I_{wr} \frac{a_{req}}{r} \quad (2.18)$$

De maneira análoga a Equação (2.15), o torque efetivo das rodas traseiras  $T_{eff}^{tras}$  [Nm] é determinado pelo valor mínimo entre  $T_{disp}^{tras}$  e  $T_{max}^{diant}$ , conforme expresso pela Equação (2.19).

$$T_{eff}^{tras} = \min \{ T_{disp}^{tras}, T_{max}^{tras} \} \quad (2.19)$$

Para a aceleração do veículo  $a_x$  [m/s<sup>2</sup>], esta pode ser calculada pela Equação (2.20). No entanto, é importante ressaltar que, tendo em vista os fatores limitantes de desempenho apresentados anteriormente, o valor de  $a_x$  pode ser inferior à aceleração requerida  $a_{req}$  (Equação (2.1)). Sendo assim, para este caso, um processo iterativo entre as equações 2.7 a 2.20 é realizado para determinar o valor de  $a_x$ , considerando  $a_x = a_{req}$  na primeira iteração. Após a convergência,  $a_x$  é numericamente integrado pelo ODE5 em ambiente Simulink™ para que se possa determinar a velocidade  $V$  do veículo. De igual modo, a distância percorrida é definida pela integração da velocidade calculada.

$$a_x = \frac{T_{eff}^{diant} + T_{eff}^{tras}}{rM} - \frac{D_A + R_x}{M} \quad (2.20)$$

Os torques efetivos do motor de combustão  $T_{eff}^{MCI}$  [Nm] e de cada motor elétrico *in-wheel*  $T_{eff}^{ME}$  [Nm] podem, portanto, serem calculados, respectivamente, segundo as equações 2.21 e 2.22.

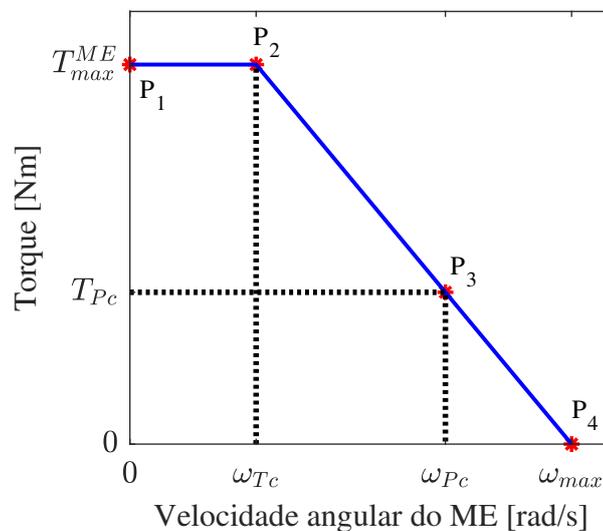


Figura 2.4: Curva de torque máximo do motor elétrico

$$T_{eff}^{MCI} = \frac{T_{eff}^{diant}}{N_t N_d \eta_{td}} + ((I_e + I_t)(N_t N_d)^2 + I_d N_d^2 + I_{wf}) \frac{a_x}{r} \quad (2.21)$$

$$T_{eff}^{ME} = \frac{T_{eff}^{tras} + I_{wr} \frac{a_x}{r}}{2} \quad (2.22)$$

Por fim, as velocidades efetivas do MCI  $\omega_{eff}^{MCI}$  [rad/s] e dos MEs  $\omega_{eff}^{ME}$  [rad/s] são dadas pelas equações 2.23 e 2.24, onde o coeficiente de escorregamento do pneu  $e$ , que modifica a velocidade relativa das rodas, varia em função do torque efetivo dos eixos dianteiro ou traseiro Figura 2.5.

$$\omega_{eff}^{MCI} = \frac{V N_d N_t}{r(1 - e)} \quad (2.23)$$

$$\omega_{eff}^{ME} = \frac{V}{r(1 - e)} \quad (2.24)$$

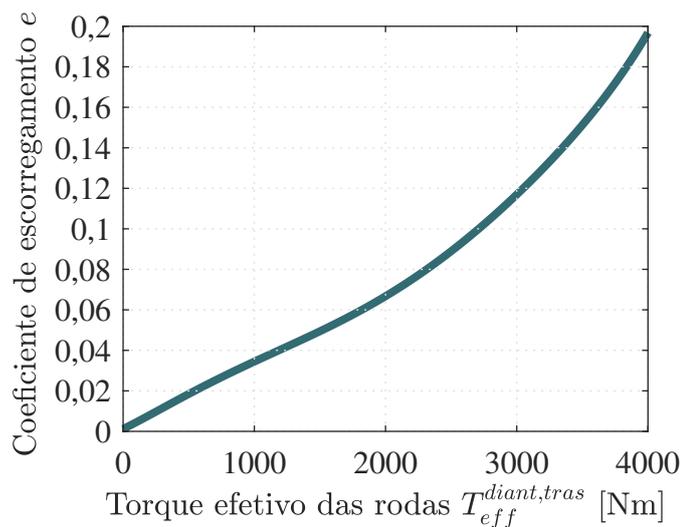


Figura 2.5: Coeficiente de escorregamento do pneu  $e$  em função do torque efetivo  $T_{eff}^{diant,tras}$  (Eckert *et al.*, 2021b)

## 2.2.4 Arquitetura SSHSP

Para a arquitetura SSHSP, a demanda de potência é destinada inteiramente para o eixo dianteiro, visto que o sistema de propulsão elétrico está conectado ao MCI, caracterizando-se por ser uma configuração em série do tipo *single shaft*, conforme descrito na subseção 1.3.2. Assim como na arquitetura SAPHP, o controlador *fuzzy* responsável pelo gerenciamento de energia ramifica o torque requerido  $T_{req}^g$  (Equação (2.25)) entre as fontes de potência (MCI e ME). Neste caso, entretanto, o sistema de tração elétrico é composto por apenas um motor elétrico, sendo o torque requerido do ME  $T_{req}^{ME}$  [Nm] dado pela condição proposta na Equação (2.26), onde  $P_c$  e  $N_{ME}$  representam a parcela de torque máximo disponível do ME e a relação de transmissão do

sistema de polias da configuração SSHSP, respectivamente.

$$T_{req}^g = \frac{T_{req}}{N_t N_d \eta_{td}} + ((I_e + I_t)(N_t N_d)^2 + I_d N_d^2 + I_{wf}) \frac{a_{req}}{r} \quad (2.25)$$

$$T_{req}^{ME} = \begin{cases} P_c T_{max}^{ME} N_{ME}, & \text{se: } T_{req}^g > T_{max}^{ME} N_{ME} \\ T_{req}^g, & \text{se: } T_{req}^g \leq T_{max}^{ME} N_{ME} \end{cases} \quad (2.26)$$

Uma vez determinado  $T_{req}^{ME}$ , o restante de torque requerido pelo sistema é fornecido pelo MCI, seguindo a regra apresentada na Equação (2.27). Caso o torque requerido seja inferior ao valor do torque disponível pelo motor elétrico,  $T_{req}^{MCI}$  é igual a zero, visto que toda demanda de potência é transferida para o sistema de propulsão elétrico. Como apresentado na subseção anterior, a demanda de torque do MCI não pode exceder sua curva máxima de torque (Figura 2.3). Dessa forma, o torque disponível do MCI  $T_{disp}^{MCI}$  [Nm] pode ser expresso pela Equação (2.28).

$$T_{req}^{MCI} = \begin{cases} T_{req} - T_{req}^{ME} & \text{if } T_{req} > T_{max}^{MCI} \\ 0 & \text{if } T_{req} \leq T_{max}^{MCI} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$T_{disp}^{MCI} = \min\{T_{req}^{MCI}, T_{max}^{MCI}\} \quad (2.28)$$

O torque de entrada da caixa de transmissão, por sua vez, pode ser calculado por meio da Equação (2.31). Analogamente a arquitetura SAPHP, o fator limitante dado pelo torque máximo transmissível pela embreagem é introduzido no equacionamento, visto a perda de desempenho do veículo durante o processo de troca de marchas.

$$T_g = \min\{T_{disp}^{MCI} + T_{req}^{ME}, T_{cl}\} \quad (2.29)$$

O torque disponível do sistema de propulsão hibridizado (aqui representado pelo conjunto MCI e ME) para as rodas dianteiras  $T_{disp}$  [Nm], por sua vez, é definido pela Equação (2.30). No entanto,  $T_{disp}$  nem sempre poderá ser totalmente convertido em força de tração efetiva. Isto deve-se ao limite de tração dos pneus, representado pelo torque máximo transmissível pelo contato pneu-solo  $T_{max}^{diant}$  (Equação (2.7)). Com isso, o torque efetivo  $T_{eff}$  é obtido pelo valor mínimo entre  $T_{disp}$  e  $T_{max}^{diant}$ . A aceleração do veículo é determinada pela Equação (2.32) e, analogamente à subseção anterior, um procedimento iterativo é realizado entre as equações 2.7, 2.30, 2.31 e 2.32, para determinação de  $a_x$ , de maneira que  $a_x = a_{req}$  na primeira iteração, analogamente à subseção anterior.

$$T_{disp} = T_g N_t N_d \eta_{td} - ((I_e + I_{ME} N_{ME}^2 + I_t)(N_t N_d)^2 + I_d N_d^2 + I_{wf}) \frac{a_x}{r} \quad (2.30)$$

$$T_{eff} = \min\{T_{disp}, T_{max}^{diant}\} \quad (2.31)$$

$$a_x = \frac{T_{eff}}{rM} - \frac{D_A + R_x}{M} \quad (2.32)$$

Portanto, o torque efetivo aplicado pelo MCI e ME ao eixo de entrada da caixa de transmissão  $T_{g,eff}$  [Nm] pode ser determinado pela Equação (2.33). Para esta arquitetura propulsora híbrida, os torques efetivos do motor de combustão interna  $T_{eff}^{MCI}$  e motor elétrico  $T_{eff}^{ME}$  são calculados pelas equações 2.34 e 2.35, respectivamente.

$$T_{g,eff} = \frac{T_{eff}}{N_t N_d \eta_{td}} + ((I_e + I_{ME} N_{ME}^2 + I_t)(N_t N_d)^2 + I_d N_d^2 + I_w) \frac{a_x}{r} \quad (2.33)$$

$$T_{eff}^{MCI} = \begin{cases} T_{g,eff} - T_{req}^{ME} & \text{if } T_{g,eff} > T_{req}^{ME} \\ 0 & \text{if } T_{g,eff} \leq T_{req}^{ME} \end{cases} \quad (2.34)$$

$$T_{eff}^{ME} = \begin{cases} \frac{T_{req}^{ME}}{N_{ME}} & \text{if } T_{g,eff} > T_{req}^{ME} \\ \frac{T_{g,eff}}{N_{ME}} & \text{if } T_{g,eff} \leq T_{req}^{ME} \end{cases} \quad (2.35)$$

No que diz respeito à velocidade angular efetiva do MCI, esta é calculada pela Equação (2.23), o qual foi apresentada anteriormente. A velocidade efetiva do motor elétrico  $\omega_{eff}^{ME}$ , por sua vez, é dada pela Equação (2.36), visto que, nesta configuração, o ME não está conectado diretamente às rodas.

$$\omega_{eff}^{ME} = \omega_{eff}^{MCI} N_{ME} \quad (2.36)$$

### 2.3 Motor a combustão: Emissões e consumo

Para a modelagem do motor de combustão interna, uma vez definidos os pontos de operação (dado pelo torque efetivo  $T_{eff}^{MCI}$  e velocidade angular efetiva  $\omega_{eff}^{MCI}$ ), pode-se então calcular o consumo de combustível e emissões de gases poluentes utilizando o programa de simulação ADVISOR™ (*Advanced Vehicle Simulator*), que é incorporada ao modelo de simulação em ambiente Matlab/Simulink™. ADVISOR™ (Markel *et al.*, 2002) é uma ferramenta de análise de sistemas desenvolvida no NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) para modelagem avançada de veículos, sendo utilizado como referência para diversos estudos publicados na área de sistemas de propulsão veicular (Gökce e Ozdemir; Mashadi *et al.*; Hu *et al.*; Zhou *et al.*, 2014; 2014; 2020; 2020).

Além disso, para a análise de emissões de poluentes atmosféricos, o ADVISOR™ simula a eficiência do catalisador, que varia em função da temperatura do MCI  $T_{\circ}^{MCI}$  [°C], sendo esta também estimada pelo programa. Deste modo, o modelo do MCI implementado é capaz de simular o regime transiente da partida a frio, no qual grande parcela das emissões são produzidas

(Eckert *et al.*, 2019a).

A simulação define, para a condição inicial, o MCI em temperatura ambiente (20 °C), aumentando no decorrer do tempo devido ao calor gerado pelo processo de combustão, que aquece o MCI até atingir a temperatura ideal de operação ( $T_C^{MCI} = 95$  °C), sendo então controlado pelo sistema de resfriamento.

Portanto, por meio dos mapas de emissões e consumo específico, obtidos pelo banco de dados do ADVISOR™, para um MCI 1.0L 4 cilindros, é possível, com os valores de entrada de  $T_{eff}^{MCI}$  e  $\omega_{eff}^{MCI}$ , determinar o consumo de combustível  $F_C^{ADV}$  [g/kWh] e emissões de  $CO^{ADV}$  [g/kWh],  $HC^{ADV}$  [g/kWh] e  $NO_x^{ADV}$  [g/kWh].

Deste modo, a vazão volumétrica de combustível  $\dot{m}_{fc}$  [l/s] e as vazões mássicas dos gases  $CO$   $\dot{m}_{CO}$  [g/s],  $HC$   $\dot{m}_{HC}$  [g/s] e  $NO_x$   $\dot{m}_{NOX}$  [g/s] podem ser calculadas pelas equações 2.37, 2.38, 2.39, 2.40, respectivamente, onde  $T_{MCI}$  [Nm] representa o torque do motor de combustão,  $\omega_{MCI}$  [rad/s] a velocidade angular do MCI e  $\rho_g$  [kg/m<sup>3</sup>] a densidade do combustível. Por fim, pode-se determinar o consumo  $F_C$  [l] e as emissões  $CO^{gkm}$  [g/km],  $HC^{gkm}$  [g/km] e  $NO_x^{gkm}$  [g/km] pelas equações 2.41, 2.42, 2.43 e 2.44.

Visto que as normas de emissões veiculares utilizam a notação de gramas por quilômetro, a quantidade de poluentes atmosféricos gerados durante o ciclo de condução é dividida pela distância percorrida do veículo  $x_{cyc}$  [km].

$$\dot{m}_{fc} = \frac{F_C^{ADV} T_{MCI} \omega_{MCI}}{3,6(10^6) \rho_g} \quad (2.37)$$

$$\dot{m}_{CO} = \frac{CO^{ADV} T_{MCI} \omega_{MCI}}{3,6(10^6)} \quad (2.38)$$

$$\dot{m}_{HC} = \frac{HC^{ADV} T_{MCI} \omega_{MCI}}{3,6(10^6)} \quad (2.39)$$

$$\dot{m}_{NOX} = \frac{NO_x^{ADV} T_{MCI} \omega_{MCI}}{3,6(10^6)} \quad (2.40)$$

$$F_C = \int_0^t \dot{m}_{fc} dt \quad (2.41)$$

$$CO^{gkm} = \frac{1}{x_{cyc}} \int_0^t \dot{m}_{CO} dt \quad (2.42)$$

$$HC^{gkm} = \frac{1}{x_{cyc}} \int_0^t \dot{m}_{HC} dt \quad (2.43)$$

$$NO_x^{gkm} = \frac{1}{x_{cyc}} \int_0^t \dot{m}_{NOX} dt \quad (2.44)$$

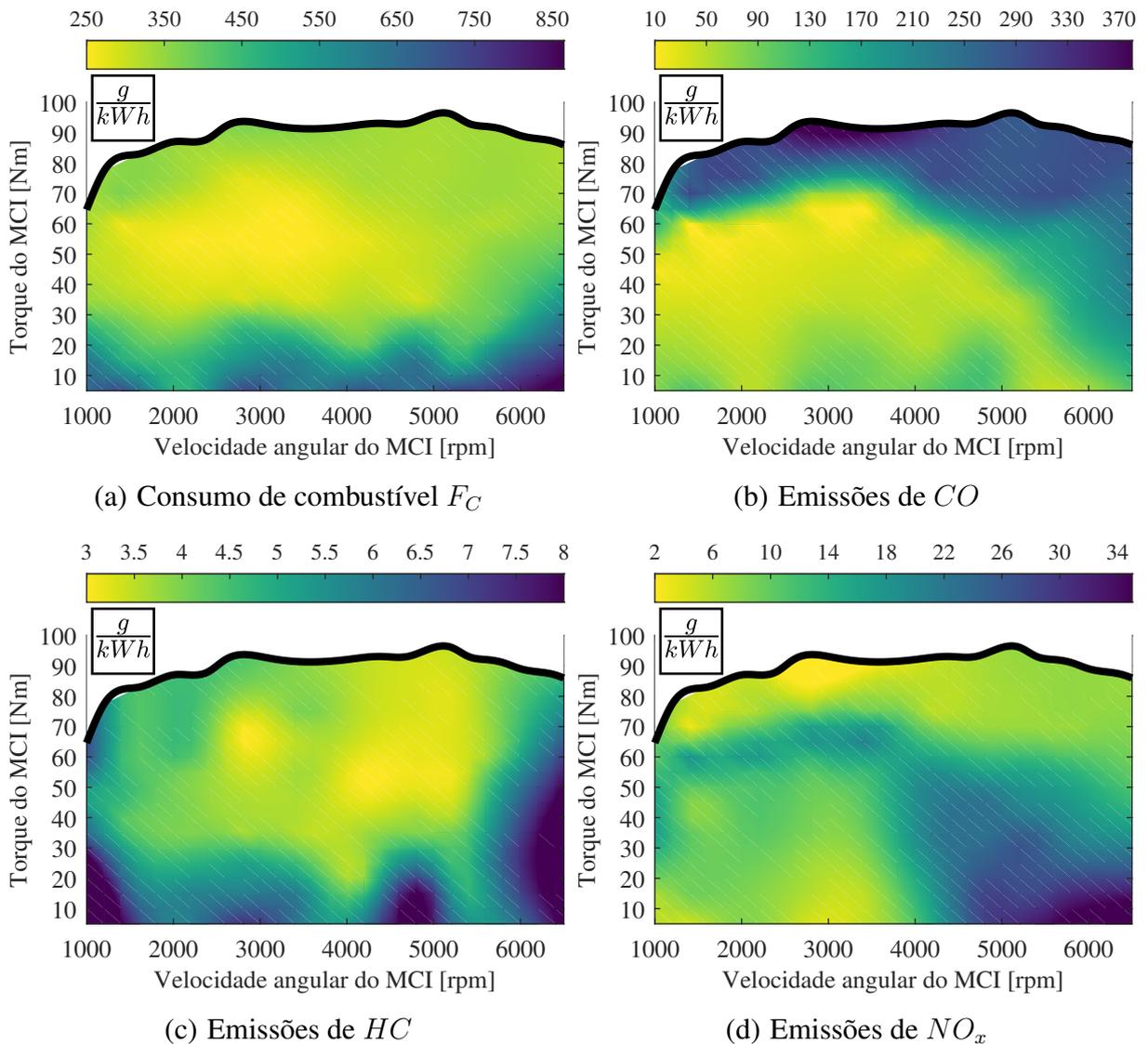


Figura 2.6: Mapas do MCI obtidos pela ferramenta ADVISOR™

## 2.4 Modelo do motor elétrico

Neste estudo, a curva genérica de torque do motor elétrico (Figura 2.7) é determinada por meio de otimização para que se possa definir a configuração ótima do ME a ser utilizado no sistema de propulsão elétrico. Tal abordagem foi anteriormente implementada em trabalhos da literatura (Eckert *et al.*; Eckert *et al.*, 2019b; 2020a) e é baseada na definição dos pontos de torque máximo  $T_{max}$  [Nm] e velocidade angular máxima em torque máximo  $\omega_{Tc}$  [rad/s], que representam a fase de torque constante e são otimizados pelo método i-AWGA.

A fase de potência constante da curva de torque do ME é, por sua vez, caracterizada por  $T_{Pc}$  [Nm] (Equação (2.45)), que corresponde a 30% do valor máximo de torque, conforme descrito por Tong, 2014. A velocidade angular  $\omega_{Pc}$  [rad/s], referente ao torque  $T_{Pc}$  para a curva de torque máximo, pode, então, ser determinada de acordo com a Equação (2.46). Além disso, o ponto de velocidade angular máxima  $\omega_{max}$  (torque nulo) pode ser calculado por progressão

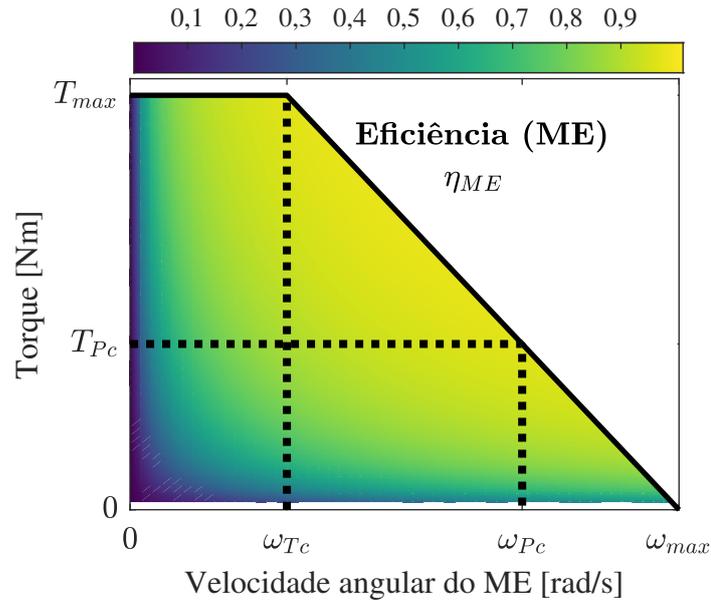


Figura 2.7: Mapa de eficiência do motor elétrico  $\eta_{ME}$

linear, baseado no método desenvolvido por Eckert *et al.*, 2018b.

$$T_{Pc} = 0.3T_{max} \quad (2.45)$$

$$\omega_{Pc} = \frac{T_{max}\omega_{Tc}}{T_{Pc}} \quad (2.46)$$

As eficiências do ME  $\eta_{ME}$  e do inversor  $\eta_{inv}$  são interpoladas de acordo com os dados de referência obtidos na Figura 2.7 e Figura 2.8, respectivamente. De maneira análoga, a inércia do ME  $I_{ME}$  [kgm<sup>2</sup>] e massa do sistema de tração elétrico (ME + inversor)  $M_{MEI}$  [kg] podem ser obtidas por meio da especificação de motores elétricos comerciais utilizados em veículos híbridos, como apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Dados de especificação do sistema de tração elétrico (Eckert *et al.*, 2020b)

Potência do motor elétrico ( $P_{ME}$ ) [kW]	3	5	7	12	20
Inércia do motor elétrico ( $I_{ME}$ ) [kgm <sup>2</sup> ]	0,04	0,05	0,06	0,08	0,11
Massa (ME + inversor) ( $M_{MEI}$ ) [kg]	9,9	13,5	16,8	25,1	41,5

Neste trabalho, a tensão nominal do sistema de armazenamento de energia é definido como  $V_{nom} = 48V$ , visto que sistemas com tensões superiores a 60 V representam um potencial risco à integridade do motorista (Kerler *et al.*, 2014). No projeto Roda Elétrica (subseção 1.3.1), foi definida a tensão  $V_{nom}$  de 48V, tendo em vista a grande disponibilidade desta configuração de bateria no mercado, bem como a facilidade na montagem de *pack* de baterias.

Para a arquitetura SAPHP, a corrente elétrica de descarga da bateria  $I$  [A] entregue ao motor elétrico pode ser dada pela primeira condição da Equação (2.47), onde  $V_{batt}$  [V] representa a tensão dinâmica da bateria (conforme será descrito na subseção 2.5). Tendo em vista que a configuração híbrida SSHSP apresenta apenas um motor elétrico em sua topologia, o

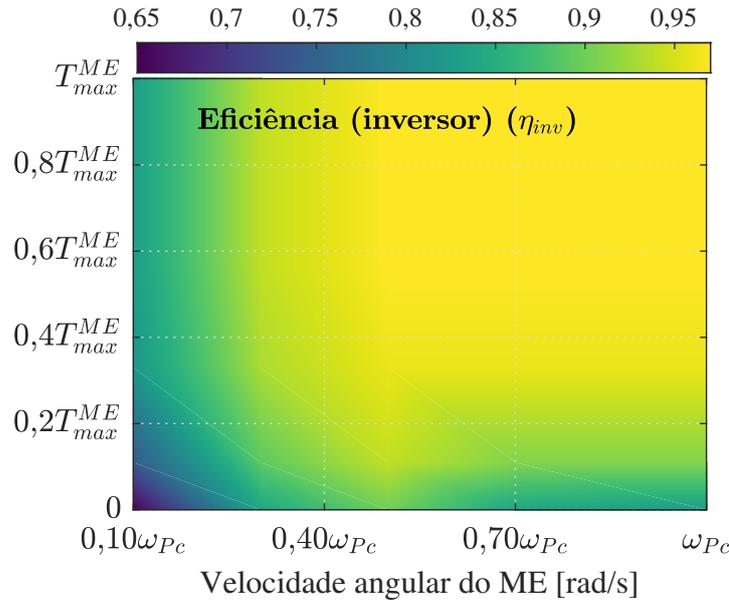


Figura 2.8: Mapa de eficiência do inversor  $\eta_{inv}$ . Adaptado de Rotering e Ilic, 2011

equacionamento é modificado para a segunda condição da Equação (2.47).

$$I = \begin{cases} \frac{2T_{eff}^{ME} \omega_{eff}^{ME}}{V_{batt} \eta_{ME} \eta_{inv}}, & \text{para SAPHP} \\ \frac{T_{eff}^{ME} \omega_{eff}^{ME}}{V_{batt} \eta_{ME} \eta_{inv}}, & \text{para SSHSP} \end{cases} \quad (2.47)$$

## 2.5 Modelo da bateria de íon-lítio

O estado de carga da bateria  $SoC$  [%] consiste em um parâmetro importante na análise do desempenho do sistema de armazenamento de energia, dado que este determina a capacidade disponível da bateria. Na simulação, o sinal de corrente elétrica  $I$  é destinado ao modelo da bateria, que é baseado no bloco de bateria do ambiente computacional Simulink™ (MathWorks, 2021). O valor do  $SoC$  é então utilizado como um dos parâmetros de entrada do controle *fuzzy* para gerenciamento de potência (como será abordado na subseção 2.7). O cálculo desta variável é dado pela Equação (2.48), onde  $SoC_0$  [%] e  $Q$  [Ah] representam o estado de carga inicial e capacidade da bateria, respectivamente.

$$SoC(t) = SoC_0 - \left( \frac{1}{Q} \int_0^t I(\tau) d\tau \right) \times 100\% \quad (2.48)$$

O limite mínimo do  $SoC$  é restringido para 40%, de maneira que evite descargas profundas e consequente redução na vida útil da bateria, como proposto por Correa *et al.*; Eckert *et al.*, 2015; 2019b. Uma vez determinado o estado de carga, pode-se calcular, por conseguinte, a profundidade de descarga  $DoD$  (Equação (2.49)).

$$DoD(t) = (100 - SoC(t))\% \quad (2.49)$$

A massa da bateria  $M_{batt}$  é dada pela Equação (2.50), em função da energia específica das baterias de íon-lítio  $S_E = 150$  [Wh/kg] (Thackeray *et al.*; Wang *et al.*; Eckert *et al.*, 2012; 2016; 2020a), tensão nominal  $V_{nom}$  e capacidade nominal  $Q_{nom}$  [Ah]. Além disso, o tamanho da bateria é limitado pela capacidade de energia  $E_{batt} = 11,4$  [kWh] (Cusenza *et al.*, 2019). Por meio da determinação da massa total do sistema de propulsão elétrico (dado pela soma das massas da bateria, ME e inversor), calcula-se a nova massa do veículo pós conversão híbrida, como apresentado na Equação (2.51), onde  $M_{con}$  corresponde à massa do veículo convencional.

$$M_{batt} = \frac{V_{nom}Q_{nom}}{S_E} \quad (2.50)$$

$$M = M_{con} + M_{batt} + M_{EMI} \quad (2.51)$$

Neste estudo, a tensão dinâmica da bateria é caracterizada de acordo com o princípio do modelo de bateria de Shepherd (Shepherd; Tremblay e Dessaint; Saw *et al.*, 1965; 2009; 2014). Equações 2.52 e 2.53 expressam o cálculo da tensão real da bateria  $V_{batt}$  [V], que é determinada pelos seguintes parâmetros: tensão constante do circuito equivalente da bateria  $E_0$  [V], resistência interna de primeira ordem  $R$  [ $\Omega$ ], corrente elétrica da bateria  $I_{batt}$  [A], constante de polarização  $K$  [V/Ah], amplitude da zona exponencial  $A$  [V] e inversa da constante de tempo da zona exponencial  $B$  [1/Ah]. A variável  $I_{batt}$  assume o valor de  $I$  (Equação (2.47)) em modo de descarga. No entanto, para o modo de carregamento da bateria,  $I_{batt}$  é dado por um valor constante de corrente elétrica  $I_c$ , que é determinado por processo iterativo de acordo com a tensão máxima da bateria  $V_c$  (subseção 2.5.1). Além disso, os valores positivo e negativo da corrente elétrica de baixa frequência  $I^*$  [A] correspondem aos modelos de carregamento e descarregamento da bateria, respectivamente.

$$V_{batt}^{(I^* < 0)} = E_0 - RI_{batt} - K \left( \frac{Q}{I_{batt}t - 0,1Q} \right) I^* - K \left( \frac{Q}{Q - I_{batt}t} \right) I_{batt}t + Ae^{-BI_{batt}t} \quad (2.52)$$

$$V_{batt}^{(I^* > 0)} = E_0 - RI_{batt} - K \left( \frac{Q}{Q - I_{batt}t} \right) I^* - K \left( \frac{Q}{Q - I_{batt}t} \right) I_{batt}t + Ae^{-BI_{batt}t} \quad (2.53)$$

### 2.5.1 Recarga da bateria

Após a simulação do PHEV ser realizada sob o ciclo de condução combinado (Figura 2.1), o recarregamento da bateria (pela rede elétrica) também é simulado, de maneira que possa ser definido o custo de energia elétrica utilizada para a recarga. Nos trabalhos publicados de Delfino *et al.*; Delfino *et al.*, 2017; 2019, discute-se a respeito da não-linearidade da fase de carregamento da bateria, no qual a corrente elétrica de recarga é reduzida no decorrer do aumento do  $SoC$ , uma vez que a tensão máxima da bateria é atingida. No estudo de Delfino *et al.*, 2019, um modelo de sistema de armazenamento de energia empírico é desenvolvido, onde uma identificação de grande número de parâmetros é realizada por meio de dados experimentais coletados.

Neste trabalho, o modelo de recarga da bateria é simplificado para um valor de corrente elétrica constante devido ao custo computacional durante o processo de otimização multi-objetivo e falta de dados obtidos em testes experimentais que seriam necessários para identificação do sistema em condição de recarga. Dessa forma, o estado final de carga  $SoC_{final}$  [%], obtido pós simulação do veículo hibridizado submetido ao perfil de condução proposto, é definido como condição inicial e um carregamento de corrente constante  $I_c$  [A] (Young *et al.*; Eckert *et al.*, 2013; 2020b) é realizado, considerando o máximo valor de  $I_c$ , de modo que a tensão máxima da bateria  $V_c$  [V] não seja excedida até a condição de recarga total ( $SoC = 100\%$ ). Um fator de eficiência  $\eta_c$  em relação às perdas por geração de calor e pela conversão de CA (Corrente Alternada) para CC (Corrente Contínua) também é introduzido ao modelo. A energia elétrica para a recarga da bateria  $J_c$  [Ws] é dada pela Equação (2.54), em função do tempo de carregamento  $C_t$  [s].

$$J_c = \int_0^{C_t} \eta_c I_c V_c dt \quad (2.54)$$

### 2.5.2 Degradação da bateria

A degradação e consequente redução da capacidade da bateria no decorrer dos ciclos se caracteriza como um dos grandes desafios da eletrificação veicular. Deste modo, um modelo de envelhecimento de bateria de íon-lítio é implementado neste estudo, de maneira que o estado de saúde da bateria possa ser avaliado e introduzido como um dos parâmetros a ser maximizados pelo algoritmo genético. Este modelo de envelhecimento da bateria utiliza uma abordagem genérica para tipos de baterias íon-lítio (LiFePO<sub>4</sub>, por exemplo), conforme proposto por Motapon *et al.*, 2020. Por apresentar caráter generalista, tal abordagem não é focada em procedimentos custosos para identificação de parâmetros para cada configuração de bateria analisada, sendo, portanto, adequada para métodos de otimização devido à redução do tempo de processamento. Além disso, estudos da literatura mostram que este modelo é preciso quando comparado com resultados experimentais. Para o modelo de simulação descrito neste trabalho, a temperatura ambiente é definida como constante ( $T_{amb} = 293,15 \text{ K} = 20^\circ\text{C}$ ) e os efeitos de temperatura no

comportamento das células da bateria são desconsiderados.

As capacidades da bateria no começo da vida (BOL - *Beginning of Life*) e fim da vida útil (EOL - *End of Life*) são representadas por  $Q_{BOL}$  [Ah] e  $Q_{EOL}$  [Ah], respectivamente. A degradação do sistema, causada pelo fator de envelhecimento  $\epsilon$  ao longo do  $k$ -ésimo meio ciclo (onde um ciclo completo é definido como uma descarga e recarga da bateria), pode ser expressa pela Equação (2.55). Além disso, o aumento da resistência interna do circuito equivalente, que corresponde a um fator crucial para o desempenho de baterias aplicadas em veículos eletrificados (Omar *et al.*; Saw *et al.*, 2014; 2014), é determinada de maneira análoga (Equação (2.56)).

$$Q(k) = Q_{BOL} - \epsilon(k)(Q_{BOL} - Q_{EOL}) \quad (2.55)$$

$$R(k) = R_{BOL} + \epsilon(k)(R_{BOL} - R_{EOL}) \quad (2.56)$$

O fator de envelhecimento da bateria  $\epsilon$ , por sua vez, é determinado pela Equação (2.57), em função da profundidade de descarga  $DoD$  (Equação (2.49)). Quando  $k$  é zero,  $\epsilon$  também é zero, representando a condição BOL (começo de vida da bateria). Além disso,  $Cl$  está associado ao número máximo de ciclos da bateria e pode ser calculado pela Equação (2.58). A constante de número de ciclo é denotado por  $H$ , a constante de Arrhenius é expressa por  $\psi$  e a corrente elétrica média durante meio ciclo é representada por  $I_c^a$  [A] em modo de recarga e  $I_{dis}^a$  [A] em modo de descarga. Os fatores expoentes para  $DoD$ , perfis de corrente de descarga e recarga são representados por  $\xi$ ,  $\gamma_{dis}$  e  $\gamma_c$ , respectivamente. O termo  $T_{ref}$  [K] corresponde à temperatura ambiente nominal.

$$\epsilon(k) = \epsilon(k-1) + \frac{1}{2Cl(k-1)} \left( 2 - \frac{DoD(k-2) + DoD(k)}{DoD(k-1)} \right) \quad (2.57)$$

$$Cl(k) = H \left( \frac{DoD(k)}{100} \right)^{-\xi} \exp \left( -\psi \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{amb}(k)} \right) \right) (I_{dis}^a(k))^{-\gamma_{dis}} (I_c^a(k))^{-\gamma_c} \quad (2.58)$$

Vale pontuar que uma das suposições do modelo de envelhecimento apresentado é que o primeiro meio ciclo do processo de ciclagem da bateria (isto é  $k = 1$ ) deve ser iniciado pelo processo de descarga da bateria. A partir do quarto ciclo ( $k > 3$ ), o modelo inicia o cálculo do fator de envelhecimento  $\epsilon$  para os ciclos seguintes, conforme descrito pela Equação (2.57). No que diz respeito às simplificações do modelo matemático que prevê a vida útil da bateria,  $\epsilon$  é calculado para todos os casos em que  $k$  apresenta número par. Sendo assim, para valores ímpares do meio ciclo  $k$ , o sistema aguarda o próximo meio ciclo, que corresponderá ao perfil de recarregamento (valor par para  $k$ ), de modo que possa ser garantida a função crescente monotônica para o fator  $\epsilon$ . Além disso, para qualquer caso em que  $DoD(k) = DoD(k-1) = DoD(k-2)$ , o estado de carga da bateria  $SoC$  permanece constante, nenhuma descarga ou recarga é realizada e, conseqüentemente, o fator  $k$  não é modificado. Por fim, uma limitação do

modelo apresentado se refere ao envelhecimento por tempo de inatividade (do inglês, *calendar aging*), que não é levado em consideração nestes equacionamentos.

De acordo com a norma ISO 12405-2 (ISO, 2012), a bateria atinge seu fim da vida útil quando a capacidade de descarga é reduzida para 80% da capacidade da bateria no começo da vida, ou seja,  $\epsilon = 0$ . Neste estudo, esta suposição é utilizada como referência para o cálculo do estado de saúde da bateria  $SoH$ , que é dada pela razão entre a capacidade atual da bateria  $Q$  e a sua capacidade inicial em condição BOL  $Q_{BOL}$ , como apresentado na Equação (2.59).

$$SoH(k) = \frac{Q(k)}{Q_{BOL}} \quad (2.59)$$

Para que seja possível a estimativa do  $SoH$ , cada configuração de bateria de PHEV obtida pelo método de otimização i-AWGA é submetida a 3000 horas de ciclagem, que tem por objetivo simular o processo de descarga gerada pelo perfil de corrente  $I$  enquanto o veículo está desempenhando o ciclo de condução combinado, bem como o modelo de recarga, representado pela corrente de recarga constante  $I_c$ , que permite a bateria atingir sua tensão máxima. Dessa forma, é possível avaliar a degradação da bateria para as soluções otimizadas encontradas pelo algoritmo genético.

## 2.6 Custo do kit de hibridização

Esta subseção apresenta o fator econômico das configurações hibridizadas analisadas neste trabalho (SAPHP e SSHSP). É importante pontuar que sistemas de propulsão elétricos de maior tamanho fornecem melhores resultados no que diz respeito à economia de combustível e emissões de gases poluentes. Isto ocorre especialmente quando um controle otimizado de gerenciamento de potência é implementado. No entanto, tecnologia propulsora eletrificada necessita de componentes com custos significativos, os quais devem ser considerados no processo de conversão híbrida de veículo convencionais. Posto isso, neste trabalho, os custos do motor elétrico e bateria são avaliados de acordo com a Tabela 2.4. Os dados apresentados são baseados em custos definidos por fornecedores do mercado internacional (Golden Motor Technology; Shenzhen Everexceed Industrial; Howell Energy, 2021; 2021; 2021).

Tabela 2.4: Dados de custos de motor elétrico e bateria íon-lítio 48V

Motor elétrico		Bateria íon-lítio (48 V)	
Potência $P_{ME}$ [kW]	$\Gamma_{ME}$ [US\$]	Capacidade nominal $Q_{nom}$ [Ah]	$\Gamma_{batt}$ [US\$]
3	288	50	750
5	446	60	850
10	785	90	1000
20	1450	100	1190
— — —	— — —	120	1420
— — —	— — —	200	2180

Vale ressaltar que o custo do kit foi definido em dólares americanos [US\$], tendo em vista a variação cambial do real, nos últimos 12 meses, frente às moedas mais negociadas do mundo (Mota, 2020). Deste modo, os custos do motor elétrico  $\Gamma_{ME}$  [US\$] e bateria  $\Gamma_{batt}$  [US\$], de acordo com suas respectivas potência  $P_{ME}$  e capacidade nominal  $Q_{nom}$ , são determinados pela interpolação dos dados apresentados na Tabela 2.4. Neste sentido, o custo total  $\Gamma$  [US\$] do sistema propulsão elétrico é dado pela Equação (2.60).

$$\Gamma = \begin{cases} 2\Gamma_{ME} + \Gamma_{batt}, & \text{para SAPHP} \\ \Gamma_{ME} + \Gamma_{batt}, & \text{para SSHSP} \end{cases} \quad (2.60)$$

## 2.7 Controle baseado em lógica fuzzy

Os sistemas de controle *fuzzy* são amplamente utilizados em diversas áreas de pesquisa tais como sistemas térmicos (Krzywanski *et al.*, 2019), engenharia biomédica (Teodorescu *et al.*, 2017), sistemas fotovoltaicos (Guenounou *et al.*; Long e Geng, 2014; 2015), sistemas de transmissão automotivos (Eckert *et al.*; Wang *et al.*, 2019a; 2019b), gerenciamento de energia de veículos eletrificados (Rahman *et al.*; Li *et al.*, 2021; 2021a), estabilidade direcional (Silva *et al.*; Silva *et al.*, 2022; 2021a), energia eólica (Beddar *et al.*, 2016), sistemas de armazenamento de energia (Sahu e Patel; Mahmoudi *et al.*, 2017; 2021), dentre outros. Por esta razão, neste estudo, uma abordagem de controle baseado em lógica *fuzzy* tipo Mamdani foi adotada para troca de marchas e gerenciamento de potência. O método do processo de inferência de Mamdani é a opção padrão do *toolbox* do Matlab™ Fuzzy, além de ser indicado para aplicação em sistemas complexos de comportamento não-linear, semelhantes ao investigado neste trabalho. O método Mamdani também vem sendo aplicado com sucesso em procedimentos de otimização de controle *fuzzy*, conforme demonstrado na literatura (Mahmoudi *et al.*, 2021).

Como mencionado anteriormente na subseção 1.5, estratégias de controle para troca de marchas e ramificação da demanda de potência entre fontes de energia são fatores importante para garantir o aumento da eficiência e desempenho de PHEVs, sem que ocorra um aumento de emissões de gases poluentes e desgaste excessivo da bateria. Sendo assim, este trabalho apresenta um controle *fuzzy* otimizado, considerando diferentes parâmetros de entrada do veículo hibridizado. As Figuras 2.9 e 2.10 ilustram a atuação do controlador na tomada de decisão do veículo com arquitetura SAPHP e SSHSP, respectivamente, quando submetido a determinadas condições de condução.

Com intuito de se obter controladores *fuzzy* independentes que possam considerar parâmetros de entrada correspondentes, mas com funções de pertinência e pesos diferentes, foram desenvolvidos sistemas de controle distintos para o gerenciamento de potência e troca de marchas. No trabalho de Eckert *et al.*, 2019b, observa-se que os melhores resultados para o controle *fuzzy* de troca de marchas são obtidos por meio do método de defuzzificação por bissecção. En-

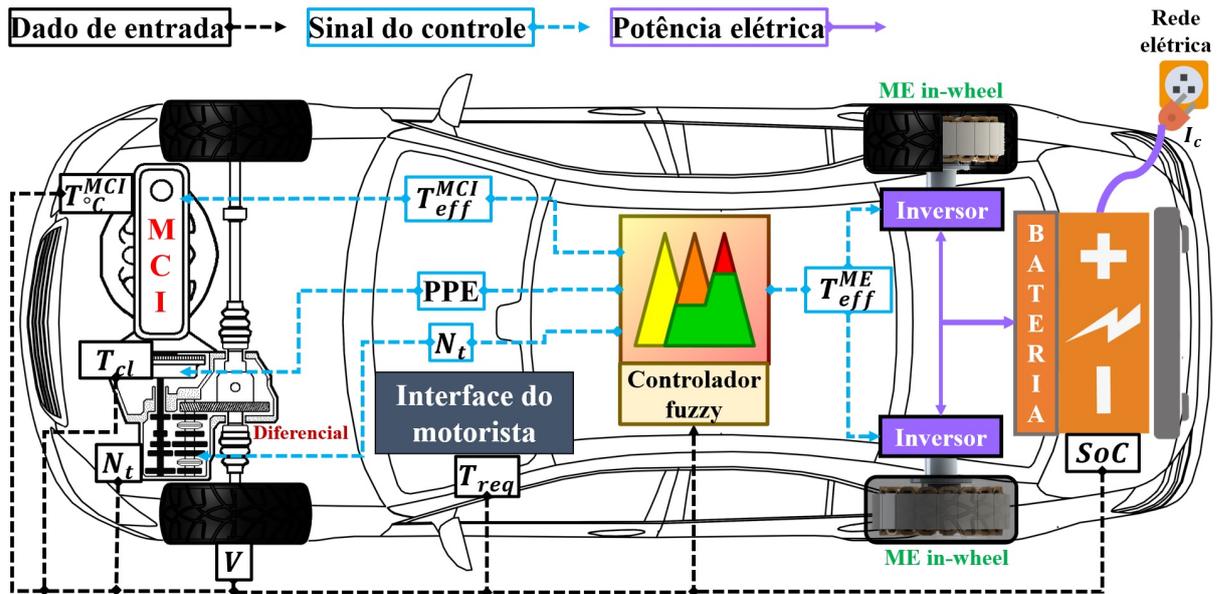


Figura 2.9: Esquematização da arquitetura SAPHP

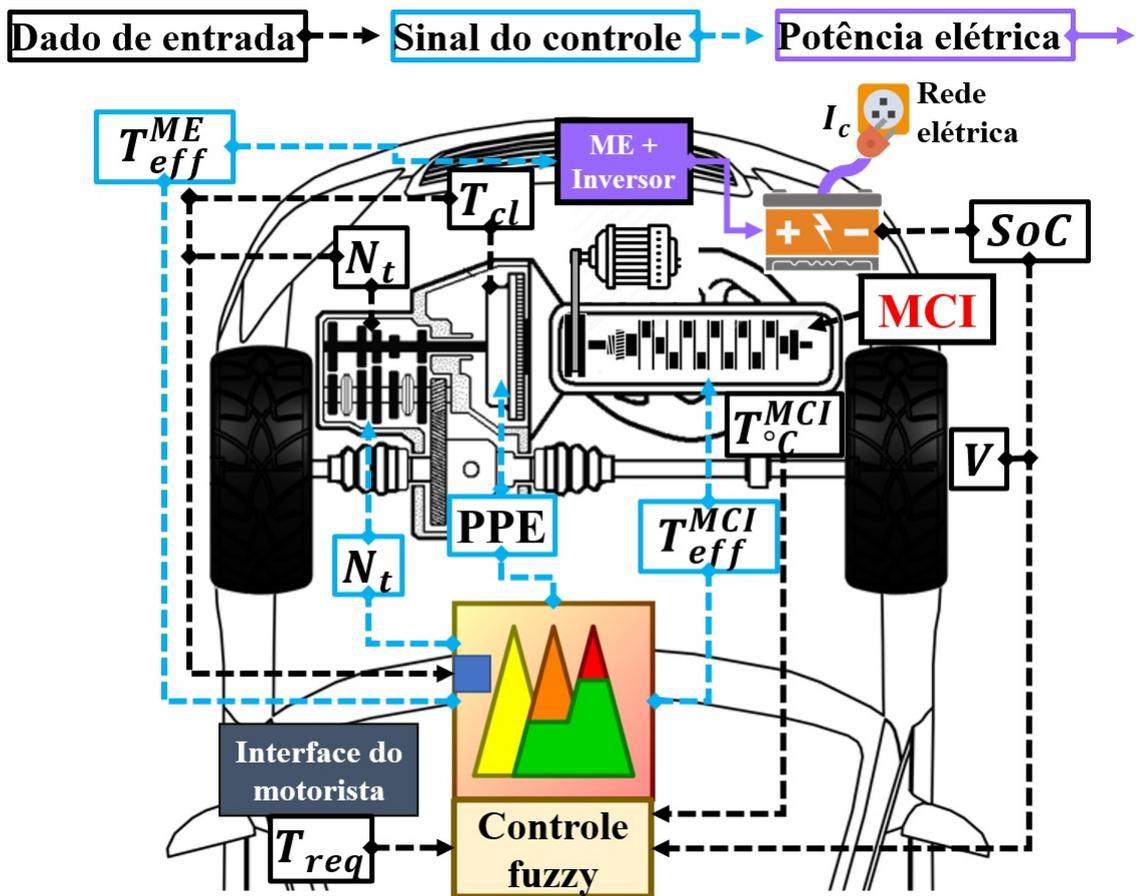


Figura 2.10: Esquematização da arquitetura SSHSP

tretanto, este método, que resulta em mudanças bruscas no sinal de saída, não fornece resultados satisfatórios para ramificação de potência do PHEV, visto que esta estratégia requer transições suaves entre as fontes de energia do veículo hibridizado.

### 2.7.1 Controle de gerenciamento de potência

O Controle do Gerenciamento de Potência (CGP) tem como objetivo distribuir a demanda de potência entre MCI e sistema de tração elétrica. Neste estudo, o controlador baseado em lógica *fuzzy* é caracterizado por quatro parâmetros de entrada, que influenciam na ramificação de potência entre as fontes de energia do veículo hibridizado plug-in, conforme ilustrado na Figura 2.11.

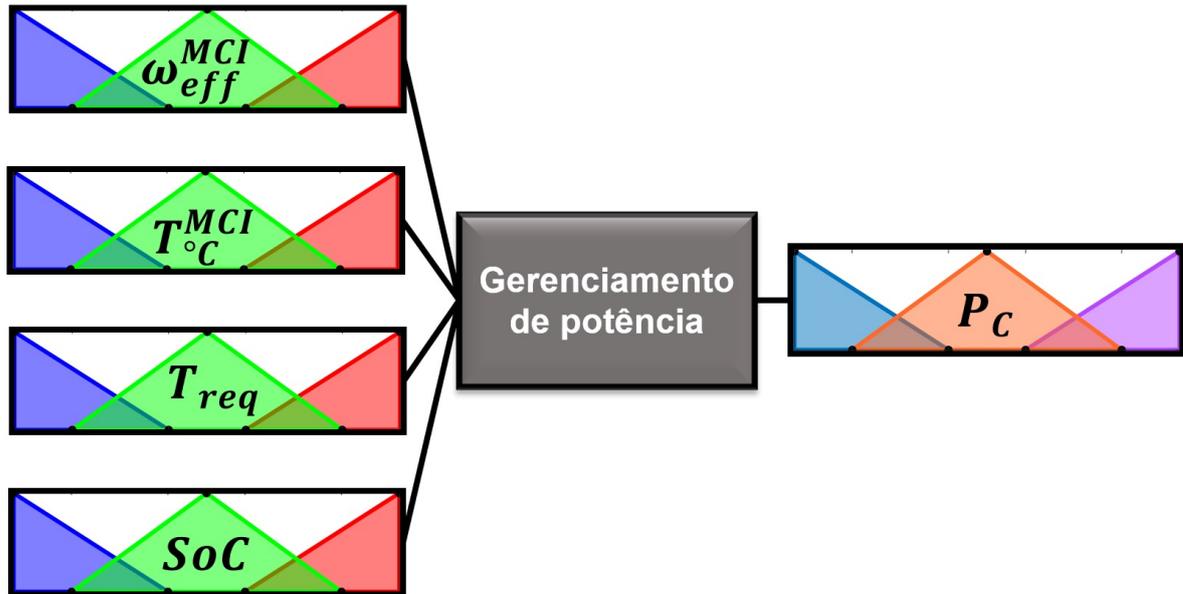


Figura 2.11: Controle *fuzzy* para gerenciamento de potência

A primeira variável de entrada é a velocidade angular efetiva do MCI  $\omega_{eff}^{MCI}$ , variando entre a velocidade em condição de marcha lenta (94 rad/s ou 900 RPM) e velocidade máxima do motor (681 rad/s ou 6500 RPM). A velocidade  $\omega_{eff}^{MCI}$  foi escolhida como entrada do controlador *fuzzy*, visto que este parâmetro influi no ponto de operação do MCI.

A temperatura do motor de combustão é a segunda entrada para o CGP devido ao fato que  $T_{°C}^{MCI}$  tem impacto significativo nas emissões de gases poluentes durante fase de partida a frio do ciclo de condução urbano (Figura 2.1). O limite inferior da entrada  $T_{°C}^{MCI}$  é dado pela temperatura ambiente (20 °C), enquanto o limite superior é definido pela temperatura ideal de operação do MCI, ou seja, 95 °C. A demanda de torque  $T_{req}$ , por sua vez, se configura como uma variável essencial para o desenvolvimento da estratégia do CGP, sendo, portanto, incluída como a terceira entrada do sistema de controle.

Por fim, o estado de carga da bateria  $SoC$  (limitado a valor mínimo de 40%) é a última entrada do CGP, tendo em vista que o valor deste parâmetro determina a disponibilidade do sistema de propulsão elétrico para entrega de torque ao PHEV. Uma vez que a bateria alcance o estado de carga  $SoC$  mínimo, o controle de gerenciamento de energia deve direcionar toda demanda de torque ao motor de combustão interna.

No que diz respeito à saída do controlador, o valor obtido após defuzzificação varia de

0 a 1. Para a arquitetura SAPHP, este parâmetro é representado por  $P_c$  e determina a fração do torque requerido  $T_{req}$  destinado ao sistema de propulsão elétrico, conforme descrito pela Equação (2.26). O restante do torque requerido é atribuído ao MCI (sistema de propulsão das rodas dianteiras), como apresentado pela Equação (2.11). No caso da configuração SSHSP,  $P_c$  corresponde à uma parcela do torque disponível do ME (Equação (2.26)), modificando o torque requerido do sistema de tração elétrica.

Neste estudo, controles otimizados baseados em lógica *fuzzy* são desenvolvidos para ramificação de potência e troca de marchas de PHEV. A otimização é baseada na técnica desenvolvida por Eckert *et al.*, 2019b. A Figura 2.12 ilustra as funções de pertinência das entradas e saídas do CGP, onde os parâmetros  $I_{Pn}$  e  $O_{Pn}$ , que definem as funções (quatro pontos inferiores e um superior), são ajustados e otimizados pelo algoritmo genético, conforme descrito posteriormente no Capítulo 3.

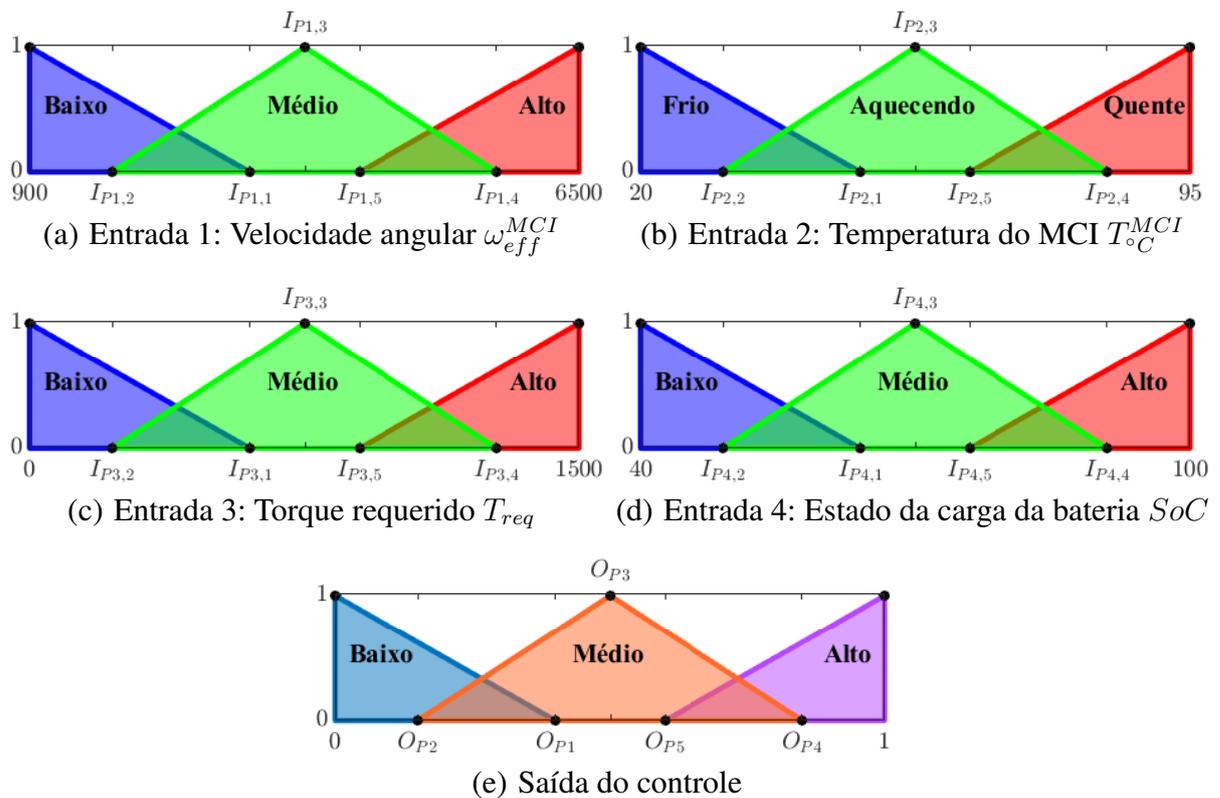


Figura 2.12: Funções de pertinência do controle *fuzzy* para gerenciamento de potência

O controlador *fuzzy* é composto por funções de pertinência triangulares divididas em três níveis distintos, que serão aqui representados genericamente por  $L_d$  (Baixo),  $M_d$  (Médio) e  $H_d$  (Alto). Para a temperatura do MCI (Figura 2.12b), entretanto, os níveis foram definidos como "Frio", "Aquecendo" e "Quente" para melhor associação à este parâmetro de entrada. As funções de pertinência com variação linear foram escolhidas visto que fornecem formulação menos complexas e melhor desempenho computacional, sendo amplamente aplicadas na área da engenharia (Mahmoud, 2018).

Além disso, a combinação dos três níveis de cada um dos parâmetros de entradas por meio de conexão "E" resulta em 81 regras. Para cada combinação possível, o algoritmo genético define, de maneira randômica, um nível para o sinal de saída  $P_c$  do controlador. De maneira similar, o i-AWGA atribui um peso para cada uma das regras e seleciona um dos seguintes métodos de defuzzificação  $D_z$  para o controle: centróide ( $D_z = 1$ ), bissecção ( $D_z = 2$ ), Média dos Máximos (MOM - *Middle of Maximum*) ( $D_z = 3$ ), Maior dos Máximos (LOM - *Largest of Maximum*) ( $D_z = 4$ ), Menor dos Máximos (SOM - *Smallest of Maximum*) ( $D_z = 5$ ).

Os parâmetros que definem as funções de pertinência de entrada e saída do controle são representados pelo vetor  $\mathbf{MF}_{\text{PS}}$ , conforme expresso pela Equação (2.61). De igual modo, as regras do controle *fuzzy* e pesos também são otimizados. O número de regras e pesos correspondem à todas as combinações possíveis dos níveis dos parâmetros de entrada. Como apresentado na Tabela 2.5, tal número de combinações pode ser calculada pelo princípio fundamental da contagem, obtendo-se  $3^4$  regras, onde 3 refere-se à quantidade de níveis do controle e 4 ao número de entradas. Sendo assim, as regras  $R_{P_n}$ , seus respectivos pesos  $W_{P_n}$  e o método de defuzzificação  $D_{z1}$  são, por sua vez, combinados no vetor  $\mathbf{RW}_{\text{PS}}$ , que é representado pela Equação (2.62).

$$[\mathbf{MF}_{\text{PS}}]_{1 \times 25} = [I_{P1,1} \ I_{P1,2} \ \dots \ I_{P1,5} \ I_{P2,1} \ I_{P2,2} \ \dots \ I_{P4,4} \ I_{P4,5} \ O_{P1} \ O_{P2} \ \dots \ O_{P4} \ O_{P5}] \quad (2.61)$$

$$[\mathbf{RW}_{\text{PS}}]_{1 \times 163} = [R_{P1} \ R_{P2} \ \dots \ R_{P81} \ W_{P1} \ W_{P2} \ \dots \ W_{P81} \ D_{z1}] \quad (2.62)$$

## 2.7.2 Controle de troca de marchas

Assim como no gerenciamento de potência, o controle para trocas de marchas também utiliza o torque  $T_{req}$ ,  $T_C^{MCI}$  e  $\omega_{eff}^{MCI}$  como entradas para o processo de inferência *fuzzy*, como apresentado na Figura 2.13. Deste modo, o controlador é capaz de identificar o momento mais adequado para redução ou ampliação nas trocas de marchas. Para a fase de partida a frio, por exemplo, o adiamento da ampliação nas trocas de marchas resulta em diminuição do período de aquecimento do MCI, evitando, por conseguinte, o aumento significativo de emissões de gases devido à baixa eficiência do catalisador. Na condição de MCI aquecido, entretanto, o controle de troca de marchas pode apresentar tendência à antecipação das ampliações de marcha, de maneira que a economia de combustível possa ser priorizada, conforme descrito em Eckert *et al.*, 2019a.

Além disso, a saída do controle  $G_c$ , que tem limite superior unitário, representa o valor de referência para o processo de decisão na troca de marchas. O parâmetro  $G_c$  é comparado com os limites inferior  $L_i$  e superior  $L_s$ , enquanto a marcha atual  $G_n$  é avaliada para que ocorra a redução, ampliação ou manutenção da marcha, de acordo com as condições propostas pela

Tabela 2.5: Regras do controle *fuzzy* para gerenciamento de potência

$\omega_{eff}^{MCI}$	$T_{\circ C}^{MCI}$	$T_{req}$	$SoC$		
			$L_d$	$M_d$	$H_d$
$L_d$	$L_d$	$L_d$	$R_{p1} W_{p1}$	$R_{p2} W_{p2}$	$R_{p3} W_{p3}$
		$M_d$	$R_{p4} W_{p4}$	$R_{p5} W_{p5}$	$R_{p6} W_{p6}$
		$H_d$	$R_{p7} W_{p7}$	$R_{p8} W_{p8}$	$R_{p9} W_{p9}$
	$M_d$	$L_d$	$R_{p10} W_{p10}$	$R_{p11} W_{p11}$	$R_{p12} W_{p12}$
		$M_d$	$R_{p13} W_{p13}$	$R_{p14} W_{p14}$	$R_{p15} W_{p15}$
		$H_d$	$R_{p16} W_{p16}$	$R_{p17} W_{p17}$	$R_{p18} W_{p18}$
	$H_d$	$L_d$	$R_{p19} W_{p19}$	$R_{p20} W_{p20}$	$R_{p21} W_{p21}$
		$M_d$	$R_{p22} W_{p22}$	$R_{p23} W_{p23}$	$R_{p24} W_{p24}$
		$H_d$	$R_{p25} W_{p25}$	$R_{p26} W_{p26}$	$R_{p27} W_{p27}$
$M_d$	$L_d$	$L_d$	$R_{p28} W_{p28}$	$R_{p29} W_{p29}$	$R_{p30} W_{p30}$
		$M_d$	$R_{p31} W_{p31}$	$R_{p32} W_{p32}$	$R_{p33} W_{p33}$
		$H_d$	$R_{p34} W_{p34}$	$R_{p35} W_{p35}$	$R_{p36} W_{p36}$
	$M_d$	$L_d$	$R_{p37} W_{p37}$	$R_{p38} W_{p38}$	$R_{p39} W_{p39}$
		$M_d$	$R_{p40} W_{p40}$	$R_{p41} W_{p41}$	$R_{p42} W_{p42}$
		$H_d$	$R_{p43} W_{p43}$	$R_{p44} W_{p44}$	$R_{p45} W_{p45}$
	$H_d$	$L_d$	$R_{p46} W_{p46}$	$R_{p47} W_{p47}$	$R_{p48} W_{p48}$
		$M_d$	$R_{p49} W_{p49}$	$R_{p50} W_{p50}$	$R_{p51} W_{p51}$
		$H_d$	$R_{p52} W_{p52}$	$R_{p53} W_{p53}$	$R_{p54} W_{p54}$
$H_d$	$L_d$	$L_d$	$R_{p55} W_{p55}$	$R_{p56} W_{p56}$	$R_{p57} W_{p57}$
		$M_d$	$R_{p58} W_{p58}$	$R_{p59} W_{p59}$	$R_{p60} W_{p60}$
		$H_d$	$R_{p61} W_{p61}$	$R_{p62} W_{p62}$	$R_{p63} W_{p63}$
	$M_d$	$L_d$	$R_{p64} W_{p64}$	$R_{p65} W_{p65}$	$R_{p66} W_{p66}$
		$M_d$	$R_{p67} W_{p67}$	$R_{p68} W_{p68}$	$R_{p69} W_{p69}$
		$H_d$	$R_{p70} W_{p70}$	$R_{p71} W_{p71}$	$R_{p72} W_{p72}$
	$H_d$	$L_d$	$R_{p73} W_{p73}$	$R_{p74} W_{p74}$	$R_{p75} W_{p75}$
		$M_d$	$R_{p76} W_{p76}$	$R_{p77} W_{p77}$	$R_{p78} W_{p78}$
		$H_d$	$R_{p79} W_{p79}$	$R_{p80} W_{p80}$	$R_{p81} W_{p81}$

Equação (2.63) (Eckert *et al.*, 2019a). No entanto, vale ressaltar que algumas regras sobrepõem estas restrições tais como a condição de neutro ( $Marcha = 0$ ) quando a velocidade do veículo é igual nula e o sistema de propulsão dianteiro não requer demanda de torque acima de zero. Os valores máximo e mínimo da velocidade angular do motor de combustão também são incluídos como restrições na estratégia de controle para trocas de marchas. Por fim, os limites  $L_i$  e  $L_s$  são introduzidos como genes do cromossomo no i-AWGA (Capítulo 3), resultando em valores otimizados para cada solução obtida.

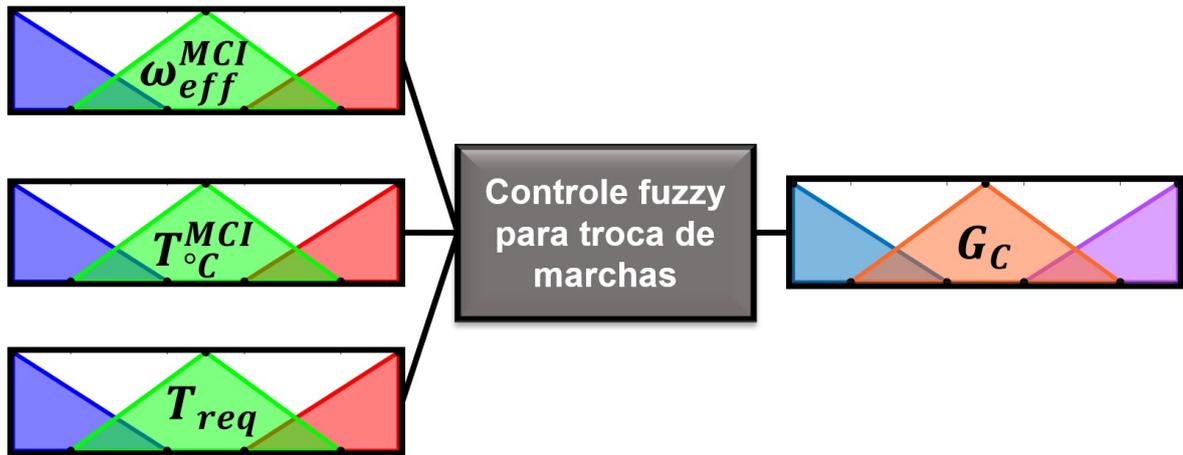


Figura 2.13: Controle *fuzzy* para troca de marchas

$$\text{Marcha} = \begin{cases} G_c < L_i \text{ e } G_n > 1 \therefore \text{Marcha} = G_n - 1 \\ L_i \leq G_c \leq L_s \therefore \text{Marcha} = G_n \\ G_c > L_s \text{ e } G_n < 5 \therefore \text{Marcha} = G_n + 1 \\ \omega_{eff}^{MCI} \leq 94 \text{ e } G_n > 0 \therefore \text{Marcha} = G_n - 1 \\ \omega_{eff}^{MCI} \geq 681 \text{ e } G_n \leq 4 \therefore \text{Marcha} = G_n + 1 \\ V = 0 \text{ e } T_{req}^{diant} \leq 0 \therefore \text{Marcha} = 0 \end{cases} \quad (2.63)$$

De maneira análoga ao gerenciamento de potência, o controle *fuzzy* para troca de marchas é caracterizado por funções de pertinência triangulares com três níveis, definidas pelos parâmetros  $I_{G_n}$  (entradas) e  $O_{G_n}$  (saída), como ilustrado pela Figura 2.14. O vetor  $MF_{GS}$  para representação das funções de pertinência (entradas e saída) pode ser expresso pela Equação (2.64). As regras  $R_{G_n}$ , pesos  $W_{G_n}$  e método de defuzzificação  $D_{z2}$  são representados pelo vetor  $RW_{GS}$ , como mostrado na Equação (2.65).

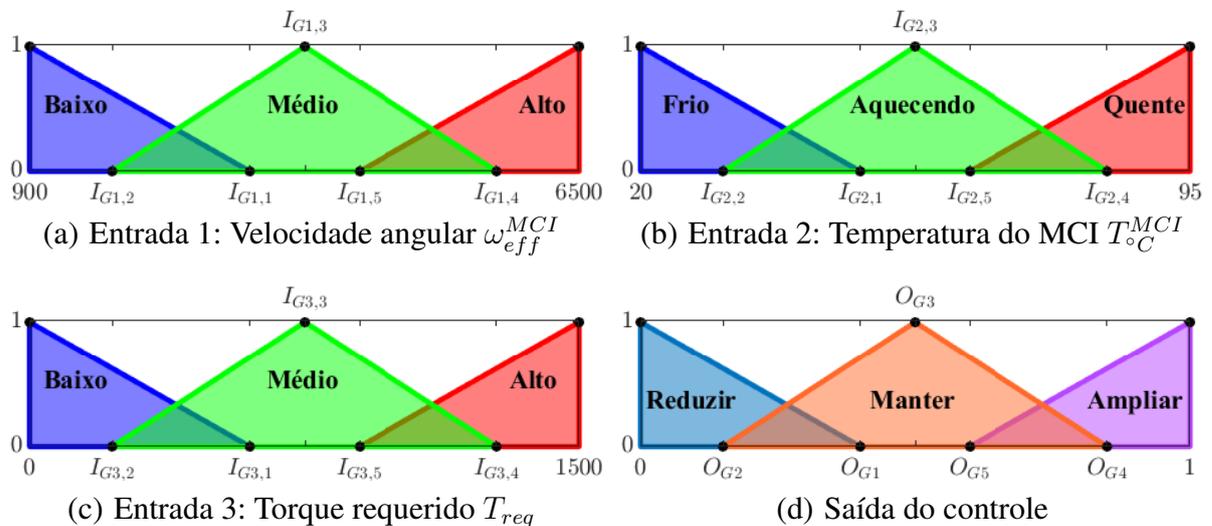


Figura 2.14: Funções de pertinência do controle *fuzzy* para troca de marchas

$$[\mathbf{MF}_{\mathbf{GS}}]_{1 \times 25} = [I_{G1,1} I_{G1,2} \dots I_{G1,5} I_{G2,1} I_{G2,2} \dots I_{G4,4} I_{G4,5} O_{G1} O_{G2} \dots O_{G4} O_{G5}] \quad (2.64)$$

$$[\mathbf{RW}_{\mathbf{GS}}]_{1 \times 55} = [R_{G1} R_{G2} \dots R_{G27} W_{G1} W_{G2} \dots W_{G27} D_{z2}] \quad (2.65)$$

Tendo em vista que o controle para troca de marchas não considera o estado de carga da bateria  $SoC$  como uma das variáveis de entrada, os números das regras e pesos são reduzidos para  $3^3$  (27 combinações), ou seja, três entradas e três níveis de controle *fuzzy*. Tabela 2.6 apresenta todas as regras e pesos do controle de troca de marchas.

Tabela 2.6: Regras do controle *fuzzy* para troca de marchas

$\omega_{eff}^{MCI}$	$T_{\circ C}^{MCI}$	$T_{req}$					
		$L_d$		$M_d$		$H_d$	
$L_d$	$L_d$	$R_{g1}$	$W_{g1}$	$R_{g2}$	$W_{g2}$	$R_{g3}$	$W_{g3}$
	$M_d$	$R_{g4}$	$W_{g4}$	$R_{g5}$	$W_{g5}$	$R_{g6}$	$W_{g6}$
	$H_d$	$R_{g7}$	$W_{g7}$	$R_{g8}$	$W_{g8}$	$R_{g9}$	$W_{g9}$
$M_d$	$L_d$	$R_{g10}$	$W_{g10}$	$R_{g11}$	$W_{g11}$	$R_{g12}$	$W_{g12}$
	$M_d$	$R_{g13}$	$W_{g13}$	$R_{g14}$	$W_{g14}$	$R_{g15}$	$W_{g15}$
	$H_d$	$R_{g16}$	$W_{g16}$	$R_{g17}$	$W_{g17}$	$R_{g18}$	$W_{g18}$
$H_d$	$L_d$	$R_{g19}$	$W_{g19}$	$R_{g20}$	$W_{g20}$	$R_{g21}$	$W_{g21}$
	$M_d$	$R_{g22}$	$W_{g22}$	$R_{g23}$	$W_{g23}$	$R_{g24}$	$W_{g24}$
	$H_d$	$R_{g25}$	$W_{g25}$	$R_{g26}$	$W_{g26}$	$R_{g27}$	$W_{g27}$

Por fim, os controladores *fuzzy* apresentados neste capítulo seguem restrições construtivas, de modo que possam ser criadas configurações de funções de pertinência válidas para as entradas e saída do controle. Tais funções triangulares devem sempre se cruzar entre os níveis "Baixo"/"Médio" e "Médio"/"Alto", sem que ocorra a ligação entre os níveis das extremidades "Baixo"/"Alto". Visto que trata-se de condições introduzidas no algoritmo genético, este tópico será melhor detalhado no Capítulo 3 a seguir.

### 3 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Este capítulo apresenta o procedimento de otimização multiobjetivo utilizado no presente estudo para se obter configurações otimizadas de trens de potência de veículos hibridizados plug-in. Além disso, o método de otimização também é aplicado aos controladores *fuzzy* de troca de marchas e gerenciamento de potência por meio da busca por funções de pertinência, regras, pesos e método de defuzzificação mais apropriados para a minimização dos critérios escolhidos, que serão descritos a seguir.

#### 3.1 Formulação do problema de otimização

Neste trabalho, o problema de otimização é formulado e resolvido com base no método i-AWGA (*Interactive Adaptive-Weight Genetic Algorithm*) (Gen *et al.*, 2008), que foi aplicado com êxito em estudos publicados na literatura na área de otimização de sistemas veiculares tais como caixas de transmissão (Eckert *et al.*, 2021c), controle de troca de marchas (Barbosa *et al.*, 2022), motores elétricos (Eckert *et al.*, 2019b), controle de gerenciamento de energia (Eckert *et al.*, 2020a), dentre outros.

Neste trabalho, o problema de otimização implementado é caracterizado por uma abordagem multicritério com foco na minimização de três parâmetros principais: consumo equivalente  $F_{eq}$  [l], fator de emissões  $E_F$  e fator do sistema de propulsão elétrico  $P_F$ , os quais são apresentados em seguida.

##### 3.1.1 Consumo equivalente

Na literatura, métodos com diferentes abordagens tem sido desenvolvidos para a conversão da energia consumida pela bateria em consumo de combustível equivalente. No estudo de Lei *et al.*, 2019, é apresentada uma estratégia de minimização de consumo equivalente (ECMS - *Equivalent Consumption Minimization Strategy*) para um PHEV baseado em perfis de condução do cenário urbano. No artigo, a função de equivalência do consumo de energia elétrica em consumo de combustível é dependente de parâmetros tais como tensão de circuito aberto, resistência interna da bateria, potência da bateria, capacidade da bateria, estado de carga da bateria, capacidade calorífica do combustível e consumo de combustível.

Zhang *et al.*, 2020c, por sua vez, realizaram predição do consumo equivalente para veículo híbrido elétrico submetido a diferentes condições de tráfego, verificando o modelo com testes experimentais realizados no ANL (*Argonne National Laboratory*). Para tal, o consumo de gasolina equivalente ao processo de recarga da bateria foi determinado em função da capacidade total de energia da bateria, densidade da gasolina e consumo de combustível específico em região de operação de eficiência máxima do motor de combustão.

Para conveniência da análise comparativa do PHEV com o veículo convencional, neste

trabalho, o custo de recarga da bateria é convertido em consumo de combustível equivalente  $F_{ME}$  [l] (Eckert *et al.*, 2019b) de acordo com a relação dos custos de combustível  $F_{cost}$  [\$/l] e energia elétrica  $E_{cost}$  [\$/Ws], conforme descrito pela Equação (3.1), e consumo de energia elétrica para recarga da bateria  $J_c$  (Equação (2.54)).

O valor resultante de  $F_{ME}$  é adicionado ao consumo de combustível real do MCI  $F_C$  (Equação (2.41)), fornecido pelo mapa de consumo da ferramenta de simulação ADVISOR™. Deste modo, o consumo de combustível equivalente total  $F_{eq}$  [l] pode ser calculado por meio da Equação (3.2).

$$F_{ME} = J_c \frac{E_{cost}}{F_{cost}} \quad (3.1)$$

$$F_{eq} = F_C + F_{ME} \quad (3.2)$$

Sendo assim, o primeiro critério de otimização  $f_1$  é dado pela minimização do consumo de combustível equivalente  $F_{eq}$ , como apresentado pela Equação (3.3).

$$f_1 = \min (F_{eq}(\mathbf{X})) \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Fator de emissões de gases

O segundo critério de otimização é dado pela minimização das emissões de poluentes atmosféricos  $f_2$  (Equação (3.4)), que são quantificados pelos mapas de emissões do ADVISOR™ presentes no modelo do MCI (subseção 2.3). No modelo do motor de combustão, emissões de  $CO$ ,  $NO_x$  e  $HC$  são mensuradas e combinadas em um fator de emissões resultante  $E_F$  (Eckert *et al.*, 2019b) por meio de pesos adaptativos (Gen *et al.*, 2008), em função dos valores máximo e mínimo de cada poluente na população de soluções gerada pelo algoritmo genético, conforme expresso pela Equação (3.5).

$$f_2 = \min (E_F(\mathbf{X})) \quad (3.4)$$

$$E_F(\mathbf{X}) = CO^{factor} \frac{CO(\mathbf{X}) - CO^{min}}{CO^{max} - CO^{min}} + NO_x^{factor} \frac{NO_x(\mathbf{X}) - NO_x^{min}}{NO_x^{max} - NO_x^{min}} + HC^{factor} \frac{HC(\mathbf{X}) - HC^{min}}{HC^{max} - HC^{min}} \quad (3.5)$$

Além disso, este estudo tem como foco estabelecer pesos proporcionais para cada gás de exaustão baseado no dano à saúde humana e meio ambiente (abordagem qualitativa) e no valor numérico de gás emitido na atmosfera (abordagem quantitativa), de modo que a região

de operação mais segura nos mapas de emissões possa ser encontrada no balanço entre cada poluente analisado (Figuras 2.6b, 2.6c e 2.6d). Estes fatores de ponderação para cada poluente são calculados de acordo com as equações 3.6, 3.7 e 3.8, onde  $(CO/NO_x/HC)^{QNT}$  e  $(CO/NO_x/HC)^{MAK}$  representam, respectivamente, a quantidade de cada gás emitido durante o ciclo de condução analisado e máxima concentração do composto químico na atmosfera sem que ocorram potenciais riscos ao bem-estar humano.

O uso de fatores de importância para cada emissão veicular na formulação de um problema de otimização é relatado no estudo de Montazeri-Gh e Mahmoodi-K, 2016, onde o peso de cada composto químico emitido pelo PHEV ( $CO$ ,  $HC$  e  $NO_x$ ) é variado de acordo com o foco da função objetivo, que deve ser determinado pelo projetista. No entanto, para ampla revisão bibliográfica realizada no presente trabalho, não foram encontrados estudos que introduzem uma análise qualitativa para cada emissão veicular de poluentes atmosféricos na formulação do problema de otimização proposto.

$$CO^{factor} = \frac{\frac{CO^{QNT}}{CO^{MAK}}}{\frac{CO^{QNT}}{CO^{MAK}} + \frac{NO_x^{QNT}}{NO_x^{MAK}} + \frac{HC^{QNT}}{HC^{MAK}}} \quad (3.6)$$

$$NO_x^{factor} = \frac{\frac{NO_x^{QNT}}{NO_x^{MAK}}}{\frac{CO^{QNT}}{CO^{MAK}} + \frac{NO_x^{QNT}}{NO_x^{MAK}} + \frac{HC^{QNT}}{HC^{MAK}}} \quad (3.7)$$

$$HC^{factor} = \frac{\frac{HC^{QNT}}{HC^{MAK}}}{\frac{CO^{QNT}}{CO^{MAK}} + \frac{NO_x^{QNT}}{NO_x^{MAK}} + \frac{HC^{QNT}}{HC^{MAK}}} \quad (3.8)$$

Para a avaliação do grau de risco de cada poluente atmosférico para a saúde humana, foi utilizada como referência a documentação de valores MAK (*Maximale Arbeitsplatzkonzentration*) (Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015). Os valores MAK são estabelecidos pela "Comissão de Investigação de Riscos à Saúde de Compostos Químicos na Área de Trabalho", regida pela Fundação de Pesquisa Alemã (DFG - *Deutsche Forschungsgemeinschaft*). Tal índice é definido como a concentração máxima de uma substância química (seja ela um gás, vapor ou material particulado) no ar do ambiente de trabalho sem que ocorram efeitos adversos à saúde humana, assumindo usualmente uma exposição de 8 horas diárias ou 40 horas semanais. Sendo assim, o banco de dados criado pela DFG tem como objetivo fornecer uma classificação do potencial tóxico de composições químicas na atmosfera ocupacional (IFA, 2012).

No que diz respeito ao monóxido de carbono ( $CO$ ), as emissões deste poluente na atmosfera não devem exceder  $35 \text{ mg/m}^3$  para exposição humana nas condições propostas pela docu-

mentação de índices MAK descritas anteriormente. Emissões de  $CO$  consistem, para grande parte da região de operação do MCI, na maior parcela entre os poluentes atmosféricos emitidos pelo PHEV (Figura 2.6).

Os óxidos de nitrogênio  $NO_x$ , por sua vez, podem ser avaliados, de maneira aproximada, como dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), visto que o  $NO_2$  é o composto de óxido de nitrogênio mais presente e relevante em emissões na atmosfera, conforme descrito por Research Triangle Park, 1999. Dentre os gases analisados, este poluente atmosférico apresenta menor concentração máxima tolerável para exposição humana com  $NO_x^{MAK} = 0,95 \text{ mg/m}^3$ . No entanto, vale pontuar que, em termos comparativos, a quantidade emitida de  $NO_x$  é substancialmente menor que as emissões de  $CO$  em ampla parcela do mapa de emissões do MCI, modificando, dessa forma, o peso de emissões  $NO_x^{factor}$  (Equação (3.7)).

Apesar dos hidrocarbonetos não queimados ( $HC$ ) serem formados por centenas de substâncias químicas, os compostos químicos benzeno ( $C_6H_6$ ), formaldeído ( $CH_2O$ ), acetaldeído ( $C_2H_4O$ ), hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAH - *Polynuclear Aromatic Hydrocarbons*) e 1,3-butadieno ( $C_4H_6$ ) são de maior relevância nas emissões veiculares de  $HC$  devido ao maior dano que estas composições causam à saúde humana e meio ambiente (Hickey *et al.*, 2014). Deste modo, o valor da concentração máxima de  $HC$  para exposição humana  $HC^{MAK}$  foi determinado pela média dos índices de tolerância das emissões dos compostos químicos citados.

O formaldeído e acetaldeído apresentam valores MAK aplicáveis com  $0,37 \text{ mg/m}^3$  e  $91 \text{ mg/m}^3$ , respectivamente. Para os hidrocarbonetos  $C_6H_6$ ,  $C_4H_6$  e PAH, foram utilizados os índices EKA (*Expositionsäquivalente für krebserzeugende Arbeitsstoffe*), pertencente à documentação BAT (*Biologische Arbeitsstoff-Toleranzwerte*), que são valores limites usualmente baseados em efeitos equivalentes aos valores MAK, conforme descrito em Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2015.

Os índices EKA apresentam valores de concentração de substâncias químicas na atmosfera de acordo com a avaliação do material biológico no fim da exposição humana. Para o caso do benzeno ( $C_6H_6$ ), a exposição humana à concentração de  $2 \text{ mg/m}^3$  de  $C_6H_6$  na atmosfera resulta em  $25 \mu\text{g}$  de ácido S-fenilmercaptúrico (S-PMA) por grama de amostra urinária, o que se configura como valor máximo para saúde humana, segundo Wulandari *et al.*, 2018. Além disso, a concentração de 1,3-butadieno ( $C_4H_6$ ) de  $5,65 \text{ mg/m}^3$  está correlacionada ao valor limite de N-acetil-S-(2-hidroxi-3-butenil)-L-cisteína na urina sem que ocorram danos ao ser humano (Bechtold *et al.*; van Sittert *et al.*, 1994; 2000). O composto químico PAH, por sua vez, apresenta valor EKA de  $0,016 \mu\text{g/m}^3$  para a concentração crítica de 3-hidroxibenzo(a)pireno no organismo ( $0,45 \text{ ng}$  por grama de creatinina, de acordo com Lafontaine *et al.*, 2004). Baseado nesses dados, pode-se, portanto, propor uma concentração máxima aproximada de  $HC^{MAK} = 23 \text{ mg/m}^3$ .

### 3.1.3 Fator elétrico

O terceiro e último critério de otimização  $f_3$  (Equação (3.9)) está relacionado ao tamanho e custo do sistema de propulsão elétrico do veículo hibridizado, bem como o ciclo de vida da bateria. Uma vez que os parâmetros da bateria e ME são variáveis de projeto a ser otimizadas, é importante selecionar configurações de PHEV adequada no ponto de vista de desempenho veicular, eficiência e durabilidade do sistema de motorização auxiliar. Estudos de Eckert *et al.*; Eckert *et al.*, 2019b; 2020b mostraram que procedimentos de otimização focados apenas em eficiência energética resulta em grandes motores elétricos e baterias devido às vantagens do sistema de tração elétrica quando comparado com o trem de potência convencional.

Dessa forma, o critério de otimização  $f_3$  tem como objetivo a minimização do fator do sistema de propulsão elétrico  $P_F$ , que é dado em função de pesos adaptativos dos seguintes parâmetros: massa do kit de hibridização  $M_{es}$  (Equação (3.11)), o estado de saúde da bateria  $SoH$  (Equação (2.59)), tempo de recarga  $C_t$  e custo do sistema elétrico  $\Gamma$  (Equação (2.60)).

$$f_3 = \min (P_F(\mathbf{X})) \quad (3.9)$$

$$P_F(\mathbf{X}) = \frac{M_{es}(\mathbf{X}) - M_{es}^{min}}{M_{es}^{max} - M_{es}^{min}} + \frac{SoH^{max} - SoH(\mathbf{X})}{SoH^{max} - SoH^{min}} + \frac{C_t^{max} - C_t(\mathbf{X})}{C_t^{max} - C_t^{min}} + \frac{\Gamma^{max} - \Gamma(\mathbf{X})}{\Gamma^{max} - \Gamma^{min}} \quad (3.10)$$

$$M_{es} = \begin{cases} 2M_{EMI} + M_{batt}, & \text{para SAPHP} \\ M_{EMI} + M_{batt}, & \text{para SSHSP} \end{cases} \quad (3.11)$$

## 3.2 Método i-AWGA (*Interactive Adaptive-Weight Genetic Algorithm*)

O método de otimização i-AWGA desempenha uma busca ampla por uma série de soluções ótimas comprometidas com os critérios de otimização propostos, além de não ser limitada à condição de falsos mínimos (Lopes *et al.*, 2020), o que pode eventualmente ocorrer em outras técnicas de otimização. Deste modo, o problema de otimização será resolvido por meio do procedimento i-AWGA, que será detalhado a seguir.

### 3.2.1 Função objetivo

A população de indivíduos é avaliada de acordo com o valor do *fitness*  $F_t$  de cada solução obtida pelo algoritmo genético. Como expresso pela Equação (3.12),  $F_t$  é dado em função dos valores máximo  $f_j^{max}$  e mínimo  $f_j^{min}$  apresentados na população para cada critério de otimização  $j$ . Um fator de penalidade  $P_p$  é adicionado com objetivo de aumentar o valor  $F_t$  das soluções

não dominadas (fronteira de Pareto), onde  $P_p = 0$  para as soluções dominadas e  $P_p = 1$  para as não dominadas. Esta abordagem pondera a influência de cada critério de otimização e estreita a evolução da população no decorrer das gerações. Além disso, para as 10 primeiras gerações, um fator diversidade  $D_{iv}$  é introduzido, de modo que seja utilizado um método de *ranking* baseado em qualidade (*fitness*) e diversidade dos indivíduos da população. Isto faz com que, no começo do processo evolutivo, as soluções obtidas pelo algoritmo genético apresentem características mais diversificadas e distribuídas, o que auxilia na busca pela região que se encontra o mínimo global.

$$F_t(\mathbf{X}) = \begin{cases} \sum_{j=1}^3 \frac{f_j^{max} - f_j(\mathbf{X})}{f_j^{max} - f_j^{min}} + P_p(\mathbf{X}) + D_{iv}(\mathbf{X}), & \text{se: } G_{en} \leq 10 \\ \sum_{j=1}^3 \frac{f_j^{max} - f_j(\mathbf{X})}{f_j^{max} - f_j^{min}} + P_p(\mathbf{X}), & \text{se: } G_{en} > 10 \end{cases} \quad (3.12)$$

O fator  $D_{iv}$  (Equação (3.13)) é dado pela soma do inverso do quadrado das distâncias do cromossomo candidato aos outros cromossomos já selecionados para cruzamento em gerações passadas, conforme proposto por Winston, 1993. Tal distância  $d$  entre indivíduos é aqui representada pelo vetor resultante formado pela diferença dos três critérios de otimização  $f_j$ , como descrito pela Equação (3.14), onde  $f_j^{cand}$  e  $f_j^{selec}$  correspondem aos valores dos critérios para o cromossomo candidato e aquele selecionado nas gerações anteriores, respectivamente. A variável  $C_{sel}$ , por sua vez, representa o número de indivíduos já selecionados até a geração passada ( $G_{en} - 1$ ). Tendo em vista que na primeira geração ainda não há histórico de cromossomos selecionados,  $D_{iv} = 0$  para esta condição.

$$D_{iv}(\mathbf{X}) = \begin{cases} \sum_{v=1}^{C_{sel}} \frac{1}{d_v^2}, & \text{se: } G_{en} > 1 \\ 0, & \text{se: } G_{en} = 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$d = \sqrt{(f_1^{cand} - f_1^{selec})^2 + (f_2^{cand} - f_2^{selec})^2 + (f_3^{cand} - f_3^{selec})^2} \quad (3.14)$$

### 3.2.2 Variáveis de projeto e restrições

Como mencionado anteriormente, neste estudo, são consideradas diferentes variáveis de projeto tais como capacidade nominal da bateria  $Q_{nom}$  [Ah], torque máximo do motor elétrico  $T_{max}$  [Nm], velocidade angular do motor elétrico em fase de potência constante  $\omega_{Tc}$  [rad/s] e relação de transmissão do sistema de polias  $N_{ME}$  (este último apenas para a arquitetura SSHSP). Os parâmetros das funções de pertinência  $\mathbf{MF}_{PS}$  e regras e pesos  $\mathbf{RW}_{PS}$  do controle baseado

em lógica *fuzzy* para gerenciamento de potência também são otimizados. De maneira análoga, o controle de troca de marchas é otimizado pelos vetores  $\mathbf{MF}_{GS}$  (configuração das funções triangulares de pertinência) e  $\mathbf{RW}_{GS}$  (regras e respectivos pesos). Tais parâmetros são definidos como genes do vetor cromossomo  $\mathbf{X}$ , conforme expresso pela Equação (3.15). Para a arquitetura SSHSP, o parâmetro  $N_{ME}$  é adicionado ao  $\mathbf{X}$ .

$$[\mathbf{X}] = \begin{cases} [Q_{nom} T_{max} \omega_{Tc} \mathbf{MF}_{PS} \mathbf{MF}_{GS} \mathbf{RW}_{PS} \mathbf{RW}_{GS} L_i L_s], & \text{se: SAPHP} \\ [Q_{nom} T_{max} \omega_{Tc} N_{ME} \mathbf{MF}_{PS} \mathbf{MF}_{GS} \mathbf{RW}_{PS} \mathbf{RW}_{GS} L_i L_s], & \text{se: SSHSP} \end{cases} \quad (3.15)$$

Além disso, a otimização está condicionada às restrições de parâmetros de projeto do sistema de propulsão elétrico, conforme descrito por  $C(\mathbf{X})$  (Equação (3.16)). Outras condições são também avaliadas para evitar soluções com resultados indesejáveis, que não devem estar contidos nos dados da população. Para evitar o crescimento das emissões de gases poluentes, as configurações híbridas não podem apresentar índices de emissões superiores aos obtidos pelo veículo convencional (representado por  $CO^{con}$ ,  $HC^{con}$  e  $NO_x^{con}$ ). O estado de carga após o fim do ciclo de condução  $SoC_{final}$ , por sua vez, é limitado em 40% para evitar alta profundidade de descarga, que pode causar, conseqüentemente, degradação excessiva da bateria (Fuhs; Correa *et al.*; Eckert *et al.*, 2008; 2015; 2020a). O consumo de combustível também é restringido em valores iguais ou inferiores ao consumo  $F_C^{con}$  [l] do veículo convencional.

$$C(\mathbf{X}) = \begin{cases} 50 \text{ Ah} \leq Q \leq 150 \text{ Ah} \\ 5 \text{ Nm} \leq T_{max} \leq 100 \text{ Nm}, & \text{somente para: SAPHP} \\ 5 \text{ Nm} \leq T_{max} \leq 50 \text{ Nm}, & \text{somente para: SSHSP} \\ 52 \text{ rad/s} \leq \omega_{Tc} \leq 209 \text{ rad/s} \\ 3 \text{ kW} \leq T_{max} \times \omega_{Tc} \leq 20 \text{ kW} \\ 0,5 \leq N_{ME} \leq 2, & \text{somente para: SSHSP} \\ CO(\mathbf{X}) \leq CO^{con}(\mathbf{X}) \\ HC(\mathbf{X}) \leq HC^{con}(\mathbf{X}) \\ NO_x(\mathbf{X}) \leq NO_x^{con}(\mathbf{X}) \\ COR_{min}(\mathbf{X}) \geq 0,99 \\ F_C \leq F_C^{con} \\ SoC_{final} \geq 40\% \end{cases} \quad (3.16)$$

No que diz respeito ao desempenho, soluções com baixa performance são eliminadas pela restrição do critério  $COR_{min}$ , que é adicionado ao  $C(\mathbf{X})$  (Barbosa *et al.*; Eckert *et al.*, 2020; 2021c). Este critério se baseia no coeficiente de correlação  $COR$  (Equação (3.17)), que compara o perfil de velocidade  $V$  [m/s] do veículo com a velocidade desejada do ciclo de condução  $V_{cic}$  [m/s], considerando o passo de tempo discreto de 0,1 s.

$$COR = \sqrt{\frac{(\sum (V_c - \bar{V}_{cic})) (V - \bar{V})^2}{\sum (V_{cic} - \bar{V}_{cic})^2 \sum (V - \bar{V})^2}} \quad (3.17)$$

No entanto, é importante pontuar que o i-AWGA modifica as funções de pertinência dos controles *fuzzy* (representadas pelos vetores  $\mathbf{MF}_{PS}$  e  $\mathbf{MF}_{GS}$ ) de acordo com os limites inferior e superior [ $Rg_{min}$   $Rg_{max}$ ] para cada uma das entradas ilustradas na Figura 2.12. Além disso, a interação entre os níveis das funções de pertinência deve ocorrer seguindo as restrições apresentadas nas equações 3.18 (gerenciamento de potência) e 3.19 (controle de troca de marchas).

$$F_{PS} = \left\{ \begin{array}{l} Rg_{i,min} < I_{Pi,3} < Rg_{i,max} \\ Rg_{i,min} < I_{Pi,2} < I_{Pi,1} \\ I_{Pi,5} < I_{Pi,4} < Rg_{i,max} \\ I_{Pi,2} < I_{Pi,3} < I_{Pi,4} \\ Rg_{i,min} < I_{Pi,1} < I_{Pi,5} \\ I_{Pi,1} < I_{Pi,5} < Rg_{i,max} \\ Rg_{j,min} < O_{P3} < Rg_{j,max} \\ Rg_{j,min} < O_{P2} < O_{P1} \\ O_{P5} < O_{P4} < Rg_{j,max} \\ O_{P2} < O_{P3} < O_{P4} \\ Rg_{j,min} < O_{P1} < O_{P5} \\ O_{P1} < O_{P5} < Rg_{j,max} \end{array} \right. \quad (3.18)$$

$$F_{GS} = \left\{ \begin{array}{l} Rg_{i,min} < I_{Gi,3} < Rg_{i,max} \\ Rg_{i,min} < I_{Gi,2} < I_{Gi,1} \\ I_{Gi,5} < I_{Gi,4} < Rg_{i,max} \\ I_{Gi,2} < I_{Gi,3} < I_{Gi,4} \\ Rg_{i,min} < I_{Gi,1} < I_{Gi,5} \\ I_{Gi,1} < I_{Gi,5} < Rg_{i,max} \\ Rg_{j,min} < O_{G3} < Rg_{j,max} \\ Rg_{j,min} < O_{G2} < O_{G1} \\ O_{G5} < O_{G4} < Rg_{j,max} \\ O_{G2} < O_{G3} < O_{G4} \\ Rg_{j,min} < O_{G1} < O_{G5} \\ O_{G1} < O_{G5} < Rg_{j,max} \\ 0 < L_i < L_s < 1 \end{array} \right. \quad (3.19)$$

### 3.2.3 População inicial

O processo de otimização é iniciado com 100 cromossomos  $\mathbf{X}$  gerados randomicamente de acordo com as restrições  $F_{PS}$  (Equação (3.18)),  $F_{GS}$  (Equação (3.19)) e  $C$  (Equação (3.16)). Como descrito por Girgis *et al.*, 2013, a aleatoriedade de indivíduos é necessário para o processo inicial de otimização. Sendo assim, o banco de dados correspondente aos parâmetros de projeto e controle dos veículos hibridizados descreve as soluções geradas aleatoriamente, definindo uma população inicial para o i-AWGA. A partir desta etapa, o processo evolutivo é então iniciado, realizando-se a seleção de cromossomos para cruzamento e mutação.

### 3.2.4 Seleção

Nesta etapa, é definida a maneira como os indivíduos serão selecionados para reprodução, cruzamento e mutação, produzindo novos membros para as gerações seguintes. Os variados métodos de seleção propostos na literatura tem como objetivo direcionar o processo de seleção para os membros mais aptos, de maneira que a reprodução destes possam eventualmente fornecer indivíduos ainda mais aptos que os atuais. Este procedimento simula, de maneira artificial, a seleção natural proposta por Charles Darwin, que é um mecanismo evolutivo de sobrevivência dos indivíduos mais aptos da população (Golberg, 1989). Dentre os métodos mais comuns na literatura, pode-se citar a seleção proporcional a aptidão, por torneio, por regime permanente e por *ranking*, conforme apresentado no trabalho de Goldberg e Deb, 1991.

Neste trabalho, os membros da população são selecionados, baseado nos valores de  $Ft(\mathbf{X})$ , pelo método de seleção aleatória por roleta, o qual se configura como o esquema de seleção proporcional a aptidão mais comum na implementação em algoritmos genéticos. Este tipo de seleção é conceitualmente equivalente a atribuir à cada indivíduo da população uma região fracionada de uma roleta circular com área proporcional a aptidão daquele membro (Mitchell, 1998).

A probabilidade de seleção  $S_P(\mathbf{X})$  pode ser determinada de acordo com a Equação (3.20), onde  $P_S$  representa o número de membros da população da geração atual. O valor de  $S_P(\mathbf{X})$  de um cromossomo  $\mathbf{X}$  corresponde a uma fração do  $Ft(\mathbf{X})$  daquele cromossomo pelo somatório dos valores de  $Ft(\mathbf{X})$  para todos os membros da população. Isto garante que as soluções mais comprometidas com os critérios de otimização  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  apresentem maiores chances de seleção no decorrer do processo evolutivo. Dessa forma, quanto mais aptos os indivíduos forem no que diz respeito ao processo evolutivo do algoritmo genético, maior serão os valores da função objetivo  $Ft(\mathbf{X})$  (*fitness* do cromossomo) e da probabilidade de seleção  $S_P(\mathbf{X})$ .

$$S_P(\mathbf{X}) = \frac{Ft(\mathbf{X})}{\sum_{X=1}^{P_S} Ft(\mathbf{X})} \quad (3.20)$$

### 3.2.5 Crossover e mutação

Segundo Holland, 1992, o operador de cruzamento (*crossover*) entre indivíduos de uma população é a ferramenta principal de variação e inovação utilizado pelos algoritmos genéticos, onde a mutação é responsável por evitar a estagnação do processo evolutivo em determinada região.

Para cada geração, 35 pares de cromossomos representados por  $\mathbf{X}_1$  e  $\mathbf{X}_2$  são randomicamente selecionados de acordo com a probabilidade  $S_P(\mathbf{X})$ . Com intuito de melhorar os resultados da população, cada variável de projeto do par de indivíduos são aleatoriamente combinadas pelo operador de cruzamento ou *crossover*, gerando cromossomos descendentes  $\mathbf{X}_C$ . Uma vez que atendam as restrições de otimização  $C$ ,  $F_{PS}$  e  $F_{GS}$ , os indivíduos gerados  $\mathbf{X}_C$  são incluídos na população.

Além disso, para que ocorra o crescimento da variabilidade entre os membros da população, um operador de mutação modifica, de maneira aleatória, genes dos cromossomos  $\mathbf{X}_1$ ,  $\mathbf{X}_2$  e  $\mathbf{X}_C$ , resultando na criação dos membros  $\mathbf{X}_{M1}$ ,  $\mathbf{X}_{M2}$  e  $\mathbf{X}_{MC}$ , respectivamente.

Quanto às taxas de cruzamento e mutação, muitas abordagens com diferentes probabilidades de ocorrência no processo evolutivo são apresentadas na literatura. Segundo Mitchell, 1998, não há resultados conclusivos que apontem configurações de algoritmos genéticos ideais para casos em geral; muitos pesquisadores tem, entretanto, trabalhado com parâmetros de otimização baseados em estudos previamente desenvolvidos que obtiveram resultados satisfatórios com o procedimento de otimização.

Neste estudo, a probabilidade de ocorrência de mutação de cada gene do cromossomo (variável de projeto) é definida em 50%, conforme descrito em trabalhos publicados de Eckert *et al.*; Eckert *et al.*, 2019a; 2020a. De igual modo, os cromossomos mutados são incluídos como membros da população se estes atenderem às restrições de otimização propostas. A Tabela A.1 do Apêndice A apresenta as regras do processo de mutação dos cromossomos. No cruzamento entre os indivíduos  $\mathbf{X}_1$  e  $\mathbf{X}_2$ , uma porcentagem de 50% também é atribuída para a probabilidade de herança, por parte do novo indivíduo gerado  $\mathbf{X}_C$ , dos genes de um dos dois membros selecionados para reprodução.

### 3.2.6 Limite de população e critério de convergência

Uma vez que os processos de cruzamento e mutação gerem o crescimento do tamanho da população  $P_S$ , um número máximo de membro  $P_{lim}$  é definido. Em experimentos realizados por De Jong, 1975, é mostrado que o tamanho de população mais indicado para implementação nos algoritmos genéticos varia entre 50 e 100 indivíduos. Neste trabalho, limite de membros da população  $P_{lim}$  é configurado para 200 indivíduos e, quando a população excede tal limite ( $P_S > P_{lim}$ ), as soluções de maior *ranking* de Pareto são eliminadas da população (Lopes *et al.*, 2020). Vale ressaltar, entretanto, que, no caso da população ser composta apenas de solu-

ções não dominadas (fronteira de Pareto), o limite da população é acrescido de 50 cromossomos ( $P_{lim} = P_{lim} + 50$ ) para que se possa evitar a eliminação de toda a população, conforme descrito por Eckert *et al.*, 2020a. Por fim, a convergência do algoritmo genético é dada pela repetição da mesma fronteira de Pareto por 20 gerações consecutivas, o que indica a estagnação do processo evolutivo (Barbosa *et al.*, 2021).

Por fim, é importante pontuar que todos os processos de simulação e etapas do algoritmo genético descritos no Capítulo 2 e no presente capítulo, respectivamente, se apresentam de maneira sequencial, podendo ser divididos em blocos que englobam os parâmetros de projeto, o modelo de simulação e procedimento de otimização propriamente dito. Para uma melhor compreensão da interligação entre todas as fases previstas pelo processo evolutivo, a Figura 3.1 ilustra um fluxograma detalhado, do início até a convergência, do método i-AWGA utilizado neste trabalho.

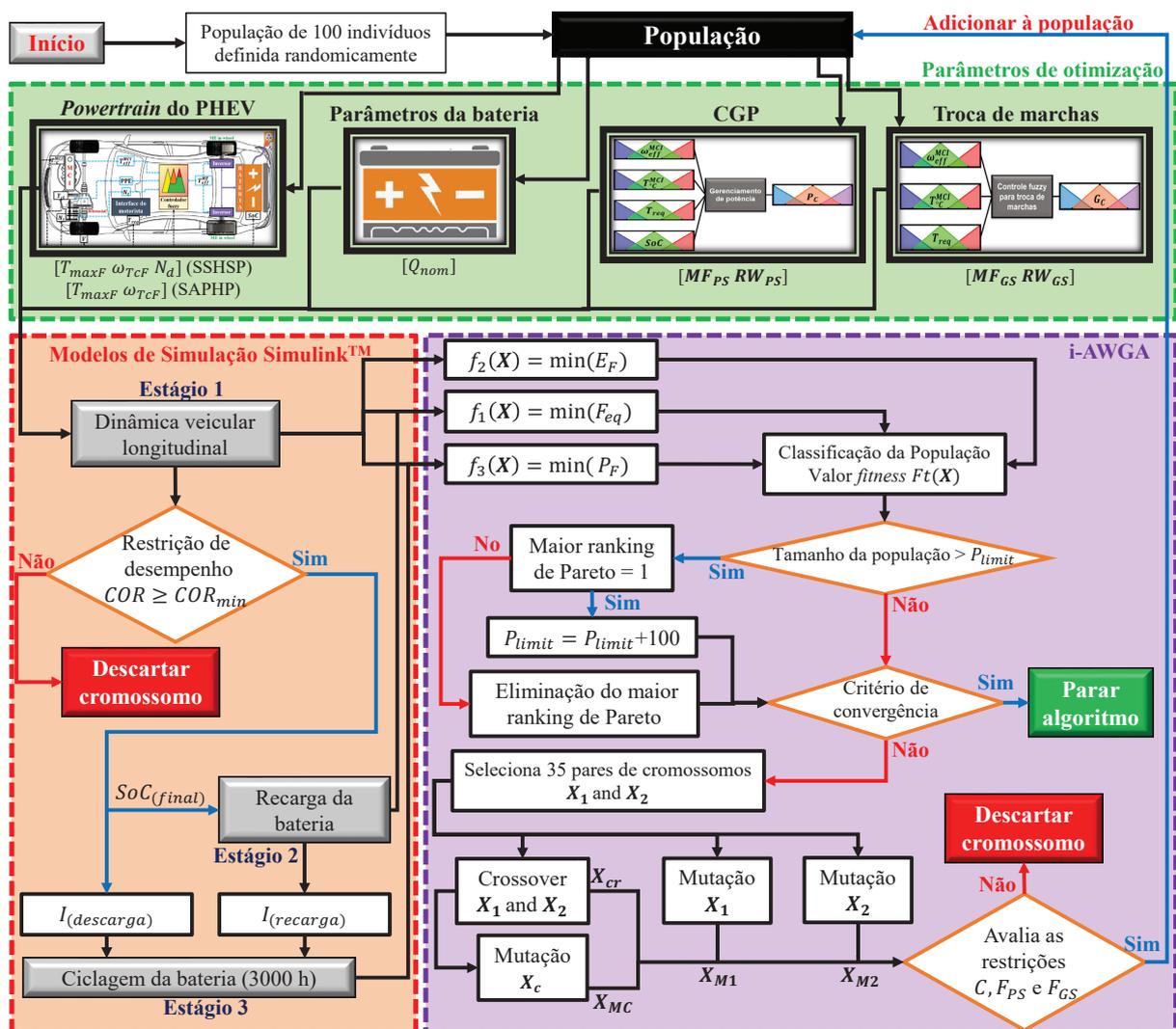


Figura 3.1: Fluxograma do procedimento de otimização

No fluxograma, é possível observar que o início da população é gerada de maneira randômica, conforme mencionado anteriormente neste capítulo. Cada membro da população é com-

posto pelos parâmetros de projeto (descrito no painel em verde) e são posteriormente submetidos aos estágios do processo de simulação (painel em laranja). Os estágios 1, 2 e 3 correspondem à dinâmica longitudinal veicular (e cálculo de consumo e emissões), recarga da bateria e ciclagem da bateria em 3000 horas, respectivamente, conforme descrito no Capítulo 2. No painel em roxo, são determinados os respectivos valores dos critérios de otimização para cada membro da população. Após esta etapa, a população é classificada e ranqueada de acordo com o valor  $F_t$ , iniciando o processo de seleção dos cromossomos (descrito nas subseções 3.2.4 e 3.2.5), caso o critério de convergência não seja atingido.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados das soluções não dominadas da fronteira de Pareto após a convergência do algoritmo genético. As configurações ótimas mais comprometidas com a minimização dos critérios de otimização  $f_1$  (consumo de combustível equivalente),  $f_2$  (fator de emissões de gases poluentes) e  $f_3$  (fator do sistema de propulsão elétrico) serão avaliadas para as arquiteturas propulsoras SSHSP e SAPHP, de modo que se possa realizar uma análise comparativa com o veículo convencional movido apenas por motor de combustão.

### 4.1 Arquitetura SSHSP

O primeiro caso abordado refere-se à arquitetura propulsora SSHSP. A Figura 4.1 ilustra as soluções da fronteira de Pareto, que são resultados da convergência da minimização dos critérios de otimização propostos neste trabalho. Dentre tais soluções não dominadas, as configurações de PHEV mais relevantes (no ponto de vista dos parâmetros que compõem a função objetivo  $F_t$ , conforme descrito pela Equação (3.12)) serão discutidas no decorrer desta seção.

As soluções de PHEV que apresentam menores valores de cada critério de otimização  $f_j$  são destacadas na Figura 4.1. As primeiras soluções analisadas são as configurações que apresentam menores valores para cada um dos três critérios de otimização, isto é, mínimo consumo de combustível equivalente ( $\min(f_1)$ ), mínimo fator de emissões veiculares ( $\min(f_2)$ ) e mínimo fator do sistema de propulsão elétrico ( $\min(f_3)$ ). Além disso, a solução de melhor *trade-off* ou mais comprometida com a função objetivo ( $\max(F_t)$ ) é selecionada para discussão dos resultados. Para a investigação dos potenciais benefícios desta arquitetura híbrida, uma análise comparativa é realizada entre suas configurações otimizadas e o veículo convencional. Utilizando o veículo convencional como referência do presente estudo, é possível avaliar os ganhos obtidos pelas soluções ótimas encontradas pelo algoritmo genético.

Os resultados obtidos por essas configurações e seus respectivos parâmetros do vetor cromossomo  $\mathbf{X}$ , que levam a minimização dos critérios de otimização, são apresentados pela Tabela 4.1 (ver Figura B.1 no Apêndice B para representação gráfica). Por meio da Tabela 4.1, é possível observar que as configurações hibridizadas em destaque melhoram consideravelmente a eficiência energética do veículo, bem como reduzem, de maneira substancial, as emissões de gases poluentes. No entanto, conforme ilustrado pela Figura 4.1, a configuração SSHSP que apresenta menor consumo de combustível equivalente  $F_{eq}$  não corresponde àquela de menor fator de emissões veiculares. Além disso, a solução com menor fator do sistema elétrico ( $\min(f_3)$ ) proporcionou um aumento de 5,86% em economia de combustível. Além disso, esta configuração reduziu emissões de  $CO$  em 4,69%,  $HC$  em 3,49% e  $NO_x$  em 10,22%, quando comparado com o veículo convencional movido a gasolina. Isto deve-se às restrições de otimização  $C(\mathbf{X})$ , que eliminaram as soluções com índices de emissões de gases poluentes maiores que aqueles

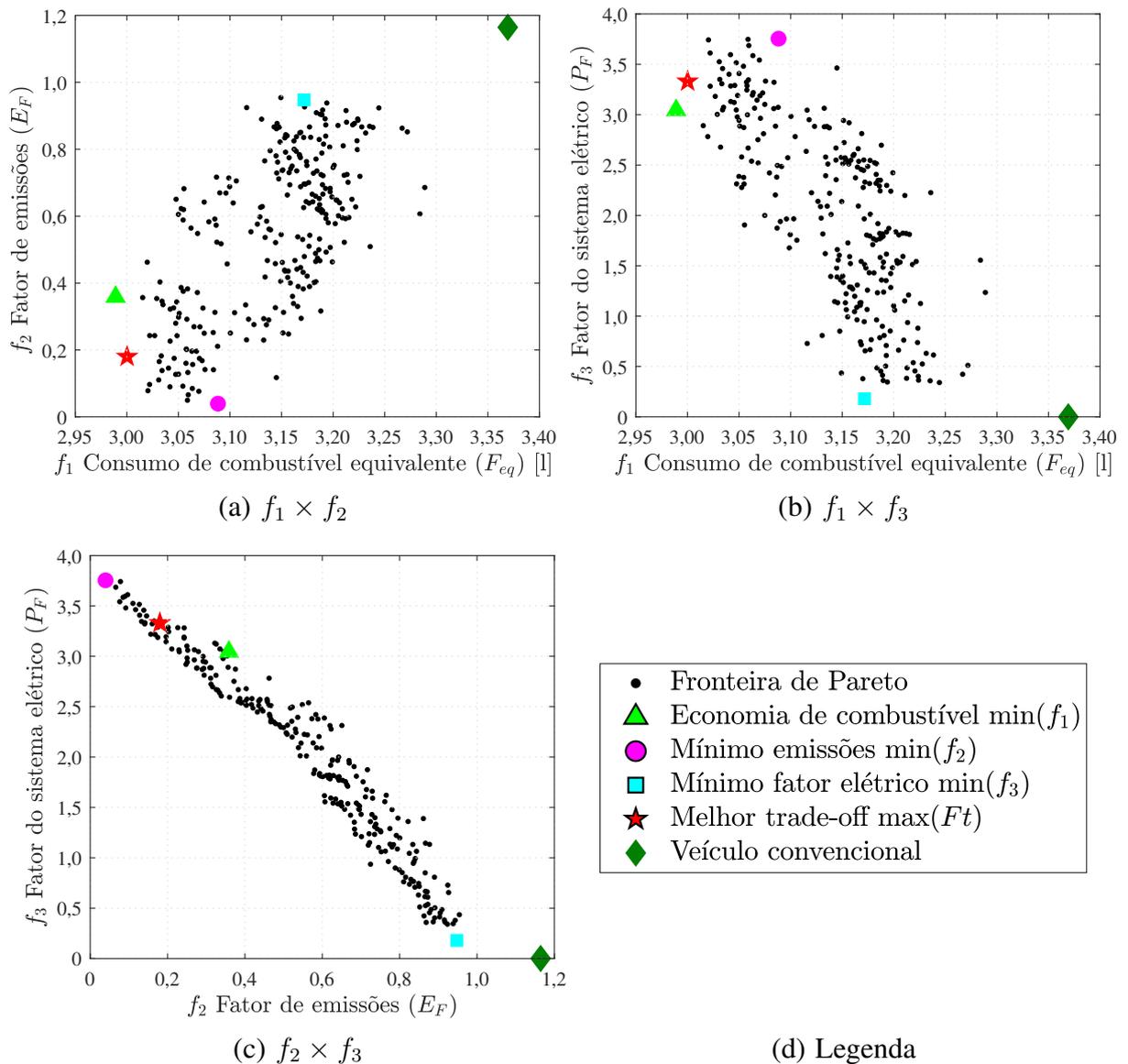


Figura 4.1: Soluções ótimas da fronteira de Pareto (arquitetura SSHSP)

obtidos pelo veículo convencional.

A configuração SSHSP que resulta em menor fator de emissões ( $\min(f_2)$ ), por sua vez, está diretamente associada com maiores valores do fator do sistema de propulsão elétrico ( $f_3$ ). Tal solução ótima foi capaz de reduzir o consumo de combustível equivalente em 8,34% e emissões em 22,25% ( $CO$ ), 29,51% ( $HC$ ) e 53,88% ( $NO_x$ ) em relação à configuração veicular não hibridizada.

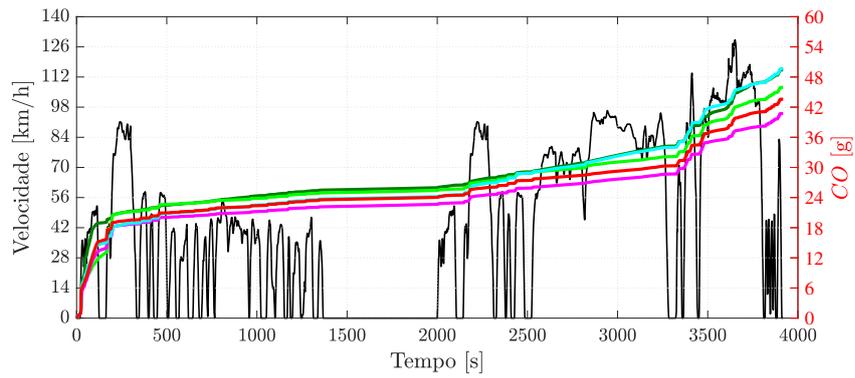
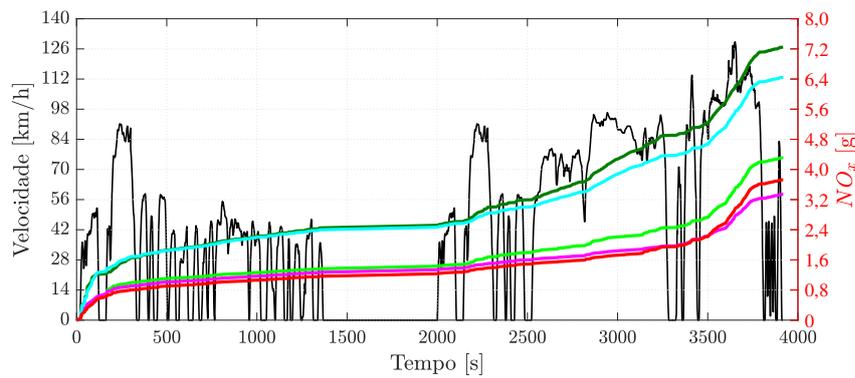
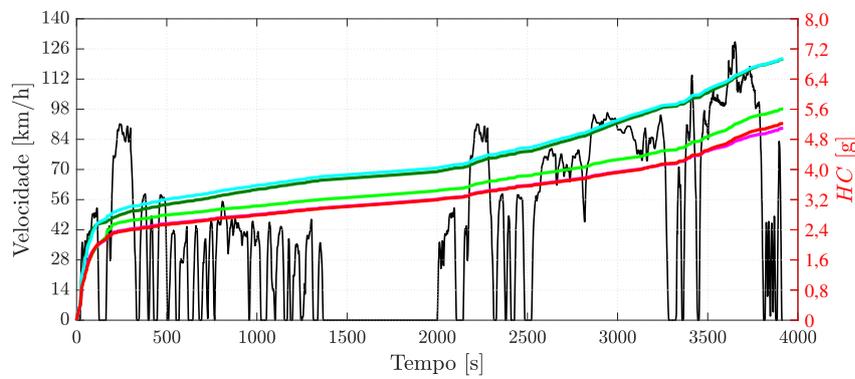
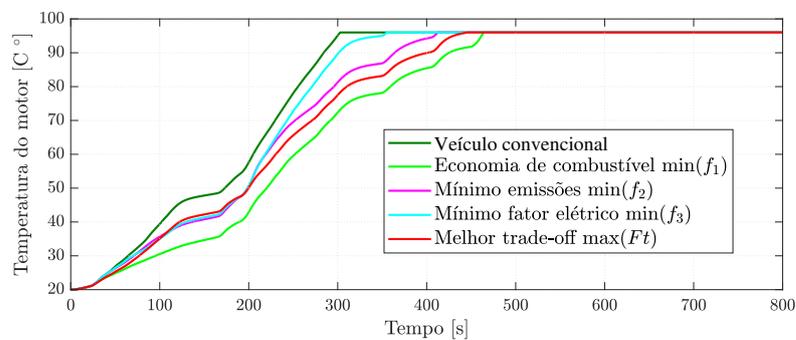
Para a solução de mínimo consumo equivalente ( $\min(f_1)$ ), esta apresentou sistema de propulsão elétrico similar ao da configuração  $\min(f_2)$ , conforme descrito na Tabela 4.1. No entanto, neste caso, os controles de gerenciamento de potência e troca de marchas priorizam os ganhos em economia de combustível (-11,29% de  $F_{eq}$ ), associado com reduções em emissões de  $CO$  (-12,15%),  $HC$  (-22,27%) e  $NO_x$  (-40,17%) quando comparado com o veículo convencional, representando uma diminuição menos relevante nos índices de emissões em relação à

Tabela 4.1: Resultados obtidos para configurações otimizadas de PHEV (arquitetura SSHSP) e veículo convencional

Resultados	Soluções				
	Veículo convencional	Cons. equiv. min ( $f_1$ )	Min. Emissões min ( $f_2$ )	Fator elétrico min ( $f_3$ )	Melhor <i>trade-off</i> max ( $F_t$ )
$F_{eq}(\mathbf{X})$ [l]	3,3693	2,9890	3,0883	3,1717	3,0002
$E_F(\mathbf{X})$	1,1645	0,3586	0,0394	0,9476	0,1801
$P_F(\mathbf{X})$	---	3,0446	3,7544	0,1797	3,3304
$COR(\mathbf{X})$	0,990	0,9965	0,9973	0,9952	0,9970
$CO$ [g/km]	1,1225	0,9861	0,8728	1,0699	0,9350
$NO_x$ [g/km]	0,1546	0,0925	0,0716	0,1388	0,0799
$HC$ [g/km]	0,1549	0,1204	0,1092	0,1495	0,1120
$C_t$ [h]	---	2,2076	2,5309	1,0661	2,3890
$SoH$	---	0,9509	0,9394	0,9857	0,9461
$\Gamma$ [US\$]	---	1846,5	1973,0	1081,8	1883,1
$M_{es}$ [kg]	---	55,51	62,79	29,93	57,61
$SoC_{final}$ [%]	---	51,47	43,73	77,38	47,46
Cromossomos					
$Q_{nom}$ [Ah]	---	122,82	139,44	61,28	127,32
$\omega_{Tc}$ [rpm]	---	1450,8	1802,9	1424,4	1552,3
$T_{max}$ [Nm]	---	46,22	44,95	21,67	46,22
$N_{ME}$	---	0,824	0,744	0,528	0,824
$D_{z1}$	---	LOM (4)	LOM (4)	SOM (5)	LOM (4)
$D_{z2}$	---	Bissecção (2)	Bissecção (2)	Bissecção (2)	Bissecção (2)
$L_i$	---	0,0767	0,2270	0,0970	0,0830
$L_s$	---	0,4764	0,4748	0,5703	0,4764

solução min ( $f_2$ ). A configuração SSHSP de melhor *trade-off*, ou seja, mais comprometida com a função objetivo (max ( $F_t$ )) apresentou resultado intermediário entre as soluções min ( $f_1$ ) e min ( $f_2$ ), com menor sistema de propulsão elétrico. Tal configuração apresentou, em relação à configuração veicular padrão, redução do consumo  $F_{eq}$  em 10,95%, juntamente com -16,71% de  $CO$ , -27,69% de  $HC$  e -48,32% de  $NO_x$ . Deste modo, é possível inferir que houve ganhos relevantes desta configuração otimizada, no que diz respeito à eficiência energética e índices de emissões de gases poluentes.

Como ilustrado na Figura 4.2abc, a solução min ( $f_2$ ) obteve melhor desempenho em emissões durante praticamente todo ciclo de condução. Isto deve-se a fato que, conforme observado na Figura 4.2d, esta configuração teve por característica a redução do tempo de aquecimento do motor de combustão interna durante partida a frio em 7,58% e 11,24%, quando comparada às soluções max ( $F_t$ ) e min ( $f_1$ ), respectivamente, resultando, por conseguinte, uma diminuição das emissões dos gases resultantes da queima incompleta do combustível. A configuração min ( $f_3$ ), por sua vez, apresentou baixo desempenho em emissões, ultrapassando os índices de  $NO_x$  e  $HC$  obtidos pelo veículo convencional durante trechos do ciclo FTP-75 (perfil urbano). No entanto, até mesmo esta solução de mínimo fator elétrico, obteve, conforme mencionado anteriormente, redução de emissões, que foi possível devido à última parte do ciclo combinado, caracterizada pelo perfil de condução agressivo US06.

(a) Emissões de  $CO$ (b) Emissões de  $NO_x$ (c) Emissões de  $HC$ 

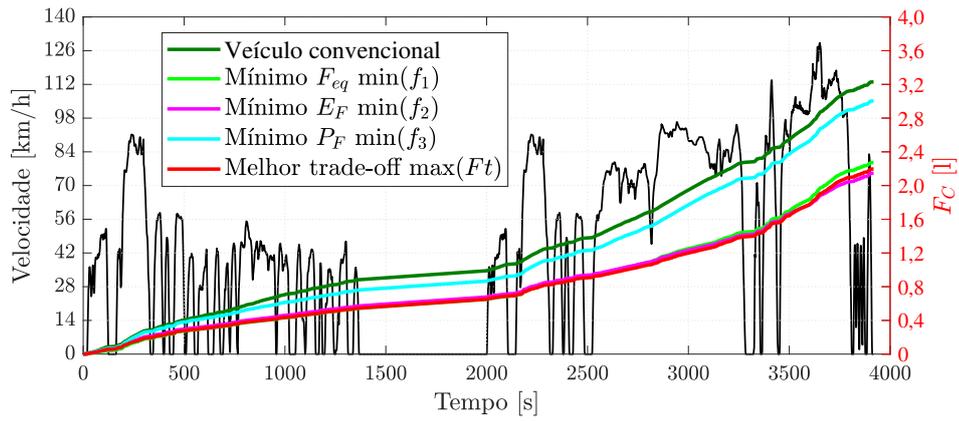
(d) Temperatura do MCI

Figura 4.2: Emissões ao longo do ciclo de condução para as soluções SSHSP analisadas

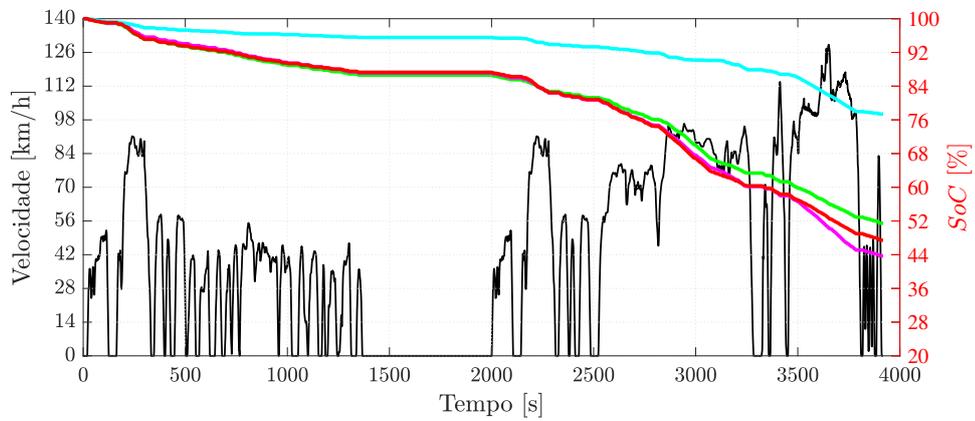
Para que seja possível obter uma alta economia de combustível e baixas emissões de poluentes atmosféricos, ao mesmo tempo que se maximiza a vida útil da bateria do veículo hibridizado, é necessária uma estratégia de gerenciamento de energia que atribui uma ordem de importância para  $SoH$  do sistema de armazenamento de energia. Além disso, o uso excessivo do sistema elétrico, apesar de reduzir consideravelmente o consumo de combustível (conforme mostrado na Figura 4.3a), resultará em demasiada degradação da bateria, reduzindo, deste modo, o seu estado de saúde. O perfil do estado de carga tem papel fundamental neste sentido, visto que grandes oscilações de corrente elétrica induzirão em abruptos decaimentos no  $SoC$  da bateria e conseqüente sobrecarregamento do sistema. Por meio da Figura 4.3b, infere-se que as soluções ótimas analisadas de menor consumo ( $\max(F_t)$ ,  $\min(f_1)$  e  $\min(f_2)$ ) utilizaram o sistema elétrico de maneira substancial nos ciclos de maior demanda de potência (HWFET e US06), gerando profundidade de descarga  $DoD$  de até 56,27%.

A Figura 4.4ab apresenta a influência da  $DoD$  nos resultados obtidos pelas soluções da fronteira de Pareto. É possível observar que, apesar da otimização permitir a profundidade de descarga máxima de 60% (ou  $SoC$  final de 40%) até o fim do ciclo de condução, nenhuma das soluções não dominadas chegaram a este limite superior de descarga. Isto pode ser explicado pelo controle de gerenciamento de potência que considera a fadiga da bateria como um dos seus fatores importantes, evitando configurações ótimas que utilizem de maneira agressiva o sistema de armazenamento de energia. Sendo assim, é possível quantificar pela Figura 4.4a que 8% das melhores soluções (mais comprometidas com os critérios de otimização e, portanto, de maior valor  $F_t$ ) apresentaram  $DoD$  entre 48,5% e 59,7%, onde a configuração de melhor *trade-off* obteve valor intermediário de 52,54%. Tais resultados demonstram a importância da fadiga da bateria como critério de análise no gerenciamento de energia de veículos híbridos elétricos, tendo em vista que controles otimizados que não levam em consideração tal fator tendem a utilizar a bateria de maneira inapropriada, reduzindo, assim, o ciclo de vida do sistema.

Além disso, a Figura 4.4b ilustra a correlação inversa entre o estado de saúde  $SoH$  e a profundidade de descarga  $DoD$ . No entanto, é importante ressaltar que, para um mesmo valor  $DoD$ , foi possível notar diferentes soluções com valores distintos de  $SoH$ , o que é resultado dos diferentes valores de capacidade nominal (parâmetros considerados na otimização) das baterias otimizadas. No que se refere à solução  $\max(F_t)$ , houve um acréscimo de 0,75% no  $SoH$  da bateria, quando comparado com a solução  $\min(f_2)$ , que tem foco na minimização das emissões. O candidato de melhor *trade-off*, contudo, apresentou redução de 0,42% na vida da bateria, em relação à configuração  $\min(f_1)$ . Isto deve-se ao controle de gerenciamento de energia da solução  $\min(f_1)$ , que teve como foco principal a minimização do consumo equivalente do veículo, atenuando grandes descargas de corrente elétrica que poderiam acarretar em maior consumo energético e, conseqüentemente, maior degradação da bateria. Por fim, tem-se a solução  $\min(f_3)$ , que, por sua vez, apresentou valor de apenas 22,62% para  $DoD$ , devido ao objetivo da configuração em reduzir o fator do sistema elétrico. Assim, foi possível observar um aumento na expectativa de vida da bateria em 3,96%, em comparação com a solução  $\max(F_t)$ .

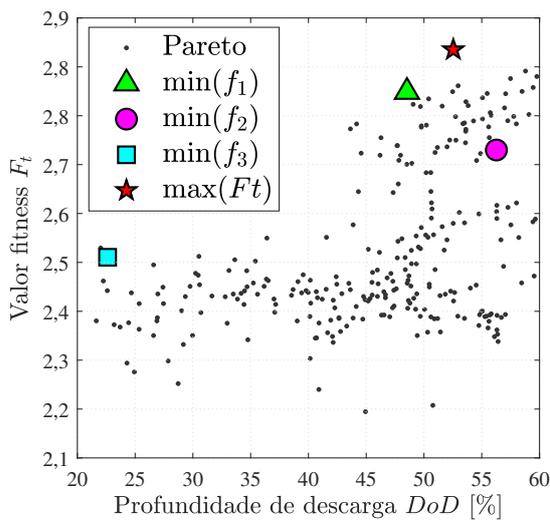


(a) Consumo de combustível  $F_C$

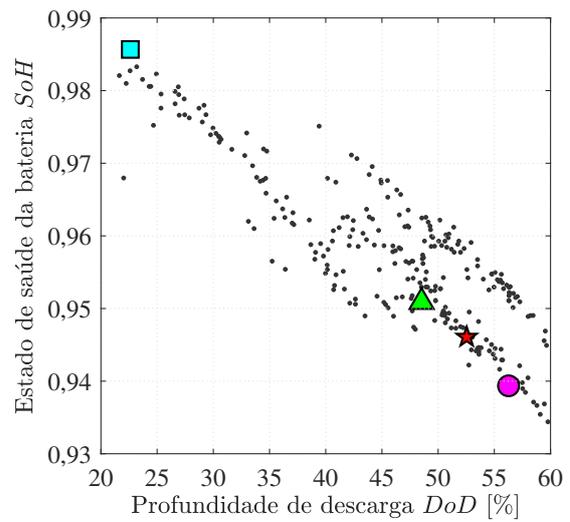


(b) Estado de carga  $SoC$

Figura 4.3: Consumo e perfil do estado de carga da bateria ao longo do ciclo de condução para as soluções SSHSP analisadas



(a)  $DoD \times F_t$



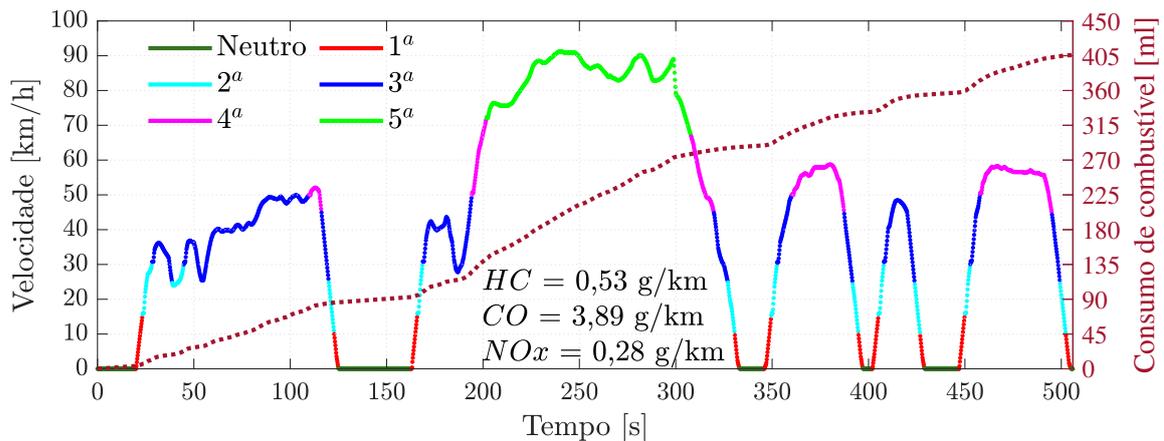
(b)  $DoD \times SoH$

Figura 4.4: Influência da profundidade de descarga nos resultados da população SSHSP

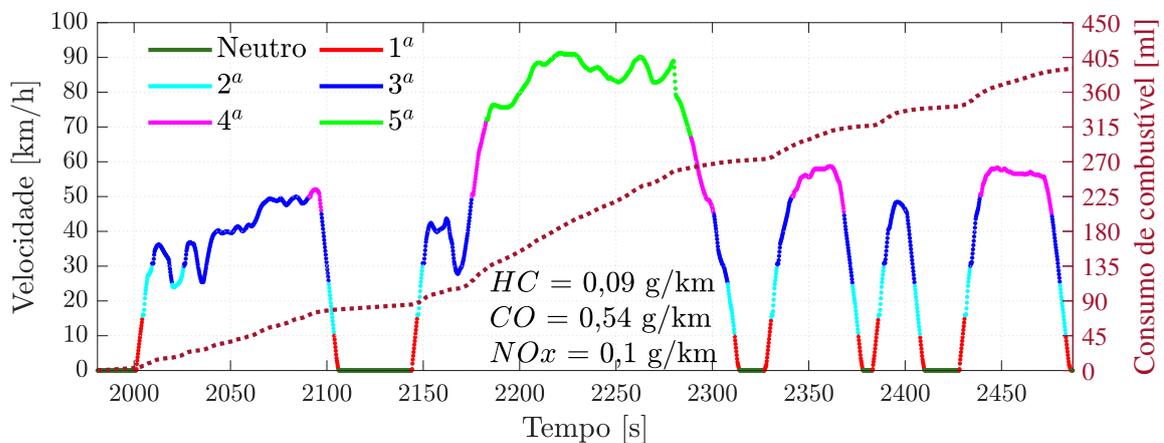
#### 4.1.1 Análise dos controles otimizados da solução de melhor *trade-off*

O controle de troca de marchas se configura como um dos parâmetros importantes para que ocorra a melhor combinação entre economia de combustível, período de aquecimento do motor de combustão interna e consequente emissões de gases por queima incompleta do combustível. Ao mesmo tempo, o controle de gerenciamento de potência permite traçar estratégias que previnam a fadiga acentuada da bateria mediante agressivas demandas de potência no decorrer do ciclo de condução. Sendo assim, a configuração mais comprometida dentre os critérios de otimização será analisada nesta subseção, no que diz respeito aos controles otimizados e suas influências nos resultados obtidos.

Como ilustrado na Figura 4.5ab, o veículo convencional mantém a mesma estratégia de troca de marchas durante partidas a frio e a quente do ciclo urbano FTP-75 (tais partidas são compostas pelo mesmo perfil de velocidade). Apesar de não modificar sua estratégia de controle, é possível notar que as emissões decaem consideravelmente durante a partida a quente, visto que, conforme mencionado anteriormente, o período de aquecimento do MCI influencia diretamente a geração de poluentes atmosféricos liberados pelo escapamento veicular.



(a) Partida a frio

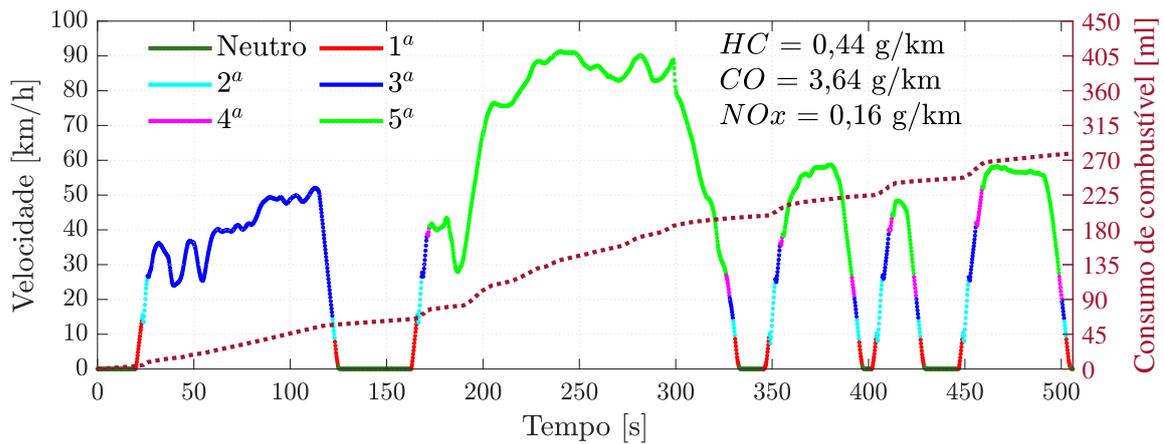


(b) Partida a quente

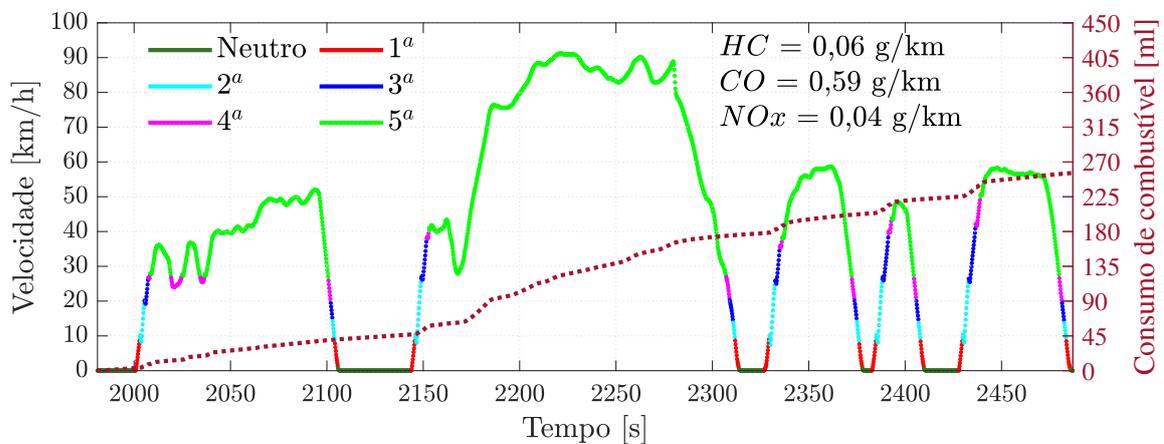
Figura 4.5: Estratégia de troca de marchas do veículo convencional

A configuração ótima da arquitetura SSHSP, por sua vez, apresenta um controle sensível a tais variações, adaptando a estratégia de troca de marchas de acordo com a temperatura do motor, perfil de condução e economia de combustível. A Figura 4.6a mostra que, durante a partida a frio, o controle provoca o adiamento de trocas de marchas, reduzindo, conseqüentemente, o período de aquecimento do MCI. Sendo assim, o controle prioriza a minimização das emissões de gases no período a frio, no qual se concentra a maior parcela de geração de poluentes durante todo o ciclo.

Na partida a quente, no entanto, conforme descrito pela Figura 4.6b, a estratégia é modificada para priorização do consumo de combustível em detrimento das emissões de poluentes, visto que este trecho apresenta (assim como no veículo convencional) redução considerável na liberação de gases. Para que isso ocorra, o controle antecipa as trocas de marchas, deslocando a ponto de operação do motor para uma região mais eficiente. O consumo de combustível durante este trecho apresenta, portanto, uma redução de 8,27% em relação ao mesmo perfil de condução em partida a frio. Deste modo, é possível inferir que o controlador otimizado apresentou bom desempenho, avaliando tomadas de decisões com foco nos critérios de otimização.



(a) Partida a frio



(b) Partida a quente

Figura 4.6: Estratégia de troca de marchas da solução  $max(F_t)$  (SSHSP)

Uma vez que o estágio de aquecimento do MCI da temperatura ambiente até a temperatura ideal de operação (partida a frio) ocorre apenas no começo do ciclo de condução, o MCI pode operar em modo de economia de combustível durante grande parte do ciclo combinado. As Figuras 4.7a e 4.7b ilustram a região de operação do MCI para o veículo convencional e hibridizado, respectivamente.

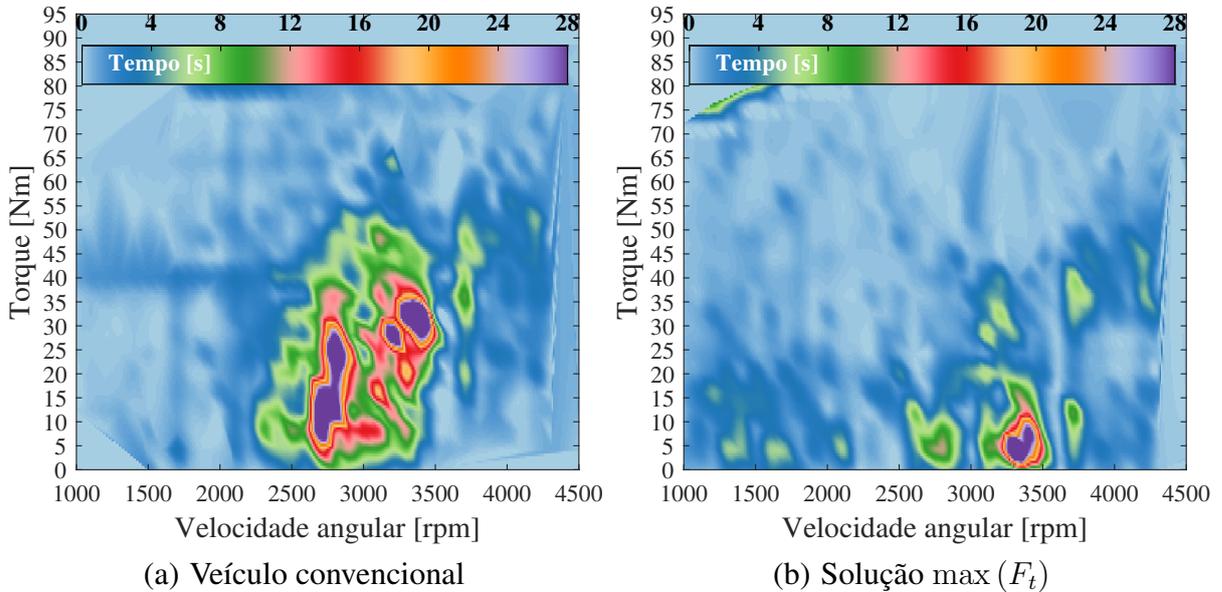


Figura 4.7: Mapas de operação do MCI (convencional e arquitetura SSHSP)

Para a configuração SSHSP otimizada ( $\max(F_t)$ ), é possível observar que houve um deslocamento dos pontos de operação do motor para regiões de baixo torque e baixa velocidade angular, o que permite a redução do consumo de combustível do veículo. Vale ressaltar que isso é devido não só à utilização do sistema elétrico, mas também de um eficiente controle de gerenciamento de potência entre MCI e ME e de troca de marchas. A Figura 4.8 mostra as funções de pertinência das entradas e saída do controlador otimizado, baseado em lógica *fuzzy*, para estratégia de troca de marchas.

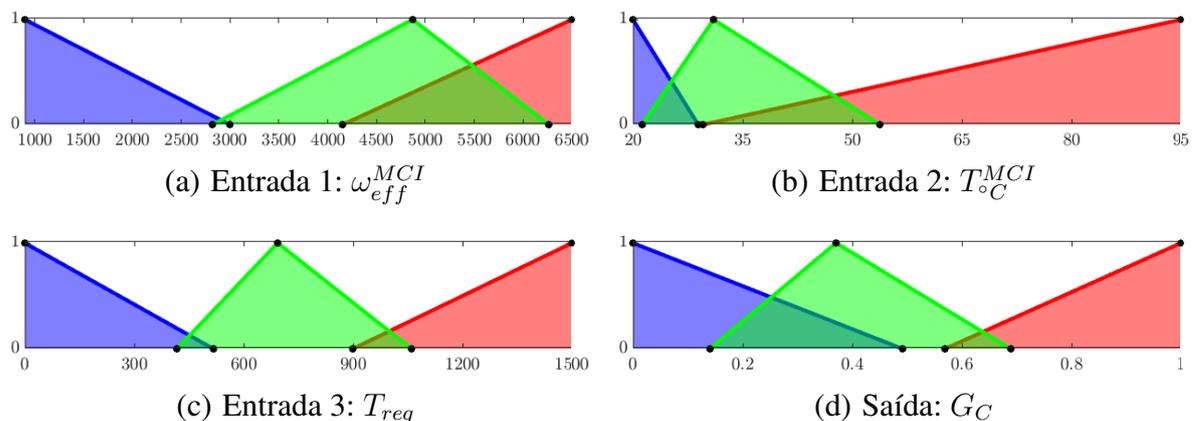


Figura 4.8: Funções de pertinência do controle *fuzzy* otimizado para troca de marchas (SSHSP)

A Figura 4.9, por sua vez, ilustra as características do controle de gerenciamento de potência (CGP) baseado em lógica *fuzzy*, onde as funções de pertinência apresentaram outros formatos tanto para as entradas como para a saída.

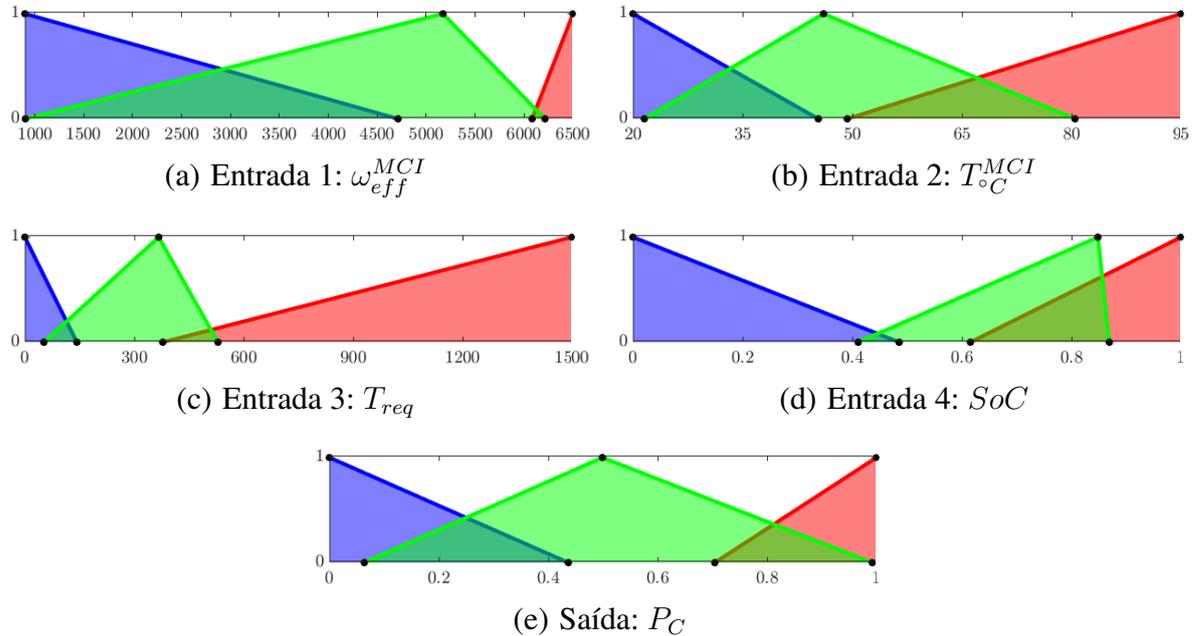


Figura 4.9: Funções de pertinência do controlador *fuzzy* otimizado para CGP (SSHSP)

## 4.2 Arquitetura SAPHP

Nesta subseção, serão apresentadas as soluções otimizadas para PHEVs com arquitetura propulsora SAPHP (configuração em paralelo). Assim como para a arquitetura SSHSP, neste segundo caso foram selecionados os melhores candidatos da fronteira de Pareto, de acordo com os critérios  $f_j$  propostos na formulação do problema de otimização. Para que seja possível uma análise coerente dos resultados, o veículo convencional será novamente utilizado como base para avaliação dos ganhos percentuais de cada uma das configurações ótimas obtidas pelo algoritmo genético.

A Figura 4.10 mostra as soluções não dominadas (pós convergência do processo evolutivo). Na Figura 4.10a, é possível observar que, conforme mencionado anteriormente na discussão dos resultados deste capítulo, nem sempre um menor consumo de combustível está associado a menores emissões de poluentes atmosféricos e vice-versa. Neste sentido, vale ressaltar que a solução  $\min(f_2)$  (mínimo fator de emissões  $E_F$ ) apresentou apenas a 137ª maior economia de combustível dentre 202 soluções presentes na fronteira de Pareto.

Além disso, pode-se destacar que a redução do fator do sistema elétrico  $P_F$  ocasiona uma tendência ao aumento do consumo equivalente  $F_{eq}$  (Figura 4.10b) e fator de emissões  $E_F$  (Figura 4.10c).

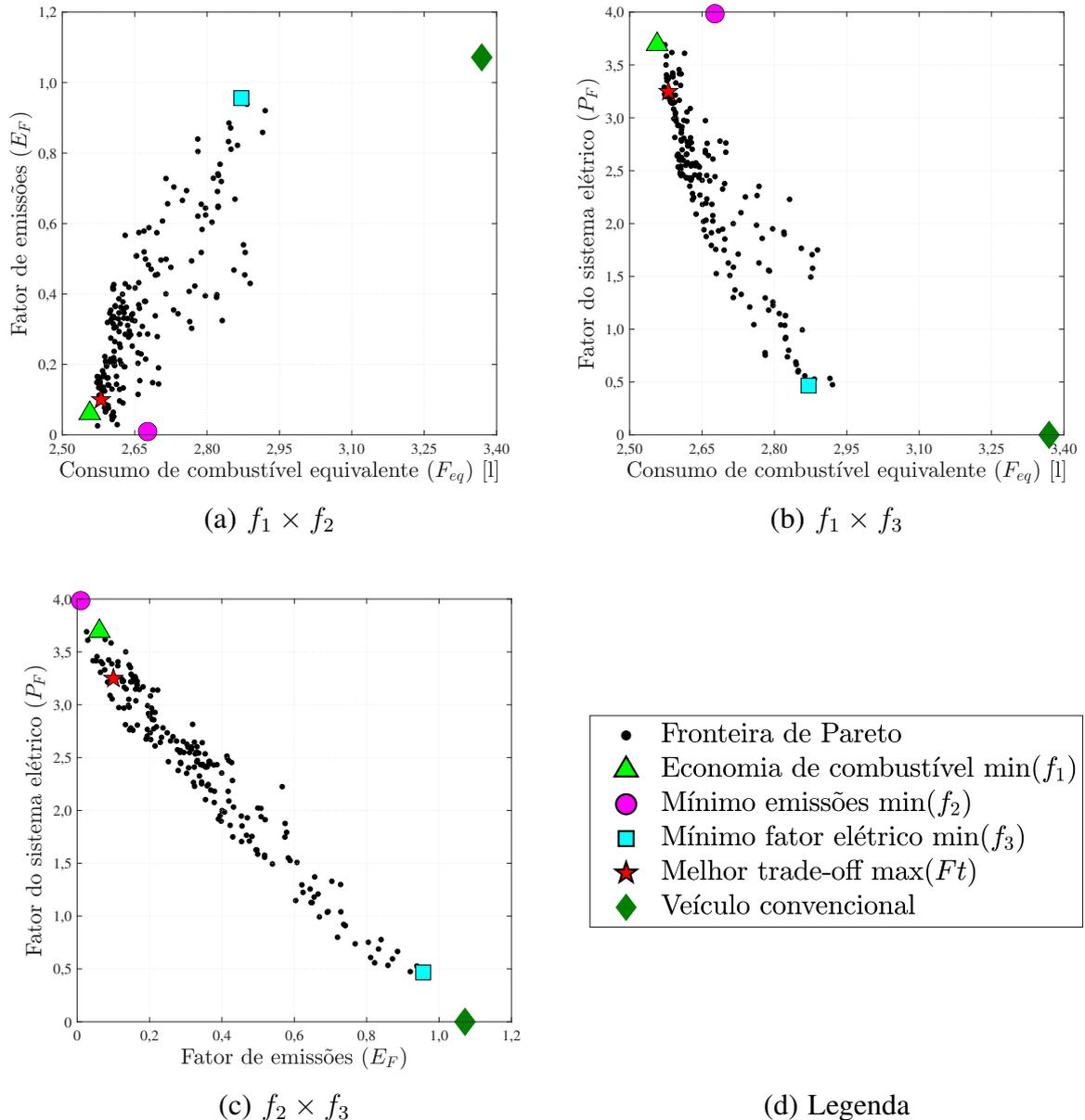


Figura 4.10: Soluções ótimas da fronteira de Pareto (arquitetura SAPHP)

No que diz respeito aos parâmetros de projeto e demais resultados para as soluções ótimas em análise, a Tabela 4.2 mostra as variáveis que foram levadas em conta no vetor cromossomo do algoritmo genético. Vale ressaltar que, diferentemente da arquitetura em série (SSHSP), a solução de melhor *trade-off* da arquitetura SAPHP utilizou o método do centróide para defuzzificação dos controladores de gerenciamento de potência e troca de marchas. Conforme descrito na Seção 2.7, estudos na literatura mostram que o método de defuzzificação por bissecção apresenta geralmente melhores resultados para o controle de troca de marchas. Tal característica foi notada na análise das soluções otimizadas de arquitetura SSHSP (ver Tabela 4.1), onde todas as configurações ótimas obtiveram o valor 2 (bissecção) para a variável  $D_{z2}$ . Para a arquitetura em paralelo, por sua vez, observa-se que apenas as soluções  $\min(f_2)$  e  $\min(f_3)$  utilizaram

Tabela 4.2: Resultados obtidos para configurações otimizadas de PHEV (arquitetura SAPHP) e veículo convencional

Resultados	Soluções				
	Veículo convencional	Cons. equiv. $\min(f_1)$	Min. Emissões $\min(f_2)$	Fator elétrico $\min(f_3)$	Melhor <i>trade-off</i> $\max(Ft)$
$F_{eq}(\mathbf{X})$ [l]	3,3693	2,5569	2,6767	2,8709	2,5802
$E_F(\mathbf{X})$	1,1645	0,0611	0,0095	0,9559	0,0999
$P_F(\mathbf{X})$	---	3,6948	3,9845	0,4672	3,2484
$COR(\mathbf{X})$	0,990	0,9973	0,9972	0,9929	0,9972
$CO$ [g/km]	1,1225	0,7675	0,7081	1,0014	0,7328
$NO_x$ [g/km]	0,1546	0,0676	0,0656	0,1476	0,0737
$HC$ [g/km]	0,1549	0,1091	0,1057	0,1491	0,1114
$C_t$ [h]	---	2,7040	2,7273	0,3114	2,6254
$SoH$	---	0,9457	0,9394	0,9974	0,9493
$\Gamma$ [US\$]	---	2703,7	2698,0	2014,0	2518,1
$M_{es}$ [kg]	---	63,71	70,58	47,31	59,27
$SoC_{final}$ [%]	---	40,83	40,10	93,10	42,60
Cromossomos					
$Q_{nom}$ [Ah]	---	127,95	132,04	85,74	118,93
$\omega_{Tc}$ [rpm]	---	547,63	815,18	614,58	539,01
$T_{max}$ [Nm]	---	66,65	64,36	46,97	60,11
$D_{z1}$	---	Bissecção (2)	Centróide (1)	SOM (5)	Centróide (1)
$D_{z2}$	---	LOM (4)	Bissecção (2)	Bissecção (2)	Centróide (1)
$L_i$	---	0,0652	0,0301	0,0232	0,0410
$L_s$	---	0,3471	0,2832	0,3779	0,4413

este método de defuzzificação para o controlador de troca de marchas. É possível inferir que o processo evolutivo buscou outras alternativas de controle para reduzir os critérios propostos em uma arquitetura híbrida propulsora que tem por característica o desacoplamento do sistema de tração elétrico do motor de combustão.

Como apresentado na Tabela 4.2 (ver Figura D.5 no Apêndice C para representação gráfica das soluções), a solução  $\min(f_1)$  (menor consumo equivalente,  $F_{eq}$ ) proporcionou a relevante economia de combustível de 24,11% em relação ao veículo convencional. Além disso, quando comparado com a solução de mínimo consumo equivalente de arquitetura SSHSP, a solução  $\min(f_1)$ /SAPHP apresentou diminuição de 14,46% no valor de  $F_{eq}$ . Com relação às emissões de poluentes, esta configuração otimizada também obteve reduções de  $CO$  (-31,63%),  $NO_x$  (-56,27%) e  $HC$  (-29,57%) em comparação com o veículo movido apenas a gasolina. Vale ressaltar que, assim como nos resultados obtidos para a arquitetura SSHSP, as maiores reduções de emissões foram obtidas para o  $NO_x$ . Isto ocorre tendo em vista que, conforme descrito no Capítulo 3, o dióxido de nitrogênio apresenta maior índice MAK, isto é, menor concentração máxima tolerável para exposição humana dentre os gases analisados. Sendo assim, o peso qualitativo do  $NO_x$  no cálculo do fator de emissões  $E_F$  foi maior que os demais gases de exaustão, priorizando uma região do mapa de emissões (ver Figura 2.6d) que fosse possível uma redução mais acentuada na emissão deste gás. Por fim, a solução ótima  $\min(f_1)$ /SAPHP foi capaz de

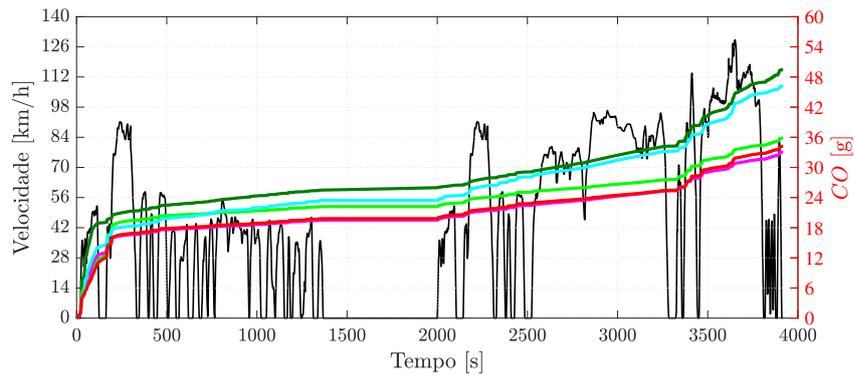
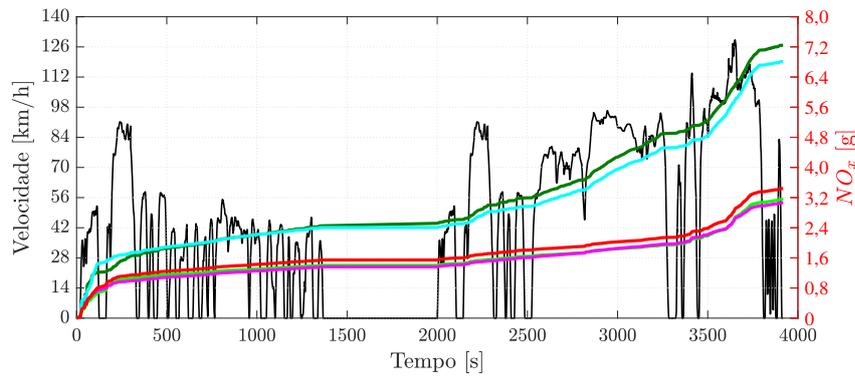
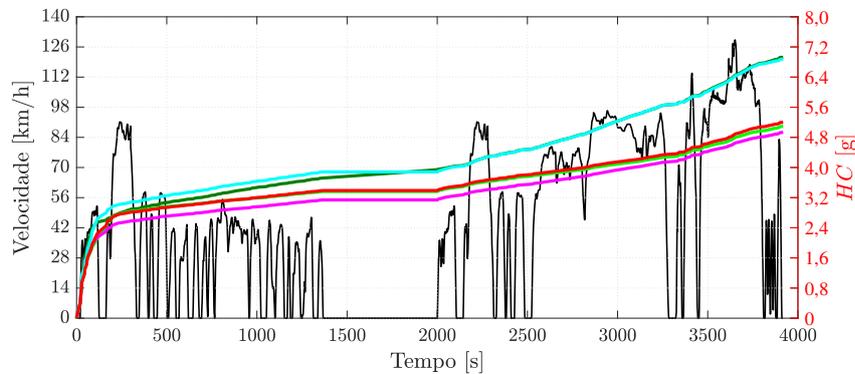
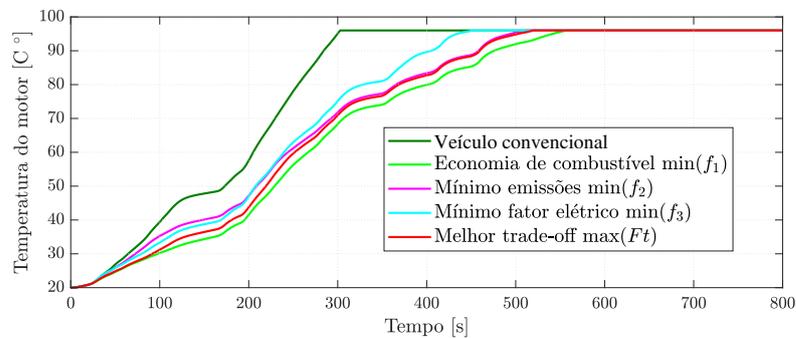
melhorar os índices de emissões de  $CO$  (-22,17%),  $NO_x$  (-26,92%) e  $HC$  (-9,38%), com relação à configuração PHEV com mínimo consumo equivalente equipada com arquitetura SSHSP. Dessa forma, nota-se que a solução  $\min(f_1)/SAPHP$  superou, no que diz respeito à economia de combustível e índices de emissões de gases poluentes, não apenas o veículo convencional, mas também a configuração otimizada análoga para arquitetura em série (SSHSP).

A configuração  $SAPHP \min(f_3)$ , por sua vez, apresentou, assim como para a arquitetura SSHSP, resultados menos expressivos no ponto de vista da economia de combustível e emissões de poluentes atmosféricos, obtendo redução de 14,79%, 10,79%, 4,53% e 3,74% para  $F_{eq}$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  e  $HC$ , respectivamente, em relação ao veicular convencional. No entanto, vale ressaltar que a configuração  $\min(f_3)$  se configura como uma potencial alternativa para baixos níveis de hibridização veicular, que demandará menor custo  $\Gamma$  e tempo de recarga  $C_t$ .

A solução de melhor *trade-off*, isto é, a mais comprometida com a função objetivo  $F_t$ , obteve, quando comparado à configuração veicular padrão, diminuição do consumo equivalente em 23,42%, emissões de  $CO$  em 34,72%,  $NO_x$  em 52,33% e  $HC$  em 28,08%. Além disso, vale enfatizar que, ao se observar Tabela 4.1 e Tabela 4.2, a configuração  $\max(F_t)/SAPHP$  destaca-se como a melhor solução dentre todas as analisadas no que concerne à economia de combustível e fator de emissões de gases. Limitações desta configuração devem, entretanto, ser pontuadas quanto ao maior custo e massa do sistema, em comparação com a solução  $\max(F_t)/SSHSP$ .

A Figura 4.11 ilustra o comportamento das emissões de gases no decorrer do ciclo de condução combinado para as configurações  $\min(f_1)$ ,  $\min(f_2)$ ,  $\min(f_3)$ ,  $\max(F_t)$  e convencional. Conforme descrito pela Figura 4.11a, Figura 4.11b e Figura 4.11c, a solução  $\min(f_2)$  obteve melhores índices de emissões de gases durante todos os perfis do ciclo não só em relação ao veículo padrão, mas também quando comparado às outras soluções ótimas em análise.

Analogamente à arquitetura em série, a configuração  $SAPHP$  com mínimo consumo equivalente  $F_{eq}$  ( $\min(f_1)$ ) apresentou aumento de 8,97% no período de aquecimento do MCI durante a partida a frio (Figura 4.11d), em comparação com a solução que obteve menor fator de emissões ( $\min(f_2)$ ). Como mencionado na seção anterior, isto é devido ao controle de troca de marchas, que prioriza, nesta configuração, a economia de combustível durante todo o ciclo por meio da antecipação da troca de marchas, ocasionando o prolongamento do processo de aquecimento do motor e, por conseguinte, maiores emissões de gases provenientes da queima incompleta do combustível. A solução  $\min(f_3)$  (mínimo fator elétrico), por sua vez, obteve baixo desempenho em emissões de hidrocarbonetos, apresentando, durante grande parte do ciclo urbano FTP-75, maiores emissões de  $HC$ , se comparado ao veículo convencional. Este fato pode ser explicado pelo baixo nível de hibridização para este caso, o que resulta em piores índices de emissões de gases em relação a veículos mais eletrificados. Por fim, para a solução  $\max(F_t)$ , houve tempo intermediário de aquecimento do MCI, com aumento de 1,61% e redução de 7,29% com relação às configurações  $\min(f_2)$  e  $\min(f_1)$ , respectivamente. Neste caso, objetivo da estratégia de controle de troca de marchas é balancear economia de combustível e emissões, de maneira que nenhum dos critérios seja prejudicado.

(a) Emissões de  $CO$ (b) Emissões de  $NO_x$ (c) Emissões de  $HC$ 

(d) Temperatura do MCI

Figura 4.11: Emissões ao longo do ciclo de condução para as soluções SAPHP analisadas

De modo similar à arquitetura SSHSP, os resultados obtidos pela arquitetura propulsora SAPHP demonstraram a importância do uso adequado do sistema elétrico na hibridização veicular. As Figuras 4.12a e 4.12b ilustram o consumo de combustível e perfil de descarga da bateria durante o perfil de condução, respectivamente. É possível observar que as soluções  $\min(f_1)$ ,  $\min(f_2)$  e  $\max(F_t)$  obtiveram profundidades de descarga  $DoD$  semelhantes, com valores entre 57,4% e 59,9%. O mesmo comportamento pode ser notado para o consumo, onde a configuração SAPHP de menor  $F_{eq}$  ( $\min(f_1)$ ) obteve redução de 5,34% em consumo de combustível  $F_C$ , em relação a solução de melhor *trade-off*. A configuração  $\min(f_3)$ , entretanto, além de utilizar tamanho reduzido de sistema elétrico ( $M_{es} = 47,31$  kg), apresentou  $DoD$  de apenas 6,9%, refletindo em um consumo de combustível  $F_C$  bem mais acentuado que as demais configurações ótimas em análise.

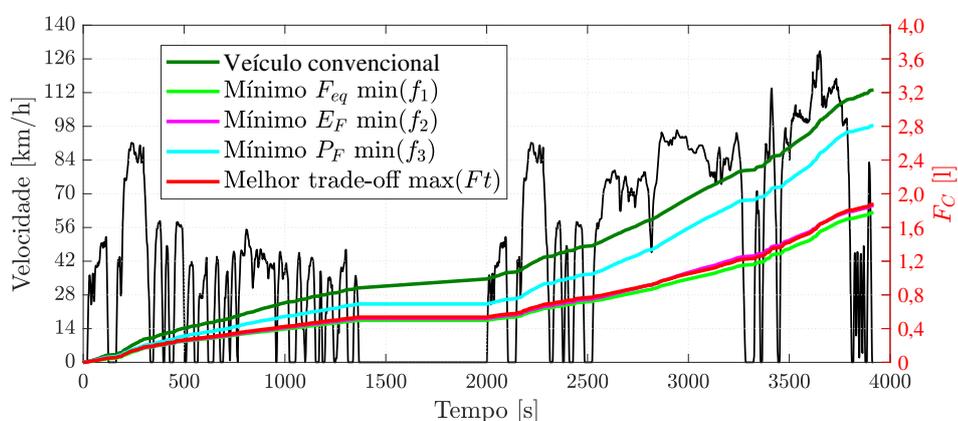
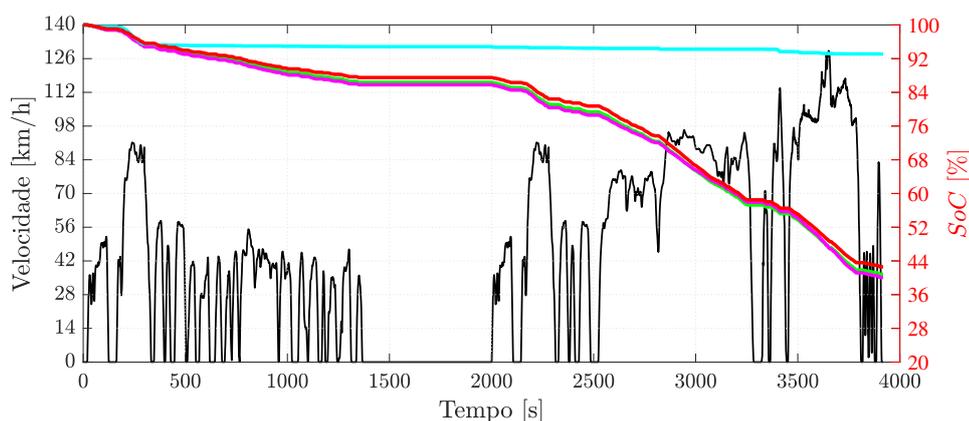
(a) Consumo de combustível  $F_C$ (b) Estado de carga  $SoC$ 

Figura 4.12: Consumo e perfil do estado de carga da bateria ao longo do ciclo de condução para as soluções SAPHP analisadas

Além disso, é importante ressaltar a influência da profundidade de descarga nos demais resultados obtidos pelas soluções não dominadas. A Figura 4.13a mostra que houve uma concentração das soluções que apresentaram maior  $F_t$  na região de maiores porcentagens de  $DoD$ . É possível quantificar que aproximadamente 69,9% das soluções mais comprometidas com a

função objetivo ( $\max(F_t)$ ) obtiveram valores de  $DoD$  entre 50% e 60% (valor máximo estabelecido pelo processo de otimização). Ao mesmo tempo, nota-se que, de maneira semelhante à arquitetura em série, uma maior profundidade de descarga não significou necessariamente um maior valor  $fitness F_t$ , visto que maiores descargas estão associadas à redução do ciclo de vida da bateria. Tal fato pode ser observado pelas configurações  $\min(f_1)$  e  $\min(f_2)$  que, apesar de terem apresentado porcentagens superiores de  $DoD$ , tiveram valores de  $F_t$  inferiores em 27,27% e 24,58%, respectivamente, com relação à solução de melhor *trade-off*.

Por meio da Figura 4.13b, percebe-se, mais uma vez, que  $DoD$  e  $SoH$  apresentam correlação inversa, em que soluções que utilizaram a bateria em pequena proporção (por exemplo, a  $\min(f_3)$ ) apresentaram estado de saúde da bateria próximo a 1, isto é, condição de começo de vida.

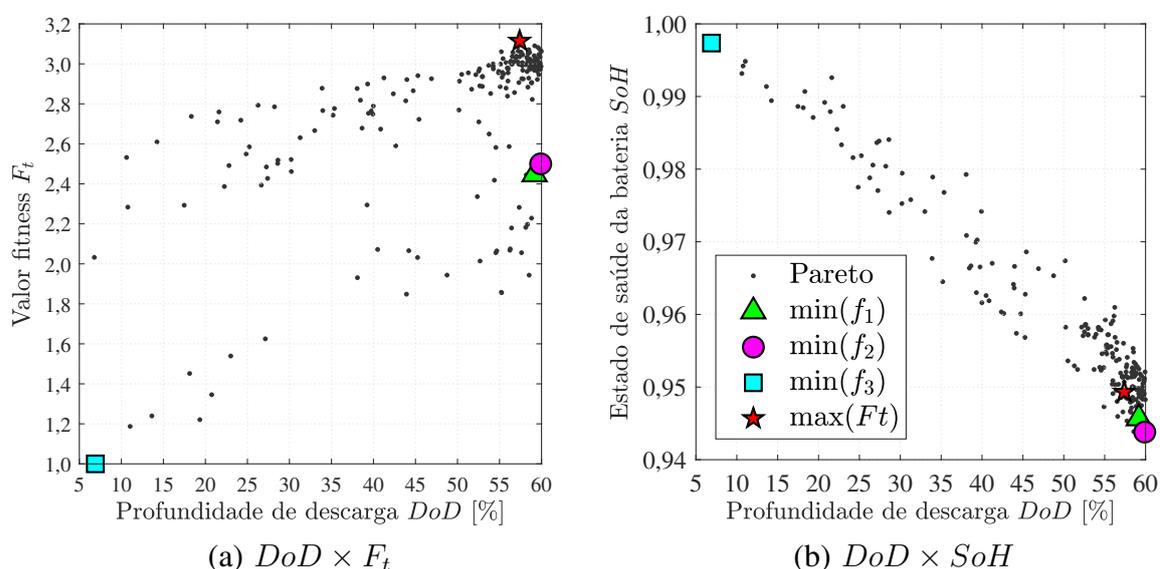


Figura 4.13: Influência da profundidade de descarga nos resultados da população SAPHP

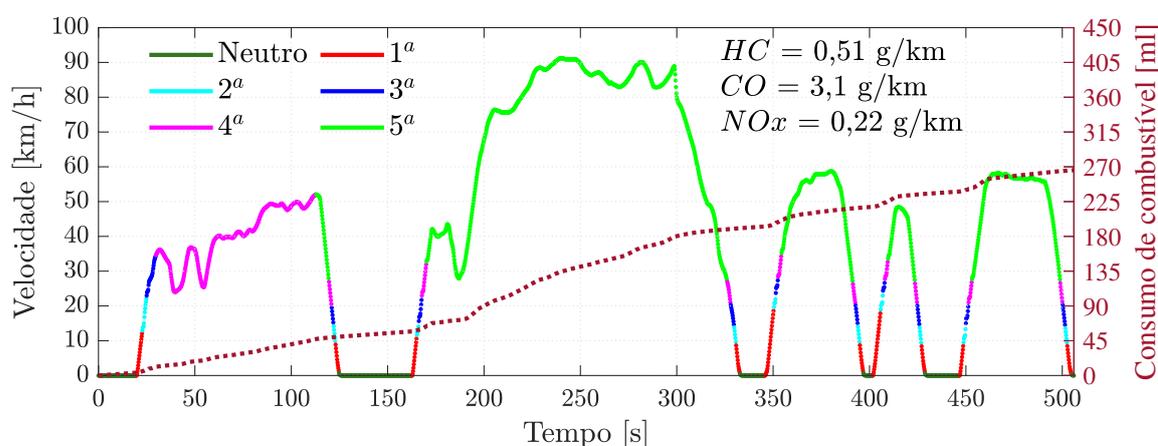
#### 4.2.1 Análise dos controles otimizados da solução de melhor *trade-off*

Nesta subseção, serão apresentados os respectivos resultados obtidos pelos controles otimizados baseados em lógica *fuzzy*. Conforme mencionado na Seção 4.2, a implementação de um controle *fuzzy* otimizado para troca de marchas permite a adaptação da estratégia de acordo com diferentes parâmetros, dentre eles a temperatura do motor de combustão.

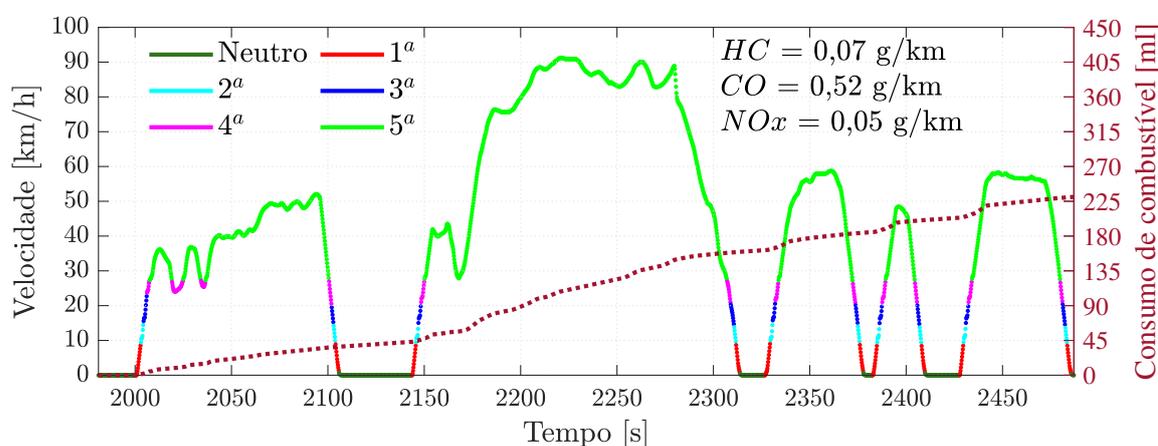
A Figura 4.14a ilustra o trecho de partida a frio do veículo hibridizado, em que é possível observar que houve o adiamento na troca de marchas, de modo que pudesse ocorrer a redução do tempo de aquecimento do MCI e consequente diminuição das emissões de gases. Vale pontuar que, apesar da arquitetura SSHSP ter apresentado comportamento similar, a configuração  $\max(F_t)$  SAPHP atingiu a quarta marcha após os primeiros trinta segundos, enquanto a arqui-

tetura em série atingiu esta marcha apenas aos 165 s (ver Figura 4.6a). Pode-se afirmar, dessa forma, que a solução  $\max(F_t)$  SAPHP apresentou período de aquecimento do MCI mais lento em relação à solução  $\max(F_t)$  SSHSP, refletindo em piores índices de emissões de  $HC$  (0,51 g/km contra 0,44 g/km) e  $NO_x$  (0,22 g/km contra 0,16 g/km) neste trecho do ciclo de condução.

De maneira análoga à configuração em série, a estratégia de troca de marchas da solução  $\max(F_t)$  com arquitetura em paralelo (SAPHP) apresentou adiantamento de troca de marchas durante partida a quente (Figura 4.14b), priorizando, portanto, a economia de combustível neste trecho do ciclo. Em comparação com a partida a frio, a partida a quente obteve redução de 13,19% no consumo de combustível.



(a) Partida a frio



(b) Partida a quente

Figura 4.14: Estratégia de troca de marchas da solução  $\max(F_t)$  (SAPHP)

Outro importante aspecto a ser analisado é o mapa de operação do MCI. Na configuração em série descrita na Subseção 4.2.1, a utilização do sistema elétrico permitiu o deslocamento dos pontos de operação do MCI para região de maior eficiência (ver Figura 4.7). Conforme mostrado na Figura 4.15, para a configuração em paralelo de melhor *trade-off*, houve um deslocamento ainda mais acentuado para a região de baixo torque e velocidade angular, resultando em uma maior economia de combustível. Isto pode ser explicado pelo maior kit de hibridização

utilizado pela configuração otimizada SAPHP, em que uma maior demanda de potência pode ser direcionada para o sistema de tração elétrico, admitindo, portanto, a atuação do MCI em pontos de maior eficiência.

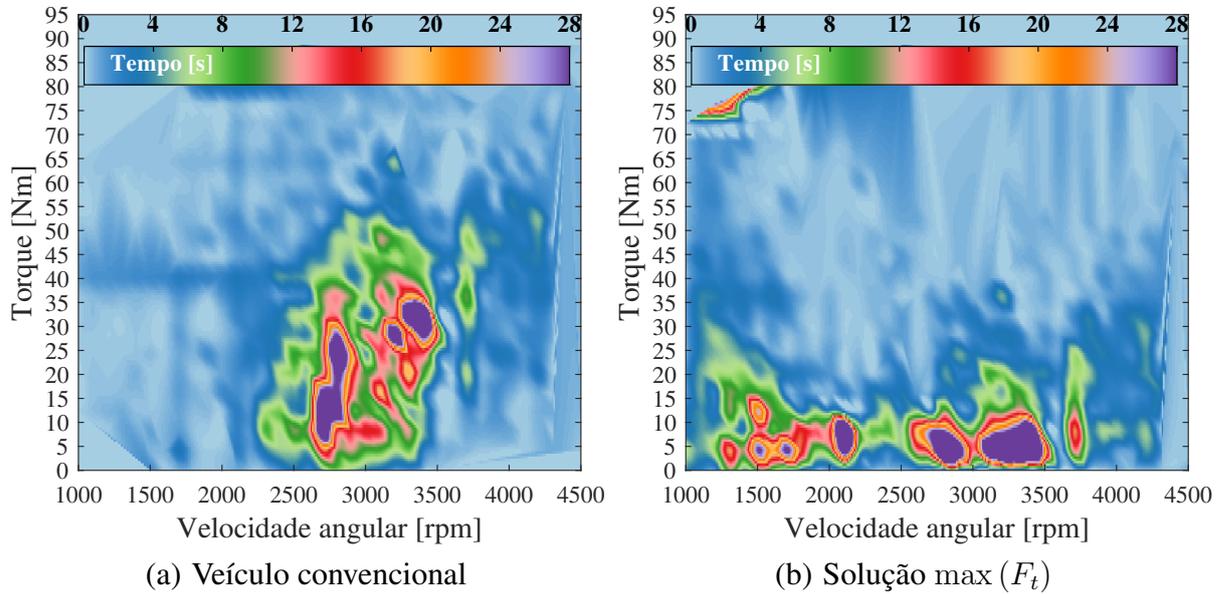


Figura 4.15: Mapas de operação do MCI (convencional e arquitetura SAPHP)

Por fim, as Figuras 4.16 e 4.17 apresentam as funções de pertinência das entradas e saída dos controladores baseados em lógica *fuzzy* que foram obtidos pelo processo de otimização para controle de gerenciamento de potência (CGP) e controle de troca de marchas, respectivamente.

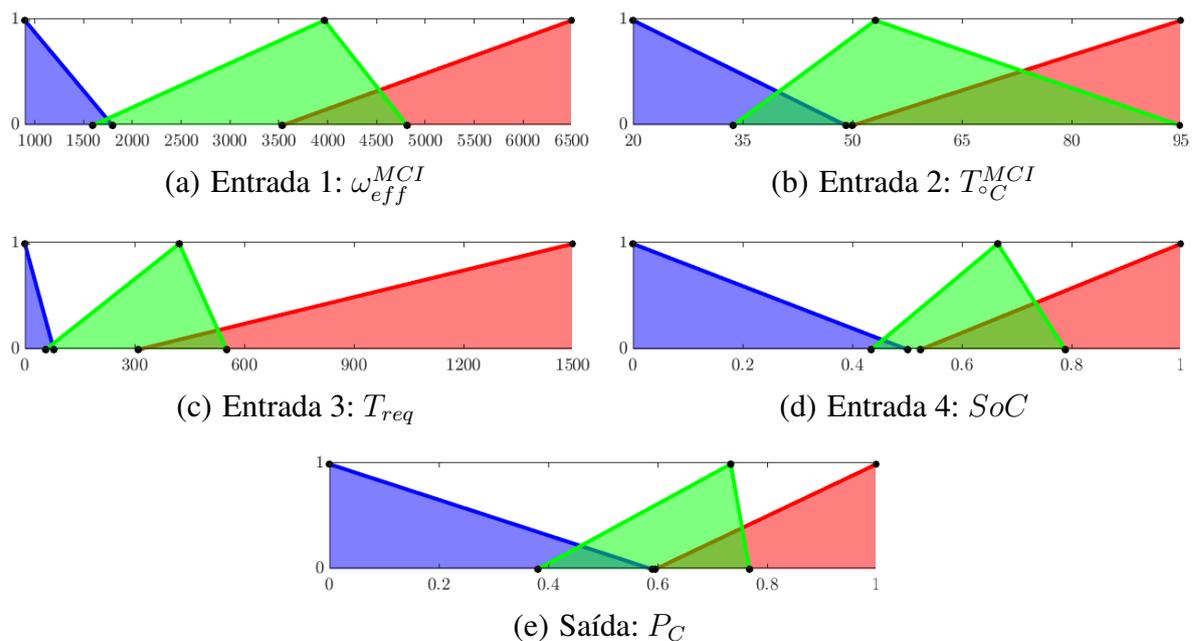


Figura 4.16: Funções de pertinência do controlador *fuzzy* otimizado para CGP (SAPHP)

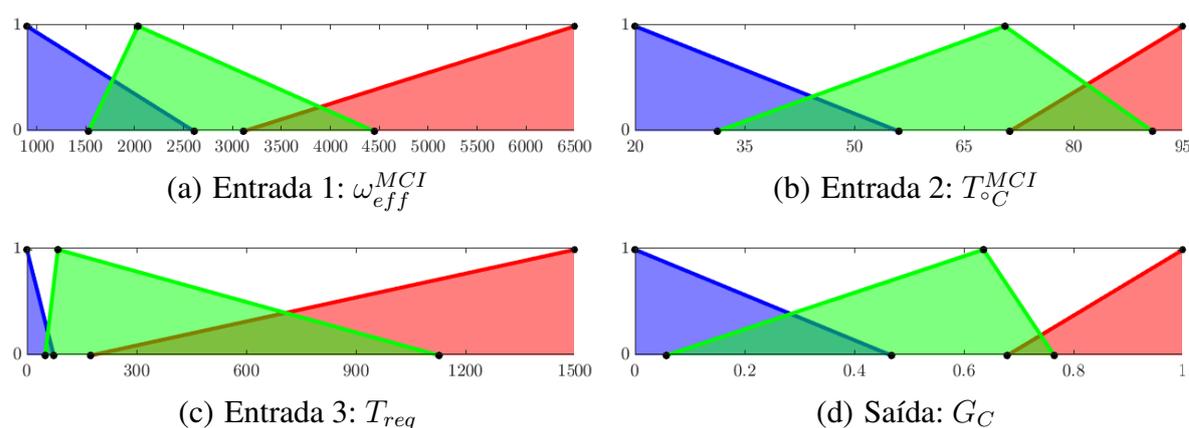


Figura 4.17: Funções de pertinência do controle *fuzzy* otimizado para troca de marchas (SAPHP)

### 4.3 Análise comparativa de configurações otimizadas com arquiteturas SSHSP e SAPHP

Nesta seção, serão discutidos pontos-chave em relação à análise comparativa entre as soluções mais comprometidas com os critérios de otimização para arquiteturas em série (SSHSP) e paralelo (SAPHP). O objetivo desta avaliação é definir as vantagens e limitações de cada arquitetura propulsora híbrida no que diz respeito aos custos operacionais, ciclo de vida, tamanho do sistema elétrico etc. Além disso, será avaliado a robustez das soluções quando submetidas à outros perfis de condução, discutindo possíveis implicações no que se refere à economia de combustível, emissões de poluentes atmosféricos e vida útil da bateria.

#### 4.3.1 Soluções ótimas analisadas

Primeiramente, é importante destacar as configurações de melhor *trade-off* para as arquiteturas propulsoras híbridas analisadas neste estudo e ponderar quais os aspectos mais relevantes de cada uma delas.

Como mencionado anteriormente, quatro configurações foram selecionadas para serem analisadas para as arquiteturas SAPHP e SSHSP, seguindo o foco de cada um dos critérios de otimização propostos. A Figura 4.18 ilustra as fronteiras de Pareto (soluções não dominadas) de ambas as arquiteturas híbridas. Por meio desta análise comparativa entre as populações obtidas pelo processo evolutivo para as topologias veiculares em estudo, é possível observar que a arquitetura em paralelo obteve ganhos substanciais de economia de combustível, apresentando toda sua população deslocada à esquerda (mais eficiente) com relação à população de arquitetura SSHSP (Figuras 4.18a e 4.18b).

Para os índices de emissões, é possível inferir que as soluções obtidas pela arquitetura em série apresentaram limitações para regiões com baixo fator de emissões  $E_F$ , obtendo apenas 2 soluções para  $E_F$  menor que 0,15. No entanto, a fronteira de Pareto da arquitetura SAPHP

também sobressaiu em relação a esse critério, apresentando 42 configurações não dominadas em que  $E_F < 0,15$ .

O fator do sistema elétrico, entretanto, teve comportamento distinto dos demais critérios. Neste caso, a população com arquitetura em paralelo obteve, em média, melhor desempenho para fatores de emissões abaixo de 0,6, conforme mostrado na Figura 4.18c. Para valores de  $E_F > 0,6$ , por sua vez, as soluções não dominadas com configuração em série apresentaram, de um modo geral, menores índices de  $P_F$ . Tal fato pode ser explicado pelo menor custo e massa do sistema elétrico das soluções SSHSP, o que diminui substancialmente o valor de  $P_F$ .

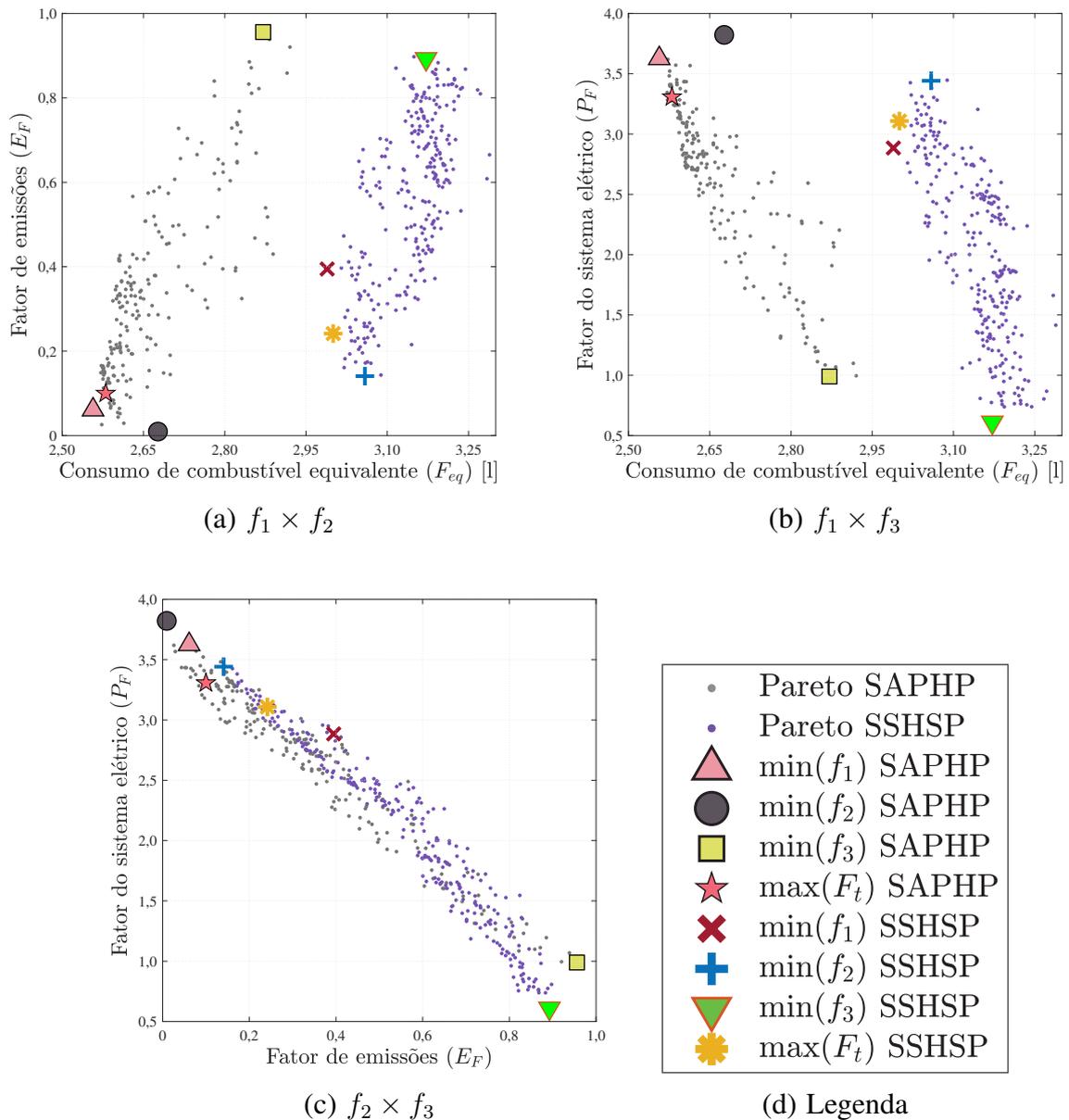


Figura 4.18: Soluções ótimas da fronteira de Pareto (populações SAPHP e SSHSP separadas)

As vantagens das configurações com arquitetura SAPHP ficam mais evidentes quando ambas as populações são unificadas como uma só fronteira de Pareto. Para este caso, ilustrado

pela Figura 4.19, é possível destacar que as soluções otimizadas de melhor *trade-off*, mínimo consumo de combustível equivalente e mínimo fator de emissões foram provenientes da arquitetura em paralelo. Por outro lado, observa-se que a solução SSHSP de mínimo fator elétrico permaneceu como configuração ótima, demonstrando que os benefícios desta arquitetura se encontram, principalmente, na implementação de pequenos kits de hibridização. Neste contexto, vale ressaltar que a solução  $\max(F_t)$  SSHSP foi apenas a 80ª melhor solução dentre 472 configurações da população unificada.

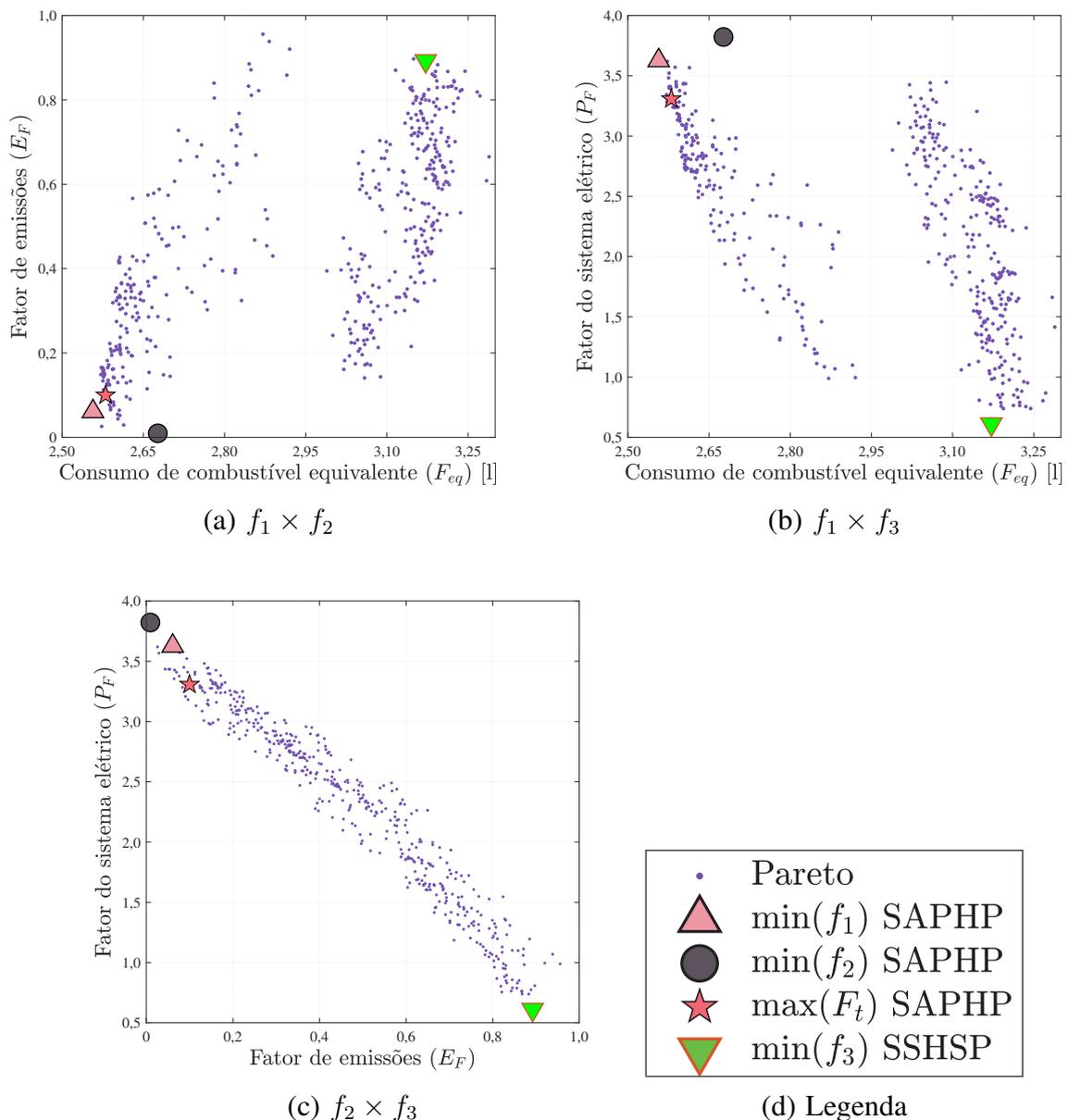


Figura 4.19: Soluções ótimas da fronteira de Pareto (populações SAPHP e SSHSP unificadas)

Como descrito nas seções anteriores, as configurações ótimas em série (SSHSP) e paralelo (SAPHP) apresentaram ganhos relevantes de projeto em relação à configuração veicular padrão. Para ilustração deste fato, a Figura 4.20 apresenta um gráfico em radar com as valências

de cada uma das soluções otimizadas no que diz respeito à economia de combustível ( $x_{cyc}$  como distância percorrida pelo ciclo), emissões de gases poluentes e desempenho (representado pelo fator  $COR$ , descrito pela Equação (3.17) no capítulo anterior). Pelo gráfico apresentado, fica evidente os benefícios da implementação de kits de hibridização veicular em veículos convencionais.

Ao mesmo tempo, na comparação entre arquiteturas hibridizadas, é possível observar que a solução  $\max(F_t)$  SAPHP obteve maior economia de combustível (+16,28%) e menor índice de emissões de  $CO$  (-21,62%) quando comparado à solução  $\max(F_t)$  SSHSP. O desempenho veicular e demais emissões de gases, entretanto, apresentaram resultados similares para configurações híbridas em série e paralelo.

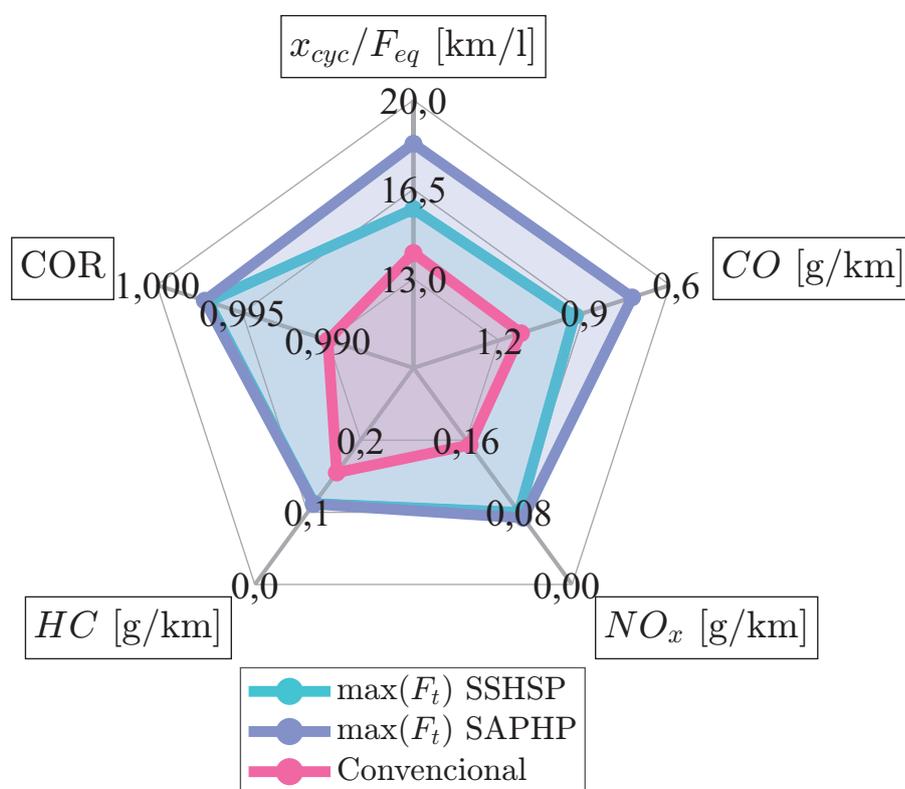


Figura 4.20: Gráfico de radar pentagonal:  $\max(F_t)$  SSHSP  $\times$   $\max(F_t)$  SAPHP  $\times$  convencional

Além disso, fatores que compõem o sistema elétrico devem ser igualmente analisados, tendo em vista que é gerada adição de massa e custos operacionais ao veículo convencional. Por outro lado, o tempo de recarga de veículos hibridizados plug-in também deve ser avaliado para escolha de uma configuração que melhor adapte aos desejos do consumidor.

Neste sentido, a Figura 4.21 ilustra os resultados obtidos pelas soluções  $\max(F_t)$  SSHSP e  $\max(F_t)$  SAPHP, sendo possível a rápida visualização dos ganhos de cada arquitetura otimizada com relação a todos os fatores considerados na função objetivo proposta pelo problema de otimização.

Observa-se que, além de superar os ganhos de economia de combustível e índices de emissões de gases da configuração otimizada em série, a solução  $\max(F_t)$  com arquitetura hí-

brida paralela apresentou o aumento aproximado de 0,35% no estado de saúde da bateria. No entanto, a solução  $\max(F_t)$  SSHSP apresentou melhores resultados em relação ao tempo de recarga, massa e custo do sistema elétrico, com reduções de 9,03%, 2,81% e 25,22%, respectivamente. É possível inferir, portanto, que a configuração PHEV otimizada com arquitetura SSHSP apresentou menor custo inicial de investimento para se adquirir o kit de hibridização, mas compreende maior degradação da bateria no decorrer do processo de ciclagem. Tal fato implica em menor ciclo de vida do produto e consequente aumento nos custos operacionais a longo prazo.

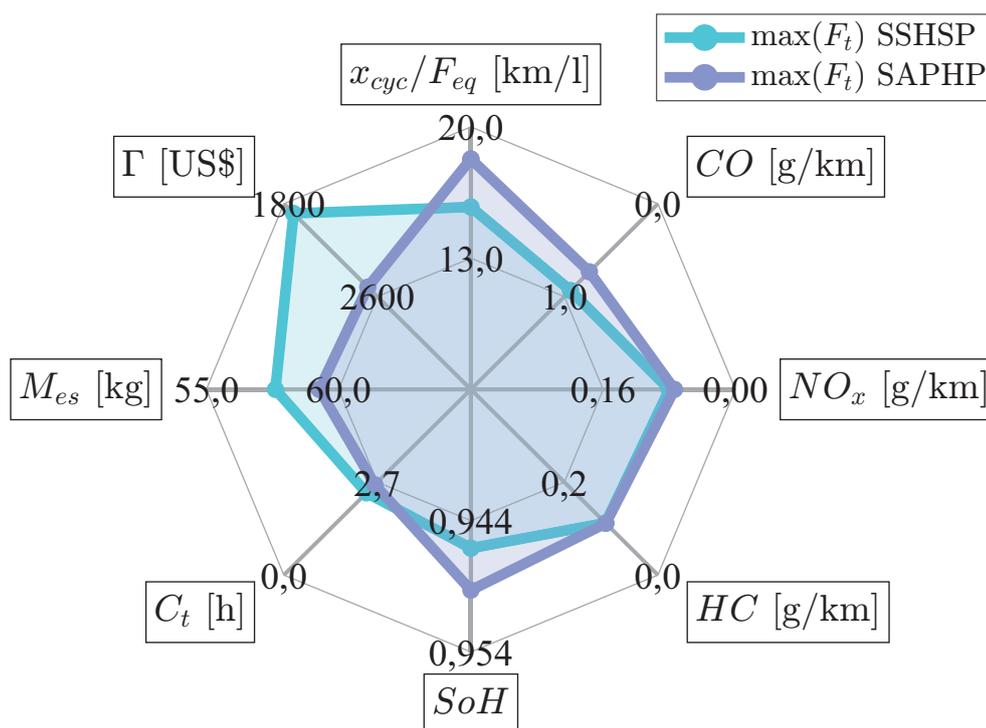


Figura 4.21: Gráfico de radar octogonal:  $\max(F_t)$  SSHSP  $\times$   $\max(F_t)$  SAPHP

De maneira análoga às soluções de melhor *trade-off*, pode-se realizar uma análise comparativa entre as configurações ótimas SSHSP e SAPHP para cada um dos critérios de otimização, isto é,  $\min(f_1)$ ,  $\min(f_2)$  e  $\min(f_3)$ . A Figura 4.22 ilustra as valências das soluções  $\min(f_1)$  SSHSP e  $\min(f_1)$  SAPHP para todos os fatores considerados nos critérios de otimização.

Diferentemente das configurações de maior  $F_t$ , na análise comparativa entre as soluções  $\min(f_1)$  SSHSP e  $\min(f_1)$  SAPHP, é possível observar que a solução com arquitetura em série apresentou não só menor custo  $\Gamma$  (-31,71%), mas também maior  $SoH$  (+0,55%). A mesma condição não é encontrada nas soluções  $\min(f_2)$  (Figura 4.23), em que as configurações com arquiteturas SSHSP e SAPHP apresentam valores idênticos de  $SoH$ .

Por fim, é mostrada na Figura 4.24 a comparação entre soluções de mínimo fator de emissões ( $\min(f_3)$ ). Um aspecto importante desta análise é que, ao contrário das soluções  $\min(f_1)$ ,  $\min(f_2)$  e  $\max(F_t)$ , a solução  $\min(f_3)$  SAPHP obteve menor tempo de recarga e maior emissões de  $NO_x$  que aquela com arquitetura em série.

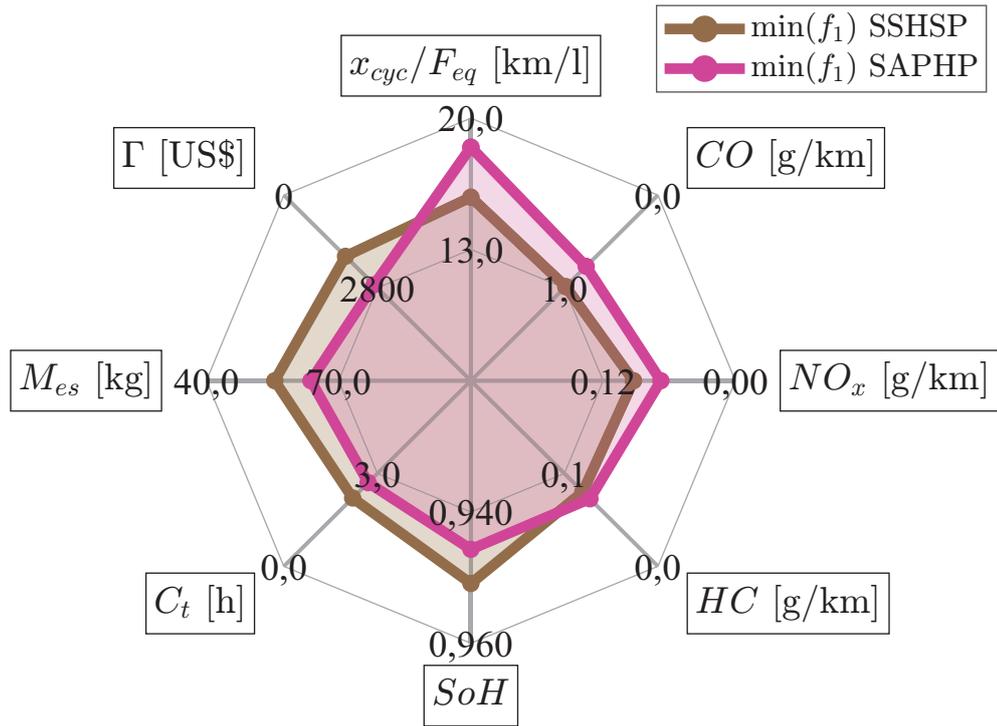


Figura 4.22: Gráfico de radar octogonal:  $\min(f_1)$  SSHSP  $\times$   $\min(f_1)$  SAPHP

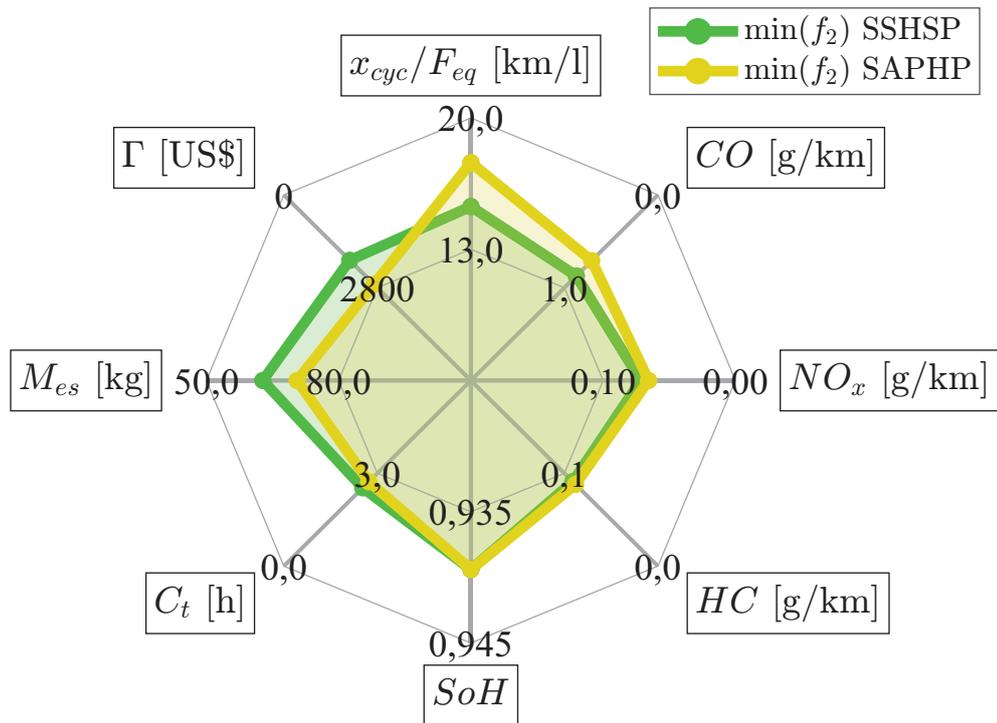


Figura 4.23: Gráfico de radar octogonal:  $\min(f_2)$  SSHSP  $\times$   $\min(f_2)$  SAPHP

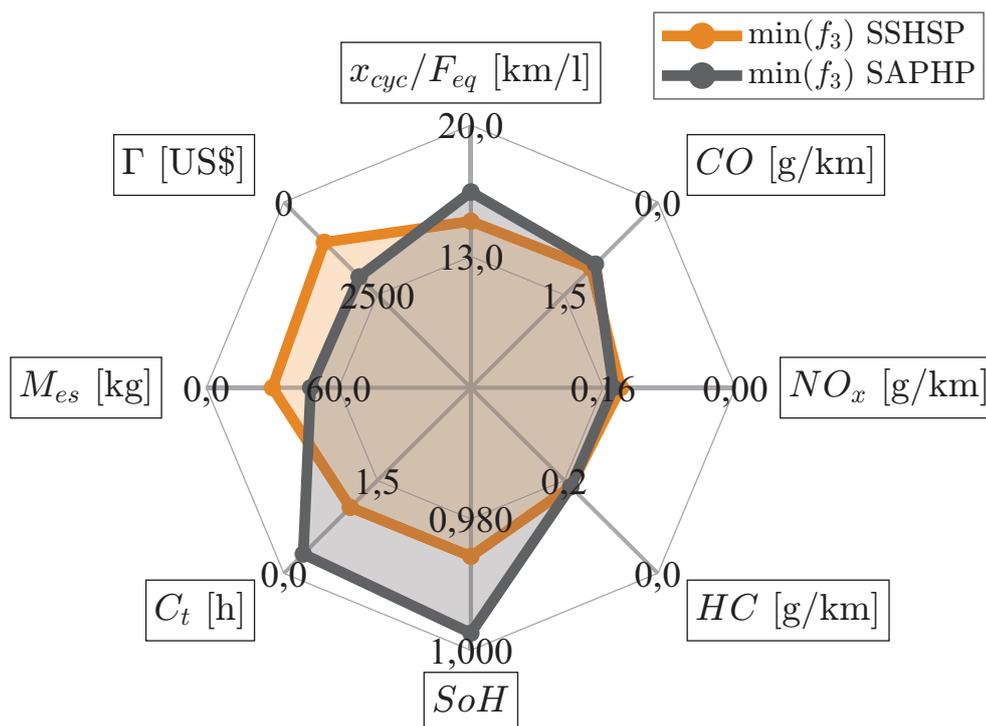


Figura 4.24: Gráfico de radar octogonal:  $\min(f_3)$  SSHSP  $\times$   $\min(f_3)$  SAPHP

#### 4.3.2 Avaliação da robustez das configurações em ciclos de condução alternativos

Esta subseção tem como objetivo principal apresentar as potenciais vantagens das configurações otimizadas  $\max(F_t)$  SSHSP e  $\max(F_t)$  SAPHP quando submetidas a perfis de condução diferentes daqueles em que o método de otimização foi realizado. Dessa forma, ciclos de rodagem alternativos (ver perfis de velocidade no Apêndice D) foram utilizados para a avaliação da robustez das soluções em relação aos critérios de otimização considerados neste estudo. Vale aqui ressaltar que nenhum dos ciclos reais apresentados nesta seção foi projetado para análise de emissões, diferindo-se, portanto, do ciclo combinado em que o procedimento de otimização foi realizado.

O primeiro perfil de condução analisado consiste no ciclo padrão WLTC (*Light Vehicles Test Cycles*) (BARLOW *et al.*, 2009), que é composto por trechos de baixa e alta velocidade. O segundo perfil, por sua vez, trata-se do ciclo de condução real da cidade de Campinas (Silva *et al.*, 2021b), que combina seções em ambiente urbano e rodoviário. Além disso, avaliam-se as configurações PHEV otimizadas no ciclo de condução entre a cidade de São Paulo e Campinas (Miranda *et al.*, 2022), que se configura como uma longa seção rodoviária com alto perfil de velocidade. Vale ressaltar que quanto o ciclo de Campinas como o de Campinas-São Paulo levam em consideração a altimetria de sua rota. O quarto ciclo utilizado nesta avaliação é o perfil de condução da cidade de Ouro Branco (Barbosa *et al.*, 2022), que apesar de ser composto por três trechos idênticos, apresenta parâmetros como altimetria e condições de tráfego modificados para cada trecho. Por fim, o último ciclo de condução é dado pela combinação de

dois perfis de condução (tráfego leve e pesado) obtidos experimentalmente na cidade de Santa Maria, conforme descrito por Roso *et al.*, 2019b.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos pelas soluções de melhor *trade-off* com arquiteturas SSHSP e SAPHP quando submetidas aos ciclos de condução em análise. É possível observar que estas soluções obtiveram, quando comparado ao veículo convencional, redução de poluentes atmosféricos e consumo de combustível não só em relação ao ciclo combinado considerado neste estudo (formado por FTP-75, HWFET e US06), mas também em outras condições e perfis de condução. Neste sentido, as configurações  $\max(F_t)$  SSHSP e SAPHP apresentaram aumento na economia de combustível de até 26,60% e 38,32%, respectivamente, dentre os ciclos avaliados. Este comportamento robusto demonstra o potencial da conversão híbrida de veículos mediante cenários distintos de rodagem.

No entanto, é importante pontuar possíveis limitações identificadas em casos específicos. No ciclo Campinas, a solução  $\max(F_t)$  SSHSP apresentou aumento de 15,01% nas emissões de *CO* em relação à configuração veicular padrão. Dentre todos os ciclos avaliados (incluindo o ciclo combinado), esta foi a única condição em que uma solução de maior  $F_t$  apresentou piores índices que àqueles obtidos pelo veículo convencional.

Outra exceção observada ocorreu no ciclo de Santa Maria. Neste perfil de velocidade, a solução  $\max(F_t)$  SSHSP apresentou maior economia de combustível (+ 1,27%) que a configuração SAPHP, se configurando como o único caso em que a configuração otimizada em série obteve menor consumo equivalente que a respectiva em paralelo.

### 4.3.3 Análise de custos e ciclo de vida

Assim como a potencial redução no consumo de combustível e emissões de poluentes atmosféricos, os custos relativos à obtenção do kit de hibridização (curto prazo), bem como o ciclo de vida do sistema (longo prazo) se configuram como fatores cruciais para viabilidade da conversão veicular híbrida e sua ampla inserção no mercado. Deste modo, é realizada uma análise das melhores configurações otimizadas com arquiteturas SSHSP e SAPHP no que concerne a vida útil da bateria e seus respectivos custos operacionais. A Tabela 4.4 descreve os resultados obtidos para o ciclo combinado definido para o procedimento de otimização neste trabalho e demais ciclos alternativos utilizados na seção anterior.

Para o ciclo combinado FTP-75/HWFET/US06, a solução  $\max(F_t)$  SAPHP apresentou, em relação à configuração em série, um aumento de 17,42% na expectativa de vida da bateria  $L_{batt}$  [h], mesmo com uma maior profundidade de descarga *DoD*. Isto é devido ao melhor gerenciamento de potência da solução PHEV com arquitetura em paralelo, protegendo a bateria contra possíveis sobrecarregamentos que possam reduzir seu ciclo de vida. Além disso, é importante enfatizar que, apesar do menor custo compreendido  $\Gamma$  para a solução  $\max(F_t)$  SSHSP, esta configuração teve um maior custo operacional a longo prazo, isto é, para a razão entre o custo e a vida da bateria em quilômetros rodados  $K_{batt}$  [km].

Tabela 4.3: Resultados obtidos para ciclos alternativos

Resultados	Soluções		
	Veículo convencional	Melhor <i>trade-off</i> SSHSP $\max(F_t)$ SSHSP	Melhor <i>trade-off</i> SAPHP $\max(F_t)$ SAPHP
<b>WLTC</b>			
$F_{eq}(\mathbf{X})$ [l]	1,6278	1,4660	1,0041
$COR(\mathbf{X})$	0,9998	0,9997	0,9998
$CO$ [g/km]	1,4299	1,2543	0,8185
$NOx$ [g/km]	0,1801	0,1313	0,0740
$HC$ [g/km]	0,2043	0,1787	0,1513
$C_t$ [h]	---	1,0478	1,1828
$SoH$	---	0,9575	0,9614
<b>Ciclo Campinas</b>			
$F_{eq}(\mathbf{X})$ [l]	3,7241	3,3535	2,9732
$COR(\mathbf{X})$	0,9997	0,9958	0,9991
$CO$ [g/km]	0,9627	1,1079	0,9084
$NOx$ [g/km]	0,1444	0,0954	0,0918
$HC$ [g/km]	0,1812	0,1575	0,1494
$C_t$ [h]	---	2,0713	2,0903
$SoH$	---	0,9665	0,9739
<b>Ciclo Campinas-São Paulo</b>			
$F_{eq}(\mathbf{X})$ [l]	5,3871	5,2172	4,2408
$COR(\mathbf{X})$	0,9999	0,9966	0,9984
$CO$ [g/km]	1,3717	1,3172	0,8962
$NOx$ [g/km]	0,1905	0,1539	0,1223
$HC$ [g/km]	0,1250	0,1091	0,0954
$C_t$ [h]	---	2,7545	3,2021
$SoH$	---	0,9372	0,9135
<b>Ciclo Ouro Branco</b>			
$F_{eq}(\mathbf{X})$ [l]	1,2643	1,0770	0,9549
$COR(\mathbf{X})$	0,9999	0,9888	0,9985
$CO$ [g/km]	1,5218	1,4067	1,1051
$NOx$ [g/km]	0,1830	0,0991	0,1229
$HC$ [g/km]	0,2458	0,1872	0,2065
$C_t$ [h]	---	0,8652	0,8373
$SoH$	---	0,9454	0,9692
<b>Ciclo Santa Maria</b>			
$F_{eq}(\mathbf{X})$ [l]	4,8606	3,5677	3,6134
$COR(\mathbf{X})$	0,9999	0,9999	0,9999
$CO$ [g/km]	0,6122	0,5360	0,4473
$NOx$ [g/km]	0,0840	0,0559	0,0548
$HC$ [g/km]	0,1284	0,1013	0,0999
$C_t$ [h]	---	2,3422	3,2020
$SoH$	---	0,9667	0,9634

Em relação ao WLTC, é possível observar que, quando comparado ao ciclo combinado, houve uma menor profundidade de descarga para as soluções otimizadas, tendo em vista que este ciclo padrão de condução apresenta menor demanda de potência e tempo de rodagem (1800 s contra 3917 s do ciclo combinado). Dessa forma, o processo de ciclagem baseado no ciclo WLTC apresentou menos danos à vida da bateria se comparado às condições de condução impostas pelo ciclo FTP-75/HWFET/US06, para ambas as configurações otimizadas, conforme mostrado na Tabela 4.4. Na análise entre as configurações obtidas pelo algoritmo genético, observa-se que a solução  $\max(F_t)$  SAPHP teve o ganho relevante de 23,91% no ciclo de vida  $C_{batt}$  da bateria, com relação à configuração SSHSP. Comportamento semelhante também foi notado para os ciclos de condução de baixa demanda de potência das cidades de Campinas e Ouro Branco, em que menores valores de  $DoD$  resultaram em uma extensão na vida útil do sistema de armazenamento de energia.

O ciclo Campinas-São Paulo, por sua vez, apresentou grande perfil de descarga da bateria, tendo em vista sua característica de alta demanda de potência. Como observado, este perfil de condução causou maiores efeitos de degradação na bateria, reduzindo seu ciclo de vida em 45,26% (SAPHP) e 42,74% (SSHSP) quando comparado ao ciclo combinado utilizado no presente estudo.

Além disso, o perfil de velocidade baseado na cidade de Santa Maria apresentou uma exceção aos demais ciclos analisados. Neste ciclo, a solução  $\max(F_t)$  SSHSP obteve maior ciclo de vida da bateria (+26,72%) e menor razão do custo por vida útil em quilômetros rodados (-26,39%), com relação à configuração em paralelo.

Portanto, é possível inferir que, diferentemente dos outros perfis de condução analisados, a configuração otimizada em série apresentou no ciclo Santa Maria (composto por trechos de tráfego intenso e leve) maior custo-benefício que a sua respectiva com arquitetura em paralelo. Isto pode ser explicado pelo perfil de velocidade do ciclo que provocou uma profundidade de descarga bem menor para a solução  $\max(F_t)$  SSHSP (54,36% contra 70,00%), maximizando, por conseguinte, o ciclo de vida de seu sistema. Vale ressaltar, por fim, que esta condição apresentada pode ser considerada um caso isolado, visto que a configuração PHEV com arquitetura SAPHP sobressaiu em todos os outros ciclos de condução analisados, não só em relação a vida útil da bateria, mas também na razão de custos operacionais por quilômetro  $\Gamma/K_{batt}$ .

#### 4.4 **Benchmarking com trabalhos da literatura**

De maneira que seja possível uma avaliação comparativa mais detalhada do desempenho das configurações ótimas obtidas neste estudo, foi realizado um estudo de *benchmarking* com outros estudos de veículos híbridos elétricos presentes na literatura. Vale enfatizar que esta análise comparativa foi realizada com configurações veiculares híbridas com mais alto grau de eletrificação que não passaram por uma conversão híbrida após fabricação. Este fato explica possíveis ganhos relevantes destes estudos em relação às soluções otimizadas deste trabalho.

Tabela 4.4: Resultados obtidos para ciclo de vida e custos

Resultados	Soluções	
	Melhor <i>trade-off</i> SSHSP $\max(F_t)$ SSHSP	Melhor <i>trade-off</i> SAPHP $\max(F_t)$ SAPHP
<b>Ciclo combinado FTP-75/HWFET/US06</b>		
<i>SoH</i>	0,9461	0,9493
<i>DoD</i> [%]	52,54	57,40
$L_{batt}$ [h]	2445	2871
$C_{batt}$ [ciclos]	2247	2639
$K_{batt}$ [km]	104770	123170
$\Gamma/K_{batt}$ [US\$/km]	0,0224	0,0204
<b>WLTC</b>		
<i>SoH</i>	0,9575	0,9614
<i>DoD</i> [%]	25,97	25,86
$L_{batt}$ [h]	3039	3765
$C_{batt}$ [ciclos]	6077	7530
$K_{batt}$ [km]	140400	174720
$\Gamma/K_{batt}$ [US\$/km]	0,0167	0,0144
<b>Ciclo Campinas</b>		
<i>SoH</i>	0,9665	0,9739
<i>DoD</i> [%]	45,55	45,70
$L_{batt}$ [h]	7798	10043
$C_{batt}$ [ciclos]	3739	4815
$K_{batt}$ [km]	154410	201860
$\Gamma/K_{batt}$ [US\$/km]	0,0152	0,0125
<b>Ciclo Campinas-São Paulo</b>		
<i>SoH</i>	0,9372	0,9135
<i>DoD</i> [%]	70,00	70,00
$L_{batt}$ [h]	1417	1741
$C_{batt}$ [ciclos]	1230	1511
$K_{batt}$ [km]	96895	119990
$\Gamma/K_{batt}$ [US\$/km]	0,0242	0,0210
<b>Ciclo Ouro Branco</b>		
<i>SoH</i>	0,9454	0,9692
<i>DoD</i> [%]	19,03	18,30
$L_{batt}$ [h]	4559	5992
$C_{batt}$ [ciclos]	10212	13424
$K_{batt}$ [km]	187470	248980
$\Gamma/K_{batt}$ [US\$/km]	0,0125	0,0101
<b>Ciclo Santa Maria</b>		
<i>SoH</i>	0,9667	0,9634
<i>DoD</i> [%]	54,36	70,00
$L_{batt}$ [h]	8610	6796
$C_{batt}$ [ciclos]	3177	2507
$K_{batt}$ [km]	221520	175250
$\Gamma/K_{batt}$ [US\$/km]	0,0106	0,0144

O estudo comparativo com a literatura, apresentado na Tabela 4.5, baseia-se na análise de quatro trabalhos publicados que investigam consumo de combustível e emissões de gases poluentes ( $CO$ ,  $NO_x$  e  $HC$ ) para veículos híbridos elétricos, que tem a gasolina como combustível e tamanho similar ao utilizado para o procedimento de otimização deste estudo. Além da revisão de literatura, foi também considerado a configuração do Toyota Prius, presente no banco de dados do ambiente ADVISOR™, que é bastante utilizado como referência para trabalhos publicados na área de sistemas de propulsão veicular (Gökce e Ozdemir; Mashadi *et al.*; Zhou *et al.*, 2014; 2014; 2020).

Tabela 4.5: Análise comparativa entre diferentes procedimentos de otimização para veículos híbridos elétricos

Ciclo	Configurações analisadas	Resultados			
		$F_C$ [l]	$CO$ [g/km]	$NO_x$ [g/km]	$HC$ [g/km]
UDDS	PHEV (otimizado) <sup>1</sup>	0,624	1,323	0,204	0,314
	PHEV (preditivo) <sup>1</sup>	0,516	1,287	0,105	0,262
	PHEV (série) <sup>2</sup>	---	0,6	0,16	0,17
	PHEV (paralelo) <sup>2</sup>	---	0,71	0,18	0,14
	Toyota Prius (ADVISOR) <sup>3</sup>	0,588	0,791	0,152	0,704
	$\max(F_t)$ SSHSP	0,546	1,975	0,098	0,249
	$\max(F_t)$ SAPHP	0,535	1,657	0,129	0,283
NEDC	Honda Civic (padrão) <sup>4</sup>	0,509	0,624	0,054	0,049
	Honda Civic (modificado) <sup>4</sup>	0,497	0,827	0,043	0,068
	PHEV (série) <sup>2</sup>	0,306	1,06	0,25	0,32
	PHEV (paralelo) <sup>2</sup>	0,525	1,1	0,26	0,25
	HEV (paralelo + transmissão ótima) <sup>5</sup>	0,331	4,39	1,15	0,49
	Toyota Prius (ADVISOR) <sup>3</sup>	0,557	0,772	0,108	0,784
	$\max(F_t)$ SSHSP	0,460	1,619	0,153	0,286
$\max(F_t)$ SAPHP	0,545	1,364	0,159	0,306	
JC08	PHEV (série) <sup>2</sup>	0,229	0,49	0,14	0,16
	PHEV (paralelo) <sup>2</sup>	0,319	0,58	0,18	0,13
	$\max(F_t)$ SSHSP	0,399	2,321	0,216	0,351
	$\max(F_t)$ SAPHP	0,438	1,914	0,206	0,411

<sup>1</sup>Montazeri-Gh e Mahmoodi-K, 2016

<sup>2</sup>Silva *et al.*, 2009

<sup>3</sup>Markel *et al.*, 2002

<sup>4</sup>Fontaras *et al.*, 2008

<sup>5</sup>Karaođlan *et al.*, 2019

O primeiro trabalho considerado nesta análise introduz processo de otimização baseado em algoritmo genético para se obter controladores otimizados baseados em lógica *fuzzy* utilizados no gerenciamento de potência de um PHEV (Montazeri-Gh e Mahmoodi-K, 2016). No estudo, o CGP é baseado em condições de tráfego (reconhecimento e predição), de modo que as emissões de gases e consumo de combustível possam ser minimizados.

No estudo desenvolvido por Silva *et al.*, 2009, é apresentada uma metodologia para estimativa do consumo de combustível e emissões de gases de diferentes arquiteturas veiculares híbridas plug-in (configurações em série e paralelo) submetidas a ciclos padrões de condu-

ção distintos. Esta metodologia utilizada no trabalho é baseada na norma SAE J1711 (Duoba *et al.*, 2009).

Em diferente abordagem, Fontaras *et al.*, 2008 avaliam, por meio de testes experimentais em diferentes ciclos de condução, as emissões de gases e economia de combustível de dois tipos de veículos híbridos elétricos (Honda Civic IMA e Toyota Prius II).

No último estudo considerado neste *benchmarking*, é avaliada a influência de razões de transmissão sobre o consumo de combustível e emissões de poluentes atmosféricos de uma configuração veicular híbrida (HEV) em paralelo (Karaođlan *et al.*, 2019). Para a análise comparativa da Tabela 4.5, foi considerada a melhor configuração relatada pelos autores deste trabalho.

Conforme descrito na Tabela 4.5, os resultados obtidos no presente estudo apresentaram similaridade com aqueles encontrados na literatura. Neste sentido, vale destacar alguns pontos-chave desta avaliação. Para o ciclo de condução UDDS (ou FTP-72), a solução  $\max(F_t)$  SSHSP apresentou o melhor índice de emissões de  $NO_x$  dentre todas as configurações presentes na literatura. Isto é devido à priorização do  $NO_x$  no cálculo do fator de emissões proposto no problema de otimização. Ao mesmo tempo, as configurações otimizadas  $\max(F_t)$  SSHSP e  $\max(F_t)$  SAPHP obtiveram maiores índices de  $CO$  com relação aos outros estudos analisados. Neste contexto, é importante pontuar que o ciclo UDDS (perfil urbano) foi utilizado como base da otimização dos trabalhos em análise, enquanto o presente estudo utilizou um ciclo que combina perfis urbano (FTP-75), rodoviário (HWFET) e de alta demanda de potência (US06). Em relação ao consumo de combustível  $F_C$  e emissões de  $HC$ , as configurações do presente estudo apresentaram valores intermediários entre os tipos de veículos híbridos avaliados.

Com relação aos ciclos NEDC e JC08, as configurações otimizadas obtidas no presente trabalho também apresentaram valores intermediários quando comparado com os outros estudos. Vale ressaltar, entretanto, que nenhum dos trabalhos publicados em análise tiveram como objetivo a minimização da degradação da bateria. Como destacado neste trabalho, este fator se configura como essencial para a redução dos custos operacionais do sistema de propulsão a longo prazo, tendo em vista que a bateria consiste em uma parcela importante dos custos de um veículo híbrido elétrico.

Por fim, é possível concluir que as soluções otimizadas apresentaram, de uma maneira geral, comportamento aceitável quando submetidas à diferentes perfis de condução e comparadas com outros tipos de configurações veiculares. Para um *benchmarking* ainda mais detalhado, seria importante levar em conta os níveis de hibridização de cada configuração e seu desempenho para o caso em que o estado de saúde da bateria é levado em consideração na formulação do problema de otimização.

#### 4.5 Estimativa do custo computacional

Neste estudo, as simulações foram realizadas em 3 computadores com processadores Intel i7 (3.20 Ghz) e memória RAM 16 Gb. Durante o procedimento de otimização para cada uma

das arquiteturas propulsoras híbridas analisadas neste trabalho, foram realizadas 15 simulações em paralelo (5 em cada computador utilizado). A Tab. 4.6 apresenta uma estimativa do custo computacional por configuração simulada.

Tabela 4.6: Estimativa do custo computacional

<b>Estágio</b>	<b>Simulação</b>	<b>Tempo médio de processamento</b>
1	Dinâmica longitudinal	200,0 s
2	Recarga da bateria	2,0 s
3	Ciclagem da bateria (3000 h)	60,0 s

Sendo assim, considerando que, por geração, 140 novas soluções são criadas pelo processo evolutivo (conforme descrito no Capítulo 3), pode-se estimar que o custo computacional para cada geração foi de aproximadamente 2445,33 segundos (40,75 minutos). Por fim, o tempo estimado para a convergência da otimização das arquiteturas SSHSP e SAPHP foi equivalente a 30 dias (ou 1440 horas), o que pode ser justificado pelo grande número de variáveis de projeto e alta complexidade dos modelos de simulação.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho propõe configurações otimizadas de trem de potência de veículos híbridos plug-in com intuito de reduzir consumo energético, emissões de gases poluentes, degradação da bateria, tempo de recarga, tamanho e custo do kit do hibridização. Para isto, variáveis de projeto de arquiteturas propulsoras híbridas (SSHSP e SAPHP) e parâmetros de controladores baseados em lógica *fuzzy* são introduzidos na formulação de um problema de otimização multiobjetivo.

Além disso, critérios de otimização tais como economia de combustível e emissões de gases poluentes se opõem a vida útil do sistema de armazenamento de energia dos PHEVs, afetando, deste modo, o custo deste tipo de topologia veicular híbrida. Neste sentido, tendo em vista a natureza conflitante desses fatores que regem a função objetivo proposta, este estudo contribui com uma abordagem que lida com a complexidade da definição de configurações otimizadas de PHEVs por meio da otimização do sistema de propulsão elétrico e controles de gerenciamento de potência e troca de marchas.

No estudo, é mostrado que, com o apropriado projeto do sistema de tração elétrica e controle otimizado, a conversão híbrida de veículos convencionais consiste em uma potencial solução, com resultados promissores no ponto de vista da redução do consumo de combustível e emissões de gases. Por meio da análise realizada, pode-se observar que também é possível estender, de maneira significativa, o ciclo de vida da bateria do sistema de motorização auxiliar, o que é importante para a viabilidade da implementação de kits de hibridização veicular no aspecto econômico e sustentável. Sendo assim, os resultados deste estudo justificam a importância de um controle de gerenciamento de potência que leva em conta, dentre outros parâmetros, a degradação da bateria.

No que diz respeito aos resultados obtidos, para a arquitetura propulsora SSHSP, a solução de melhor *trade-off* ( $\max(F_t)$ ) apresentou aumento de 10,95% na economia de combustível equivalente. Para emissões de gases, tal configuração obteve redução relevante de monóxidos de carbono  $CO$  (-16,71%), hidrocarbonetos não queimados no processo de combustão  $HC$  (-27,69%) e óxidos de nitrogênio  $NO_x$  (-48,32%). Com relação a configuração otimizada de arquitetura em paralelo, a solução  $\max(F_t)$  SAPHP apresentou diminuição ainda mais significativa no consumo de combustível (-23,42%) e emissões de poluentes atmosféricos (-34,72% para  $CO$ , -52,33% para  $NO_x$  e -28,08% para  $HC$ ).

Neste trabalho, foi também realizada uma análise comparativa entre as configurações otimizadas das arquiteturas propulsoras em série e paralelo. Para esta avaliação, a solução  $\max(F_t)$  SAPHP obteve melhores índices de emissões de gases, maior economia de combustível e estado de saúde da bateria com relação à configuração otimizada em série. Por outro lado, a solução  $\max(F_t)$  SSHSP apresentou menor massa do kit de hibridização e custo inicial do sistema elétrico, que se configuram como fatores importantes no ponto de vista mercadológico. Ao mesmo tempo, a redução do tempo de recarga proporcionada pela configuração em série é outra

grande vantagem, visto que evita possíveis problemas correlacionados com a infraestrutura de recarregamento. Neste sentido, é importante destacar que a geração de energia elétrica proveniente fontes de energia limpas se configura como aspecto fundamental para tornar a eletrificação veicular mais sustentável.

Além disso, por meio da avaliação das configurações PHEV otimizadas em ciclos de condução alternativos, foi possível concluir que as soluções  $\max(F_t)$  SAPHP e  $\max(F_t)$  SSHSP apresentaram comportamento robusto não apenas no ciclo pelo qual foi submetido o procedimento de otimização, mas também em diferentes perfis de condução (incluindo ciclos reais), com alta e baixa demanda de potência. Para a análise de custos e ciclo de vida da bateria, concluiu-se que a configuração PHEV com arquitetura SAPHP sobressaiu em relação ao custo-benefício para todos os ciclos de condução analisados, exceto o ciclo real baseado na cidade de Santa Maria, em que a solução  $\max(F_t)$  SSHSP obteve menor razão entre custo operacional e vida útil da bateria em quilômetros rodados.

Com relação ao estudo de *benchmarking* realizado, as configurações ótimas obtiveram, de uma maneira geral, resultados similares àqueles oriundos de trabalhos publicados na literatura, apesar de diferenças pontuais resultantes da distinção nos níveis de hibridização das configurações analisadas e nos objetivos dos procedimentos de otimização (nenhum dos estudos analisados levou em conta o estado de saúde bateria, por exemplo).

Vale ressaltar que o método utilizado neste estudo tem como objetivo principal atuar na concepção inicial do veículo hibridizado, uma vez que parâmetros obtidos para o projeto do sistema elétrico precisam se adequar às configurações de bateria e motores elétricos disponíveis no mercado.

Por fim, conclui-se, pelos resultados descritos neste estudo, que ambas as configurações veiculares hibridizadas analisadas apresentaram viabilidade não só em relação ao consumo de combustível e emissões de gases, mas também no que diz respeito aos custos operacionais dos kits de hibridização otimizados.

## 5.1 Trabalhos futuros

Apesar das configurações híbridas otimizadas terem apresentado resultados promissores, análises adicionais relacionadas aos efeitos dinâmicos causados pela distribuição de massa do veículo hibridizado seriam válidas. Outras abordagens de controle e métodos de otimização também se configuram como importantes para uma avaliação detalhada dos procedimentos mais eficientes, com melhores resultados e menor custo computacional. Ao mesmo tempo, é importante comparar diferentes formulações do procedimento de otimização, avaliando as potenciais mudanças que possam ocorrer nas soluções otimizadas uma vez que pesos distintos sejam atribuídos para cada critério de otimização proposto.

Além disso, as configurações otimizadas devem ser avaliadas experimentalmente, de maneira que seja possível a comparação com os ganhos obtidos pelos métodos numéricos. Ao

mesmo tempo, vale pontuar que, para o modelo de simulação proposto, componentes tais como motor elétrico, inversor e motor de combustão foram baseados em dados experimentais, aumentando, deste modo, o grau de acuracidade dos resultados obtidos.

Ainda no âmbito experimental, testes de ciclagem para validação de modelos matemáticos que descrevem o mecanismo de envelhecimento de baterias se configuram como essenciais para uma implementação mais realista de controladores de gerenciamento de potência que levam em consideração a vida útil da bateria.

Outro aspecto importante a ser estudado em futuros trabalhos consiste na análise do impacto econômico, ambiental e social da inserção de veículos eletrificados no mercado, avaliando-se seus potenciais benefícios no cenário urbano. Em relação aos índices de emissões dos veículos híbridos, também é necessário utilizar a abordagem *Well-to-Wheel* para se quantificar as emissões de gases de efeito estufa causadas pela geração de energia elétrica para suprir a demanda deste tipo de sistema de propulsão, de modo que seja possível a avaliação dos reais benefícios da eletrificação veicular em larga escala.

Por fim, estudos relacionados a outras arquiteturas propulsoras limpas e energeticamente eficientes são bastante pertinentes para efeitos de comparação com diferentes níveis de hibridização. Neste sentido, trabalhos vem sendo desenvolvidos na área de otimização e controle de veículos puramente elétricos e veículos elétricos movidos a célula combustível. Além disso, estudos na área de biocombustíveis se configuram como bastante promissores para a realidade do mercado brasileiro, visto que a eletrificação veicular ainda apresenta grandes desafios de infraestrutura. Como continuidade deste trabalho, a avaliação dos potenciais benefícios de motores *flex* se apresenta como uma proposta relevante de pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- ABNT. Light road vehicles - fuel consumption measurement - test method. **NBR 7024**, 2010.
- ABNT. Determination of hydrocarbons, carbon monoxide, nitrogen oxides, carbon dioxides and particulate matter in the exhaust gas. **NBR 6601**, 2012.
- ABOLHASSANI, M.; ACHARYA, P.; ASADI, P.; ASHMUN, T.; CAMPBELL, S.; DORSEY, D.; HOELSCHER, D.; NIAZI, P.; PALMA, L.; PARSA, L.; SHIDORE, N.; THOMAS, G.; WELCH, S.; WISINGER, J.; GAO, Y. e EHSANI, M. Impact of hybrid electric vehicles on the world's petroleum consumption and supply. In **SAE Technical Papers**. 06 2003.
- AHMADI, S.; BATHAEE, S. e HOSSEINPOUR, A.H. Improving fuel economy and performance of a fuel-cell hybrid electric vehicle (fuel-cell, battery, and ultra-capacitor) using optimized energy management strategy. **Energy Conversion and Management**, v. 160, 74 – 84, 2018.
- ALDHUFAIRI, H.S. e OLATUNBOSUN, O.A. Developments in tyre design for lower rolling resistance: a state of the art review. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 232, n. 14, 1865–1882, 2018.
- ALMEIDA, R.M.; SHI, Q.; GOMES-SELMAN, J.M.; WU, X.; XUE, Y.; ANGARITA, H.; BARROS, N.; FORSBERG, B.R.; GARCÍA-VILLACORTA, R.; HAMILTON, S.K. *et al.* Reducing greenhouse gas emissions of amazon hydropower with strategic dam planning. **Nature communications**, v. 10, n. 1, 1–9, 2019.
- AMJAD, S.; NEELAKRISHNAN, S. e RUDRAMOORTHY, R. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, 1104 – 1110, 2010.
- ANL. Plug-ins: The future for hybrid electric vehicles? 11 2006.  
**URL:** <https://www.osti.gov/biblio/1219328>
- BAI, Y.; HE, H.; LI, J.; LI, S.; XIONG WANG, Y. e YANG, Q. Battery anti-aging control for a plug-in hybrid electric vehicle with a hierarchical optimization energy management strategy.

**Journal of Cleaner Production**, v. 237, 117841, 2019.

BARBOSA, T.P.; DA SILVA, L.A.R.; PUJATTI, F.J.P. e GUTIÉRREZ, J.C.H. Hydraulic hybrid passenger vehicle: Fuel savings possibilities. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, pp. 1–19, 2020.

BARBOSA, T.P.; ECKERT, J.J.; SILVA, L.C.A.; DA SILVA, L.A.R.; GUTIÉRREZ, J.C.H. e DEDINI, F.G. Gear shifting optimization applied to a flex-fuel vehicle under real driving conditions. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, v. 50, n. 6, 2084–2101, 2022.

BARBOSA, T.P.; ECKERT, J.J.; SILVA, L.C.A.; DA SILVA, L.A.R.; GUTIÉRREZ, J.C.H. e DEDINI, F.G. Gear shifting optimization applied to a flex-fuel vehicle under real driving conditions. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, v. 0, n. 0, 1–18, 2021.

BARLOW, T.J.; LATHAM, S.; MCCRAE, I. e BOULTER, P. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. **TRL Published Project Report**, 2009.

BECHTOLD, W.E.; STRUNK, M.R.; CHANG, I.Y.; WARD, J. e HENDERSON, R.F. Species differences in urinary butadiene metabolites: comparisons of metabolite ratios between mice, rats, and humans. **Toxicology and applied pharmacology**, v. 127, n. 1, 44–49, 1994.

BEDDAR, A.; BOUZEKRI, H.; BABES, B. e AFGHOUL, H. Experimental enhancement of fuzzy fractional order  $\pi + i$  controller of grid connected variable speed wind energy conversion system. **Energy Conversion and Management**, v. 123, 569–580, 2016.

BEDSWORTH, L.W. e TAYLOR, M.R. Learning from california's zero-emission vehicle program. **California Economic Policy**, v. 3, n. 4, 2007.

BENAJES, J.; GARCÍA, A.; MONSALVE-SERRANO, J. e MARTÍNEZ-BOGGIO, S. Optimization of the parallel and mild hybrid vehicle platforms operating under conventional and advanced combustion modes. **Energy Conversion and Management**, v. 190, 73 – 90, 2019.

BENAJES, J.; GARCÍA, A.; MONSALVE-SERRANO, J. e MARTÍNEZ-BOGGIO, S. Emissions reduction from passenger cars with rcci plug-in hybrid electric vehicle technology. **Applied**

**Thermal Engineering**, v. 164, 114430, 2020.

BENDER, F.A.; BOSSE, T. e SAWODNY, O. An investigation on the fuel savings potential of hybrid hydraulic refuse collection vehicles. **Waste Management**, v. 34, n. 9, 1577–1583, 2014.

BERTOTI, Elvis. **Caracterização Dinâmica de uma Bancada Dinamométrica Veicular de Rolos Duplos**. 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

BI, J.; WANG, Y.; SAI, Q. e DING, C. Estimating remaining driving range of battery electric vehicles based on real-world data: A case study of beijing, china. **Energy**, v. 169, 833–843, 2019.

BJÖRNSSON, L.H.; KARLSSON, S. e SPREI, F. Objective functions for plug-in hybrid electric vehicle battery range optimization and possible effects on the vehicle fleet. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 86, 655 – 669, 2018.

BORBA, BSMC. **Metodologia de regionalização do mercado de combustíveis automotivos no Brasil**. 2008. Tese (Doutorado). Dissertação de M. Sc., PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BOUILLY, J.; LAFOSSAS, F.; MOHAMMADI, A. e VAN WISSEN, R. Evaluation of fuel economy potential of an active grille shutter by the means of model based development including vehicle heat management. **SAE International Journal of Engines**, v. 8, n. 5, 2394–2401, 2015.

BRITANNICA. Alessandro Volta: Biography. <https://www.britannica.com/biography/Alessandro-Volta>, 2021. [Online; acessado em 4-Fevereiro-2021].

CAPPARELLA, J. 25 Best-Selling Cars, Trucks, and SUVs of 2019. <https://www.caranddriver.com/news/g27041933/best-selling-cars-2019/>, 2020. [Online; acessado em 01-Fevereiro-2021].

CAUSTON, Marcus. **Aftermarket vehicle hybridization: designing a supply network for a startup company**. 2010. Dissertação (Mestrado). Massachusetts Institute of Technology.

CHEAH, Lynette W. **Cars on a diet: the material and energy impacts of passenger vehicle weight reduction in the US**. 2010. Tese (Doutorado). Massachusetts Institute of Technology.

COLLANTES, Gustavo O. **The California zero-emission vehicle mandate: A study of the policy process, 1990-2004**. 2006. Tese (Doutorado). Institute of Transportation Studies, University of California, Davis.

CORNO, M. e POZZATO, G. Active adaptive battery aging management for electric vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 69, n. 1, 258–269, 2019.

CORREA, F.C.; ECKERT, J.J.; SILVA, L.C.; COSTA, E.S.; SANTICIOLLI, F.M. e DEDINI, F.G. Gear shifting strategy to improve the parallel hybrid vehicle fuel consumption. In **2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)**, pp. 1–6. IEEE, 2015.

CORRÊA, Fernanda Cristina. **Desenvolvimento e Análise de Estratégias de Gerenciamento de Potência em Veículo Elétrico Híbrido de Configuração Paralela**. 2013. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

CORRÊA, F.C.; DE ALCKMIN E SILVA, L.C.; ECKERT, J.J. e DEDINI, F.G. Aplicação da lógica fuzzy no gerenciamento de sistemas de armazenamento de energia. **Journal of Applied Instrumentation and Control**, 2020.

COSTA, Eduardo dos Santos. **Análise de consumo de combustível em veículo automotor hibridizado**. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

COSTA, E.D.S.; SANTICIOLLI, F.M.; ECKERT, J.J.; DIONÍSIO, H.J.; DEDINI, F.G. e CORRÊA, F.C. Computational and experimental analysis of fuel consumption of a hybridized vehicle. Relatório técnico, SAE Technical Paper, 2014.

CUSENZA, M.A.; BOBBA, S.; ARDENTE, F.; CELLURA, M. e DI PERSIO, F. Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, 634 – 649, 2019.

DA SILVA, S.F.; DE MOURA FERNANDES, E. e DE AMORIM JUNIOR, W.F. Simulation-driven model-based approach for the performance and fuel efficiency trade-off evaluation of

vehicle powertrain. Relatório técnico, SAE Technical Paper, 2019.

D'AMBROSIO, S. e VITOLO, R. Potential impact of active tire pressure management on fuel consumption reduction in passenger vehicles. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 233, n. 4, 961–975, 2019.

DE JONG, K. A. **An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems**. 1975. Tese (Doutorado). University of Michigan, Ann Arbor.

DE LUCA, S.; DI PACE, R. e MARANO, V. Modelling the adoption intention and installation choice of an automotive after-market mild-solar-hybridization kit. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 56, 426–445, 2015.

DE SOUZA, L.L.P.; LORA, E.E.S.; PALACIO, J.C.E.; ROCHA, M.H.; RENÓ, M.L.G. e VENTURINI, O.J. Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, 444 – 468, 2018.

DELFINO, F.; FERRO, G.; MINCIARDI, R.; ROBBA, M.; ROSSI, M. e ROSSI, M. Identification and management of an electrical storage system for application in photovoltaic installations. In **2017 13th IEEE International Conference on Control Automation (ICCA)**, pp. 886–891. 2017.

DELFINO, F.; FERRO, G.; MINCIARDI, R.; ROBBA, M.; ROSSI, M. e ROSSI, M. Identification and optimal control of an electrical storage system for microgrids with renewables. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 17, 100183, 2019.

DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT. **List of MAK and BAT Values: Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area**. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 07 2015.

DOE. Freedomcar and vehicle technologies multi-year program plan 2006-2011. **U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy**, 2007.

DOE. The History of the Electric Car. <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, 2014a. [Online; acessado em 4-Fevereiro-2020].

DOE. UC Davis Pioneers Research for Plug-In Hybrid Electric Vehicles. <https://afdc.energy.gov/case/1363>, 2014b. [Online; acessado em 05-Fevereiro-2021].

DONG, H.; FU, J.; ZHAO, Z.; LIU, Q.; LI, Y. e LIU, J. A comparative study on the energy flow of a conventional gasoline-powered vehicle and a new dual clutch parallel-series plug-in hybrid electric vehicle under nedc. **Energy Conversion and Management**, v. 218, 113019, 2020.

DONG, J. e LIN, Z. Within-day recharge of plug-in hybrid electric vehicles: Energy impact of public charging infrastructure. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 17, n. 5, 405 – 412, 2012.

DUOBA, M.; BOCCI, D.; BOHN, T.; CARLSON, R.; JEHLIK, F. e LOHSE-BUSCH, H. Argonne facilitation of phev standard testing procedure (sae j1711). 2009.

ECKERT, Jony Javorski. **Análise comparativa entre os métodos de cálculo da dinâmica longitudinal em veículos**. 2013. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

ECKERT, Jony Javorski. **Desenvolvimento de bancada dinamométrica para validação da influência da estratégia de troca de marchas na dinâmica veicular longitudinal**. 2017. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

ECKERT, J.J.; BERTOTI, E.; SILVA, L.C.D.A.E. e DEDINI, F.G. Experimental validation for the employment of shifting strategies optimized via i-awga in a gear shift indicator system for manual transmission vehicles. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, 2021a.

ECKERT, J.J.; CORRÊA, F.C.; SANTICIOLLI, F.M.; COSTA, E.D.S.; DIONÍSIO, H.J. e DEDINI, F.G. Vehicle gear shifting strategy optimization with respect to performance and fuel consumption. **Mechanics based design of structures and machines**, v. 44, n. 1-2, 123–136, 2016.

ECKERT, J.J.; D. A. SILVA, L.C.; DEDINI, F.G. e CORRÊA, F.C. Electric vehicle powertrain and fuzzy control multi-objective optimization, considering dual hybrid energy storage systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 69, n. 4, 3773–3782, 2020a.

ECKERT, J.J.; DA SILVA, S.F.; DE MENEZES LOURENÇO, M.A.; CORRÊA, F.C.; SILVA, L.C. e DEDINI, F.G. Energy management and gear shifting control for a hybridized vehicle to minimize gas emissions, energy consumption and battery aging. **Energy Conversion and Management**, v. 240, 114222, 2021b.

ECKERT, J.J.; SANTICIOLLI, F.M.; BERTOTI, E.; COSTA, E.D.S.; CORRÊA, F.C.; SILVA, L.C.D.A.E. e DEDINI, F.G. 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, 238–253, 2018a.

ECKERT, J.J.; SANTICIOLLI, F.M.; CORRÊA, F.C.; DEDINI, F.G. *et al.* Design of an aftermarket hybridization kit: Reducing costs and emissions considering a local driving cycle. **Vehicles**, v. 2, n. 1, 210–235, 2020b.

ECKERT, J.J.; SANTICIOLLI, F.M.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Vehicle drivetrain design multi-objective optimization. **Mechanism and Machine Theory**, v. 156, n. 1, 2021c.

ECKERT, J.J.; SANTICIOLLI, F.M.; YAMASHITA, R.Y.; CORRÊA, F.C.; SILVA, L.C. e DEDINI, F.G. Fuzzy gear shifting control optimisation to improve vehicle performance, fuel consumption and engine emissions. **IET Control Theory & Applications**, v. 13, n. 16, 2658–2669, 2019a.

ECKERT, J.J.; SILVA, L.C.D.A.E.; COSTA, E.D.S.; SANTICIOLLI, F.M.; CORRÊA, F.C. e DEDINI, F.G. Optimization of electric propulsion system for a hybridized vehicle. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, v. 47, n. 2, 175–200, 2019b.

ECKERT, J.J.; SILVA, L.C.D.A.E.; SANTICIOLLI, F.M.; COSTA, E.D.S.; CORRÊA, F.C. e DEDINI, F.G. Energy storage and control optimization for an electric vehicle. **International Journal of Energy Research**, v. 42, n. 11, 3506–3523, 2018b.

EHRENBERGER, S.; KONRAD, M. e PHILIPPS, F. Pollutant emissions analysis of three plug-in hybrid electric vehicles using different modes of operation and driving conditions. **Atmospheric Environment**, v. 234, 117612, 2020.

EHSANI, M.; GAO, Y.; LONGO, S. e EBRAHIMI, K. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. CRC press, 2018.

EPA. Summary of the Clean Air Act. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act>, 1970. [Online; acessado em 04-Fevereiro-2021].

EPE. Balanço energético nacional 2017: Relatório síntese. ano base 2016. **Technical Report Empresa de Pesquisa Energética Brasília, Brasil**, 2017a.

EPRI. Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles. volume 1: Nationwide greenhouse gas emissions. **Electric Power Research Institute. Natural Resources Defense Council.**, 2007.

FAIZ, A. Automotive emissions in developing countries-relative implications for global warming, acidification and urban air quality. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 27, n. 3, 167 – 186, 1993. Special Issue Energy and Global Climate Change.

FATHABADI, H. Utilizing solar and wind energy in plug-in hybrid electric vehicles. **Energy conversion and management**, v. 156, 317–328, 2018.

FLETCHER, S. Scientific American Newsletters: 40 Years Later: Electric Cars and the OPEC Oil Embargo. <https://blogs.scientificamerican.com/observations/40-years-later-electric-cars-and-the-opec-oil-embargo/>, 2013. [Online; acessado em 02-Fevereiro-2021].

FONTARAS, G.; PISTIKOPOULOS, P. e SAMARAS, Z. Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 18, 4023 – 4035, 2008.

FREY, H.C. Trends in onroad transportation energy and emissions. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 68, n. 6, 514–563, 2018.

FUHS, A. **Hybrid vehicles: and the future of personal transportation**. CRC Press, 2008.

GEN, M.; CHENG, R. e LIN, L. **Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach**. Springer Science & Business Media, 2008.

GENTA, G. e MORELLO, L. **The automotive chassis**, v. 1. Springer, 2009.

GILLESPIE, T.D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Society of Automotive Engineers - SAE, 1992.

GIRGIS, M.; MAHMOUD, T.; ABD EL-HAMEED, H. e EL-SAGHIER, Z. Routing and capacity assignment problem in computer networks using genetic algorithm. **Information Science Letters**, v. 2, 13–25, 2013.

GNANN, T.; PLÖTZ, P. e KLEY, F. Vehicle charging infrastructure demand for the introduction of plug-in electric vehicles in germany and the us. In **Proceedings of Electric Vehicle Symposium**, v. 26. 2012.

GOHARIMANESH, M.; AKBARI, A. e TOOTOONCHI, A.A. More efficiency in fuel consumption using gearbox optimization based on taguchi method. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 10, n. 2, 1–8, 2014.

GOLBERG, D.E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. **Addison-Wesley Publishing Company**, v. 1989, n. 102, 36, 1989.

GOLDBERG, D.E. e DEB, K. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. In **Foundations of genetic algorithms**, v. 1, pp. 69–93. Elsevier, 1991.

GUENOUNOU, O.; DAHHOU, B. e CHABOUR, F. Adaptive fuzzy controller based mppt for photovoltaic systems. **Energy Conversion and Management**, v. 78, 843–850, 2014.

GUERCIONI, G.R. e VIGLIANI, A. Gearshift control strategies for hybrid electric vehicles: A comparison of powertrains equipped with automated manual transmissions and dual-clutch transmissions. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 233, n. 11, 2761–2779, 2019.

GUO, H.; WANG, X. e LI, L. State-of-charge-constraint-based energy management strategy of plug-in hybrid electric vehicle with bus route. **Energy Conversion and Management**, v. 199, 111972, 2019.

GÖKCE, K. e OZDEMIR, A. An instantaneous optimization strategy based on efficiency maps for internal combustion engine/battery hybrid vehicles. **Energy Conversion and Management**, v. 81, 255 – 269, 2014.

HAGEMAN, M. e MCLAUGHLIN, T. Considerations for pairing the ic engine and electric motor in a hybrid power system for small uavs. **2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting**, 01 2018.

HALVORSON, B. Toyota's top-selling US hybrid isn't the Prius. [https://www.greencarreports.com/news/1126603\\_toyota-s-top-selling-us-hybrid-isn-t-the-prius](https://www.greencarreports.com/news/1126603_toyota-s-top-selling-us-hybrid-isn-t-the-prius), 2020. [Online; acessado em 08-Fevereiro-2021].

HAO, H.; GENG, Y. e SARKIS, J. Carbon footprint of global passenger cars: Scenarios through 2050. **Energy**, v. 101, 121–131, 2016.

HAWKINS, S.; BILLOTTO, F.; COTTRELL, D.; HOUTMAN, A.; POULOS, S.; RADEMACHER, R.; VAN MAANEN, K. e WILSON, D. Development of general motors' eassist powertrain. **SAE International Journal of Alternative Powertrains**, v. 1, n. 1, 308–323, 2012.

HICKEY, N.; BOSCARATO, I. e KASPAR, J. **Air Pollution from Mobile Sources: Formation and Effects and Abatement Strategies**, pp. 15–43. Springer Netherlands, Dordrecht, 2014. ISBN 978-94-017-8777-2.

HILL, G.; HEIDRICH, O.; CREUTZIG, F. e BLYTHE, P. The role of electric vehicles in near-term mitigation pathways and achieving the uk's carbon budget. **Applied Energy**, v. 251, 113111, 2019.

**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919307834>

HOLJEVAC, N.; CHELI, F. e GOBBI, M. Multi-objective vehicle optimization: Comparison of combustion engine, hybrid and electric powertrains. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, p. 0954407019860364, 2019a.

HOLJEVAC, N.; CHELI, F. e GOBBI, M. A simulation-based concept design approach for combustion engine and battery electric vehicles. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, v. 233, n. 7, 1950–1967, 2019b.

HOLLAND, J. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence**. A Bradford book. MIT

Press, 1992. ISBN 9780262581110.

HOROWITZ, C.A. Paris agreement. **International Legal Materials.**, v. 55, n. 4, 740–755, 2016.

HØYER, K.G. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. **Utilities Policy**, v. 16, n. 2, 63–71, 2008.

HU, X.; MARTINEZ, C.M. e YANG, Y. Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: A unified cost-optimal approach. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 87, 4 – 16, 2017. Signal Processing and Control challenges for Smart Vehicles.

HU, X.; ZHANG, X.; TANG, X. e LIN, X. Model predictive control of hybrid electric vehicles for fuel economy, emission reductions, and inter-vehicle safety in car-following scenarios. **Energy**, v. 196, 117101, 2020.

IFA. Limit Values Germany - MAK. [https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-internationale-grenzwerte-fuer-chemische-substanzen-limit-values-for-chemical-agents/limit-values-germany-\(dfg\)/index.jsp](https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-internationale-grenzwerte-fuer-chemische-substanzen-limit-values-for-chemical-agents/limit-values-germany-(dfg)/index.jsp), 2012. [Online; acessado em 02-Agosto-2020].

ISI, F. Analysis of data for 100,000 plug-in hybrid electric passenger cars confirms high deviation from official fuel efficiency and co2 values. **Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI**, 2020.

ISO. Electrically propelled road vehicles - test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - part 2: High-energy applications. **ISO Standard No.12405-2:2012**, pp. 1–60, 2012.

JAZAR, R.N. **Vehicle Dynamics**. Springer, 2008.

JUNG, J.; ZHANG, L. e ZHANG, J. **Lead-Acid Battery Technologies: Fundamentals, Materials, and Applications**. CRC Press, 2015.

KARAOĞLAN, M.U.; KURALAY, N.S. e COLPAN, C.O. The effect of gear ratios on the

exhaust emissions and fuel consumption of a parallel hybrid vehicle powertrain. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, 1033–1041, 2019.

KERLER, M.; BURDA, P.; BAUMANN, M. e LIENKAMP, M. A concept of a high-energy, low-voltage ev battery pack. In **2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)**, pp. 1–8. IEEE, 2014.

KHAN, M. e KAR, N.C. Hybrid electric vehicles for sustainable transportation: A canadian perspective. **World electric vehicle journal**, v. 3, n. 3, 551–562, 2009.

KIM, Y.; FIGUEROA-SANTOS, M.; PRAKASH, N.; BAEK, S.; SIEGEL, J.B. e RIZZO, D.M. Co-optimization of speed trajectory and power management for a fuel-cell/battery electric vehicle. **Applied Energy**, v. 260, 114254, 2020.

**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919319415>

KRZYWANSKI, J.; GRABOWSKA, K.; SOSNOWSKI, M.; ZYLKA, A.; SZTEKLER, K.; KALAWA, W.; WOJCIK, T. e NOWAK, W. An adaptive neuro-fuzzy model of a re-heat two-stage adsorption chiller. **Thermal Science**, v. 23, n. Suppl. 4, 1053–1063, 2019.

KULKARNI, M.; SHIM, T. e ZHANG, Y. Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions. **Mechanism and machine theory**, v. 42, n. 2, 168–182, 2007.

LAFONTAINE, M.; GENDRE, C.; DELSAUT, P. e SIMON, P. Urinary 3-hydroxybenzo [a] pyrene as a biomarker of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: an approach for determining a biological limit value. **Polycyclic Aromatic Compounds**, v. 24, n. 4-5, 441–450, 2004.

LEE, T.B. Battery prices have fallen 88 percent over the last decade. <https://arstechnica.com/science/2020/12/battery-prices-have-fallen-88-percent-over-the-last-decade/>, 2020. [Online; acessado em 27-Fevereiro-2021].

LEI, Z.; QIN, D.; HOU, L.; PENG, J.; LIU, Y. e CHEN, Z. An adaptive equivalent consumption minimization strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on traffic information. **Energy**, v. 190, 116409, 10 2019.

LEMME, R.F.; ARRUDA, E.F. e BAHIENSE, L. Optimization model to assess electric vehicles as an alternative for fleet composition in station-based car sharing systems. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 67, 173–196, 2019.

LI, H.; RAVEY, A.; N'DIAYE, A. e DJERDIR, A. Online adaptive equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering power sources degradation. **Energy Conversion and Management**, v. 192, 133 – 149, 2019.

LI, L.; YAN, B.; SONG, J.; ZHANG, Y.; JIANG, G. e LI, L. Two-step optimal energy management strategy for single-shaft series-parallel powertrain. **Mechatronics**, v. 36, 147 – 158, 2016.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415816300071>

LI, P.; JIAO, X. e LI, Y. Adaptive real-time energy management control strategy based on fuzzy inference system for plug-in hybrid electric vehicles. **Control Engineering Practice**, v. 107, 104703, 2021a.

LI, Y.; WANG, S.; DUAN, X.; LIU, S.; LIU, J. e HU, S. Multi-objective energy management for atkinson cycle engine and series hybrid electric vehicle based on evolutionary nsga-ii algorithm using digital twins. **Energy Conversion and Management**, v. 230, 113788, 2021b.

LI, Y.; XIE, K.; WANG, L. e XIANG, Y. The impact of phev's charging and network topology optimization on bulk power system reliability. **Electric Power Systems Research**, v. 163, 85 – 97, 2018.

LIN, X.; BANVAIT, H.; ANWAR, S. e CHEN, Y. Optimal energy management for a plug-in hybrid electric vehicle: Real-time controller. In **Proceedings of the 2010 American Control Conference**, pp. 5037–5042. June 2010.

LINN, J. e MCCONNELL, V. Interactions between federal and state policies for reducing vehicle emissions. **Energy Policy**, v. 126, 507 – 517, 2019.

**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518307080>

LONG, S. e GENG, S. Decision framework of photovoltaic module selection under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. **Energy Conversion and Management**, v. 106, 1242–1250, 2015.

LOPES, M.V.; ECKERT, J.J.; MARTINS, T.S. e SANTOS, A.A. Optimizing strain energy extraction from multi-beam piezoelectric devices for heavy haul freight cars. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, n. 1, 1–12, 2020.

MACE, M.J. Mitigation commitments under the paris agreement and the way forward. **Climate Law**, v. 6, n. 1-2, 21 – 39, 2016.

MAHMOUD, M. **Fuzzy Control, Estimation and Diagnosis: Single and Interconnected Systems**. 01 2018. ISBN 978-3-319-54953-8.

MAHMOUDI, S.M.; MALEKI, A. e OCHBELAGH, D.R. Optimization of a hybrid energy system with/without considering back-up system by a new technique based on fuzzy logic controller. **Energy Conversion and Management**, v. 229, 113723, 2021.

MARIANI, V.; RIZZO, G.; TIANO, F. e GLIELMO, L. A model predictive control scheme for regenerative braking in vehicles with hybridized architectures via aftermarket kits. **Control Engineering Practice**, v. 123, 105142, 2022.

MARKEL, T.; BROOKER, A.; HENDRICKS, T.; JOHNSON, V.; KELLY, K.; KRAMER, B.; O'KEEFE, M.; SPRIK, S. e WIPKE, K. Advisor: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. **Journal of power sources**, v. 110, n. 2, 255–266, 2002.

MARZOUGUI, H.; KADRI, A.; MARTIN, J.P.; AMARI, M.; PIERFEDERICI, S. e BACHA, F. Implementation of energy management strategy of hybrid power source for electrical vehicle. **Energy Conversion and Management**, v. 195, 830 – 843, 2019.

MASHADI, B.; AMIRI-RAD, Y.; AFKAR, A. e MAHMOODI-KALEYBAR, M. Simulation of automobile fuel consumption and emissions for various driver's manual shifting habits. **Journal of Central South University**, v. 21, n. 3, 1058–1066, 2014.

MATHWORKS. Generic battery model. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>, 2021. [Online; acessado em 10-Junho-2020].

EUROPEAN COMMISSION. Communication from the commission to the european parliament, the european council, the council, the european economic and social committee and the

committee of the regions. In **The European Green Deal**. 12 2019.

GOLDEN MOTOR. Electric Car Kit. <https://www.goldenmotor.com/>, 2021. [Online; acessado em 20-Fevereiro-2021].

GOLDEN MOTOR TECHNOLOGY. Made-in-China Website. <https://goldenmotorcz.en.made-in-china.com/>, 2021. [Online; acessado em 01-Agosto-2020].

HOWELL ENERGY. Made-in-China Website. <https://howellenergy.en.made-in-china.com/>, 2021. [Online; acessado em 20-Agosto-2020].

SHENZHEN EVEREXCEED INDUSTRIAL. Made-in-China Website. <https://everexceed.en.made-in-china.com/>, 2021. [Online; acessado em 07-Agosto-2020].

MECKLING, J. e NAHM, J. The politics of technology bans: Industrial policy competition and green goals for the auto industry. **Energy Policy**, v. 126, 470 – 479, 2019.

MIAO, Z.; BALEŽENTIS, T.; SHAO, S. e CHANG, D. Energy use, industrial soot and vehicle exhaust pollution—china’s regional air pollution recognition, performance decomposition and governance. **Energy Economics**, v. 83, 501 – 514, 2019.

**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988319302142>

MILLER, R.G. e SORRELL, S.R. Preface. the future of oil supply. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 372, n. 2006, 20130301–20130301, 2013.

MIRANDA, M.H.; SILVA, F.L.; LOURENÇO, M.A.; ECKERT, J.J. e SILVA, L.C. Electric vehicle powertrain and fuzzy controller optimization using a planar dynamics simulation based on a real-world driving cycle. **Energy**, v. 238, 121979, 2022.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. MIT press, 1998.

MME. Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira. GOVERNO DO BRASIL. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/>

energia-minerais-e-combustiveis/2020/01, 2020. [Online; acessado em 12-Fevereiro-2021].

MOHAMED-KASSIM, Z. e FILIPPONE, A. Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 15, n. 5, 275–284, 2010.

MONTAZERI-GH, M. e MAHMOODI-K, M. Optimized predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicle based on traffic condition. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, 935 – 948, 2016.

MOTA, C.V. Por que o real é a moeda que mais se desvalorizou em 2020. <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-54549137>, 2020. [Online; acessado em 10-Dezembro-2020].

MOTAPON, S.N.; LACHANCE, E.; DESSAINT, L.A. e AL-HADDAD, K. A generic cycle life model for lithium-ion batteries based on fatigue theory and equivalent cycle counting. **IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society**, v. 1, 207–217, 2020.

MOTORS, P.E. Federal clean car incentive program candidate vehicle. **Emission Control Technology Division. Office of Air and Waster Programs. United State Environmental Protection Agency**, 1975.

NGUYEN, B.H.; VO-DUY, T.; ANTUNES, C.H. e TROVÃO, J.P.F. Multi-objective benchmark for energy management of dual-source electric vehicles: An optimal control approach. **Energy**, p. 119857, 2021.

NISSAN. powered vehicle system runs on bio-ethanolll. **Fuel Cells Bulletin**, v. 2016, n. 7, 2–3, 2016.

ODEKANLE, E.L.; FAKINLE, B.S.; JIMODA, L.A.; OKEDERE, O.B.; AKEREDOLU, F.A. e SONIBARE, J.A. In-vehicle and pedestrian exposure to carbon monoxide and volatile organic compounds in a mega city. **Urban Climate**, v. 21, 173 – 182, 2017.

OECD, I. Energy technology perspectives 2017. catalysing energy technology transformations. **Technical Report International Energy Agency**, 2017.

OMAR, N.; MONEM, M.A.; FIROUZ, Y.; SALMINEN, J.; SMEKENS, J.; HEGAZY, O.; GAULOUS, H.; MULDER, G.; VAN DEN BOSSCHE, P.; COOSEMANS, T. e VAN MIERLO, J. Lithium iron phosphate based battery – assessment of the aging parameters and development of cycle life model. **Applied Energy**, v. 113, 1575 – 1585, 2014.

PETERSON, S.B. e MICHALEK, J.J. Cost-effectiveness of plug-in hybrid electric vehicle battery capacity and charging infrastructure investment for reducing us gasoline consumption. **Energy Policy**, v. 52, 429 – 438, 2013. Special Section: Transition Pathways to a Low Carbon Economy.

PISANTI, C.; RIZZO, G. e MARANO, V. Energy management of through-the-road parallel hybrid vehicles. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 47, n. 3, 2118–2124, 2014.

PLÖTZ, P.; FUNKE, S.; JOCHEM, P. e WIETSCHHEL, M. Co 2 mitigation potential of plug-in hybrid electric vehicles larger than expected. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, 1–6, 2017.

POLICARPO, N.; FRUTUOSO, F.; CASSIANO, D.; CAVALCANTE, F.; ARAÚJO, R.; BERTONCINI, B. e OLIVEIRA, M. Emission estimates for an on-road flex-fuel vehicles operated by ethanol-gasoline blends in an urban region, brazil. **Urban Climate**, v. 24, 111 – 120, 2018.

PORSCHE. Porsche Press Release: Prof. Ferdinand Porsche Created the First Functional Hybrid Car. [https://press.porsche.com/prod/presse\\_pag/PressResources.nsf/Content?ReadForm&languageversionid=857388&archive=10](https://press.porsche.com/prod/presse_pag/PressResources.nsf/Content?ReadForm&languageversionid=857388&archive=10), 2011. [Online; acessado em 06-Fevereiro-2021].

PROHASKA, R.; SIMPSON, M.; RAGATZ, A.; KELLY, K.; SMITH, K. e WALKOWICZ, K. Field evaluation of medium-duty plug-in electric delivery trucks. **U.S. National Renewable Energy Laboratory**, 2016.

RAFAJ, P.; KIESEWETTER, G.; GÜL, T.; SCHÖPP, W.; COFALA, J.; KLIMONT, Z.; PUROHIT, P.; HEYES, C.; AMANN, M.; BORKEN-KLEEFELD, J. e COZZI, L. Outlook for clean air in the context of sustainable development goals. **Global Environmental Change**, v. 53, 1 – 11, 2018.

**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378018304035>

RAHMAN, A.U.; ZEHRRA, S.S.; AHMAD, I. e ARMGHAN, H. Fuzzy supertwisting sliding

mode-based energy management and control of hybrid energy storage system in electric vehicle considering fuel economy. **Journal of Energy Storage**, v. 37, 102468, 2021.

REDELBACH, M.; ÖZDEMIR, E.D. e FRIEDRICH, H.E. Optimizing battery sizes of plug-in hybrid and extended range electric vehicles for different user types. **Energy Policy**, v. 73, 158 – 168, 2014.

RESEARCH TRIANGLE PARK. **Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency**. 1999.

RIZZO, G.; MARANO, V.; PISANTI, C.; D'AGOSTINO, M.; NADDEO, M.; SORRENTINO, M. e ARSIE, I. A prototype mild-solar-hybridization kit: design and challenges. **Energy Procedia**, v. 45, 1017–1026, 2014.

ROSO, V.R.; SANTOS, N.D.S.A.; VALLE, R.M.; ALVAREZ, C.E.C.; MONSALVE-SERRANO, J. e GARCÍA, A. Evaluation of a stratified prechamber ignition concept for vehicular applications in real world and standardized driving cycles. **Applied Energy**, v. 254, 113691, 2019a.

ROSO, V.R.; SANTOS, N.D.S.A.; VALLE, R.M.; ALVAREZ, C.E.C.; MONSALVE-SERRANO, J. e GARCÍA, A. Evaluation of a stratified prechamber ignition concept for vehicular applications in real world and standardized driving cycles. **Applied Energy**, v. 254, 113691, 2019b.

ROTHERING, N. e ILIC, M. Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 26, n. 3, 1021–1029, 2011.

SAHU, A. e PATEL, U.S. Modelling & simulation of fuzzy logic based controller for energy storage system. **Journal of Electronic Design Technology**, v. 8, n. 2, 9–15, 2017.

SANTICIOLLI, Fabio Mazzariol. **Otimização dos Armazenadores de Energia Elétrica de um Veículo Híbrido em Função do Ciclo de Condução**. 2014. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

SANTICIOLLI, F.M.; DOS SANTOS COSTA, E.; ECKERT, J.J.; DIONÍSIO, H.J.; DE ALK-

MIN, L.C.; DEDINI, F.G. *et al.* Multiobjective gear shifting optimization considering a known driving cycle. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 3, 361–369, 2015.

SAPONARA, S. e MIHET-POPA, L. Energy storage systems and power conversion electronics for e-transportation and smart grid. 2019.

SAW, L.; SOMASUNDARAM, K.; YE, Y. e TAY, A. Electro-thermal analysis of lithium iron phosphate battery for electric vehicles. **Journal of Power Sources**, v. 249, 231–238, 2014.

SHEPHERD, C.M. Design of primary and secondary cells: Ii. an equation describing battery discharge. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 112, n. 7, 657, 1965.

SILVA, C.; ROSS, M. e FARIAS, T. Evaluation of energy consumption, emissions and cost of plug-in hybrid vehicles. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 7, 1635 – 1643, 2009.

SILVA, Fabrício Leonardo. **Modelagem e análise de sistemas de controle em diferenciais eletrônicos para veículos híbridos e elétricos**. 2020. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

SILVA, F.L.; DA SILVA, S.F.; MAZZARIOL, F.S.; ECKERT, J.J.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Multi-objective optimization of the steering system and fuzzy logic control applied to a car-like robot. In **Multibody Mechatronic Systems**, pp. 195–202. Springer International Publishing, Cham, 2021a. ISBN 978-3-030-60372-4.

SILVA, F.L.; SILVA, L.C.; ECKERT, J.J. e DE MENEZES LOURENÇO, M.A. Robust fuzzy stability control optimization by multi-objective for modular vehicle. **Mechanism and Machine Theory**, v. 167, 104554, 01 2022.

SILVA, L.C.; ECKERT, J.J.; LOURENÇO, M.A.; SILVA, F.L.; CORRÊA, F.C. e DEDINI, F.G. Electric vehicle battery-ultracapacitor hybrid energy storage system and drivetrain optimization for a real-world urban driving scenario. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 43, n. 5, 1–15, 2021b.

SILVA, L.C.D.A.E.; ECKERT, J.J.; LOURENÇO, M.A.D.M.; SILVA, F.L.; CORRÊA, F.C. e DEDINI, F.G. Battery-ultracapacitor hybrid energy storage system optimization for a real-world urban driving scenario. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and**

**Engineering**, 2021c.

SIMON, E.C. Avaliação de impactos da recarga de veículos elétricos em sistemas de distribuição. **SLJ Universidade Federal do Rio De Janeiro**, 2013.

SINGH, V.; SAHU, S.; KESARKAR, A. e BISWAL, A. Estimation of high resolution emissions from road transport sector in a megacity delhi. **Urban Climate**, v. 26 (2018), 109–120, 10 2018.

SMIT, R.; KINGSTON, P.; NEALE, D.; BROWN, M.; VERRAN, B. e NOLAN, T. Monitoring on-road air quality and measuring vehicle emissions with remote sensing in an urban area. **Atmospheric Environment**, v. 218, 116978, 2019.

**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223101930617X>

SOUZA, Reynaldo Barros de. **Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos**. 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

SPERLING, D. **Future drive: Electric vehicles and sustainable transportation**. Island Press, 2013.

TEODORESCU, H.N.L.; KANDEL, A. e JAIN, L.C. Fuzzy logic and neuro-fuzzy systems in medicine and bio-medical engineering: a historical perspective. In **Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine**, pp. 1–18. CRC Press, 2017.

THACKERAY, M.M.; WOLVERTON, C. e ISAACS, E.D. Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 7, 7854–7863, 2012.

TIANO, F.A.; RIZZO, G.; DE FEO, G. e LANDOLFI, S. Converting a conventional car into a hybrid solar vehicle: a lca approach. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 31, 188–194, 2018.

TONG, W. **Mechanical design of electric motors**. CRC press, 2014.

TORRES, J.; GONZALEZ, R.; GIMENEZ, A. e LOPEZ, J. Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. a comparative study. **Applied Energy**, v. 113, 816 – 824, 2014.

TRAUT, E.; HENDRICKSON, C.; KLAMPFL, E.; LIU, Y. e MICHALEK, J.J. Optimal design and allocation of electrified vehicles and dedicated charging infrastructure for minimum life cycle greenhouse gas emissions and cost. **Energy Policy**, v. 51, 524 – 534, 2012. Renewable Energy in China.

TREMBLAY, O. e DESSAINT, L.A. Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. **World electric vehicle journal**, v. 3, n. 2, 289–298, 2009.

TURNER, J.; POPPLEWELL, A.; PATEL, R.; JOHNSON, T.; DARNTON, N.; RICHARDSON, S.; BREDDA, S.; TUDOR, R.; BITHELL, C.; JACKSON, R. *et al.* Ultra boost for economy: extending the limits of extreme engine downsizing. **SAE International Journal of Engines**, v. 7, n. 1, 387–417, 2014.

UN. Resolution adopted by the general assembly on 1 september 2015. transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. Relatório técnico, A/RES/71/1, 2015.

VAN SITTEERT, N.J.; MEGENS, H.J.; WATSON, W.P. e BOOGAARD, P.J. Biomarkers of exposure to 1, 3-butadiene as a basis for cancer risk assessment. **Toxicological Sciences**, v. 56, n. 1, 189–202, 2000.

WAGNER, I. Best-selling plug-in electric cars in the United States in 2019, based on sales. <https://www.statista.com/statistics/257966/best-selling-electric-cars-in-the-united-states/#:~:text=In%202019%2C%20the%20Tesla%20Model,the%20U.S.%20electric%20vehicle%20market.,2020>. [Online; acessado em 08-Fevereiro-2021].

WAKEFIELD, E.H. **History of the electric automobile battery-only powered cars**. Society of Automotive Engineers Inc., 1993.

WAKEFIELD, E.H. **History of the electric automobile-hybrid electric vehicles**, v. 187. Society of Automotive Engineers Inc., 1998.

WANG, C.Y.; ZHANG, G.; GE, S.; XU, T.; JI, Y.; YANG, X.G. e LENG, Y. Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures. **Nature**, v. 529, n. 7587, 515–518, 2016.

WANG, J.; WU, Q.; LIU, J.; YANG, H.; YIN, M.; CHEN, S.; GUO, P.; REN, J.; LUO, X.;

LINGHU, W. *et al.* Vehicle emission and atmospheric pollution in china: problems, progress, and prospects. **PeerJ**, v. 7, e6932, 2019a.

WANG, S.; LIU, Y.; WANG, Z.; DONG, P.; CHENG, Y.; XU, X. e TENBERGE, P. Adaptive fuzzy iterative control strategy for the wet-clutch filling of automatic transmission. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 130, 164–182, 2019b.

WANG, T. e XIE, S. Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 beijing olympic games traffic control period. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 35, 5682–5690, 2009.

WEILLER, C. Plug-in hybrid electric vehicle impacts on hourly electricity demand in the united states. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, 3766 – 3778, 2011.

WESTBROOK, M.H. e WESTBROOK, M. **The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars**. 38. Iet, 2001.

WHO. Ambient air pollution - a major threat to health and climate. <http://www.who.int/airpollution/ambient/en/>, 2018. [Online; acessado em 19-Dezembro-2020].

WINSTON, P. **Artificial Intelligence**. Addison-Wesley Publishing Company, 1993. ISBN 9780201600865.

**URL:** <https://books.google.com.br/books?id=lk6NOwAACAAJ>

WOODY, M.; ARBABZADEH, M.; LEWIS, G.M.; KEOLEIAN, G.A. e STEFANOPOULOU, A. Strategies to limit degradation and maximize li-ion battery service lifetime - critical review and guidance for stakeholders. **Journal of Energy Storage**, v. 28, 101231, 2020.

WULANDARI, P.; WISPRIYONO, B.; FITRIA, L.; KUSNOPUTRANTO, H.; ARRAZY, S. e SANJAYA, B.R. Urinary s-phenylmercapturic acid (s-pma) level as biomarkers of exposure to benzene in informal shoes industrial workers, cibaduyut bandung. **KnE Life Sciences**, pp. 84–92, 2018.

XIE, S.; HU, X.; ZHANG, Q.; LIN, X.; MU, B. e JI, H. Aging-aware co-optimization of battery size, depth of discharge, and energy management for plug-in hybrid electric vehicles. **Journal of Power Sources**, v. 450, 227638, 2020.

XIONG, W.; ZHANG, Y. e YIN, C. Optimal energy management for a series-parallel hybrid electric bus. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 7, 1730 – 1738, 2009.

YAMASHITA, Rodrigo Yassuda. **Modelagem e controle de estabilidade aplicada a veículo de tração integral**. 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

YANG, H.; MA, M.; THOMPSON, J.R. e FLOWER, R.J. Waste management, informal recycling, environmental pollution and public health. **J Epidemiol Community Health**, v. 72, n. 3, 237–243, 2018.

YOUNG, K.; WANG, C.; WANG, L.Y. e STRUNZ, K. Electric vehicle battery technologies. In **Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks**, pp. 15–56. Springer, 2013.

ZEMAN, F. e LEWIS, R. Retrofitted plug-in hybrid vehicles: Results of nyit drive share program. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 17, n. 7, 514–518, 2012.

ZENG, Y.; CAI, Y.; KOU, G.; GAO, W. e QIN, D. Energy management for plug-in hybrid electric vehicle based on adaptive simplified-ecms. **Sustainability**, v. 10, 2060, 06 2018.

ZHANG, H.; QIN, Y.; LI, X.; LIU, X. e YAN, J. Power management optimization in plug-in hybrid electric vehicles subject to uncertain driving cycles. **eTransportation**, v. 3, 100029, 2020a.

ZHANG, Y.; GUO, C.; LI, G.; LIU, Y. e CHEN, Z. Cooperative control strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on a hierarchical framework with fast calculation. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, 119627, 2020b.

ZHANG, Y.T.; CLAUDEL, C.G.; HU, M.B.; YU, Y.H. e SHI, C.L. Develop of a fuel consumption model for hybrid vehicles. **Energy Conversion and Management**, v. 207, 112546, 2020c.

ZHENG, C.; XU, G.; XU, K.; PAN, Z. e LIANG, Q. An energy management approach of hybrid vehicles using traffic preview information for energy saving. **Energy Conversion and Management**, v. 105, 462 – 470, 2015.

ZHOU, X.; QIN, D. e HU, J. Multi-objective optimization design and performance evaluation for plug-in hybrid electric vehicle powertrains. **Applied Energy**, v. 208, 1608–1625, 2017.

ZHOU, Y.; RAVEY, A. e PÉRA, M.C. Multi-objective energy management for fuel cell electric vehicles using online-learning enhanced markov speed predictor. **Energy Conversion and Management**, v. 213, 112821, 2020.

ZHOU, Y.; RAVEY, A. e PÉRA, M.C. Real-time cost-minimization power-allocating strategy via model predictive control for fuel cell hybrid electric vehicles. **Energy Conversion and Management**, v. 229, 113721, 2021.

ZULKIFLI, S.; MOHD, S.; SAAD, N. e AZIZ, A. Split-parallel through-the-road hybrid electric vehicle: Operation, power flow and control modes. In **2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)**, pp. 1–7. IEEE, 2015.

ZULKIFLI, S.A.; MOHD, S.; SAAD, N. e AZIZ, A.R.A. Influence of motor power and efficiency on fuel consumption of retrofit-conversion split-parallel hybrid electric vehicle. In **2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)**, pp. 1–5. IEEE, 2013.

ZULKIFLI, S.A.; SAAD, N.; MOHD, S. e AZIZ, A.R.A. Split-parallel in-wheel-motor retrofit hybrid electric vehicle. In **2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia**, pp. 11–16. IEEE, 2012.

## APÊNDICE A – Tabela do operador de mutação

Tabela A.1: Operador de mutação

Variável de projeto $n$	Cromossomo inicial $[X]^T$	Operador de mutação $0 \geq MT(n) \geq 1$		Cromossomo mutado $[X_{MT}]^T$
		$MT(n) < 0,5$	$MT(n) \geq 0,5$	
$n = 1$	$Q_{nom}$	$Q_{mut} = 0$	$-10 \leq Q_{mut} \leq 10$	$Q_{nom} + Q_{mut}$
$n = 2$	$T_{max}$	$T_{mut} = 0$	$-10 \leq T_{mut} \leq 10$	$T_{max} + T_{mut}$
$n = 3$	$\omega_{Tc}$	$\omega_{mut} = 0$	$-500 \leq \omega_{mut} \leq 500$	$\omega_{Tc} + \omega_{mut}$
$n = 4$	$N_{ME}$	$N_{mut} = 0$	$-0,1 \leq N_{mut} \leq 0,1$	$N_{ME} + N_{mut}$
$5 \leq n \leq 9$	$MF_{PS}(n-4)$	$MF_{PS}(n-4) = MF_{PS}(n-4)$	$-1500 \leq MF_{PS}(n-4) \leq 1500$	$MF_{PS}(n-4) + MF_{PS}(n-4)$
$10 \leq n \leq 14$	$MF_{PS}(n-4)$	$MF_{PS}(n-4) = MF_{PS}(n-4)$	$-30 \leq MF_{PS}(n-4) \leq 30$	$MF_{PS}(n-4) + MF_{PS}(n-4)$
$15 \leq n \leq 19$	$MF_{PS}(n-4)$	$MF_{PS}(n-4) = MF_{PS}(n-4)$	$-400 \leq MF_{PS}(n-4) \leq 400$	$MF_{PS}(n-4) + MF_{PS}(n-4)$
$20 \leq n \leq 24$	$MF_{PS}(n-4)$	$MF_{PS}(n-4) = MF_{PS}(n-4)$	$-0,2 \leq MF_{PS}(n-4) \leq 0,2$	$MF_{PS}(n-4) + MF_{PS}(n-4)$
$25 \leq n \leq 29$	$MF_{PS}(n-4)$	$MF_{PS}(n-4) = MF_{PS}(n-4)$	$-0,2 \leq MF_{PS}(n-4) \leq 0,2$	$MF_{PS}(n-4) + MF_{PS}(n-4)$
$30 \leq n \leq 34$	$MF_{GS}(n-29)$	$MF_{GS}(n-29) = MF_{GS}(n-29)$	$-1500 \leq MF_{GS}(n-29) \leq 1500$	$MF_{GS}(n-29) + MF_{GS}(n-29)$
$35 \leq n \leq 39$	$MF_{GS}(n-29)$	$MF_{GS}(n-29) = MF_{GS}(n-29)$	$-30 \leq MF_{GS}(n-29) \leq 30$	$MF_{GS}(n-29) + MF_{GS}(n-29)$
$40 \leq n \leq 44$	$MF_{GS}(n-29)$	$MF_{GS}(n-29) = MF_{GS}(n-29)$	$-400 \leq MF_{GS}(n-29) \leq 400$	$MF_{GS}(n-29) + MF_{GS}(n-29)$
$45 \leq n \leq 49$	$MF_{GS}(n-29)$	$MF_{GS}(n-29) = MF_{GS}(n-29)$	$-0,3 \leq MF_{GS}(n-29) \leq 0,3$	$MF_{GS}(n-29) + MF_{GS}(n-29)$
$50 \leq n \leq 130$	$RW_{PS}(n-49)$	$RW_{PS}(n-49) = RW_{PS}(n-49)$	inteiro $[1 \leq RW_{PS}(n-49) \leq 3]$	$RW_{PS}(n-49) + RW_{PS}(n-49)$
$131 \leq n \leq 211$	$RW_{PS}(n-49)$	$RW_{PS}(n-49) = RW_{PS}(n-49)$	$0 \leq RW_{PS}(n-49) \leq 1$	$RW_{PS}(n-49) + RW_{PS}(n-49)$
$n = 212$	$RW_{PS}(n-49)$	$RW_{PS}(n-49) = RW_{PS}(n-49)$	inteiro $[1 \leq RW_{PS}(n-49) \leq 5]$	$RW_{PS}(n-49) + RW_{PS}(n-49)$
$213 \leq n \leq 239$	$RW_{GS}(n-212)$	$RW_{GS}(n-212) = RW_{GS}(n-212)$	inteiro $[1 \leq RW_{GS}(n-212) \leq 3]$	$RW_{GS}(n-212) + RW_{GS}(n-212)$
$240 \leq n \leq 266$	$RW_{GS}(n-212)$	$RW_{GS}(n-212) = RW_{GS}(n-212)$	$0 \leq RW_{GS}(n-212) \leq 1$	$RW_{GS}(n-212) + RW_{GS}(n-212)$
$n = 267$	$RW_{GS}(n-212)$	$RW_{GS}(n-212) = RW_{GS}(n-212)$	inteiro $[1 \leq RW_{GS}(n-212) \leq 5]$	$RW_{GS}(n-212) + RW_{GS}(n-212)$
$n = 268$	$L_s$	$L_s^{mut} = L_s$	$0 \leq L_s^{mut} \leq 1$	$L_s^{mut}$
$n = 269$	$L_i$	$L_i^{mut} = L_i$	$0 \leq L_i^{mut} \leq 1$	$L_i^{mut}$

## APÊNDICE B – Gráfico de radar para configurações otimizadas com arquitetura SSHSP

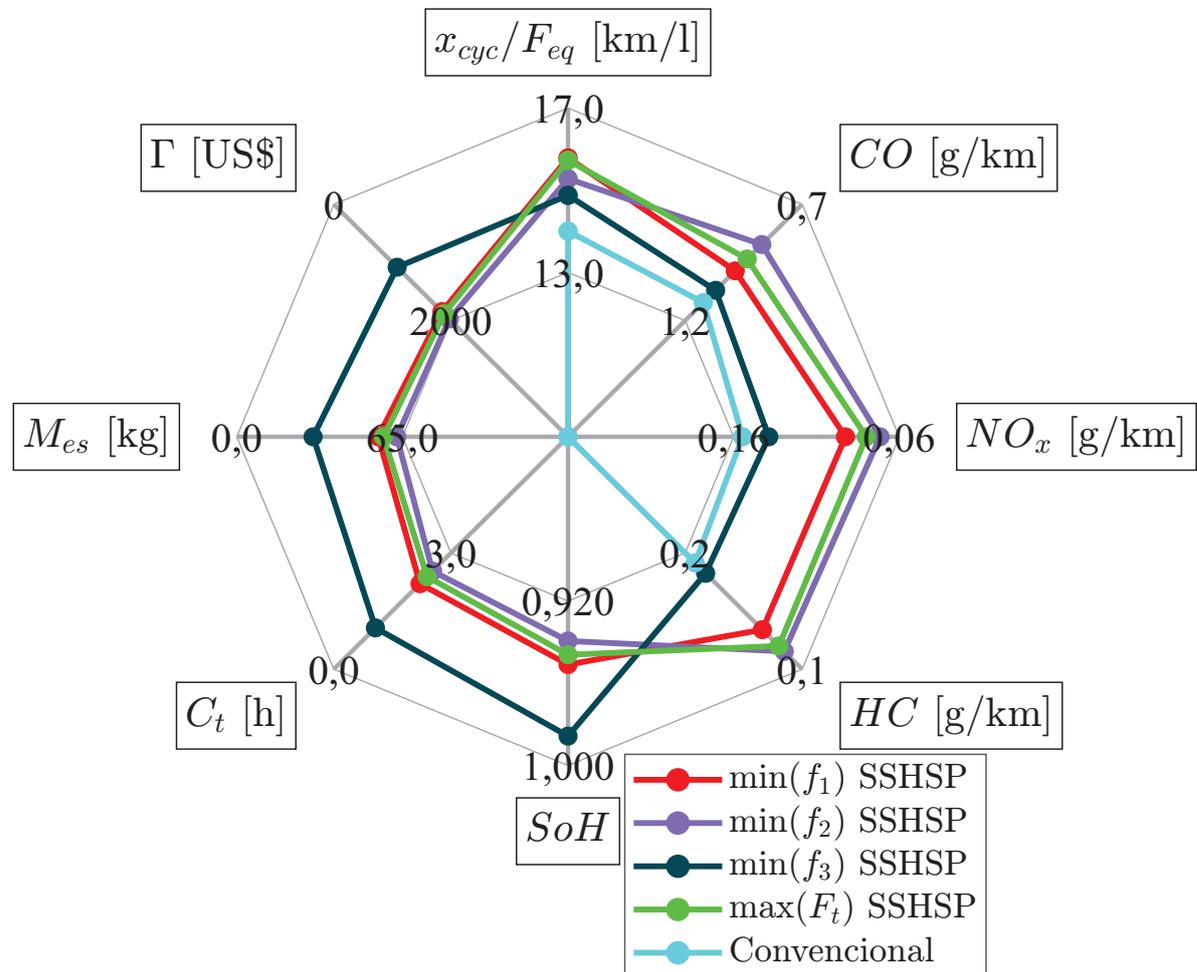


Figura B.1: Gráfico de radar octogonal para configurações PHEV otimizadas com arquitetura SSHSP

## APÊNDICE C – Gráfico de radar para configurações otimizadas com arquitetura SAPHP

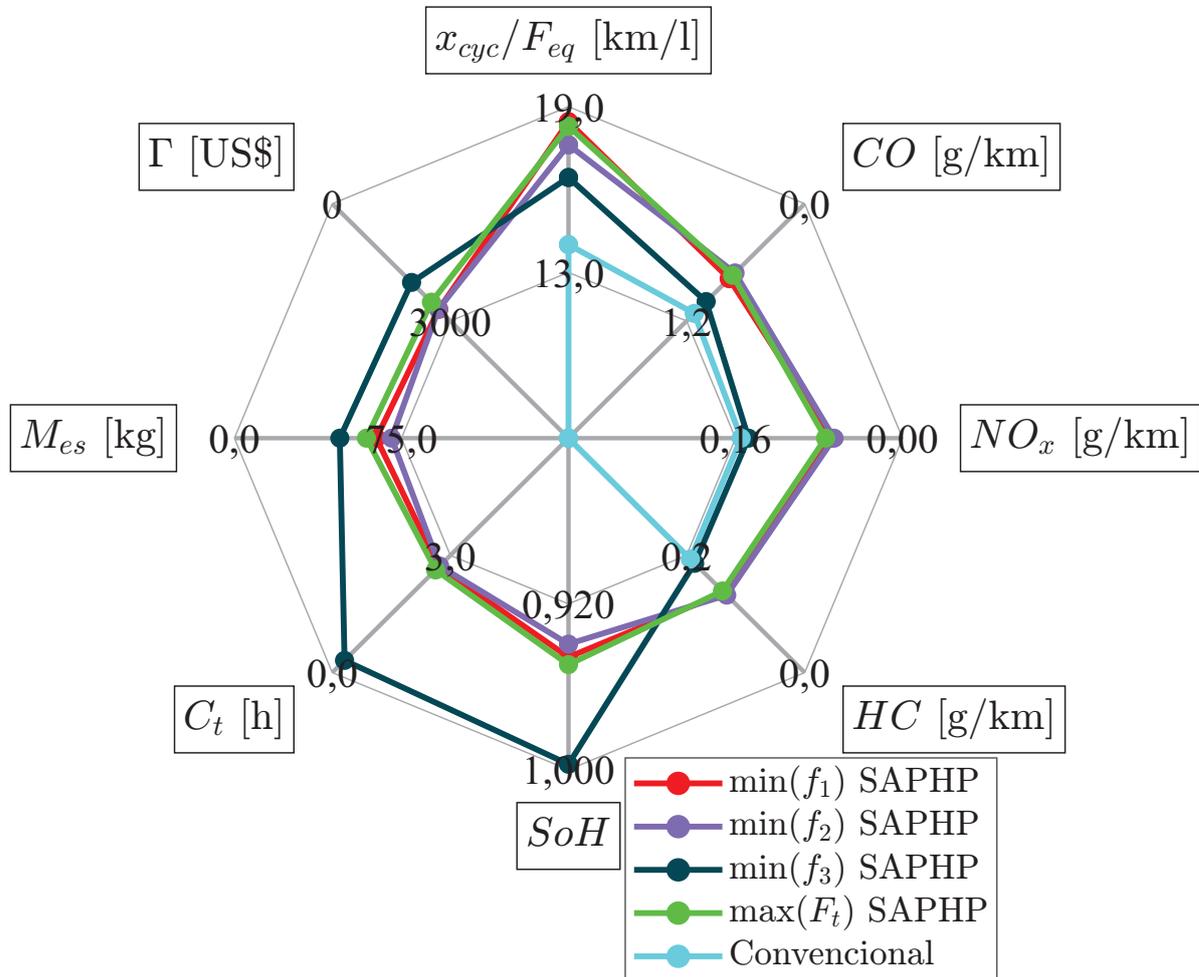


Figura C.1: Gráfico de radar octogonal para configurações PHEV otimizadas com arquitetura SAPHP

## APÊNDICE D – Ciclos de condução alternativos

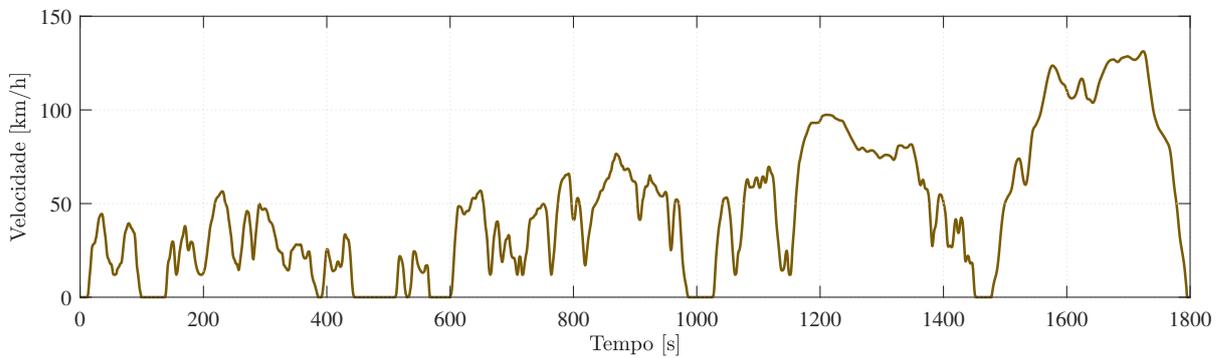
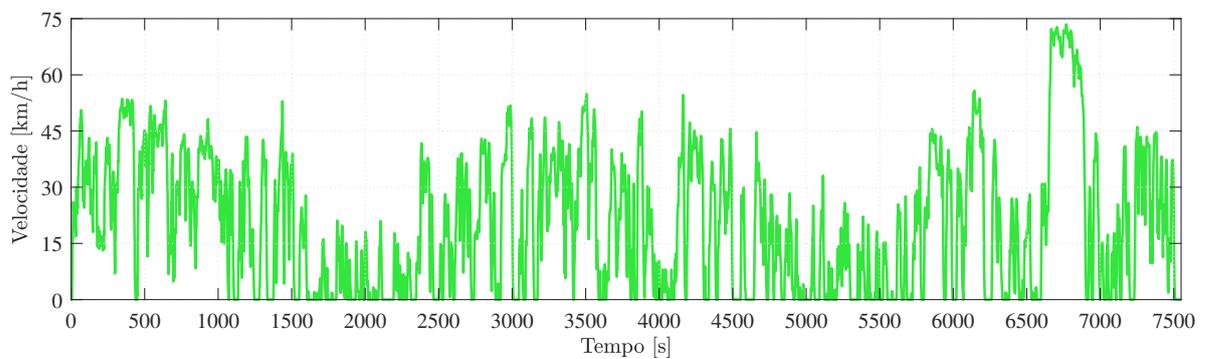
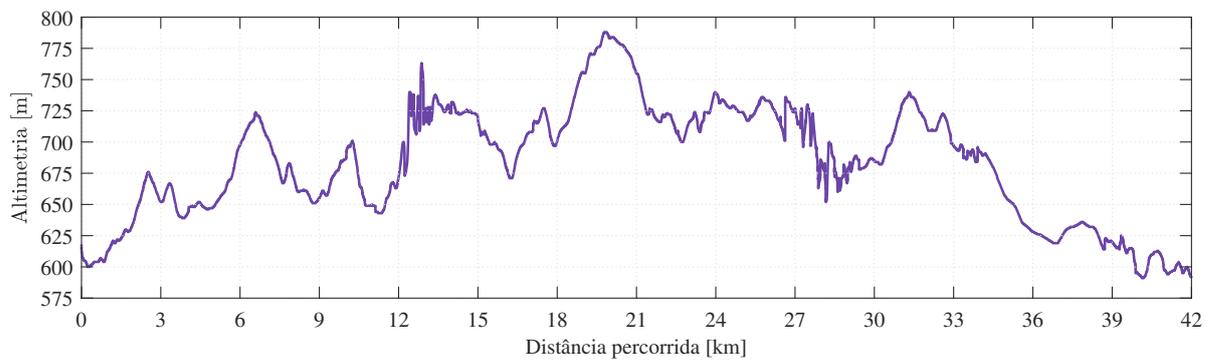


Figura D.1: Ciclo WLTC



(a) Perfil de velocidade



(b) Altimetria

Figura D.2: Ciclo Campinas

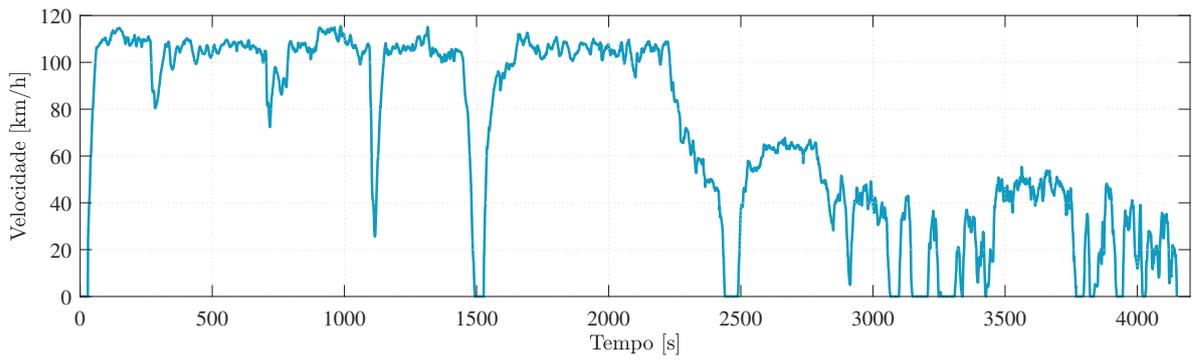
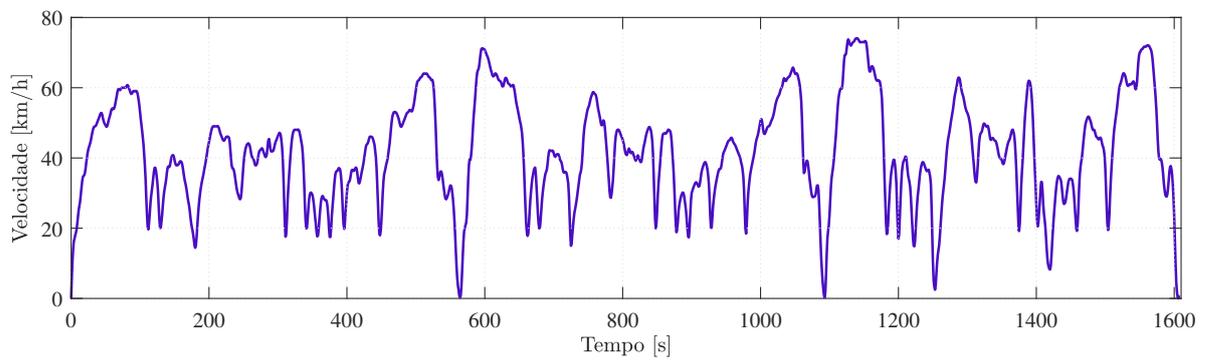
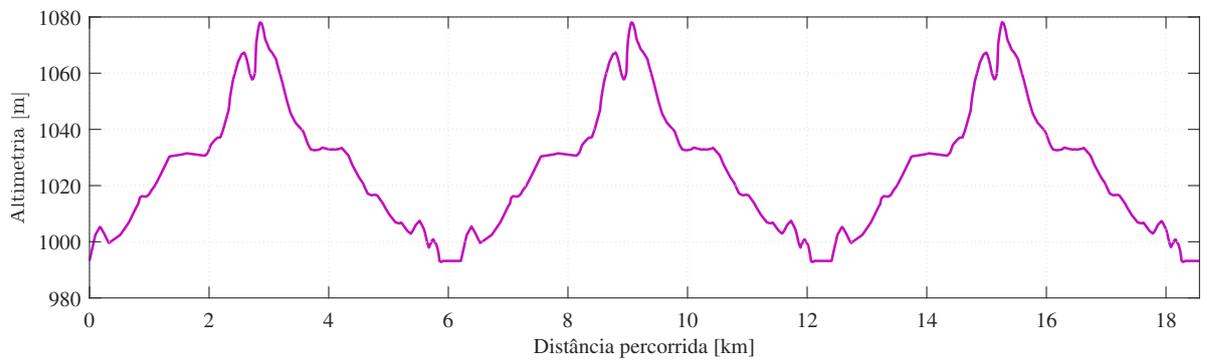


Figura D.3: Ciclo Campinas-São Paulo



(a) Perfil de velocidade



(b) Altimetria

Figura D.4: Ciclo Ouro Branco

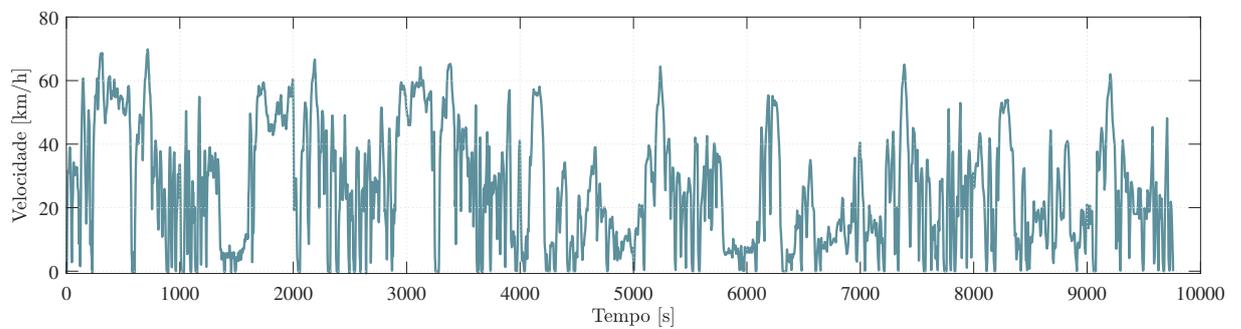


Figura D.5: Ciclo Santa Maria

## APÊNDICE E – Artigos publicados

### E.1 Periódicos

DA SILVA, S.F.; ECKERT, J.J.; CORREA, F.C.; SILVA, F.L.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Dual HESS electric vehicle powertrain design and fuzzy control based on multi-objective optimization to increase driving range and battery life cycle. **Applied Energy**, v.324, 119723, 2022. ISSN 0306-2619.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119723>

DA SILVA, S.F.; ECKERT, J.J.; SILVA, F.L.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Multi-objective optimization design and control of plug-in hybrid electric vehicle powertrain for minimization of energy consumption, exhaust emissions and battery degradation. **Energy Conversion and Management**, v.234, 113909, 2021. ISSN 0196-8904.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113909>

ECKERT, J.J.; DA SILVA, S.F.; LOURENÇO, M.A.M.; CORRÊA, F.C.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Energy management and gear shifting control for a hybridized vehicle to minimize gas emissions, energy consumption and battery aging. **Energy Conversion and Management**, v.240, 114222, 2021. ISSN 0196-8904.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114222>

ECKERT, J.J.; SILVA, F.L.; DA SILVA, S.F.; BUENO, A.V.; OLIVEIRA, M.L.M; SILVA, L.C.A. Optimal design and power management control of hybrid biofuel–electric powertrain. **Applied Energy**, v.325, 119903, 2021. ISSN 0306-2619.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119903>

ECKERT, J.J.; DA SILVA, S.F.; SANTICIOLLI, F.M.; CARVALHO, A.C. e DEDINI, F.G. Multi-speed gearbox design and shifting control optimization to minimize fuel consumption, exhaust emissions and drivetrain mechanical losses. **Mechanism and Machine Theory**, v.169, 104644, 2022. ISSN 0094-114X.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104644>

ECKERT, J.J.; BARBOSA, T.P.; DA SILVA, S.F.; SILVA, F.L.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Electric hydraulic hybrid vehicle powertrain design and optimization-based power distribution control to extend driving range and battery life cycle. **Energy Conversion and Management**, v.252, 115094, 2022. ISSN 0196-8904.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115094>

## E.2 Capítulo de livro

DA SILVA, S.F.; ECKERT, J.J.; CARVALHO, A.C.; SANTICIOLLI, F.M.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Multi-body Dynamics Co-simulation of Planetary Gear Train for Dynamic Meshing Force Analysis, v. 94, pp. 159-167, **Proceedings of the International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics - MUSME Conference**, Springer International Publishing, Cham, 2021. ISBN 978-3-030-60372-4.

**URL:** [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60372-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60372-4_18)

SILVA, F.L.; DA SILVA, S.F.; SANTICIOLLI, F.M.; ECKERT, J.J.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Multi-objective Optimization of the Steering System and Fuzzy Logic Control Applied to a Car-Like Robot, v. 94, pp. 195-202, **Proceedings of the International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics - MUSME Conference**, Springer International Publishing, Cham, 2021. ISBN 978-3-030-60372-4.

**URL:** [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60372-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60372-4_22)

CARVALHO, A.C.; SANTICIOLLI, F.M.; DA SILVA, S.F.; ECKERT, J.J.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Gear Mesh Stiffness and Damping Co-simulation, v. 94, pp. 177-184, **Proceedings of the International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics - MUSME Conference**, Springer International Publishing, Cham, 2021. ISBN 978-3-030-60372-4.

**URL:** [https://doi.org/10.1007/978-3-030-60372-4\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60372-4_20)

## E.3 Congressos

DA SILVA, S.F.; ECKERT, J.J.; SILVA, F.L.; SILVA, L.C.A. e DEDINI, F.G. Modeling and simulation of start/stop system for reduction of vehicle fuel consumption and air pollutant emissions, vol. 8, n. 1, pp. 486-498, **XXVIII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva SIMEA 2021**. São Paulo: Blucher, 2021. ISSN 2357-7592.

**URL:** <http://doi.org/10.5151/simea2021-PAP119>

MATTOS, J.A.B.; SILVA, L.C.A.; ECKERT, J.J.; DEDINI, F.G.; DA SILVA, S.F. e SILVA, F.L. Application of CFD into an automotive torque converter, 2021-36-0023, **SAE Technical Paper**. SAE BRASIL 2021 Web Forum, 2022. ISSN 0148-7191.

**URL:** <https://doi.org/10.4271/2021-36-0023>.