

**JULIANA LOPES**

**“METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO E DE GESTÃO DE  
FONTES DE ENERGIA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS”**

**CAMPINAS  
2012**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

**JULIANA LOPES**

**“METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO E DE GESTÃO DE  
FONTES DE ENERGIA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS”**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Antenor Pomílio  
Co-Orientador: Prof. Dr. Paulo Augusto Valente Ferreira

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pela aluna Juliana Lopes, e orientada pelo Prof. Dr. José Antenor Pomílio.

---

**CAMPINAS  
2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

L881m           Lopes, Juliana  
                  Metodologias de dimensionamento e de gestão de  
                  fontes de energia para veículos elétricos / Juliana Lopes.  
                  --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

                  Orientador: José Antenor Pomílio.  
                  Coorientador: Paulo Augusto Valente Ferreira.  
                  Tese de Doutorado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

                  1. Baterias. 2. Energia - Fontes alternativas. 3.  
Energia - Armazenamento. 4. Veículos elétricos. 5.  
Capacitores. I. Pomílio, José Antenor, 1960-. II.  
Ferreira, Paulo Augusto Valente, 1958-. III.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Título em Inglês: Optimal sizing and power management methodologies of energy  
sources for electric vehicle

Palavras-chave em Inglês: Batteries, Energy - Alternative sources, Energy - Storage,  
Electric vehicles, Capacitors

Área de concentração: Automação

Titulação: Doutora em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Antenor Pomílio, André Augusto Ferreira, Wanderlei  
Marinho da Silva, Christiano Lyra Filho, Marcos Ferretti

Data da defesa: 30-10-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

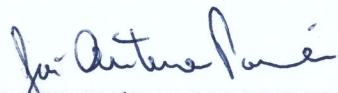
## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

**Candidata:** Juliana Lopes

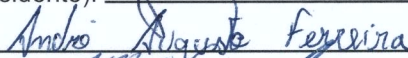
**Data da Defesa:** 30 de outubro de 2012

**Título da Tese:** "Metodologias de Dimensionamento e de Gestão de Fontes de Energia para Veículos Elétricos"

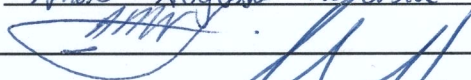
Prof. Dr. José Antenor Pomílio (Presidente):



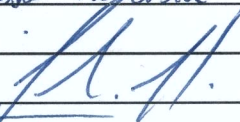
Prof. Dr. André Augusto Ferreira:



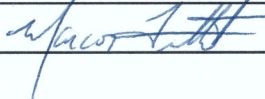
Dr. Wanderlei Marinho da Silva:



Prof. Dr. Christiano Lyra Filho:



Dr. Marcos Ferretti:





## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos Profs. José Antenor Pomílio e Paulo Augusto Valente Ferreira pela oportunidade de estender meus estudos e formação acadêmica sobre um tema de reconhecida importância: veículos elétricos. Agradeço pela orientação prontamente atendida.

Agradeço a todos os amigos dos laboratórios LCEE e DT, em especial aos amigos Marcos, Newton e Fellipe.

À minha família pelo apoio e confiança depositados em mim desde sempre.

Ao meu esposo José Francisco pela companhia e apoio incondicional ao meu trabalho.

À UNICAMP, à faculdade de engenharia elétrica e de computação, ao departamento de sistemas e controle de energia e ao departamento de telemática.

À FAPESP pelo indispensável apoio financeiro na vigência deste Doutorado.





## RESUMO

O sistema de armazenamento de energia (ESS – *Energy-Storage System*), em veículos elétricos, constituído por baterias e/ou supercapacitores pode agregar elevado custo ou elevada massa ao veículo caso o número de módulos dessas fontes seja inadequado. Nesta Tese são propostas duas metodologias aplicadas ao dimensionamento da ESS a fim de encontrar configurações de menor massa possível. Essas configurações devem ser capazes de suprir energia para o veículo elétrico em um dado perfil de alto valor de potência requerida. São investigadas ESSs com diferentes tipos de baterias e supercapacitores a fim de se obter um amplo range de escolhas de configurações em relação a peso e custo. Além de uma unidade ESS o veículo possui uma fonte de autonomia que pode ser uma célula a combustível ou uma unidade gerador/motor à combustão interna. A primeira metodologia de dimensionamento investiga configurações de ESS híbridas ou constituídas apenas por baterias ou supercapacitores para um veículo do tipo *Sport Utility Vehicle*. Esta metodologia utiliza os coeficientes de potência e energia específicas a partir das curvas de Ragone das fontes da ESS. Os resultados mostraram, que, dentre as configurações de ESSs investigadas, que a de menor massa é constituída apenas por supercapacitores de 165 F. A segunda metodologia de dimensionamento investiga configurações de ESSs híbridas para três tipos de veículos: um *Sport Utility Vehicle*, um micro-ônibus e ônibus de transporte urbano. Esse estudo visa mostrar a viabilidade do emprego da metodologia a veículos com diferentes aspectos físicos. Esta metodologia de dimensionamento destaca-se pela utilização de Otimização não Linear na solução do problema cuja função objetivo é a menor massa da ESS. O aspecto inovador desta metodologia está na utilização de otimização na solução do problema referente ao dimensionamento da ESS aplicado ao envelope dos perfis de potência dos ciclos de condução. O envelope é resultante da sobreposição dos perfis de potência relativos aos ciclos de condução de operação dos veículos. O objetivo em utilizar o envelope dos perfis de potência está na abrangência de situações diversas de operação, em eventuais ciclos de condução, nos quais o veículo possa ser conduzido. A metodologia é aplicada a determinados períodos do envelope com alto valor de potência requerida. São propostas duas estratégias de gerenciamento de potência a fim de verificar a atuação entre a ESS, dimensionadas pela metodologia ótima, e a fonte de autonomia no fornecimento da potência requerida pelos veículos. Uma estratégia de gerenciamento é fundamentada em regras e a outra é fundamentada em Otimização não Linear. A primeira estratégia foi aplicada para dez repetições de cada ciclo de condução, considerados no dimensionamento da ESS, e apresentou resultados satisfatórios quanto aos limites de operação dos supercapacitores e das baterias. A segunda estratégia de gerenciamento foi aplicada a determinados períodos dos ciclos de condução, nos quais, em relação à estratégia em regras, observou-se a atuação da fonte de autonomia. Os resultados mostraram que é possível obter maior economia de combustível, pois a fonte de autonomia permaneceu desativada com o emprego da estratégia de gerenciamento ótima. As duas estratégias de gerenciamento foram aplicadas aos três tipos de veículos.

**Palavras chave:** Baterias. Energia - Fontes alternativas. Energia - Armazenamento. Veículos elétricos. Capacitores.



## **ABSTRACT**

*The energy-storage system (ESS) of electric vehicles with batteries and/or ultracapacitors can add high cost or high mass to the vehicle if the number of modules of these sources is not appropriate. Two sizing methodologies applied to the ESS are proposed in this Thesis. These methodologies aim ESSs configurations of lowest mass. The obtained configurations must be able to supply power when the electric vehicle is driven in a certain profile of high value of power required. ESSs with different types of batteries and ultracapacitors are studied to achieve a broad range of choices of configurations in relation to weight and cost. Besides an ESS unity the electric vehicle has an autonomy source that can be a fuel cell or a generator/internal combustion engine unity. The first sizing methodology investigates different ESSs configurations for a Sport Utility Vehicle type. This methodology is based on Ragone curves of the sources from which the specific power and specific energy coefficients are obtained. The ESS of lowest mass is found by using these coefficients and the power required that must be constant. Among the ESSs configurations analyzed the results showed that the ESS of lowest mass is formed only by ultracapacitors modules of 165 F. The second methodology investigates configurations of hybrid ESSs for three vehicle models: one Sport Utility Vehicle, one minibus and one urban transit bus. This study aims to show the viability of using the methodology in vehicles with different physical characteristics. This methodology is highlighted by the use of nonlinear optimization to solve the ESS sizing problem whose objective function is the lowest mass of ESS. The innovative aspect of this methodology is the use of optimization to solve the ESS sizing problem applied to the power envelope of the driving cycle profiles. The envelope is resulting of the superposition of the power profiles related to the driving cycles in which the vehicle is driven. The purpose of using the envelope of the power profiles is to comprise different situations, in any driving cycles, in which the vehicle can be driven. The methodology is applied to certain periods of the envelope with high value of power required. Two power management strategies are proposed to manage the ESSs, sized by the optimum methodology, and the autonomy sources to supply continuously the power required by the vehicle. One power management strategy is based on rules and the other one is also based on nonlinear optimization technique. The first one was applied to ten repetitions of each driving cycle and presented good results related to batteries and ultracapacitors operational limits. The second one was applied to certain periods of the driving cycles in which the autonomy source provides nominal power related to the strategy based on rules. The results of the optimum power management strategy showed that it is possible to obtain improved fuel economy, since the autonomy source remained turned off. Both strategies were applied to the three vehicle models.*

**Keywords:** Batteries, Energy - Alternative sources, Energy - Storage, Electric vehicles, Capacitors.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Principais escolhas e componentes elétricos para um VE. ....	2
Figura 2.1 - Modelo de circuito elétrico para os SCs, no qual $R_{SC}$ é a resistência interna, $V_{SC}$ a tensão no capacitor, $I_{SC}$ a corrente e $V_t$ a tensão nos terminais do SC.....	11
Figura 2.2 - Diagrama de Ragone para as diferentes fontes de energia caracterizadas em termos de energia e potência específicas.....	13
Figura 3.1 - Configuração considerada para o sistema energético dos VEs em estudo. ....	20
Figura 3.2 - Modelo de circuito elétrico para as BTs, no qual $R_{BT}$ é a resistência interna, $E_{BT}$ a tensão de circuito aberto, $I_{BT}$ a corrente, e $V_{BT}$ a tensão de alimentação. ....	21
Figura 3.3 - Modelo de circuito elétrico para os SCs, no qual $R_{SC}$ é a resistência interna, $V_{SC}$ a tensão no capacitor, $I_{SC}$ a corrente e $V_t$ a tensão nos terminais do SC.....	24
Figura 4.1 - Gráfico de Ragone das BTs e dos SCs.....	28
Figura 4.2 - Perfil de velocidade do ciclo Z85 (a) e perfil de potência requerida (b). ....	29
Figura 4.3 - Potência requerida (a) e potência normalizada para 13 segundos (b). ....	30
Figura 4.4 - Gráfico de Ragone e linhas de tempo de 8 e 13 segundos. ....	31
Figura 4.5 - Alocação de potência requerida da BT e do SC.....	33
Figura 4.6 - Potência requerida à ESS durante aceleração.....	34
Figura 4.7 – Estado de carga da BT (a) e tensão no SC (b).....	35
Figura 5.1 - Ciclos de velocidade dos veículos V1 e V2.....	38
Figura 5.2 - Ciclo de velocidade do veículo V3. ....	38
Figura 5.3 - Perfis de potência requerida do veículo V1.....	39
Figura 5.4 - Perfis de potência requerida do veículo V2.....	40
Figura 5.5 - Perfil de potência requerida do veículo V3.....	40
Figura 5.6 - Envelope dos perfis de potência positivos da Figura 5.3 e correspondentes períodos escolhidos para o dimensionamento da ESS híbrida do veículo V1. ....	41
Figura 5.7 - Envelope dos perfis de potência positivos da Figura 5.4 e correspondentes períodos escolhidos para o dimensionamento da ESS híbrida do veículo V2. ....	41
Figura 5.8 - Perfil de potência positivo da Figura 5.5 e correspondente período escolhido para o dimensionamento da ESS híbrida do veículo V3. ....	41
Figura 5.9 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT Lítio e SC de 165 F. ....	45
Figura 5.10 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT Lítio e SC de 58 F. ....	45
Figura 5.11 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT de Chumbo e SC de 165 F. ....	45
Figura 5.12 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT de Chumbo e SC de 58 F. ....	46
Figura 5.13 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT NiCd e SC de 165 F. ....	46
Figura 5.14 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT de NiCd e SC de 58 F. ...	46
Figura 5.15 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de Lítio e SC de 165 F. .	47

Figura 5.16 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de Lítio e SC de 58 F. ...	48
Figura 5.17 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de Chumbo e SC de 165 F. .....	48
Figura 5.18 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de Chumbo e SC de 58 F. .....	48
Figura 5.19 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de NiCd e SC de 165 F.	49
Figura 5.20 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de NiCd e SC de 58 F...	49
Figura 5.21 - Massa das ESSs de V3 de todas as combinações de BTs e SCs.....	50
Figura 5.22 - Custo das ESSs de V3 de todas as combinações de BTs e SCs.....	50
Figura 5.23 - EGP fundamentada em regras.....	52
Figura 5.24 - De cima para baixo, potência requerida da BT, potência requerida do SC, estado de carga da BT, tensão da BT e tensão do SC para o período T3 do veículo V1.	53
Figura 5.25 - Potência requerida no ciclo UDDS, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.....	54
Figura 5.26 - Potência requerida no ciclo HWFET, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.....	54
Figura 5.27 - Potência requerida no ciclo NYCC, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.....	55
Figura 5.28 - Potência requerida no ciclo LA92Short, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.....	55
Figura 5.29 - Potência requerida no ciclo ECEEUDC, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.....	56
Figura 5.30 - De cima para baixo, potência requerida da BT, potência requerida do SC, estado de carga da BT, tensão da BT e tensão do SC para o período T3 do veículo V2.	58
Figura 5.31 - Potência requerida no ciclo UDDS, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.....	59
Figura 5.32 - Potência requerida no ciclo HWFET, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.....	59
Figura 5.33 - Potência requerida no ciclo NYCC, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.....	60
Figura 5.34 - Potência requerida no ciclo LA92Short, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.....	60
Figura 5.35 - Potência requerida no ciclo ECEEUDC, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.....	61
Figura 5.36 - De cima para baixo, potência requerida da BT, potência requerida do SC, estado de carga da BT, tensão da BT e tensão do SC para período T4 do veículo V3. ...	62
Figura 5.37 - Potência requerida no ciclo da Figura 5.2, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V3.....	63
Figura 5.38 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo LA92Short, da BT, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V1.....	66

Figura 5.39 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo ECEEUDC, da BT, do SC, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V1. ....	67
Figura 5.40 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo LA92Short, da BT, do SC, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V2. ....	68
Figura 5.41 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo ECEEUDC, da BT, do SC, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V2. ....	69
Figura 5.42 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo, da BT, do SC, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V3. ....	70





## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características físicas dos veículos. ....	21
Tabela 3.2 - Dados das Baterias.....	23
Tabela 3.3 - Dados dos Supercapacitores. ....	25
Tabela 4.2 - Dados do dimensionamento da ESS só com BTs.....	32
Tabela 4.3 - Dados do dimensionamento dos SCs e das BTs. ....	34



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BT	Bateria
CaC	Célula a Combustível
DoD	<i>Depth of Discharge</i>
DoE	<i>Department of Energy</i>
ECEEUDC	<i>Elementary Urban Cycle</i> adicionado ao <i>Extra-Urban Driving Cycle</i>
ESS	<i>Energy-Storage System</i>
EGP	Estratégia de Gerenciamento de Potência
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Driving Schedule</i>
LA92Short	primeiros 969 segundos do <i>Unified Dynamometer Driving Schedule</i>
MCI	Motor à Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
MIPEC	<i>Multiple Input Power Electronic Converter</i>
NiCd	Níquel e Cádmio
NYCC	<i>New York City Cycle</i>
PNGV	<i>Partnership for Next-Generation Vehicles</i>
SC	Supercapacitor
SoC	Estado de Carga
SoC <sub>BT,SC</sub>	Estado de Carga da Bateria e do Supercapacitor
SUV	<i>Sport Utility Vehicle</i>
UDDS	<i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i>
USCAR	<i>United States Council for Automotive Research</i>
USD	<i>United States Dollar</i>
V1	SUV
V2	Micro-ônibus
V3	Ônibus
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
ZEV	<i>Zero Emission Vehicle</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$	Capacitância do SC
$C_p$	Capacidade de Peukert
$CR$	Carga removida da bateria
$CS$	Carga fornecida pela bateria
$d$	Densidade do ar
$E_{\text{autonomia}}$	Energia consumida pela fonte de autonomia
$E_{BT}$	Tensão de circuito aberto da BT
$E_{SC}$	Energia armazenada no SC
$g$	Aceleração da gravidade
$I_{BT,SC}$	Corrente requerida da BT e do SC
$k$	Coefficiente de Peukert
$M$	Massa do veículo com carga ( <i>gross vehicle weight</i> )
$m$	Número de células das BTs ou dos SCs
$m_{BT}$	Massa individual do módulo ou do 'string' da BT
$M_{ESS}$	Massa da ESS
$M_r$	Massa equivalente das componentes ( <i>driveshaft</i> , semi eixos e rodas) do drivetrain em rotação
$m_{SC}$	Massa do 'string' de SC
$n$	Número de células das BTs ou dos SCs
$n_{BT}$	Número de módulos ou 'strings' de BTs
$n_{SC}$	Número de 'strings' de SCs
$P_{\text{aut\_max}}$	Potência máxima fornecida pela fonte de autonomia
$P_{\text{autonomia}}$	Potência fornecida pela fonte de autonomia
$P_{bat}$	Potência das BTs sem resistência
$P_{BT,SC}$	Potência requerida da BT e do SC
$P_{BTmax,SCmax}$	Máximo valor de potência requerida da BT e do SC
$P_{ESS}$	Potência requerida da ESS
$P_{req}$	Potência requerida pelo veículo
$R_{BT,SC}$	Resistência interna da BT e do SC
$t$	Tempo
$V$	Velocidade do veículo
$V_{BT}$	Tensão terminal da BT

$V_{SC}$	Tensão no capacitor
$V_t$	Tensão nos terminais do SC
$V_{t_{max}}$	Máxima tensão terminal dos SCs
$V_{t_{min}}$	Mínima tensão terminal dos SCs
$V_{ttg}$	Tensão terminal de meia carga dos SCs
$\delta_{BT,SC}$	Coeficiente de energia específica da BT e do SC
$\delta t$	Intervalo de tempo em segundos
$\eta_{BT}$	Eficiência da BT na descarga
$\eta_{d,c}$	Eficiência do SC na descarga e recarga
$\rho_{BT,SC}$	Coeficiente de potência específica da BT e do SC
$\rho_{BTmax,SCmax}$	Coeficiente de máxima potência específica da BT e do SC

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Benefícios da Propulsão Elétrica .....	1
1.2	Componentes de um VE.....	2
1.3	Configurações de Veículos Elétricos e Elétrico Híbridos.....	3
1.4	Escopo da Tese.....	4
2	Estudo da Arte e da Técnica .....	7
2.1	Fontes de energia para veículos elétricos.....	7
2.2	Bateria .....	7
2.2.1	Bateria Chumbo Ácida.....	7
2.2.2	Bateria de Níquel e Cádmio.....	8
2.2.3	Bateria Íon de Lítio .....	8
2.2.4	Critérios de Desempenho das Baterias.....	8
2.3	Supercapacitor .....	10
2.3.1	Critérios de Desempenho dos Supercapacitores .....	11
2.4	Combinação das Fontes de Energia.....	12
2.5	Gerenciamento e Dimensionamento de Fontes para VEs.....	14
2.5.1	Estratégias de Gerenciamento de Potência.....	15
2.5.2	Metodologias de Dimensionamento de Fontes .....	15
3	Modelagem Veicular e das Fontes da ESS.....	19
3.1	Configuração energética dos VEs.....	19
3.2	Modelagem da Dinâmica Veicular .....	20
3.3	Modelagem das Baterias .....	21
3.3.1	Dados das Baterias .....	23
3.4	Modelagem dos Supercapacitores.....	23
3.4.1	Dados dos Supercapacitores.....	24
4	Dimensionamento da ESS .....	27

4.1	Gráfico de Ragone da ESS.....	27
4.2	Ciclo de Velocidade para o Dimensionamento.....	28
4.3	Metodologia de Dimensionamento da ESS.....	29
4.4	Dimensionamento da ESS com BTs ou com SCs.....	30
4.5	Dimensionamento da ESS com BTs e SCs .....	33
4.6	Considerações Finais .....	35
5	Dimensionamento Ótimo da ESS.....	37
5.1	Ciclos de Velocidade para o Dimensionamento.....	37
5.2	Envelope dos Perfis de Potência .....	38
5.3	Metodologia de Dimensionamento Ótimo da ESS .....	41
5.3.1	Dimensionamento da ESS do Veículo V1 .....	44
5.3.2	Dimensionamento da ESS do Veículo V2.....	47
	SEPA .....	49
5.3.3	Dimensionamento da ESS do Veículo V3.....	49
5.4	EGP Fundamentada em Regras.....	50
5.4.1	EGP Fundamentada em Regras para o Veículo V1 .....	52
5.4.2	EGP Fundamentada em Regras para o Veículo V2.....	57
5.4.3	EGP Fundamentada em Regras para o Veículo V3.....	62
5.5	EGP Fundamentada em Otimização não Linear .....	64
5.5.1	EGP Ótima para o Veículo V1 .....	65
5.5.2	EGP Ótima para o Veículo V2 .....	68
5.5.3	EGP Ótima para o Veículo V3 .....	69
6	Conclusões .....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
	Anexos.....	83
	Anexo A: Artigo do congresso CBA .....	85
	Anexo B: Artigo do congresso IECON.....	95
	Anexo C: Artigo do PhD School .....	103



Anexo D: Artigo submetido à revista IEEE .....	115
Anexo E: Rotina de dimensionamento ótimo .....	125
Anexo F: EGP em regras .....	133
Anexo G: Rotina da EGP ótima .....	141
Anexo H: Rotina da curva de Ragone do SC de 58 F .....	149



# Capítulo 1

## Introdução

Nas últimas décadas, no mundo inteiro, tem-se discutido o impacto da ação do homem sobre o meio ambiente e o que fazer para reverter ou estabilizar esse quadro. Uma das formas de atuação do homem contra o meio ambiente é através da emissão de poluentes pela utilização de motores à combustão interna (MCI) em, por exemplo, carros particulares, ônibus de transporte urbano ou rodoviário, caminhões, etc. No Brasil, a frota veicular é responsável por 40 % das emissões de CO<sub>2</sub> (Silva, et al., 2003). Essas emissões contribuem, entre outros fatores, para a poluição do ar e o efeito estufa, prejudicando a qualidade de vida da população.

### 1.1 Benefícios da Propulsão Elétrica

A questão ambiental, por si só, é suficiente para justificar o desenvolvimento de veículos de transporte urbano sustentáveis, eficientes e limpos. Os automóveis permitem um mundo com liberdade, mobilidade e prosperidade, o que leva à conclusão de que o petróleo é o problema e não os carros. A dependência do petróleo como única fonte de energia para veículos tem fortes implicações políticas e econômicas, e pode-se dizer que haverá uma crise intensa com a diminuição das reservas de petróleo do mundo. O número de automóveis do planeta dobrou para quase um bilhão ou mais nos últimos dez anos, contribuindo para o problema pertinente à poluição (Carson & Vaitheeswaran, 2008).

Os veículos puramente elétricos (VE) podem ser considerados uma solução direta para o problema referente à eliminação da poluição de origem veicular. Embora esses veículos apresentem independência de derivados do petróleo como combustível, o fornecimento de energia para os VEs apresenta, necessariamente, impacto ambiental. Esses veículos também agregam características atribuídas aos veículos automotores, tais como desempenho veicular, segurança e confiabilidade.

Os VEs começaram a serem adotados para uso público no final do século XIX, antes mesmo da introdução dos veículos convencionais automotores à gasolina. No ano 1900, 4200

automóveis foram vendidos, dos quais 40 % eram a vapor, 38 % elétricos e 22 % à gasolina. No entanto, com a invenção do motor de partida, melhorias na tecnologia de produção em massa de veículos à gasolina, somadas à inconveniência da recarga das baterias de chumbo, levaram ao quase desaparecimento do veículo elétrico (Westbrook, 2001; Husain, 2005).

Devido ao apelo ambiental e à grande dependência do petróleo, o interesse por VEs ressurgiu na década de 60, impulsionando a demanda no investimento em pesquisa e desenvolvimento desses veículos. O interesse econômico e a pesquisa em VEs cresceram na década de 90, com os grandes fabricantes de automóveis desenvolvendo planos para a introdução de seus próprios VEs e/ou veículos elétricos híbridos (VEH) no mercado. Esta tendência é evidente nos dias de hoje, com os VEs operando com emissão zero (*zero emission vehicles* – ZEV) e VEHs como veículos de baixa emissão (Westbrook, 2001).

## 1.2 Componentes de um VE

Os principais componentes de um veículo elétrico são o motor elétrico (ME) de tração, controladores, fontes de energia e sistema de transmissão. A estrutura detalhada de um VE e a interação entre suas várias componentes são ilustradas na Figura 1.1 (Husain, 2005).

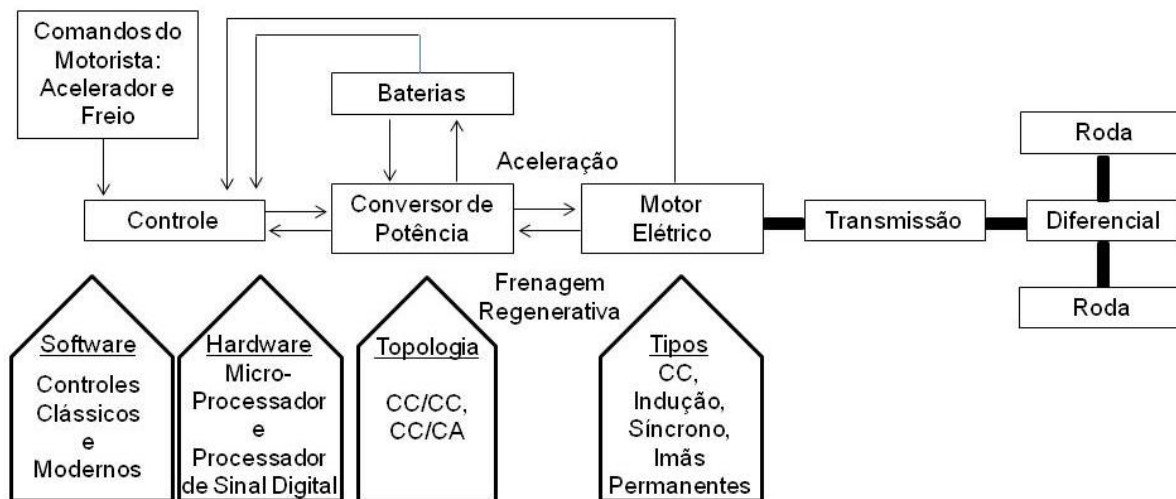


Figura 1.1 - Principais escolhas e componentes elétricos para um VE.

A Figura 1.1 também descreve algumas das escolhas disponíveis para cada um dos componentes. As baterias (BT) são a fonte de energia tradicional em VEs. O problema referente ao alcance limitado das baterias impulsionou a busca por fontes de energia com maior

densidade de energia, tais como a célula a combustível (CaC) e unidades de geração de energia formadas por um MCI acoplado a um gerador. Estas fontes asseguram a autonomia ao veículo.

### **1.3 Configurações de Veículos Elétricos e Elétrico Híbridos**

Qualquer veículo que tenha mais de uma fonte de energia para propulsão pode ser classificado como um veículo elétrico híbrido (Chau & Wong, 2002). A classificação híbrida também inclui veículos nos quais a bateria principal é auxiliada nos picos de potência pela energia armazenada em um volante de inércia ou em um acumulador hidráulico. Entretanto, o termo híbrido é mais frequentemente utilizado para veículos que apresentem bateria junto a uma unidade de geração MCI/gerador ou tração por MCI.

Veículos que apresentem em sua configuração dois diferentes tipos de baterias, ou uma CaC e uma bateria, ou uma bateria e um supercapacitor (SC), ou mesmo uma combinação dessas três fontes, são chamados de veículos híbridos puramente elétricos (Westbrook, 2001). Estes podem ser classificados como ZEVs, uma vez que a energia de propulsão é totalmente armazenada ou gerada eletricamente, e a potência utilizada é totalmente gerenciada e combinada por meios eletro/eletrônicos.

A configuração adotada para o sistema de propulsão dos veículos aqui estudados é a série, na qual a propulsão é apenas por motor elétrico. Detalhes desta configuração são apresentados na seção 2.4. Os veículos elétricos estudados nesta Tese são híbridos, pois apresentam fontes de energia de natureza distintas: BTs, SCs e fonte de autonomia. Apesar de o sistema energético ser híbrido, a abreviação VE é adotada.

Nesta Tese são propostas e discutidas metodologias empregadas no dimensionamento das fontes de energia de VEs. As metodologias visam a menor massa, com número de módulos inteiros, das fontes de energia dos VEs. Essas metodologias são empregadas no dimensionamento das fontes – BTs e/ou SCs – que constituem o sistema de armazenamento de energia (ESS – *Energy-Storage System*) dos veículos. Neste contexto são propostas duas diferentes metodologias para o dimensionamento da ESS. As duas metodologias são aplicadas a períodos com alto valor de potência requerida obedecendo às limitações físicas de tensão para SCs e de estado de carga (SoC) para baterias.

A primeira metodologia utiliza os coeficientes de potência e energia específicas das fontes obtidos a partir de suas curvas de Ragone. A segunda metodologia de dimensionamento destaca-se pela utilização de Otimização não Linear na solução do problema cuja função objetivo é a menor massa da ESS. Entre as restrições do problema estão os limites operacionais das BTs e dos SCs. O aspecto inovador desta metodologia está na utilização de otimização na solução do problema referente ao dimensionamento da ESS aplicado ao envelope dos perfis de potência dos ciclos de condução. O envelope é resultante da sobreposição dos perfis de potência relativos aos ciclos de condução de operação dos veículos. O objetivo em utilizar o envelope dos perfis de potência está na abrangência de situações diversas de operação, em eventuais ciclos de condução, nos quais o veículo possa ser conduzido além dos ciclos já considerados no dimensionamento. A metodologia é aplicada a determinados períodos do envelope com alto valor de potência requerida. A ESS é então dimensionada para fornecer a potência requerida dos períodos sem a atuação da fonte de autonomia.

Também são propostas duas estratégias de gerenciamento de potência entre a ESS e a fonte de autonomia. As EGPs são aplicadas às configurações de ESSs obtidas pelo emprego da metodologia de dimensionamento ótima. A primeira EGP é fundamentada em regras nas quais as quantidades limitantes são a potência máxima que a BT pode fornecer, a potência requerida do veículo, e a tensão terminal do SC. A segunda EGP é fundamentada em Otimização não Linear cujo objetivo é minimizar a atuação da fonte de autonomia reduzindo-se assim o consumo de combustível ( $H_2$  para uma CaC ou combustível para uma unidade gerador/MCI). Os limites operacionais das BTs e dos SCs são também restrições do problema. Uma vantagem desta EGP é a alocação ótima da potência requerida da BT, do SC e da fonte de autonomia, pois essas potências são variáveis do problema de otimização. Essa característica permite uma qualidade superior nos resultados do gerenciamento, em relação à EGP fundamentada em regras, uma vez que os limites operacionais das BTs e dos SCs não são extrapolados.

#### **1.4 Escopo da Tese**

O trabalho está dividido da seguinte forma: a descrição dos tipos e critérios de desempenho das BTs e do SC adotados, assim como a justificativa para o uso conjunto destas fontes, são apresentadas no Capítulo 2. Ainda neste Capítulo são apresentadas estratégias de

gerenciamento de potência e metodologias de dimensionamento das fontes da ESS encontradas na literatura.

A modelagem e as características físicas da dinâmica veicular, das BTs e dos SCs, necessárias para as metodologias de dimensionamento da ESS, são apresentadas no Capítulo 3. As metodologias de dimensionamento da ESS são analisadas nos Capítulos 4 e 5. As conclusões da Tese são apresentadas no Capítulo 6.

Durante a realização do curso de Doutorado foram apresentados e publicados três trabalhos em congressos (Lopes, et al., 2010), (Lopes, et al., 2011) e (Lopes, et al., 2012). Estes trabalhos encontram-se em formato integral nos Anexos de A, B e C, respectivamente. O artigo (Lopes, et al., 2012) foi submetido ao *IEEE Transactions on Vehicular Technology*; uma cópia do artigo encontra-se no Anexo D.

(Lopes, et al., 2010) foi aceito para apresentação oral no XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2010, 2010). Este artigo apresenta duas diferentes técnicas de gerenciamento de potência para um ônibus de transporte urbano elétrico híbrido. As fontes de energia do ônibus são uma unidade MCI/gerador – fonte de autonomia – e um banco de baterias chumbo ácidas, que é responsável pelo suprimento dos picos de potência requerida. A estratégia de gerenciamento de potência da seção 5.5 foi elaborada com base na EGP ótima estudada neste artigo. Os resultados deste estudo, estendido para a topologia veicular empregada nesta Tese, também serão submetidos a uma revista.

(Lopes, et al., 2011) foi aceito para apresentação oral no IECON 2011: 37th *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (RMIT University, 2011). O veículo em estudo neste artigo é puramente elétrico e do tipo SUV (*Sport Utility Vehicle*). As fontes de energia são a fonte de autonomia – responsável pelo suprimento da potência média requerida pelo sistema de tração – e a ESS, constituída por BTs chumbo ácidas e SCs de 58 F. O artigo propõe metodologias de dimensionamento da ESS para a máxima potência requerida durante o tempo de aceleração do veículo. Numa primeira etapa, é proposta uma metodologia fundamentada na teoria de Ragone, (Schupbach, et al., 2003). Em seguida, utiliza-se uma técnica de Otimização não Linear para a minimização da massa da ESS constituída por BTs e SCs. Este artigo fixou as bases para a elaboração das metodologias de dimensionamento descritas no Capítulo 4 e na seção 0.

(Lopes, et al., 2012) foi aceito para apresentação oral e de pôster no 13th *Edition of the European PhD School: Power Electronics for Electrical Machine and Energy Control* (PhD School, 2012). Este artigo apresenta um estudo de caso envolvendo as metodologias de dimensionamento ótimo e EGP, fundamentada em regras, propostas nas seções 0 e 5.4, respectivamente. A estratégia, formulada na seção 5.2, de dimensionar a ESS para períodos de alta demanda de potência resultantes da sobreposição – envelope – de perfis de potência resultantes de diferentes ciclos de velocidade também é utilizada neste artigo. O veículo elétrico, assim como suas fontes de energia, são os mesmos do artigo (Lopes, et al., 2011).

(Lopes, et al., 2012) retoma os dois estudos anteriores e foi submetido para a revista *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Neste artigo, o veículo elétrico é o mesmo do (Lopes, et al., 2011). São estudadas duas diferentes configurações de ESSs com o mesmo tipo de bateria, porém com diferentes tipos de supercapacitores. A bateria é do tipo íon de lítio. Uma ESS tem SCs de 58 F e a outra ESS tem SCs de 165 F. Todo o estudo desenvolvido no Capítulo 5 é aplicado ao dimensionamento e posterior gerenciamento de potência entre a ESS e a fonte de autonomia.



# Capítulo 2

## Estudo da Arte e da Técnica

### 2.1 Fontes de energia para veículos elétricos

Existem várias tecnologias que permitem armazenar ou gerar energia em VEs e em VEHs. Algumas dessas tecnologias, como as BTs, não são capazes de armazenar ou gerar energia suficiente para que um veículo percorra longas distâncias. Outras fontes, como o supercapacitor, apresentam potencial para uso como parte do sistema de armazenagem de energia auxiliando o VE na aceleração e/ou para armazenando energia regenerada na frenagem (Ferreira, 2007).

As fontes de energia da ESS consideradas nos estudos de caso desta Tese são baterias e supercapacitores. Os principais tipos, princípios de funcionamento e aspectos fundamentais de operação dessas fontes são descritos nas próximas seções.

### 2.2 Bateria

Os tipos de baterias usados nos estudos de caso desta Tese são a chumbo ácida, a níquel e cádmio (NiCd) e a íon de lítio. Nas subseções 2.2.1 a 2.2.3 são apresentadas as características, e na subseção 2.2.4, os critérios de desempenho considerados nas modelagens das baterias de interesse.

#### 2.2.1 Bateria Chumbo Ácida

As baterias chumbo ácidas são conhecidas por sua ampla utilização em veículos convencionais com MCIs. No entanto, para aplicação em VEs é necessário que essas BTs sejam mais robustas, resistentes a descargas profundas e usem gel no lugar de eletrólito líquido. A produção de BTs chumbo ácidas com essas características apresenta custo superior ao das chumbo ácidas convencionais (Larminie & Lowry, 2003).

Essas baterias são bem estabelecidas comercialmente, e são as recarregáveis mais baratas por kWh de carga. No entanto, apresentam baixa energia específica, e por esse motivo, não são indicadas para VEs que operem por longas distâncias. Também apresentam uma grande variedade de potência específica quando comparadas aos outros tipos de BTs. A sua utilização é aconselhável em VEHS, pois embora somente uma quantidade limitada de energia seja armazenada, a energia é liberada e absorvida rapidamente. Essas baterias apresentam energia específica de 20 a 35 Wh/kg, potência específica em torno de 250 W/kg, e número de ciclos de vida acima de 800 para 80 % de capacidade (Westbrook, 2001; Larminie & Lowry, 2003).

### **2.2.2 Bateria de Níquel e Cádmio**

Esta bateria foi considerada uma das principais concorrentes da chumbo ácida, pois apresenta energia específica quase duas vezes maior. A BT NiCd tem a vantagem de apresentar alta potência específica, longo ciclo de vida, uma grande variedade de temperaturas de operação (-40 °C a +80 °C), baixa autodescarga e boa capacidade de armazenagem de energia. Bastante robustas mecânica e eletricamente, essas BTs podem ser recarregadas no período de uma hora. Uma desvantagem da BT NiCd é a tensão de operação de cada célula, 1,2 V. Assim, dez células são necessárias para uma tensão nominal de 12 V. Esta característica explica parcialmente o alto custo associado a este tipo de bateria. Outro problema está na utilização do cádmio, elemento de elevado custo e ambientalmente nocivo (Westbrook, 2001).

### **2.2.3 Bateria Íon de Lítio**

Baterias de lítio recarregáveis começaram a ser comercializadas na década de 80. Apresentam considerável aumento na energia específica em relação a outras baterias recarregáveis. Entre as características que tornam essas BTs atraentes para aplicação automotiva estão: menor peso, potencial flexibilidade para empacotamento e produção de baixo custo em relação a outras baterias. Sua energia específica é quase três vezes maior que a chumbo ácida, podendo fornecer energia suficiente a um VE para que este tenha razoável alcance (Larminie & Lowry, 2003).

### **2.2.4 Critérios de Desempenho das Baterias**

Do ponto de vista de fabricantes de VEs, a bateria pode ser tratada como uma 'caixa preta' com uma grande variedade de critérios de desempenho (Larminie & Lowry, 2003). Estes critérios envolvem energia específica, densidade de energia, potência específica, tensões

típicas, capacidade Ampère-hora, disponibilidade comercial, custo, taxas de recarga e autodescarga, e número de ciclos de vida (Larminie & Lowry, 2003; Ehsani, et al., 2005). A seguir são listados e descritos os critérios de desempenho de interesse para a modelagem das BTs.

- **Capacidade Ampère-hora:** a capacidade de BTs usadas em VEs é frequentemente representada pela letra 'C' (Ehsani, et al., 2005; Lopes, 2008). Uma bateria com capacidade de 10 Ampère-hora pode fornecer 1 Ampère por 10 horas ou 2 Ampère por 5 horas ou, em tese, 10 Ampère por uma hora. No entanto, na prática, este comportamento não é observado na maioria das baterias. Uma bateria capaz de fornecer 1 Ampère por 10 horas, caso lhe seja exigida corrente de 10 Ampères, irá operar por menos de uma hora. Se a corrente for drenada de forma lenta, a capacidade da bateria aumenta; caso contrário, a capacidade cai consideravelmente. Este comportamento deve-se às reações químicas que ocorrem dentro das células; esse efeito é mais notável em baterias chumbo ácidas. Por esse motivo é importante predizer o efeito da corrente sobre a capacidade. Para isto, utiliza-se o modelo de Peukert para o comportamento da bateria (Larminie & Lowry, 2003).

Esse modelo parte do pressuposto de que existe uma capacidade, chamada Capacidade de Peukert, calculada pela expressão

$$C_p = I_{BT}^k \cdot t, \quad (2.1)$$

na qual  $C_p$  é a capacidade de Peukert,  $k$  é o coeficiente de Peukert,  $I_{BT}$  é a corrente requerida da BT, e  $t$  é o tempo.

Para um valor de  $k$  constante e igual a 1,2 para baterias chumbo ácidas a Capacidade de Peukert é calculada como no seguinte exemplo (Larminie & Lowry, 2003): uma bateria com capacidade nominal de 76 Ah para uma taxa de descarga de 5 h tem capacidade de 76 Ah se descarregada a uma corrente de

$$I_{BT} = 76/5 \cong 15 \text{ A}. \quad (2.2)$$

Se o coeficiente de Peukert é 1,2, então a Capacidade de Peukert é:

$$C_p = 15^{1,2} \cdot 5 = 128,9 \text{ Ah}. \quad (2.3)$$

Conhecida a Capacidade de Peukert, é possível obter o tempo de descarga da bateria, caso lhe seja solicitada uma corrente  $I$  qualquer. No exemplo, o tempo de descarga é dado por

$$t = C_p / I_{BT}^k. \quad (2.4)$$

Seja  $\delta t$  o intervalo de tempo em segundos entre cálculos consecutivos. Para uma solicitação de corrente constante, a carga efetiva removida da bateria será igual ao produto  $\delta t \cdot I_{BT}^k$ . No entanto, para que a carga seja convertida em Ah, torna-se necessário dividir  $\delta t$  por 3600. Seja  $CR_n$  a carga total removida de uma bateria no  $n$ -ésimo passo de simulação. Então obtém-se

$$CR_{n+1} = CR_n + (\delta t \cdot I_{BT}^k) / 3600 \text{ Ah}, \quad (2.5)$$

na qual CR é a carga removida da bateria.

É importante estabelecer que esta é a carga removida das placas da bateria, e não a carga total fornecida pela bateria ao veículo, que é dada por

$$CS_{n+1} = CS_n + (\delta t \cdot I_{BT}) / 3600 \text{ Ah}, \quad (2.6)$$

na qual CS é a carga fornecida pela bateria.

- **Profundidade de Descarga:** denotada por DoD (*Depth of Discharge*), é dada pela razão entre a carga removida e a capacidade original. Assim, no  $n$ -ésimo passo de simulação tem-se

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p}. \quad (2.7)$$

- **Estado de Carga:** denotado por SoC, é definido como a diferença entre a máxima carga possível da bateria (100%) e a quantidade de descarga imposta (Larminie & Lowry, 2003):

$$SoC_n = 1 - DoD_n. \quad (2.8)$$

Com esta definição, uma bateria totalmente carregada apresenta SoC igual a 100 %, e totalmente descarregada, SoC igual a 0 %. Uma dificuldade com este parâmetro é a medida da quantidade atual de carga (difícil de ser obtida). A capacidade de dispersão devido às variações presentes na fabricação das baterias também dificulta a determinação da quantidade total de carga disponível, mesmo para uma célula nova.

## 2.3 Supercapacitor

A tecnologia de capacitores de dupla camada apresenta-se como a melhor aproximação para o modelo de um SC (Ehsani, et al., 2005). Por este motivo, os aspectos fundamentais de operação analisados a partir deste ponto são referentes a este tipo de SCs (Belhachemi, et al.,

2000; Ferreira & Pomilio, 2005). Os critérios de desempenho destes SCs, como eficiência e energia armazenada, são apresentados e discutidos abaixo.

### 2.3.1 Critérios de Desempenho dos Supercapacitores

Geralmente estes dispositivos têm energia específica de 1 a 10 Wh/kg e alta potência específica, de 1 a 5 kW/kg, (Westbrook, 2001). A taxa de descarga pode ser rápida, variando de 0,3 a 30 segundos. O circuito equivalente do SC é mostrado na Figura 2.1.

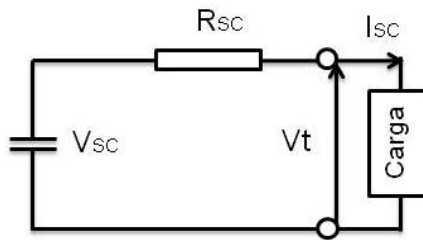


Figura 2.1 - Modelo de circuito elétrico para os SCs, no qual  $R_{SC}$  é a resistência interna,  $V_{SC}$  a tensão no capacitor,  $I_{SC}$  a corrente e  $V_t$  a tensão nos terminais do SC.

A eficiência no processo de descarga dos SCs também é bastante alta e pode ser calculada por

$$\eta_d = \frac{V_t}{V_{SC}}, \quad (2.9)$$

e no processo de recarga, por

$$\eta_c = \frac{V_{SC}}{V_t}, \quad (2.10)$$

expressões nas quais  $V_t$  é a tensão terminal do SC e  $V_{SC}$  é a tensão no capacitor (Ehsani, et al., 2005). A eficiência decresce a altas taxas de corrente e baixa tensão na célula. Dessa forma, a operação do SC deve ser preferencialmente mantida em regiões de altas tensões na célula.

A energia armazenada em um SC ( $E_{SC}$ ) pode ser obtida a partir da energia necessária para carregá-lo até certo nível, pela expressão

$$E_{SC} = \int_0^t V_{SC} I_{SC} dt = \int_0^v C V_{SC} dV_{SC} = \frac{1}{2} C V_{SC}^2, \quad (2.11)$$

na qual  $C$  é a capacitância do SC.

Sob tensão nominal, a energia armazenada no SC alcança seu valor máximo. A expressão (2.11) indica que um aumento nesta tensão pode aumentar significativamente a energia armazenada. Em aplicações reais é impossível utilizar completamente a energia armazenada devido à baixa potência em baixo estado de carga. Deve-se definir uma tensão limite mínima  $V_{t_{min}}$ , abaixo da qual o SC não libera energia. Conseqüentemente, a energia disponível para uso é menor que seu valor total, e pode ser expressa por (Ehsani, et al., 2005).

$$E_{SC} = \frac{1}{2}C(V_{t_{max}}^2 - V_{t_{min}}^2), \quad (2.12)$$

na qual  $V_{t_{max}}$  é a tensão nominal ou tensão máxima do SC.

## 2.4 Combinação das Fontes de Energia

A integração e a gestão de fontes de energia com características distintas são responsáveis pelo aumento significativo de eficiência no uso de energia gerada quando empregadas em sistemas de propulsão de veículos elétricos.

Aspectos como custos de aquisição e de manutenção, ciclo de vida, grau de compactação, confiabilidade e autonomia desempenham um papel importante na escolha de uma determinada tecnologia de fonte de energia para uma dada aplicação (EPRIPAC Corporation, 2000). Porém, essa escolha é frequentemente realizada pelo gráfico de Ragone das fontes, em referência a David Ragone (Conway, 1999). O gráfico de Ragone fornece a energia disponível em uma fonte de energia para uma dada potência requerida constante e é considerado uma ferramenta de comparação – em termos de potência e energia disponível – entre diferentes tecnologias de fontes de energia como mostrado na Figura 2.2. Um exemplo de comparação pode ser feito entre baterias e capacitores comuns. Enquanto baterias tem alta energia específica (em torno de 30 Wh/kg), mas baixa potência específica (abaixo de 100 W/kg), capacitores tem alta potência específica (em torno de  $10^6$  W/kg), porém com baixa energia específica (em torno de  $10^{-1}$  Wh/kg). Devido a estas características, cada tipo de fonte de energia é localizado em diferentes regiões do plano potência-energia da Figura 2.2 (Christen & Carlen, 2000).

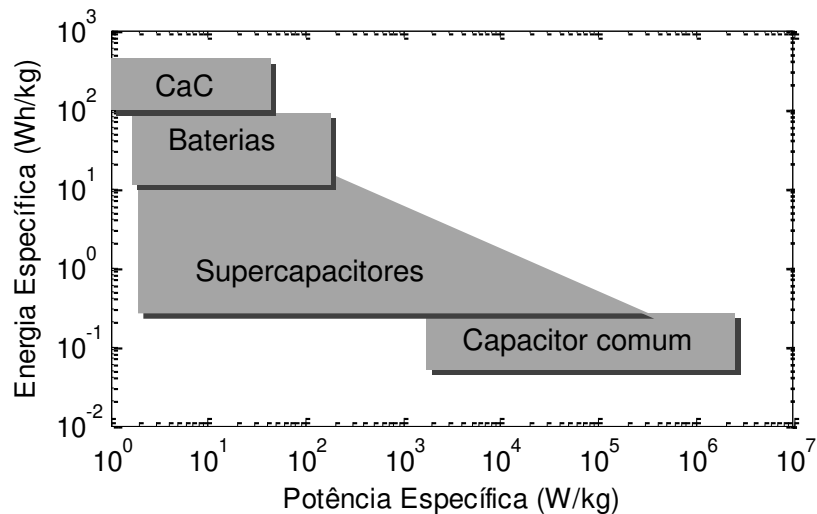


Figura 2.2 - Diagrama de Ragone para as diferentes fontes de energia caracterizadas em termos de energia e potência específicas.

A partir da Figura 2.2 pode-se observar os limites em potência e energia de cada tipo de fonte. Nem sempre esses limites vêm de encontro com a potência ou energia requerida em uma determinada aplicação. Uma solução para esse problema pode ser pensada na forma de um sistema híbrido de fontes de energia. Abaixo são citadas situações nas quais o emprego de uma tecnologia de fonte de energia é mais adequado que o emprego de outra.

- **CaC e demanda de potência média:** é a fonte mais adequada para o suprimento da demanda média de energia solicitada pelo sistema de tração elétrica, pois apresenta pequena eficiência em situações de baixa demanda de carga, lenta transferência de energia em situações transitórias e elevado custo por Watt (Ehsani, et al., 2005).

- **BT e elevadas demandas de potência:** a potência requerida do sistema de tração elétrica em baixas velocidades e acima do valor médio pode ser solicitada das baterias, pois possuem capacidade de energia suficiente para tais situações de operação do veículo (Waltermann, 1998). Neste caso, a bateria pode fornecer as altas correntes requeridas em acionamentos e pode também servir como um dispositivo de nivelamento de carga. Porém, sob bruscas variações de corrente, as baterias sofrem com perdas de potência e tem sua vida útil reduzida.

- **SC e variações bruscas de demanda de potência:** face às características e aos limites operacionais das CaCs e das baterias citados acima, pode-se pensar em uma solução mais completa na forma de um banco supercapacitor. O SC pode atuar durante o lento processo

eletroquímico de conversão de energia química da CaC e da BT em energia elétrica, além de melhorar a resposta do sistema híbrido de fontes de energia durante distúrbios transitórios de carga. Os SCs apresentam duas importantes características: a alta potência específica, que os tornam capazes de estocar altas taxas de carga, e a baixa energia específica – que os impossibilitam de atuarem sozinhos no fornecimento de energia em trajetos mais extensos.

- **Sistema de fontes híbrido:** BTs e CaCs são fontes com alta energia específica; SCs são fontes com alta potência específica. A dificuldade em obter simultaneamente essas duas características leva à conclusão de que o sistema de armazenamento de energia para VEs deve ser híbrido, com diferentes fontes de energia. Nesta Tese, a energia específica e a potência específica (das BTs e dos SCs) são consideradas nas metodologias de dimensionamento da ESS.

O emprego de um sistema híbrido de fontes de energia não compromete a durabilidade das baterias, pois altas correntes de descarga ou recarga são evitadas. Assim, a energia disponível, durabilidade e tempo de vida das BTs podem ser significativamente aumentados, (Lopes, 2008).

As características citadas acima apontam os benefícios da utilização de ESSs híbridas, adotadas nos estudos de casos da presente Tese.

## **2.5 Gerenciamento e Dimensionamento de Fontes para VEs**

Para a operação do sistema híbrido de fontes, é necessário o emprego de uma estratégia de gerenciamento de potência que determine o montante de energia que cada fonte deve fornecer dentro de seus limites aceitáveis de operação, como eficiência, corrente máxima e mínima, estado de carga, etc. No entanto, um sistema de fontes híbrido pode apresentar custo e complexidade elevados, caso não seja devidamente controlado pela EGP. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento das fontes de energia que, aliado à EGP, seja capaz de minimizar o custo e o tamanho das fontes, resultando em uma boa relação custo-benefício. Na subseção 2.5.1 são citados alguns tipos de EGPs, na subseção 2.5.2 são citadas metodologias de dimensionamento para as fontes de energia do VE encontradas na literatura.



### **2.5.1 Estratégias de Gerenciamento de Potência**

O projeto de uma EGP efetiva é a chave para um VE eficiente. Independentemente da configuração do veículo, o objetivo primário de qualquer EGP é atender a potência requerida para a propulsão do veículo através do gerenciamento do fluxo de potência entre todas as fontes de energia, (Lopes, 2008).

Na literatura são propostas diferentes EGPs, classificadas, de acordo com as metodologias empregadas, em três grupos (Lin, et al., 2001): otimização por programação dinâmica, (Lin, et al., 2003; Perez, et al., 2006); utilização de métodos por otimização estática (Pisu, et al., 2005; Musardo, et al., 2005); técnicas de controle inteligente, como o fundamentado em regras e sistemas fuzzy (Schouten, et al., 2002; Koo, et al., 1998; Cerruto, et al., 1994; Lopes, 2008).

Nesta Tese, as EGPs empregadas no gerenciamento da ESS e da fonte de autonomia são as fundamentadas em Regras (seção 5.4) e em uma técnica de Otimização não Linear (seção 5.5). A EGP fundamentada em Regras é do tipo “Se-Então”. A EGP fundamentada em Otimização não Linear visa maximizar a eficiência energética da fonte de autonomia. O emprego desta EGP baseia-se na minimização de uma função objetivo sujeita a restrições. As restrições são impostas pelas características dinâmicas das fontes da ESS, e pela potência requerida pelo sistema de tração.

### **2.5.2 Metodologias de Dimensionamento de Fontes**

Diferentes metodologias para o dimensionamento de fontes de energia de VEs são encontradas na literatura. Os enfoques variam de acordo com os critérios adotados, como a determinação da demanda de energia de cada fonte, minimização do consumo de combustível da CaC, peso das fontes, custos de aquisição e de manutenção, grau de compactação, confiabilidade, autonomia de percurso e desempenho dinâmico. Cada critério usado no dimensionamento das fontes pode ser exclusivo ou estar vinculado a outro(s) critério(s). A seguir é apresentada uma revisão da literatura sobre metodologias para o dimensionamento de fontes de energia em VEs.

(Schupbach, et al., 2003) propõem uma metodologia que minimize o tamanho e o custo da CaC, da BT e do SC para, então, implementar uma EGP que apresente boa relação custo-benefício. O gerenciamento de potência assume que a fonte principal, a CaC, fornece a potência média ou potência de estado estacionário, enquanto a ESS fornece a potência de pico

ou potência transitória. Os autores sugerem uma metodologia de comparação para determinar qual fonte, BT, SC ou uma combinação de ambas, é a mais indicada para uma dada aplicação particular. As fontes BT e SC são caracterizadas e comparadas como elementos de armazenamento de energia de curta duração (de segundos a poucos minutos). Essa caracterização é feita pela aplicação de procedimentos de manuais de testes em modelos de BTs (de acordo com o manual *Partnership for Next-Generation Vehicles* - PNGV) e SCs (de acordo com o manual da *United States Council for Automotive Research* - USCAR e *Department of Energy* - DoE), a fim de estimar a potência e energia destas fontes. Os resultados são expressos na forma de um gráfico de Ragone. A partir da utilização dos coeficientes de potência e energia específicas das fontes, os autores propõem uma metodologia de dimensionamento para uma ESS híbrida que utiliza o gráfico de Ragone das fontes. Em seguida, os autores propõem uma segunda solução para o dimensionamento utilizando uma técnica de Otimização não Linear, resultando em uma ESS com peso reduzido.

(Schupbach & Balda, 2003) estendem o estudo desenvolvido no artigo analisado acima, combinando uma EGP aprimorada à técnica de otimização apresentada em (Schupbach, et al., 2003) para redimensionar a ESS. Com isto, os autores obtêm um dimensionamento reduzido da ESS em relação ao artigo anterior. Os autores concluem que uma EGP bem projetada por meio de otimização ajuda a obter redução no peso e no volume das fontes. A EGP prioriza o uso das BTs caso a potência solicitada possa ser fornecida dentro de sua área de operação de maior eficiência. Além disso, a EGP deve manter o estado de carga do SC dentro de um limite aceitável de operação. O SC tem a função de fornecer energia para a BT a fim de que esta sempre opere em região de alta eficiência, tanto nos processos de carga como de descarga. Em linhas gerais, a EGP considera: (i) o estado da fonte de autonomia (ligada ou desligada), (ii) o estado de carga atual do SC, a potência máxima permitida e a potência de máxima eficiência, e (iii) a potência máxima e a potência de máxima eficiência da BT.

(Ferreira, 2007) propõe uma metodologia para dimensionar a CaC e uma ESS composta por BTs e SCs, em função da demanda de potência do sistema de tração do ZEV. As restrições de operação das fontes de energia e as limitações nos processos de condicionamento da energia gerada pela CaC e acumulada pela BT e pelo SC são respeitadas. As três fontes de energia são interconectadas ao mecanismo de tração elétrica por um conversor eletrônico com múltiplas entradas (*Multiple Input Power Electronic Converter* - MIPEC). Uma EGP gerencia as fontes a partir do controle do MIPEC. A fonte principal de energia (CaC) é dimensionada para fornecer 25 % da demanda máxima de potência do ciclo de condução. A BT é dimensionada para

complementar a potência gerada pela CaC e para atender a demanda de potência requerida, mantendo o estado de carga do SC em seu valor médio, de modo que a potência média desta fonte seja nula. O SC tem a função de proteger a BT e a CaC, amortecendo demandas de potência caracterizadas por variações bruscas de corrente. Assim, a potência do SC complementa a potência fornecida pela CaC e pela BT em relação à potência requerida do veículo. Na prática, este objetivo é alcançado utilizando o SC para manter constante a tensão de saída do MIPEC.

(Paladini, et al., 2007) investiga a identificação da melhor configuração de VE e EGP a fim de reduzir o consumo de combustível da CaC. A EGP é projetada por meio de um algoritmo genético multiobjetivo. O algoritmo de otimização é empregado em diferentes ciclos de condução do veículo, resultando na identificação de vários dimensionamentos otimizados das fontes de energia. A CaC é usada no fornecimento de energia do sistema de tração e na recarga da BT, e/ou do SC quando em baixo estado de carga. A BT e o SC também são recarregados pela frenagem regenerativa. A demanda de potência do sistema de tração é satisfeita na seguinte ordem: (i) CaC, (ii) SC, (iii) BT. A CaC é a fonte principal, fornecendo no máximo potência igual à sua potência nominal. Se a potência demandada exceder a soma das potências da CaC e do SC, então a BT também é empregada. O objetivo é encontrar uma combinação de parâmetros que minimize o consumo de combustível e a diferença entre o estado de carga inicial e final da BT. Os dimensionamentos finais dependem diretamente dos ciclos de condução nos quais o veículo opera.

(Bauman & Kazerani, 2008) comparam três configurações de VEs nas quais a CaC é a fonte de energia principal e a ESS é composta por BTs, SCs, e BTs e SCs. A partir de um modelo de otimização na qual a função objetivo inclui desempenho, economia de combustível e custo do *powertrain*, os autores concluem que a ESS híbrida é a melhor. É realizado um estudo de um grande número de parâmetros, de modo que diversas dimensões de componentes viáveis sejam consideradas.

(Liu, et al., 2009) desenvolvem uma metodologia fundamentada na combinação de ciclos de condução padrões para otimizar o tamanho das fontes. O algoritmo de otimização permite obter dimensões e custo minimizados, obedecendo a restrições de operação eficientes das fontes de energia. A massa e o custo total dependem do número de células presentes na CaC e na BT. O número de células das fontes e a maneira como estas estão conectadas são as principais restrições do problema de otimização.



# Capítulo 3

## Modelagem Veicular e das Fontes da ESS

Neste Capítulo são apresentadas a topologia dos veículos e as modelagens da dinâmica veicular, das baterias e dos supercapacitores, todas empregadas no desenvolvimento das metodologias de dimensionamento da ESS nos Capítulos 4 e 5.

As metodologias de dimensionamento da ESS são empregadas em três diferentes tipos de veículos: um SUV, um micro-ônibus e um ônibus de transporte urbano. Por conveniência, o veículo SUV é chamado de V1, o micro-ônibus de V2 e o ônibus de V3. O peso dos veículos diferencia uma configuração da ESS de um veículo para o outro.

Além disso, são analisadas diferentes configurações de ESS pela modificação do tipo de BT e SC, a fim de explorar alternativas de massa e custo das mesmas.

### 3.1 Configuração energética dos VEs

A Figura 3.1 ilustra a configuração adotada para o sistema energético dos três tipos de VEs em estudo. Esta configuração é apontada como a melhor alternativa entre as analisadas por (Bauman & Kazerani, 2008). Conversores bidirecionais podem ser usados para cada ESS ou somente para a BT ou para o SC. A configuração adotada na Tese considera apenas um conversor bidirecional, usado na conexão das BTs com o barramento CC, a fim de minimizar massa, custo e perdas, como justificado por (Bauman & Kazerani, 2008). O SC é empregado no fornecimento de potência transiente e, neste caso, as perdas associadas com a operação do conversor bidirecional das BTs ocorrem com menos frequência no ciclo de condução. A tensão terminal dos SCs é controlada para permanecer entre 250 e 400 V para os veículos V1 e V2, e 250 e 440 V para o veículo V3. Na configuração da Figura 3.1, o número de SCs em série é fixo. O inversor deve ser capaz de operar com tensão variável no lado CC.

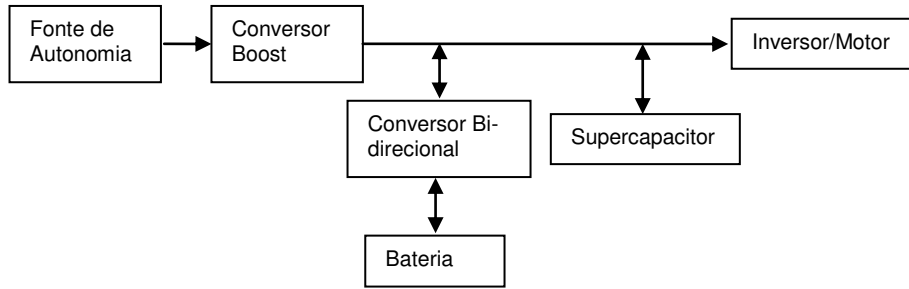


Figura 3.1 - Configuração considerada para o sistema energético dos VEs em estudo.

### 3.2 Modelagem da Dinâmica Veicular

A dinâmica veicular de interesse para os estudos de casos desenvolvidos nesta Tese é a longitudinal, que, em análises elementares, considera todas as componentes do veículo em movimento simultâneo. Neste caso, o veículo pode ser representado por um corpo rígido.

A potência requerida pelo veículo em um ciclo de condução,  $P_{req}$ , é expressa por (Gillespie, 1992)

$$P_{req} = \left( (M + M_r) \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{C_a \cdot d \cdot A \cdot V^2}{2} + f \cdot M \cdot g \right) \cdot V, \quad (3.1)$$

na qual  $M$  é a massa do veículo com carga (*gross vehicle weight*) e  $M_r$  é a massa equivalente das componentes (*driveshaft*, semi-eixos e rodas) do *drivetrain* em rotação. Assume-se  $M_r$  igual a 10 % do valor da massa do veículo sem carga (*curb weight*);  $V$  é a velocidade do veículo,  $d$  [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ] é a densidade do ar,  $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ] é a aceleração da gravidade,  $C_a$ ,  $A$  e  $f$  são definidos na Tabela 3.1 (Gillespie, 1992).

As forças de resistência atuantes no veículo são as forças de resistência do ar, segundo termo no lado direito da expressão (3.1), e de resistência ao rolamento do pneu no pavimento, terceiro termo da expressão. Assume-se que o veículo opera em pavimento plano; a força gerada pela inclinação do pavimento não é considerada.

As características físicas dos veículos de interesse estão descritas na Tabela 3.1. Os dados do veículo V1 foram obtidos de (Hyundai, 2012); os dados do chassi de V2 e V3 são encontrados em (Minas Máquinas, 2012; Via Circular, 2012); demais informações de V2 e V3 foram extraídas de (Marcopolo, 2012).

Tabela 3.1 - Características físicas dos veículos.

	V1	V2	V3
Chassi	-	LO-915	OF-1418
Marca	Hyundai	Mercedez-Benz	Mercedez-Benz
Modelo	Tucson SUV	Senior	Senior Midi
Massa do veículo com carga, M [kg]	2050	8500	14000
Massa do veículo sem carga, m [kg]	1548	5500	10000
10 % de m, $M_r$ [kg]	154,8	550	1000
Área frontal, A [m <sup>2</sup> ]	3,1659	6,6	7,5
Coeficiente de resistência ao rolamento, f	0,015	0,012	0,012
Coeficiente de arraste aerodinâmico, Ca	0,45	0,7	0,79

Para o cálculo da potência requerida em um ciclo de velocidade foram consideradas as eficiências do diferencial (90 %), do motor elétrico de tração (90 %), do inversor (95 %) e do conversor (95 %). A eficiência resultante é de 73 %, ou seja, em aceleração a expressão (3.1) deve ser dividida por 0,73, e em frenagem, multiplicada por 0,73.

### 3.3 Modelagem das Baterias

Nesta seção são apresentadas as bases para a modelagem das BTs, fundamentadas em (Larminie & Lowry, 2003; Lopes, 2008). As características que diferenciam um tipo de BT de outro são ressaltadas no texto.

- **O circuito equivalente** da Figura 3.2 é suficiente para uma modelagem adequada da bateria chumbo ácida. Este circuito também é empregado na modelagem das BTs de níquel e cádmio e íon de lítio.

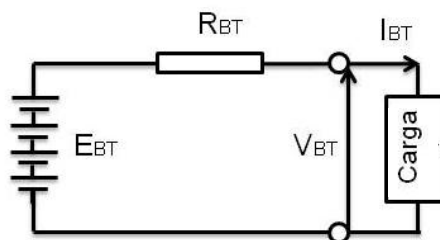


Figura 3.2 - Modelo de circuito elétrico para as BTs, no qual  $R_{BT}$  é a resistência interna,  $E_{BT}$  a tensão de circuito aberto,  $I_{BT}$  a corrente, e  $V_{BT}$  a tensão de alimentação.

- **A tensão de circuito aberto**,  $E_{BT}$ , é diferente para cada tipo de BT, e varia em função do número “n” de células. Para as BTs chumbo ácida, NiCd e íon de lítio, as  $E_{BTs}$  correspondentes são descritas pelas expressões (3.2), (3.3) e (3.4), respectivamente. Para as BTs chumbo ácida

e níquel e cádmio,  $E_{BT}$  varia com a profundidade de descarga (expressão (2.7)) (Larminie & Lowry, 2003). Assume-se que DoD é 0 para bateria carregada e 1 para a bateria descarregada:

$$E_{BT} = n \cdot (2,15 - DoD \cdot (2,15 - 2,00)), \quad (3.2)$$

$$E_{BT} = n \cdot \left( \frac{-8,2816 \cdot DoD^7 + 23,5749 \cdot DoD^6 - 30 \cdot DoD^5 + 23,7053 \cdot DoD^4 -}{12,5877 \cdot DoD^3 + 4,1315 \cdot DoD^2 - 0,8658 \cdot DoD + 1,37} \right). \quad (3.3)$$

Para a BT íon de lítio,  $E_{BT}$  varia em função do estado de carga (expressão (2.8)) da BT, (Kroeze & Krein, 2008):

$$E_{BT} = n \cdot \left( \frac{-108,97 \cdot SoC_{BT}^6 + 355,88 \cdot SoC_{BT}^5 - 453,64 \cdot SoC_{BT}^4 +}{284,33 \cdot SoC_{BT}^3 - 90,038 \cdot SoC_{BT}^2 + 13,433 \cdot SoC_{BT} + 3} \right). \quad (3.4)$$

- **A resistência interna**,  $R_{BT}$ , das BTs chumbo ácida e de níquel e cádmio é considerada constante; o valor utilizado é o fornecido pelos fabricantes. A resistência interna da BT íon de lítio varia em função do SoC e é descrita por (Kroeze & Krein, 2008)

$$R_{BT} = n \cdot \left( \frac{-0,049 \cdot SoC_{BT}^5 - 0,1297 \cdot SoC_{BT}^4 +}{0,4965 \cdot SoC_{BT}^3 - 0,4577 \cdot SoC_{BT}^2 + 0,144 \cdot SoC_{BT}^1 + 0,0482} \right). \quad (3.5)$$

- **A capacidade da BT** é calculada pela capacidade de Peukert, dada por (2.1). O coeficiente 'k' de Peukert assume um valor diferente para cada tipo de BT.

- **A tensão terminal da BT**,  $V_{BT}$ , é definida por

$$V_{BT} = E_{BT} - R_{BT} \cdot I_{BT}. \quad (3.6)$$

- **A potência requerida da BT**,  $P_{BT}$ , é definida pelo produto da tensão  $V_{BT}$  nos terminais da BT pela corrente  $I_{BT}$ :

$$P_{BT} = V_{BT} \cdot I_{BT}. \quad (3.7)$$

- **A corrente requerida da BT**, por sua vez, é definida como

$$I_{BT} = \frac{-E_{BT} + \sqrt{E_{BT}^2 + 4 \cdot R_{BT} \cdot P_{BT}}}{2 \cdot R_{BT}}. \quad (3.8)$$



### 3.3.1 Dados das Baterias

Na Tabela 3.2 são apresentados os dados relevantes de BTs empregados nas ESSs. O modelo Panasonic/CGR1860A é uma célula íon de lítio. A fim de trabalhar com módulos de baterias íon de lítio no lugar de células, considera-se que um módulo é formado por 10 células. O agrupamento de células em um módulo tem um custo aproximado de R\$ 60,00, (Bauman & Kazerani, 2008). Os coeficientes de Peukert das BTs chumbo ácida, NiCd e íon de lítio são apresentados em (39pw.us, 2010; Larminie & Lowry, 2003; Omar, et al., 2010), respectivamente. As referências que forneceram os custos das BTs chumbo ácida, NiCd e íon de lítio estão listados em (LOGIK|Energia limpa, Sistemas sustentáveis, 2012; Alibaba.com, 2012; Electric Motor Store, 2012). Os valores fornecidos em USD (*United States Dollar*) foram multiplicados por quatro como aproximação para o mesmo valor em R\$ seguindo a relação “Valor [USD] x 2 x 2”. O primeiro algarismo dois refere-se à cotação do dólar de R\$ 2 e o segundo à aproximação referente aos impostos brasileiros e lucro do comerciante.

As demais características das BTs (Tabela 3.2) estão em (Optima Batteries, 2012; Electric Motor Store, 2012; Kroeze & Krein, 2008).

Tabela 3.2 - Dados das Baterias.

Fabricante/ Modelo	Tipo	Tensão Nominal [V]	Capacidade [Ah]	Coefficiente de Peukert	Resistência [ $\Omega$ ]	Massa un. [kg]	Custo [R\$]
Optima/ D31T	Chumbo Ácida	12	75 A para 20 horas	1,079	0,0025	27,1	872,52
SAFT/ STM 5-100 MR	NiCd	6	100 A para 3 horas	1,045	0,004	12,9	1200
Panasonic/ CGR1860A	Íon de Lítio	3,7	2,2 A para 1 hora	1,03	Eq. (3.5)	0,096 por célula	11,22

### 3.4 Modelagem dos Supercapacitores

A tecnologia de capacitores eletroquímicos de dupla camada apresenta-se como a melhor alternativa para um estudo visando à aplicação de SCs como fonte de energia em VEs (Ehsani, et al., 2005). Nesta seção são apresentadas as bases para a modelagem dos SCs, fundamentadas em (Lopes, et al., 2011).

- O circuito equivalente do SC é representado na Figura 3.3.

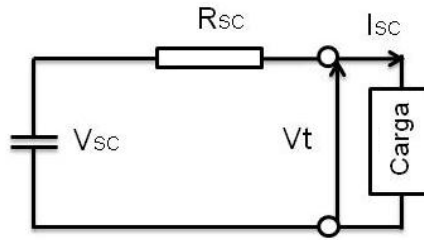


Figura 3.3 - Modelo de circuito elétrico para os SCs, no qual  $R_{SC}$  é a resistência interna,  $V_{SC}$  a tensão no capacitor,  $I_{SC}$  a corrente e  $V_t$  a tensão nos terminais do SC.

- A tensão nos terminais do SC,  $V_t$ , em função da potência requerida é

$$V_t = V_{SC} - R_{SC} \cdot I_{SC} = \left( V_{SC} + \sqrt{V_{SC}^2 - 4 \cdot P_{SC} \cdot R_{SC}} \right) / 2. \quad (3.9)$$

- A corrente requerida do SC,  $I_{SC}$ , é definida por

$$I_{SC} = P_{SC} / V_t. \quad (3.10)$$

- A energia total removida do SC,  $E_{SCn+1}$ , no  $n$ ésimo passo de simulação é

$$E_{SCn+1} = E_{SCn} - V_{SC} \cdot I_{SC} \cdot \delta t. \quad (3.11)$$

- A energia armazenada no SC é

$$E_{SC} = (1/2) \cdot C \cdot V_{SC}^2. \quad (3.12)$$

- O estado de carga no SC é igual à razão entre a tensão atual e a tensão máxima no capacitor (Chau & Wong, 2002):

$$SoC_{SC} = (V_{SC} / V_{SCmax})^2. \quad (3.13)$$

### 3.4.1 Dados dos Supercapacitores

Na Tabela 3.3 são apresentados os dados relevantes dos tipos de SCs usados nas ESSs. Na modelagem dos SCs são utilizados dados de modelos da marca Maxwell (Maxwell Technologies, 2012). Segundo o fabricante esses módulos são indicados para utilização em

VEs como fontes de energia. A referência que forneceu os custos dos módulos em R\$ é (Richardson RFPD, 2011).

Tabela 3.3 - Dados dos Supercapacitores.

<b>Fabricante/ Modelo</b>	<b>Tensão Nominal [V]</b>	<b>Capacitância [F]</b>	<b>Resistência [Ω]</b>	<b>Massa [kg]</b>	<b>Custo [R\$]</b>
Maxwell/ BMOD0058 E016 B02	16	58	0,022	0,63	662,2
Maxwell/ BMOD0165 P048	48,6	165	0,0063	13,5	6272,2



# Capítulo 4

## Dimensionamento da ESS

A metodologia proposta neste Capítulo visa à configuração de menor massa da ESS. Este estudo de caso é aplicado ao veículo V1.

### 4.1 Gráfico de Ragone da ESS

A metodologia de dimensionamento proposta neste estudo de caso utiliza o gráfico de Ragone das BTs e dos SCs. Este gráfico é uma importante ferramenta de dimensionamento, pois mostra os limites da potência e energia disponíveis nas fontes.

As curvas da Figura 4.1 foram obtidas conforme a seguinte descrição: a energia e a potência disponíveis nas BTs e nos SCs são estimadas por meio de simulações computacionais iniciadas com as fontes carregadas ( $SoC_{BT}$  e  $SoC_{SC}$  iguais a 100%), e submetidas a intervalos de potência requerida constante para um passo de 10 W/kg. Potência é requerida até que as BTs atinjam  $SoC_{BT}$  igual a 60 % e os SCs atinjam metade da sua tensão terminal inicial ( $V_t = V_t/2$ ). O tempo gasto para descarregar as fontes até estes limites é usado para calcular a energia disponível nas fontes para cada valor de potência especificado.

Os resultados obtidos por meio de simulações (para as BTs e SCs) são expressos no plano log-log de potência específica (W/kg) por energia específica (Wh/kg), na forma de um gráfico de Ragone, ilustrado na Figura 4.1. As curvas da Figura 4.1 fornecem o limite da potência disponível das BTs e dos SCs como também a região ótima de trabalho de cada fonte que se encontra na parte da curva onde potência e energia são altas. A forma das curvas depende da resistência interna e das propriedades de fuga das fontes. O critério de parada, aqui adotado, das curvas de Ragone dos SCs é a potência máxima específica de 2500 W/kg. Neste caso, os correspondentes valores de energia específica são 1,125 Wh/kg para o SC de 58 F e 1,951 Wh/kg para o SC de 165 F. A eficiência de operação nestes pontos é obtida pela expressão (2.9) sendo igual a 57 % para o SC de 58 F e 70 % para o SC de 165 F. Valores maiores de

potência específica acarretam em valores menores de energia específica resultando em eficiências ainda menores de operação.

De posse das curvas da Figura 4.1 e a partir da potência e energia requeridas das fontes, é possível encontrar os coeficientes de potência específica ( $\rho_{BT,SC}$ ) e/ou energia específica ( $\delta_{BT,SC}$ ) que fornecerão a menor massa de SC e/ou BTs, por meio da expressão geral

$$\text{Massa [kg]} = \frac{\text{Potência [W]}}{\rho_{BT,SC} [\text{W/kg}]} = \frac{\text{Energia [Wh]}}{\delta_{BT,SC} [\text{Wh/kg}]} \quad (4.1)$$

Em princípio, os coeficientes  $\rho_{BT,SC}$  e  $\delta_{BT,SC}$  podem ser encontrados em *data sheets* das fontes. Entretanto, com as curvas da Figura 4.1 é possível encontrar coeficientes que forneçam a menor massa das fontes para um determinado intervalo de tempo de potência requerida constante.

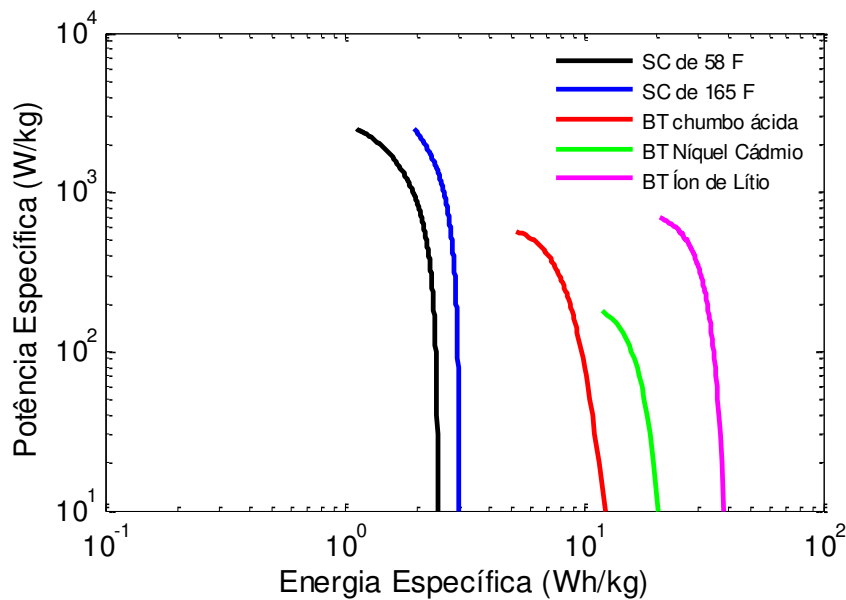


Figura 4.1 - Gráfico de Ragone das BTs e dos SCs.

## 4.2 Ciclo de Velocidade para o Dimensionamento

Neste estudo de caso, a metodologia de dimensionamento da BT e do SC é aplicada a um perfil de alto valor de potência requerida. Parte-se da premissa de que se as fontes são dimensionadas para o período de maior demanda de potência requerida de um determinado ciclo, então estas são capazes de suprir a potência requerida em períodos de menor exigência.

Para este propósito, o ciclo de condução escolhido é o Z85 (Schupbach, et al., 2003). Neste ciclo, o veículo vai de 0 a 137 km/h em 21 segundos, mantendo esta velocidade após o período de aceleração.

O perfil de velocidade do ciclo Z85 e o correspondente perfil de potência requerida, obtido pela expressão (3.1) para o veículo V1, são apresentados na Figura 4.2.

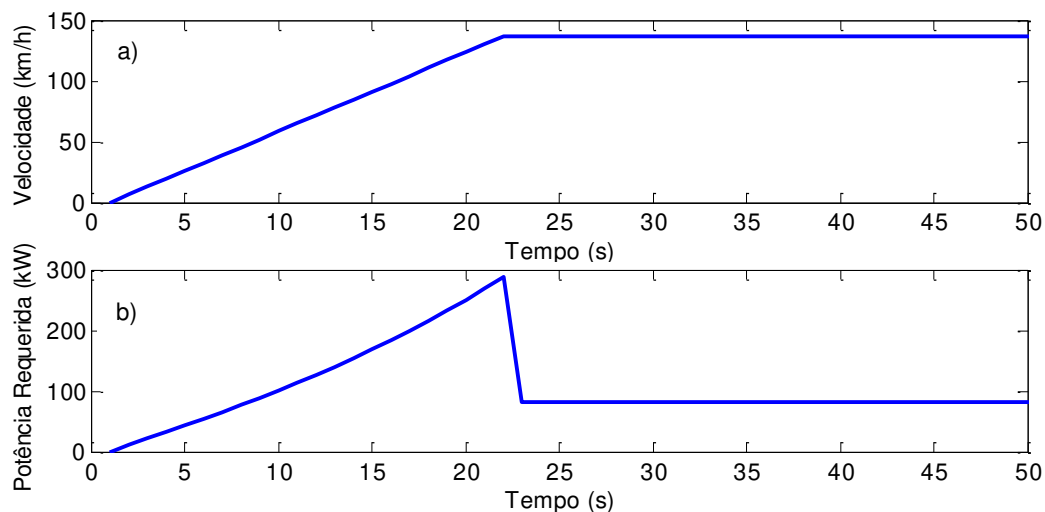


Figura 4.2 - Perfil de velocidade do ciclo Z85 (a) e perfil de potência requerida (b).

### 4.3 Metodologia de Dimensionamento da ESS

Na Figura 4.2 (b), a fonte de autonomia (que pode ser uma CaC ou uma unidade MCI/gerador) é responsável pela potência requerida em estado estacionário, igual a 82 kW. Durante o período de aceleração, a fonte de autonomia é acionada quando o valor de 82 kW é alcançado atuando no período de 9 a 22 segundos por 13 segundos. Para o mesmo período de aceleração, a ESS é responsável pela potência requerida no período de 1 a 22 segundos. Os picos de potência do período de aceleração foram aproximados para dois triângulos retângulos, como mostrado na Figura 4.3 (a). Referente à Figura 4.2 (b), a Figura 4.3 (a) mostra a atuação da ESS nas áreas hachuradas A e B.

Cada coeficiente de potência e energia específicas que compõe a curva de Ragone da fonte foi obtido para potência requerida constante. Logo, o gráfico de Ragone das fontes pode ser usado no dimensionamento da ESS, desde que a potência requerida das fontes seja constante. Para satisfazer a essa exigência, a potência e a energia requeridas da ESS são normalizadas para o tempo de atuação da fonte de autonomia de 13 segundos no período de aceleração. O

resultado desta normalização é mostrado na Figura 4.3 (b) na área hachurada C. O valor da potência normalizada é de 130 kW.

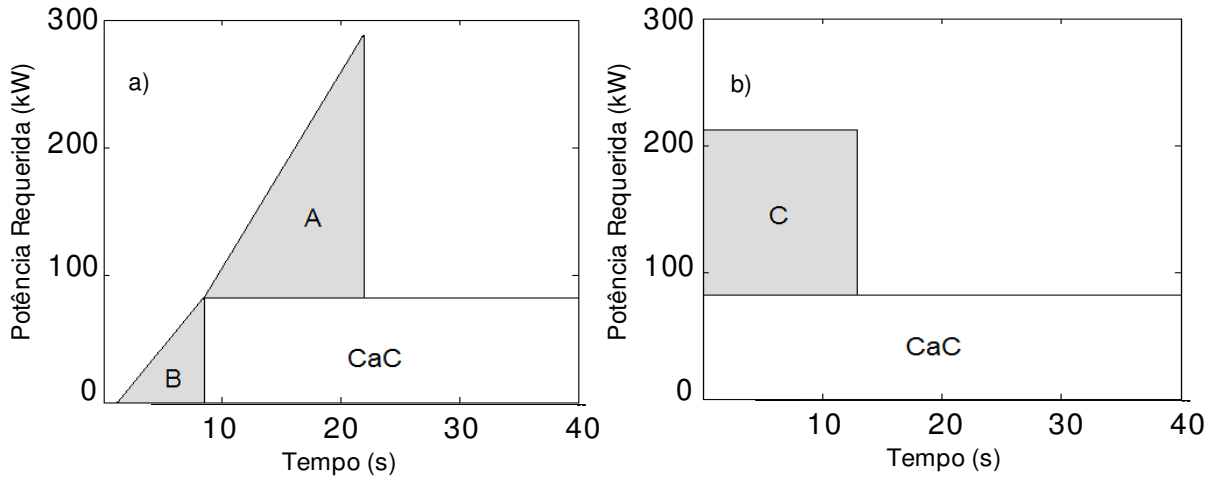


Figura 4.3 - Potência requerida (a) e potência normalizada para 13 segundos (b).

#### 4.4 Dimensionamento da ESS com BTs ou com SCs

Nesta seção, o dimensionamento é realizado para ESSs constituídas apenas por BTs ou apenas por SCs.

O tempo característico de uma aplicação corresponde às linhas retas da Figura 4.4 e é da ordem da razão de energia por potência da fonte de energia como mostrado na seguinte expressão

$$\delta [\text{Wh/kg}] = \rho [\text{W/kg}] \cdot \frac{\Delta t}{3600}, \quad (4.2)$$

o coeficiente de potência específica varia de 10 a  $10^4$  W/kg para um passo de 10 W/kg,  $\Delta t$  é o tempo em segundos de descarga da fonte para uma determinada aplicação.

Os coeficientes de potência e energia específicas são encontrados pela intersecção entre a reta de tempo na qual a potência constante é requerida, e a curva de Ragone da fonte.

Na Figura 4.4 a reta de tempo de 13 segundos corta as curvas dos SCs nos pontos 'a' e 'b', mas não corta as curvas das BTs. Isto significa que os coeficientes de potência e energia



específicas obtidos nestes pontos asseguram que os SCs fornecerão sua energia disponível em 13,14 segundos para o SC de 165 F e 13,11 segundos para o SC de 58 F.

Na

Tabela 4.1 estão indicados os coeficientes dos pontos 'a' e 'b' e a massa dos SCs, calculada pela expressão (4.1), para a ESS constituída apenas por SCs. O SC que apresentou a menor massa e o menor custo na situação considerada é o de 165 F. Um módulo deste SC tem 13,5 kg. Assim, a massa dimensionada é aproximadamente igual a 13 módulos. A massa do SC de 58 F é de 220,34 kg, o que equivale a aproximadamente 350 módulos deste SC. Logo, em módulos inteiros, a massa é de 220,5 kg.

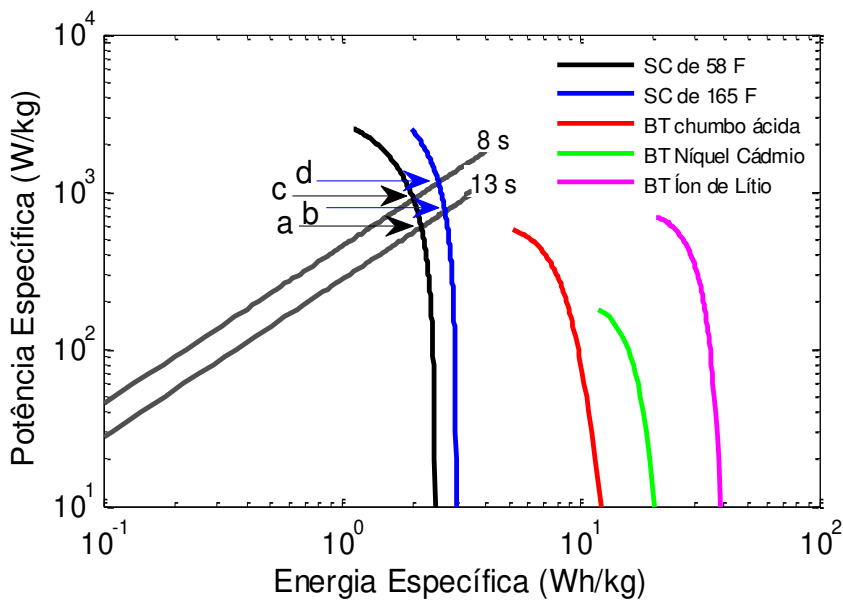


Figura 4.4 - Gráfico de Ragone e linhas de tempo de 8 e 13 segundos.

Tabela 4.1 - Dados do dimensionamento da ESS só com SCs.

Fabricante/Modelo	Capacitância [F]	$\rho$ [W/kg]	$\delta$ [Wh/kg]	Massa [kg]	Custo [R\$]
Maxwell/BMOD0058 E016 B02	58	590	2,1486	220,5	231770
Maxwell/BMOD0165 P048	165	740	2,7010	175,67	81617,6

As curvas das BTs na Figura 4.4 não são cortadas pela reta de tempo de 13 segundos. Isso significa que estas BTs não podem ser descarregadas neste período, a menos que operem fora da região segura, com  $SoC_{BT}$  abaixo de 60 %. O fator limitante para o dimensionamento das BTs é a capacidade de potência (Schupbach, et al., 2003). Dessa forma os coeficientes que fornecerão a menor massa de BTs são os máximos coeficientes de potência específica. As BTs são então dimensionadas para fornecerem a potência máxima da Figura 4.3 (a), menos a potência da fonte de autonomia, o que resulta em 208 kW.

Na Tabela 4.2 são apresentados os coeficientes de potência específica e a massa das BTs em módulos inteiros, calculada pela expressão (4.1), para a ESS constituída apenas por BTs. O tipo de BT que apresentou a menor massa na situação considerada é a íon de lítio com 594,28 kg, equivalente a 619 módulos inteiros. O preço de um módulo desta BT é de R\$ 172. A BT chumbo ácida apresentou o menor custo, com massa de 693,33 kg, equivalente a 26 módulos. Para a BT NiCd, a massa dimensionada é de 2.080 kg, equivalente a 162 módulos.

Tabela 4.2 - Dados do dimensionamento da ESS só com BTs.

Fabricante/ Modelo	Tipo	$\rho_{BTmax}$ [W/kg]	Massa [kg]	Custo [R\$]
Optima/ D31T	Chumbo Ácida	300	704,6	22685,52
SAFT/ STM 5-100 MR	NiCd	100	2089,8	194400
Panasonic/ CGR1860A	Íon de lítio	350	594,28	106468

Os coeficientes de potência específica da Tabela 4.2 asseguram que as baterias operem até a eficiência mínima de 85 %. Se forem utilizados coeficientes com valores maiores, as BTs operarão com eficiência abaixo de 85 %. Estes coeficientes foram estimados pela razão entre a potência requerida e a potência das BTs sem resistência,  $P_{bat}$ , para eficiência ' $\eta_{BT}$ ' de 85 %:

$$\eta_{BT} = P_{BT}/P_{bat} = 85 \% \quad (4.3)$$

Os coeficientes são determinados a partir dos gráficos de Ragone da Figura 4.4 correspondentes às BTs pela seguinte expressão:

$$\rho_{BTmax} = P_{BT}/m_{BT} \quad (4.4)$$

#### 4.5 Dimensionamento da ESS com BTs e SCs

Em uma ESS híbrida é possível alocar parte da potência requerida normalizada, Figura 4.3 (b), às BTs e o restante aos SCs. Como os SCs são melhor empregados no fornecimento de altos picos de potência – em curtos períodos de tempo –, a parcela de potência requerida a seu encargo será menor do que a da BT. Nesta tese não se trabalha com a hipótese de uma ESS híbrida formada por dois tipos de fontes da mesma natureza, ou seja, dois SCs ou duas BTs. Como são considerados três tipos de BTs e dois tipos de SCs, o número possível de combinações entre um tipo de SC e um tipo de BT para uma ESS híbrida é igual a seis, podendo-se escolher, portanto, a de menor massa.

A Figura 4.5 mostra uma possível alocação de potência requerida, de 90 kW para a BT, e de 40 kW para o SC.

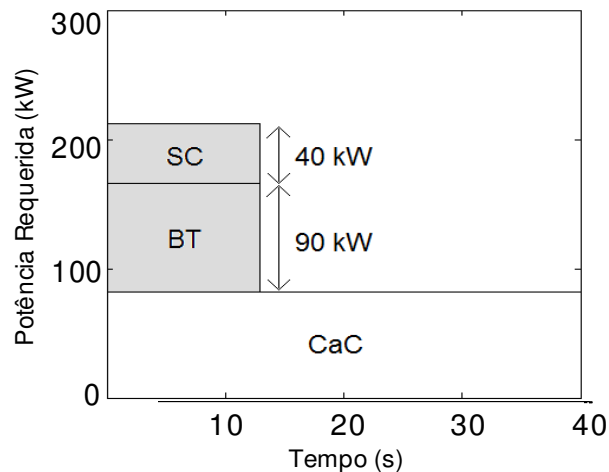


Figura 4.5 - Alocação de potência requerida da BT e do SC.

Os SCs e as BTs são dimensionadas para descarga aproximada de 13 segundos, correspondentes a 40 kW e a 90 kW de potência requerida (em relação à  $\rho_{BT\text{máx}}$ ), respectivamente. Na Tabela 4.3 são apresentados os coeficientes de potência específica e a massa, em módulos inteiros, dos SCs e das BTs, calculadas pela expressão (4.1), para as possíveis ESSs híbridas.

Tabela 4.3 - Dados do dimensionamento dos SCs e das BTs.

Fabricante/ Modelo	Capacitância [F] / Tipo	$\rho$ [W/kg]	Massa [kg]	Custo [R\$]
Maxwell/ BMOD0058 E016 B02	58	590	68,04	71.517,6
Maxwell/ BMOD0165 P048	165	740	54	25.088,8
Optima/ D31T	Chumbo Ácida	300	298,1	9.597,72
SAFT/ STM 5-100 MR	NiCd	100	903	84.000
Panasonic/ CGR1860A	Ion de Lítio	350	257,28	46.096

A partir da Tabela 4.3, a configuração de ESS híbrida com menor massa (311,28 kg) é constituída por BTs íon de lítio e SCs de 165 F. Porém, a configuração de menor custo (R\$ 34686,52) é constituída por BTs chumbo ácidas e SCs de 165 F.

Retornando ao perfil de potência requerida original, Figura 4.2 (b), pretende-se obter o comportamento temporal da tensão e do estado de carga do SC de 165 F e da BT íon de lítio que constituem a ESS híbrida de menor massa. Para melhor visualização, a Figura 4.6 mostra o perfil de potência requerida da Figura 4.2 (b) durante o período de aceleração sem a potência requerida da fonte de autonomia.

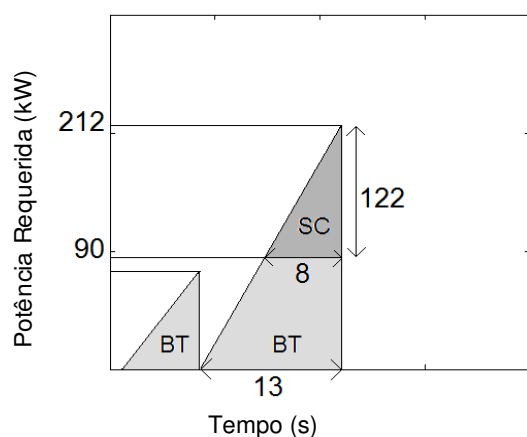


Figura 4.6 - Potência requerida à ESS durante aceleração.

Como a BT é dimensionada para fornecer potência até o valor de 90 kW, é o banco de SCs que fornece toda a potência requerida acima deste valor. A energia do pico de potência

requerida do SC, Figura 4.6, é de 488 kW. A potência normalizada, neste pico, no período de 8 segundos, é de 61 kW. A reta de tempo de 8 segundos corta a curva de Ragone do SC de 165 F no ponto 'd', que corresponde a um coeficiente de potência específica igual a 1,14 kW/kg; a massa encontrada é de 53,5 kg. Nota-se que esta massa é menor que a correspondente da Tabela 4.3.

A Figura 4.7 (a) mostra o comportamento temporal do estado de carga da BT íon de lítio, e a Figura 4.7 (b) o comportamento da tensão do SC de 165 F.

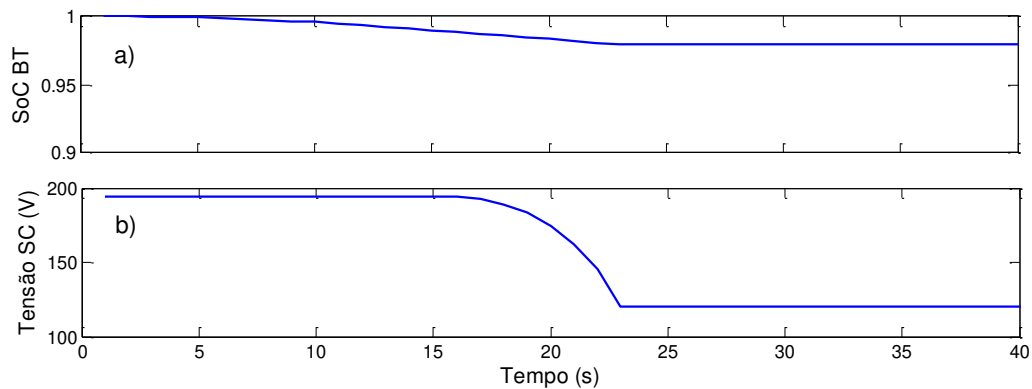


Figura 4.7 – Estado de carga da BT (a) e tensão no SC (b).

## 4.6 Considerações Finais

A metodologia descrita considera que as fontes da ESS devem fornecer toda a sua energia disponível no intervalo de tempo considerado para o dimensionamento. Esse objetivo é alcançado pelo emprego dos SCs de 165 F e 58 F.

De acordo com os resultados mostrados nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, verifica-se que: (i) as ESSs com menores valores de massa tem apenas SCs de 165 F ou 58 F em sua configuração; (ii) a ESS constituída apenas por BTs com menor massa é formada por BTs íon de lítio; (iii) a ESS híbrida com menor massa é constituída por BTs íon de lítio e SCs de 165 F. Esta última apresenta menor valor de massa que a ESS com apenas BTs íon de lítio. Em relação ao custo, venceu a ESS constituída apenas por BTs chumbo ácidas.

Os resultados da metodologia de dimensionamento da ESS proposta neste capítulo mostraram que nem sempre ESSs híbridas são mais leves que ESSs com um único tipo de fonte. Em particular, para o perfil de potência requerida da Figura 4.2 (b), a ESS constituída apenas por SCs de 165 F apresentou a menor massa. Esse resultado pode ser explicado pelo

alto valor do coeficiente de potência específica desta fonte, no intervalo de tempo de 13 segundos. Este valor de coeficiente é o maior dentre todas as fontes analisadas e, portanto, é o que vai fornecer a menor massa para a potência requerida constante de 130 kW.

Na Figura 4.4, observa-se que quando o intervalo de tempo de potência constante requerida aumenta, a reta de tempo corta os gráficos de Ragone dos SCs em valores menores, e os gráficos das BTs em valores maiores de coeficiente de potência específica. Eventualmente, para intervalos de tempo maiores que 13 segundos, as BTs poderiam fornecer valores de massa menores que os SCs. Essa característica mostra que o dimensionamento da ESS por gráfico de Ragone é diretamente dependente do intervalo tempo em que a potência constante é requerida. A ESS híbrida sempre vai apresentar maior massa que ESSs formadas apenas por BTs ou SCs porque, segundo esta metodologia, vence a fonte com maior coeficiente de potência específica.

# Capítulo 5

## Dimensionamento Ótimo da ESS

Neste capítulo é proposta uma metodologia para o dimensionamento das fontes de energia da ESS, fundamentada em Otimização não Linear, que visa a minimização da massa de ESSs híbridas. A metodologia é aplicada a determinados períodos de ciclos de velocidade com alto perfil de potência requerida, nos quais as fontes fornecem energia, obedecendo às limitações físicas de tensão para os SCs e de estado de carga para as BTs. A autonomia do veículo é garantida pela adição da fonte de autonomia. Estratégias de gerenciamento de potência aplicada às fontes permitem ao veículo operar por tempo relativo à quantidade de combustível da fonte de autonomia e em diferentes ciclos de condução.

### 5.1 Ciclos de Velocidade para o Dimensionamento

Para o estudo de caso, foram selecionados cinco ciclos de velocidade, mostrados na Figura 5.1, (epa.gov, 2012). Alguns destes ciclos retratam condições de trânsito urbano, como o *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS), o *New York City Cycle* (NYCC), e o *Elementary Urban Cycle* adicionado ao *Extra-Urban Driving Cycle* (ECEEUDC). Os outros retratam condições de trânsito em autoestrada, como o LA92Short, que contém os primeiros 969 segundos do *Unified Dynamometer Driving Schedule* e o *Highway Fuel Economy Driving Schedule* (HWFET).

A importância de se trabalhar com diferentes ciclos de velocidade reside na abrangência das mais variadas situações que o veículo pode estar sujeito, tanto em trânsito urbano como de autoestrada. A ESS deve ter capacidade de energia e potência suficientes para que o veículo opere em todos estes ciclos. No dimensionamento das ESSs dos veículos V1 e V2 são utilizados todos os ciclos da Figura 5.1. Como o veículo V3 é um ônibus de transporte urbano, o único ciclo utilizado é uma abreviação do ciclo ECEEUDC, como mostrado na Figura 5.2. Este ciclo tem velocidade máxima de 70 km/h e situações de parada/partida muito comuns em trânsito urbano.

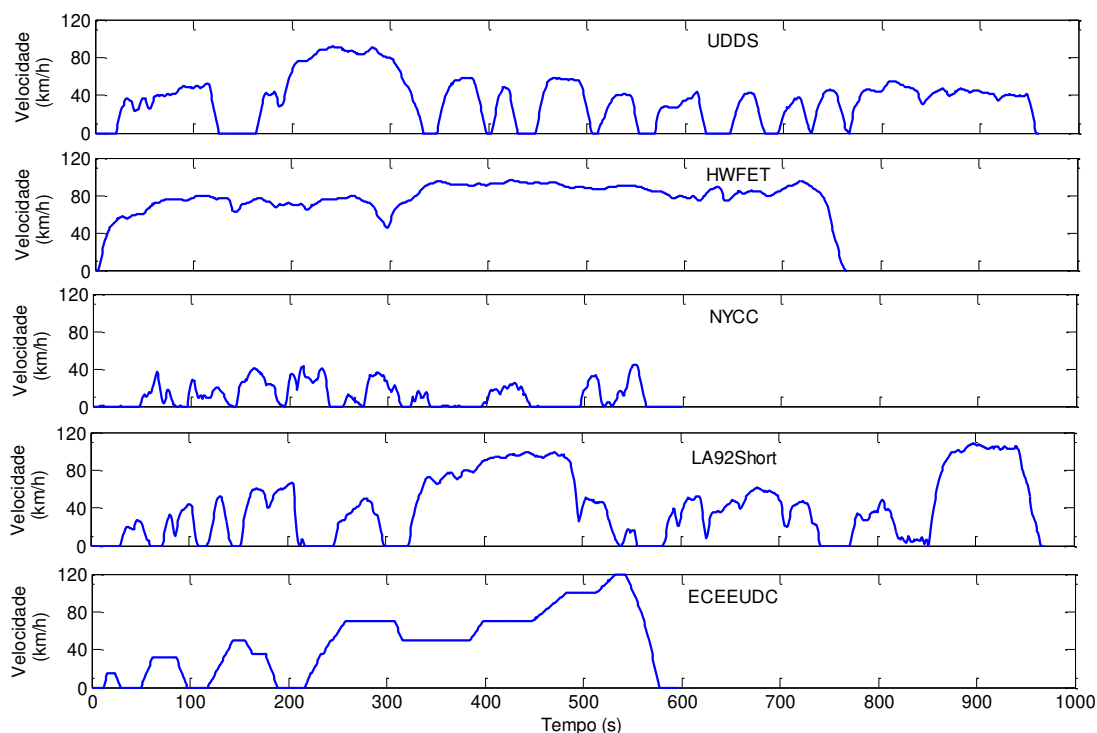


Figura 5.1 - Ciclos de velocidade dos veículos V1 e V2.

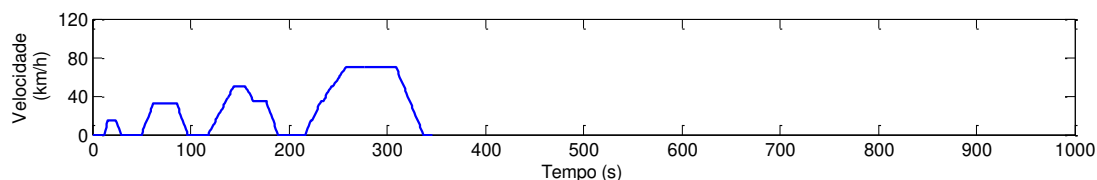


Figura 5.2 - Ciclo de velocidade do veículo V3.

## 5.2 Envelope dos Perfis de Potência

Um importante critério a ser adotado nesta metodologia de dimensionamento é a definição do período de tempo ou condição do ciclo para o qual a ESS é dimensionada.

Considera-se a possibilidade de que os veículos V1 e V2 sejam conduzidos em qualquer um dos ciclos da Figura 5.1 ou, em um ciclo de condução qualquer com os mesmos limites máximos e mínimos de potência requerida dos ciclos considerados. Por esta razão, julga-se razoável considerar, como período para o dimensionamento, o período de maior demanda de potência do envelope resultante da sobreposição dos respectivos perfis de potência calculados para cada veículo.



As Figuras 5.3 e 5.4 descrevem os perfis de potência dos ciclos da Figura 5.1 calculados para os veículos V1 e V2, respectivamente. A Figura 5.5 descreve o perfil de potência do ciclo de velocidade do veículo V3.

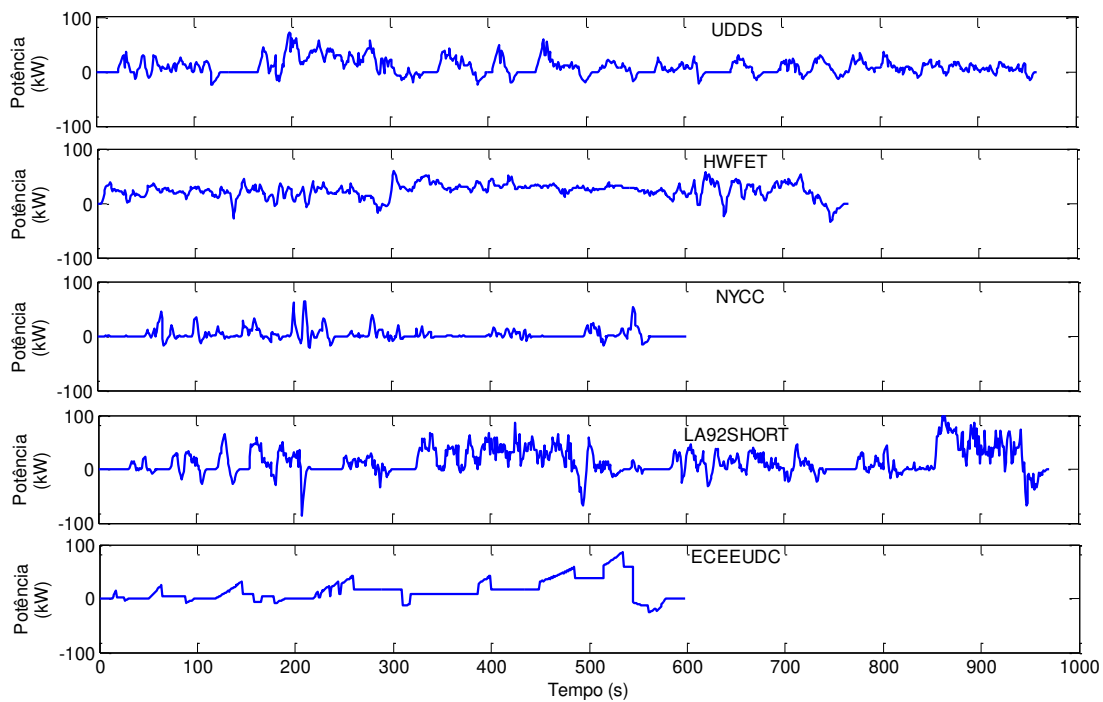


Figura 5.3 - Perfis de potência requerida do veículo V1.

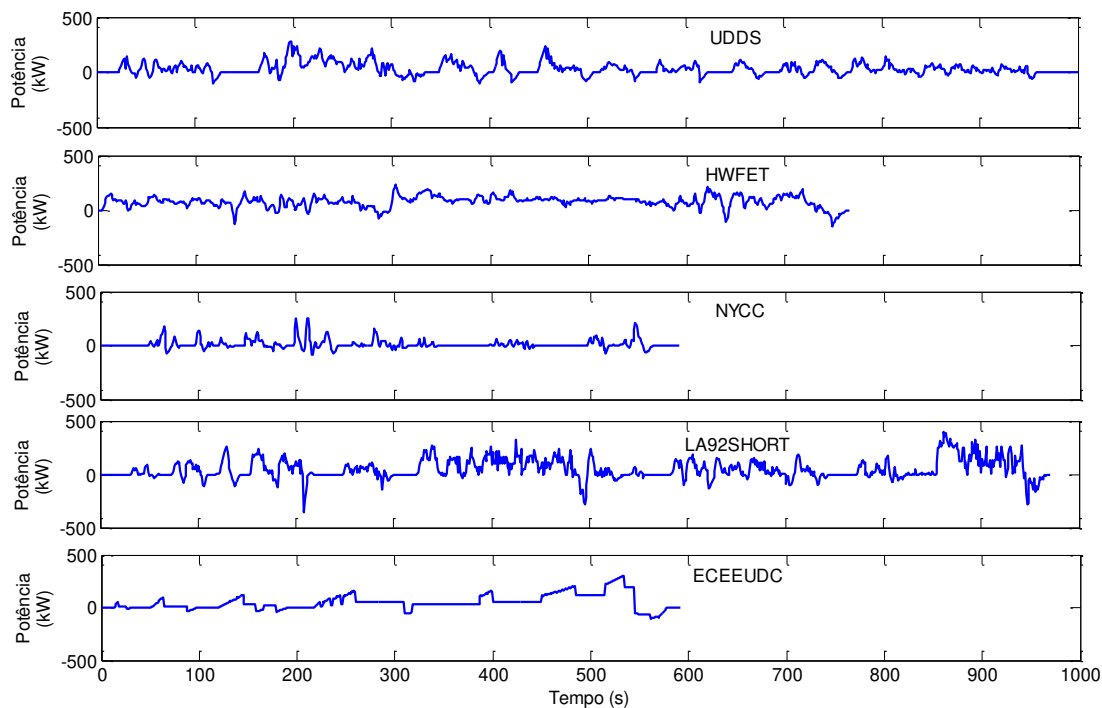


Figura 5.4 - Perfis de potência requerida do veículo V2.

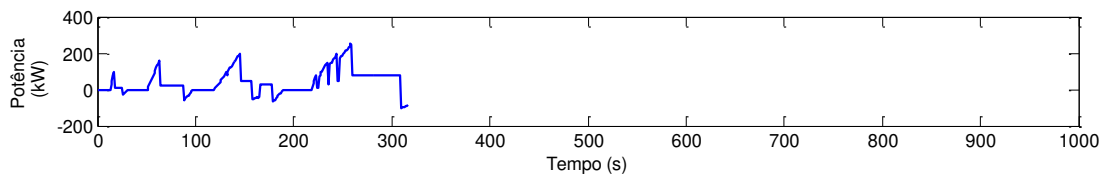


Figura 5.5 - Perfil de potência requerida do veículo V3.

O dimensionamento da ESS é fundamentado na demanda de potência, por essa razão considera-se apenas a parte positiva dos envelopes resultantes da sobreposição dos perfis de potência das Figuras 5.3 e 5.4. A frenagem se relaciona com o fluxo de energia e, portanto, tem impacto na autonomia dos VEs. A frenagem não é previsível e pode ser muito maior que a aceleração, por essa razão, as fontes de energia são dimensionadas em função da aceleração. Devido a essa característica, não faz sentido dimensionar as fontes de energia para recuperarem toda a energia proveniente da frenagem. Uma vez ultrapassado o limite de recarga das fontes entram em ação os freios mecânicos.

As Figuras 5.6 e 5.7 descrevem a parte positiva dos envelopes das Figuras 5.3 e 5.4, respectivamente. Os períodos de tempo selecionados para o dimensionamento das ESSs dos veículos V1 e V2 são T1, de 288 a 433 segundos, T2, de 433 a 585 segundos, e T3, de 840 a 950 segundos. Esses períodos estão indicados por setas vermelhas nas Figuras 5.6 e 5.7. O

perfil de potência considerado no dimensionamento da ESS do veículo V3 é a parte positiva do perfil da Figura 5.5, representado na Figura 5.8. O período de tempo T4 para o dimensionamento da ESS de V3 é de 217 a 311 segundos. Os períodos seleccionados correspondem a altos valores de potência requerida.

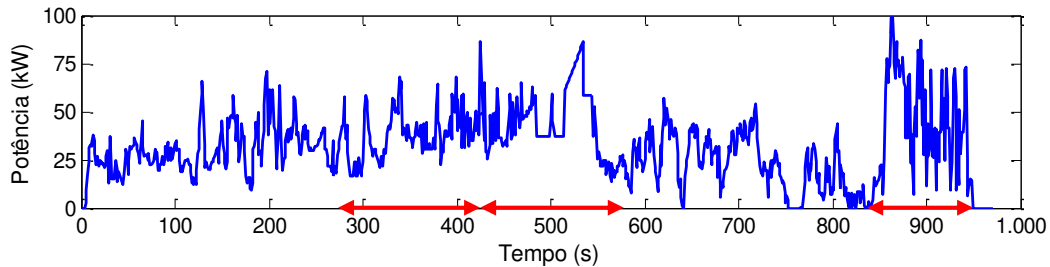


Figura 5.6 - Envelope dos perfis de potência positivos da Figura 5.3 e correspondentes períodos escolhidos para o dimensionamento da ESS híbrida do veículo V1.

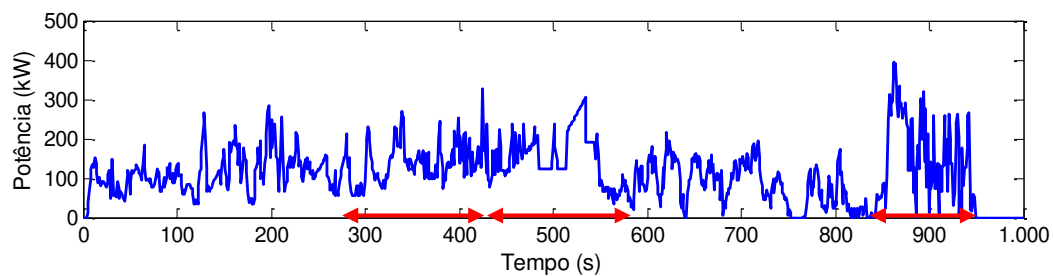


Figura 5.7 - Envelope dos perfis de potência positivos da Figura 5.4 e correspondentes períodos escolhidos para o dimensionamento da ESS híbrida do veículo V2.

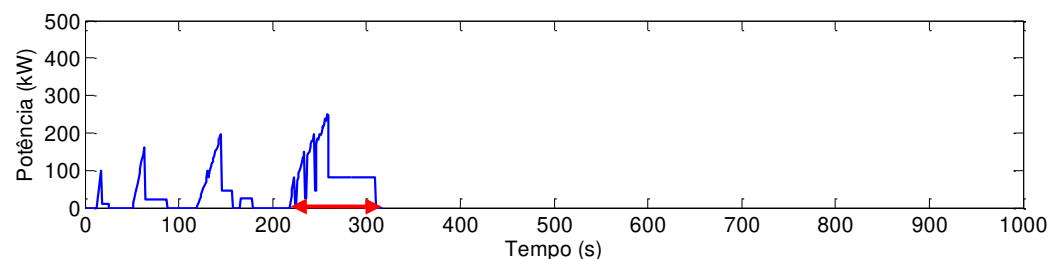


Figura 5.8 - Perfil de potência positivo da Figura 5.5 e correspondente período escolhido para o dimensionamento da ESS híbrida do veículo V3.

### 5.3 Metodologia de Dimensionamento Ótimo da ESS

Nesta seção é descrita a metodologia fundamentada em técnica de Otimização não Linear empregada na solução do problema do dimensionamento da ESS dos veículos V1, V2 e V3, (Lopes, et al., 2012). A ESS é dimensionada para suprir o perfil de potência requerida

compreendido pelo período de tempo indicado pela seta correspondente nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8. Considera-se que, para cada período de tempo, a BT e o SC devem entregar toda sua energia disponível, respeitadas as limitações físicas de tensão para SCs e de estado de carga para as BTs.

O objetivo da metodologia é a minimização da soma das massas das BTs e dos SCs, descrita pela função objetivo:

$$M_{ESS} = n_{BT} \cdot m_{BT} + n_{SC} \cdot m_{SC}, \quad (5.1)$$

na qual  $n_{BT}$  representa o número de módulos de BTs chumbo ácido ou de BTs NiCd conectados em série ou o número de 'strings' de BTs íon de lítio conectadas em paralelo. A variável  $n_{SC}$  representa o número de 'strings' de SCs conectados em paralelo;  $m_{BT}$  é a massa de cada módulo de BT chumbo ácido ou de BT NiCd ou a massa do 'string' de BT íon de lítio;  $m_{SC}$  é a massa de cada 'string' de SC.

De acordo com a Figura 3.1, o banco de SCs é diretamente conectado ao barramento CC. Logo, o número de módulos de SCs conectados em série é fixo. Um valor de tensão razoável de operação do barramento CC varia entre a tensão mínima de 250 V e máxima de 400 V, (Bauman & Kazerani, 2008). Assim, são necessários 25 módulos de SC de 58 F (16 V cada) para atingir a tensão de 400 V. Já para os SCs de 165 F (48,6 V cada), trabalha-se com a tensão terminal de 440 V para 9 módulos. Além disso, para a BT íon de lítio, o número de módulos em série é fixo e igual a 5, o que origina uma tensão terminal de 185 V.

As variáveis de otimização são  $n_{BT}$ ,  $n_{SC}$ , a potência requerida da BT ( $P_{BT}$ ) e a potência requerida do SC ( $P_{SC}$ ). As restrições do problema de otimização estão:

- na equação de balanço de potências, pela qual a soma das potências requeridas da BT e do SC é igual à potência requerida da ESS,  $P_{ESS}$ :

$$P_{ESS} = P_{BT} + P_{SC}, \quad (5.2)$$

- nos valores máximos que a potência requerida da BT,  $P_{BTmax}$ , e a potência requerida do SC,  $P_{SCmax}$ , podem assumir. Neste caso, a potência requerida das fontes não pode ser maior que a máxima potência disponível nas mesmas. Por esta razão, a potência disponível é dada em função das máximas potências específicas das BTs, Tabela 4.2, e dos SCs, igual a 3,07 kW/kg para o SC de 165 F e 2,26 kW/kg para o SC de 58 F:

$$P_{BTmax} \leq \rho_{BTmax} \cdot n_{BT} \cdot m_{BT}, \quad (5.3)$$

$$P_{SCmax} \leq \rho_{SCmax} \cdot n_{SC} \cdot m_{SC},$$

- na tensão terminal dos SCs entre os valores de  $V_{tmax}$  e  $V_{tmin}$  (250 V):

$$V_{tmax} \geq V_t \geq V_{tmin}, \quad (5.4)$$

- no estado de carga da BT entre os valores de  $SoC_{BTmax}$  (100 %) e  $SoC_{BTmin}$  (60 %):

$$SoC_{BTmax} \geq SoC_{BT} \geq SoC_{BTmin}. \quad (5.5)$$

Assim, o dimensionamento da ESS, visto como um problema de otimização, pode ser colocado da seguinte forma: encontrar  $n_{BT}$ ,  $n_{SC}$ ,  $P_{BT}$  e  $P_{SC}$  que minimize a função objetivo

$$M_{ESS} = n_{BT} \cdot m_{BT} + n_{SC} \cdot m_{SC}, \quad (5.6)$$

sujeita às restrições (5.2) a (5.5).

Como as variáveis  $n_{BT}$  e  $n_{SC}$  devem ser inteiras, o problema de otimização inteiro-misto foi resolvido por um algoritmo do tipo *Branch-and-Bound*. Para tal utilizou-se a rotina “fmincon” do *toolbox* de otimização do *software* Matlab/Simulink® 7.1. A rotina “fmincon” implementa um método do tipo Quase-Newton para otimização restrita conhecido como Programação Quadrática Sequencial (Bertsekas, 1999) (Anexo E).

A metodologia de dimensionamento proposta nesta seção não considera o custo da BT e do SC na formulação do problema de otimização. Neste caso, optou-se por enumerar todas as possíveis combinações entre BTs e SCs, de menor massa, capazes de atender a todos os períodos de potência requerida das Figuras 5.6, 5.7 e 5.8. Logo, os custos mostrados nas subseções seguintes são resultado direto das combinações obtidas entre BTs e SCs.

Os resultados da aplicação desta metodologia aos três tipos de veículos são apresentados nas subseções 5.3.1 a 0. É importante ressaltar que todas as simulações foram realizadas com o banco de baterias e o banco de supercapacitores inicialmente carregados.

Por conveniência, nas subseções 5.3.1 a 0, são descritos os cinco melhores resultados – de menor massa – de cada possível combinação entre um tipo de BT, Tabela 3.2, e um tipo de SC, Tabela 3.3. Para cada resultado também é apresentado o custo relativo das combinações.

### 5.3.1 Dimensionamento da ESS do Veículo V1

Da Figura 5.9 à Figura 5.14 são apresentados os resultados do dimensionamento e dos custos das possíveis combinações de ESSs híbridas para o veículo V1 em cada período de tempo indicado na Figura 5.6.

As combinações de BTs íon de lítio e SCs de 58 F, na Figura 5.10, assim como de BTs chumbo ácidas e SCs de 58 F, na Figura 5.12, são as que apresentaram os menores valores de massa da ESS para o veículo V1. A combinação de menor massa, 175,5 kg, tem 30 '*strings*' de BTs íon de lítio e 2 '*strings*' de SCs de 58 F. Esta combinação foi encontrada para o período T1, porém o período que exigiu maior número de fontes, em todas as simulações, foi o período T3, caracterizado por ser o período de maior demanda de potência. Como o objetivo é dimensionar a ESS para suprir o período de maior demanda de potência, sem a atuação da fonte de autonomia, a combinação de menor massa da ESS para V1 é igual a 42 '*strings*' de BTs íon de lítio e 2 '*strings*' de SCs de 58 F.

As ESSs de menores custos encontram-se descritas nas Figuras 5.11 a 5.12, e apresentam de 10 a 12 '*strings*' de BTs chumbo ácidas e nenhum '*string*' de SC. Porém, estas configurações de ESSs não podem ser usadas, pois só as BTs não são capazes de armazenar toda a energia da frenagem regenerativa, sendo necessário, para isso, o emprego de SCs. Para os perfis de velocidade analisados nesta Tese, os SCs são capazes de armazenar toda frenagem regenerativa. Em eventuais ciclos de condução, nos quais a capacidade de regeneração dos SCs aqui dimensionados é ultrapassada, o freio mecânico entra em ação.

Ainda em relação ao veículo V1, as combinações com SCs de 165 F são, invariavelmente, as mais pesadas e as mais caras. Observa-se que o custo das combinações tende a cair com a diminuição do número de '*strings*' dos dois tipos de SCs.

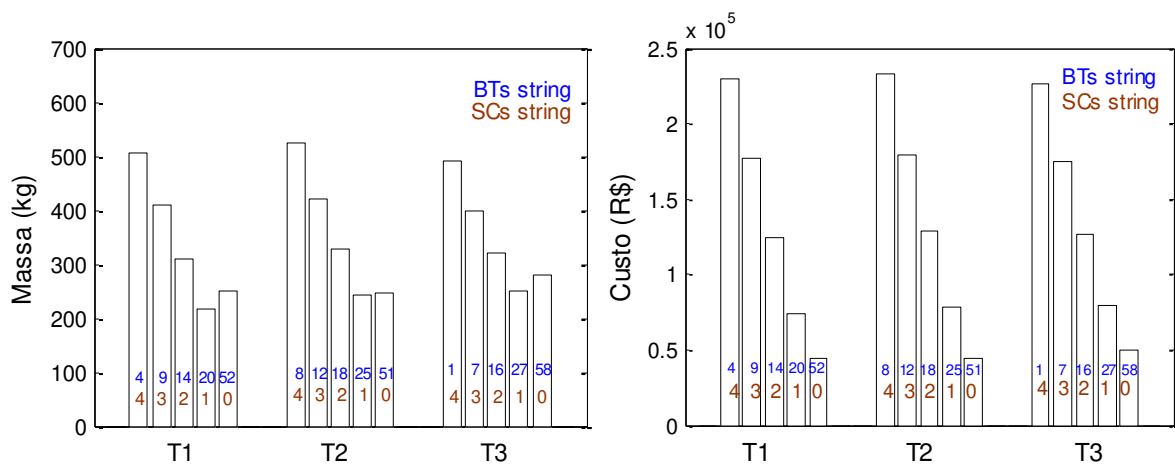


Figura 5.9 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT Lítio e SC de 165 F.

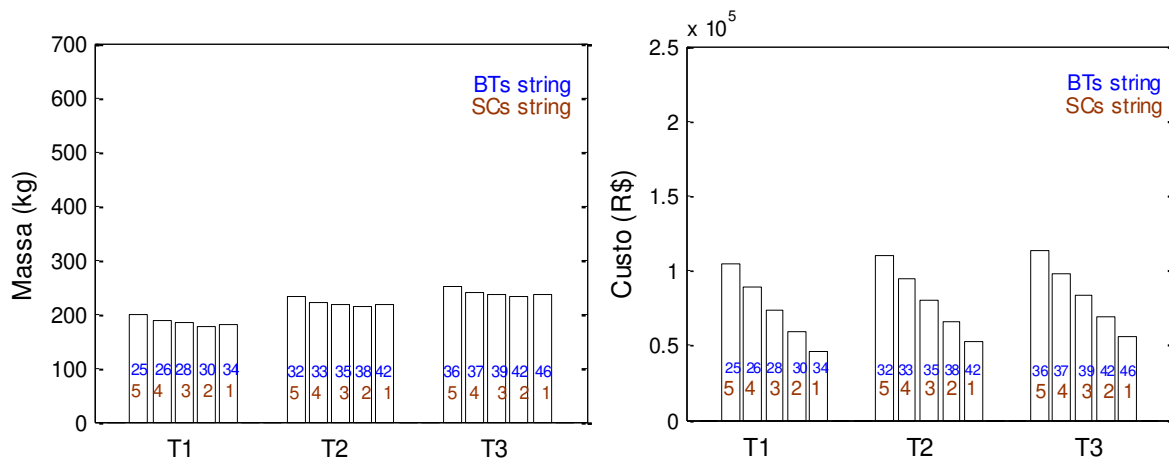


Figura 5.10 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT Lítio e SC de 58 F.

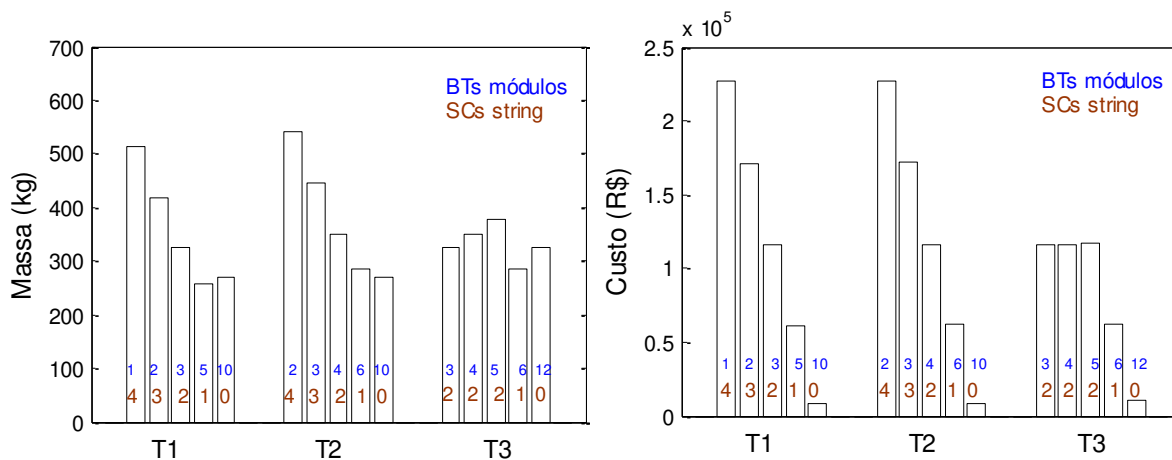


Figura 5.11 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT de Chumbo e SC de 165 F.

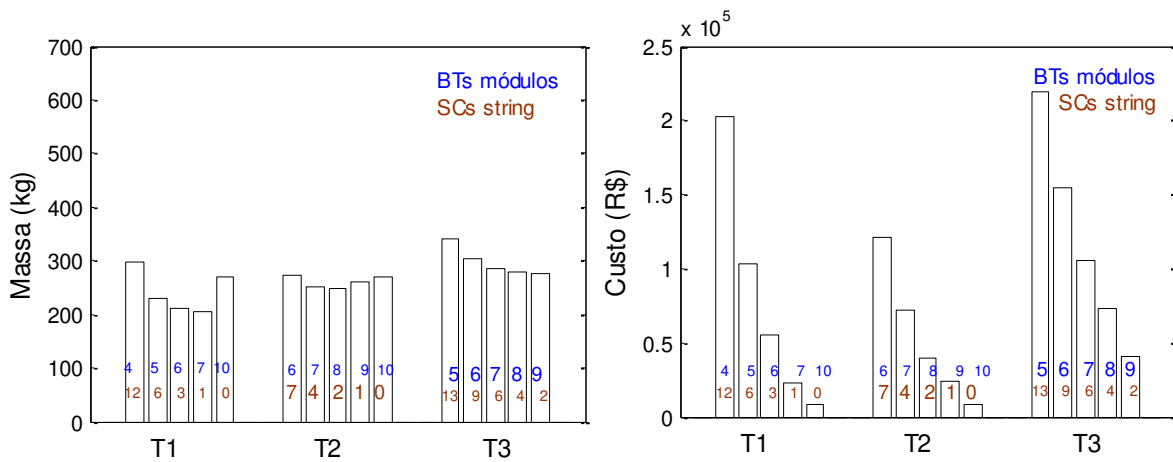


Figura 5.12 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT de Chumbo e SC de 58 F.

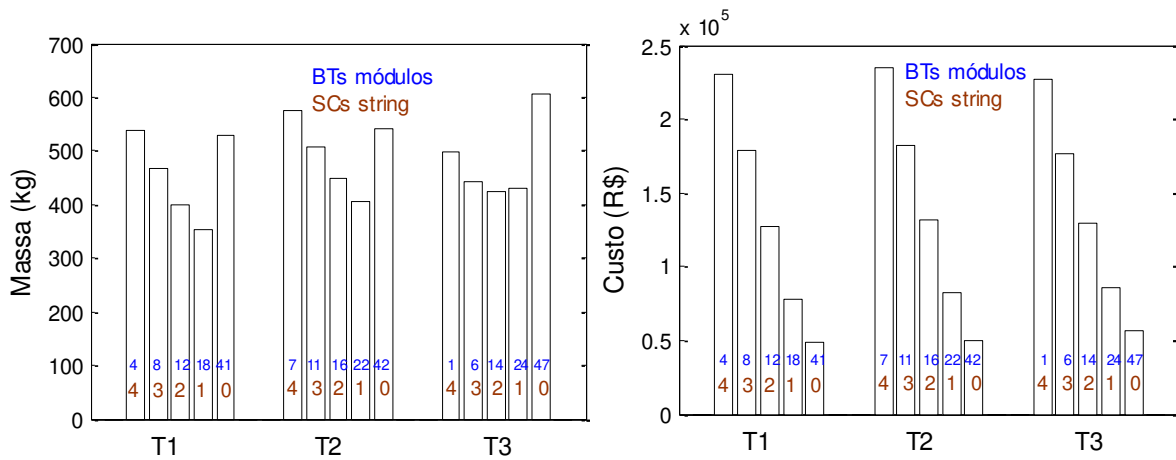


Figura 5.13 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT NiCd e SC de 165 F.

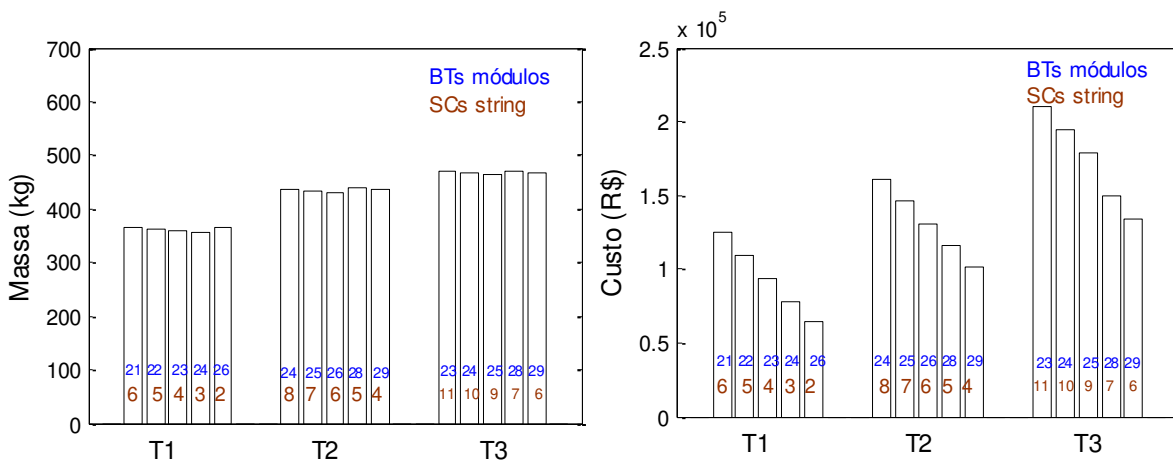


Figura 5.14 - Massa e custo das ESSs de V1 para a combinação BT de NiCd e SC de 58 F.



### 5.3.2 Dimensionamento da ESS do Veículo V2

Nas Figuras 5.15 a 5.20 são apresentados os resultados do dimensionamento e dos custos das possíveis ESSs híbridas do veículo V2 para cada período de tempo indicado na Figura 5.7.

Para o veículo V2 são consideradas as combinações encontradas no período T3 pela mesma razão justificada no dimensionamento da ESS do veículo V1. As combinações mais leves, em torno de 1.000 kg, estão entre as BTs íon de lítio e chumbo ácidas com os SCs de 58 e 165 F. A combinação de menor massa no período T3, e a escolhida para a ESS do veículo V2, tem 156 'strings' de BTs íon de lítio e 8 'strings' de SCs de 58 F. As de maior massa, e também de maior custo, são as combinações entre SCs e BTs NiCd.

As combinações com os menores custos para V2 estão ilustradas na Figura 5.17. A que apresenta menor custo no período T3 tem 31 'strings' de BTs chumbo ácidas e 1 'string' de SCs de 165 F.

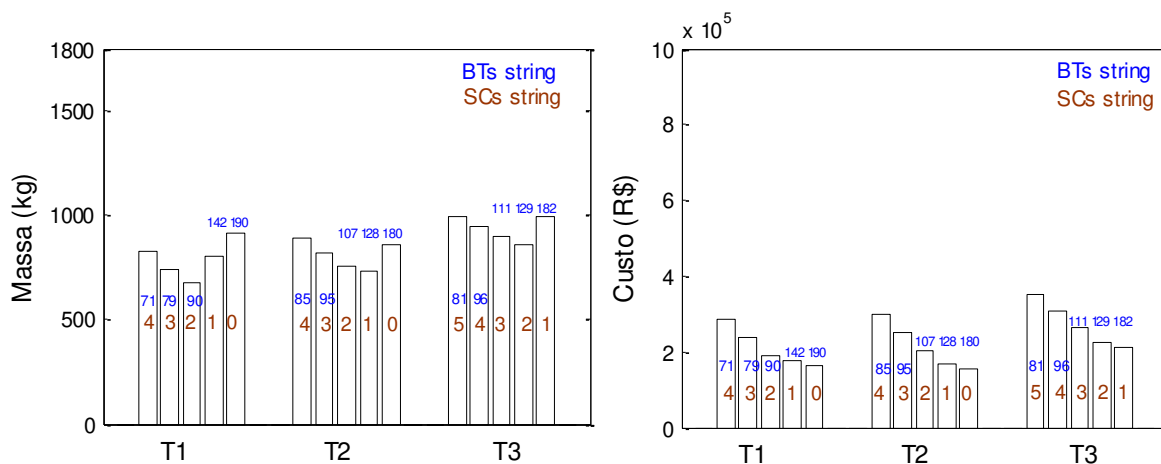


Figura 5.15 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de Lítio e SC de 165 F.

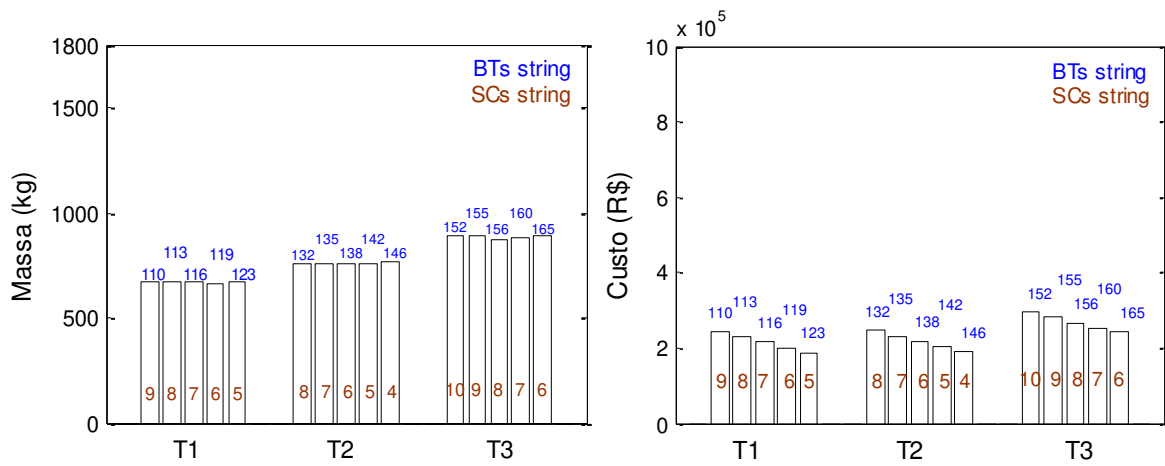


Figura 5.16 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de Lítio e SC de 58 F.

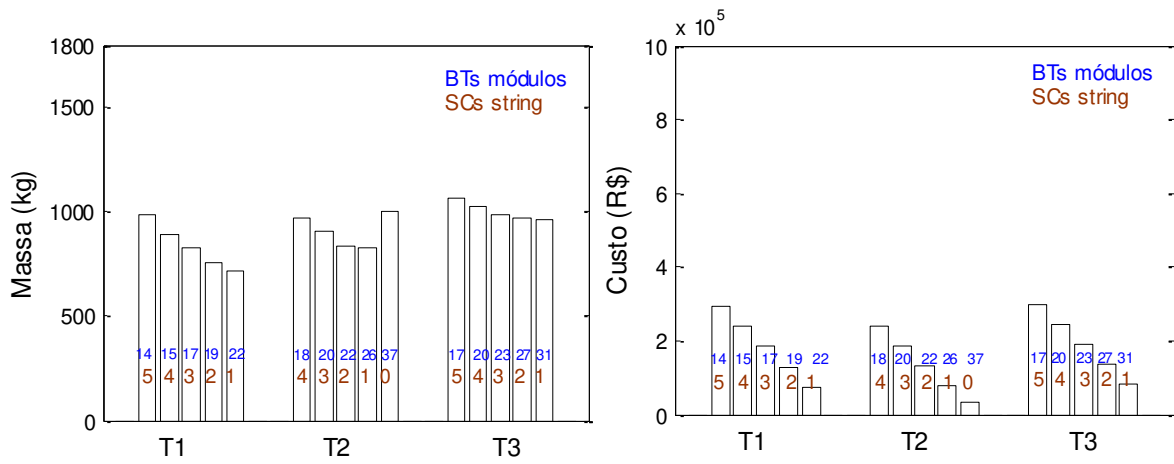


Figura 5.17 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de Chumbo e SC de 165 F.

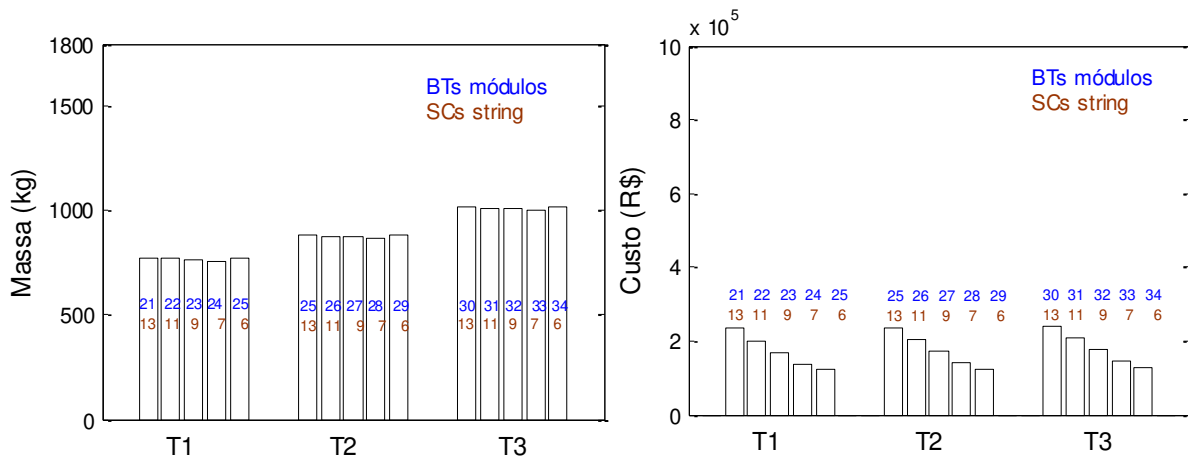


Figura 5.18 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de Chumbo e SC de 58 F.

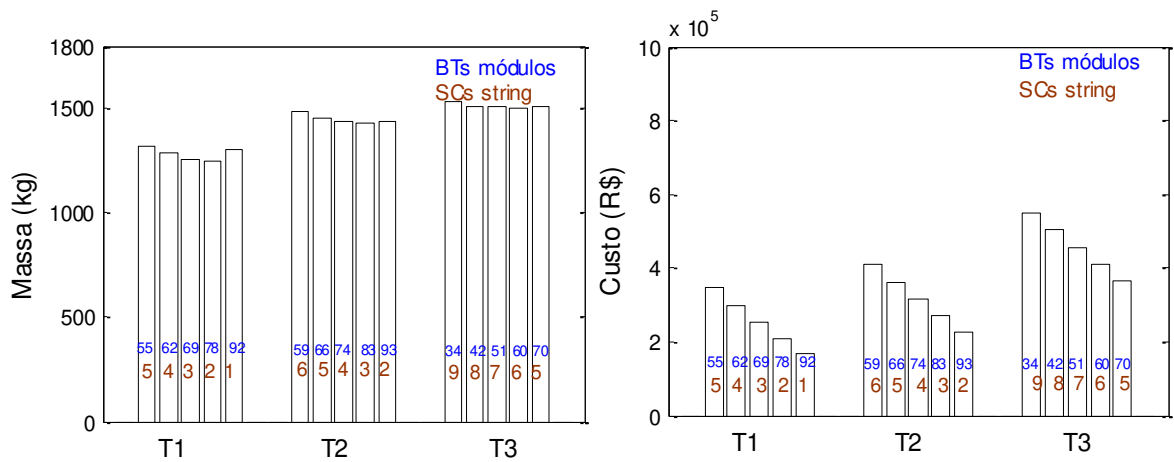


Figura 5.19 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de NiCd e SC de 165 F.

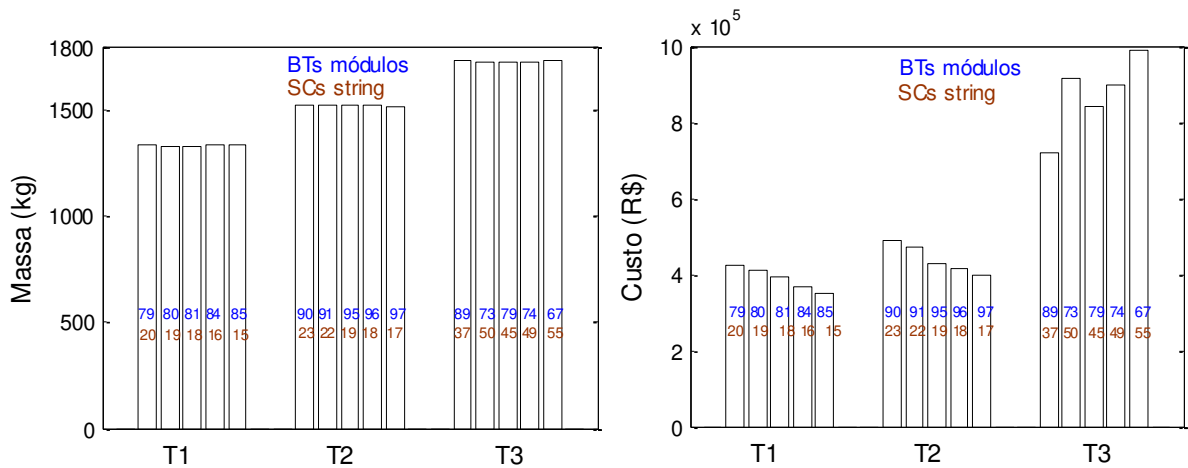


Figura 5.20 - Massa e custo das ESSs de V2 para a combinação BT de NiCd e SC de 58 F.

### 5.3.3 Dimensionamento da ESS do Veículo V3

Nas Figuras 5.21 e 5.22 são apresentados os resultados do dimensionamento e dos custos, respectivamente, das possíveis ESSs híbridas do veículo V3 para o período de tempo indicado na Figura 5.8.

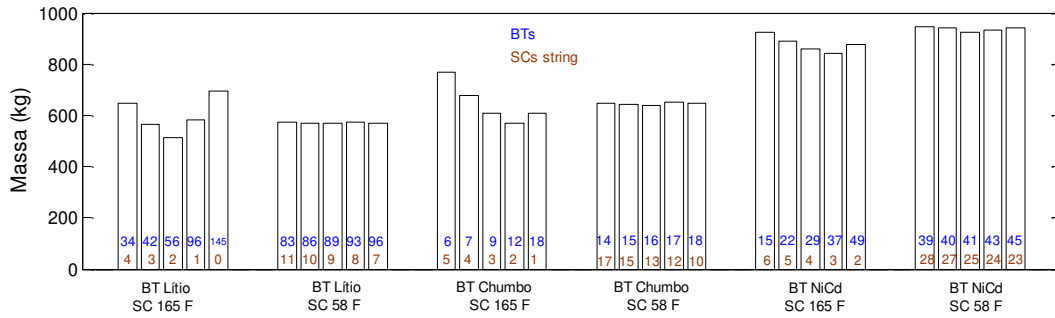


Figura 5.21 - Massa das ESSs de V3 de todas as combinações de BTs e SCs.

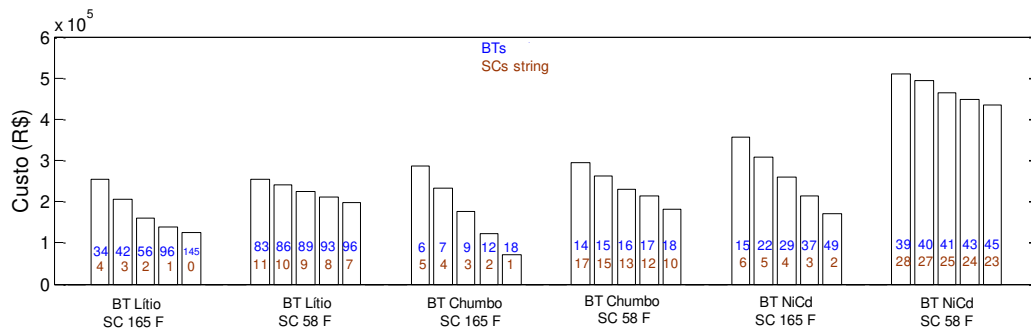


Figura 5.22 - Custo das ESSs de V3 de todas as combinações de BTs e SCs.

De acordo com a Figura 5.21, as combinações entre BTs íon de lítio e chumbo ácidas e SCs de 58 e 165 F apresentaram os menores valores de massa, em torno de 600 kg. Vale lembrar que o período de tempo T4 é o único considerado no dimensionamento da ESS do veículo V3. A combinação de menor massa, 511,8 kg, tem 56 ‘strings’ de BTs íon de lítio e 2 ‘strings’ de SCs de 165 F.

Nota-se também que o custo da ESS cai com a redução do número de ‘strings’ dos dois tipos de SCs. A combinação de fontes com menor custo tem 18 ‘strings’ de BTs chumbo ácidas e 1 ‘string’ de SC de 165 F.

#### 5.4 EGP Fundamentada em Regras

O objetivo da implantação desta EGP é o de verificar a atuação entre a ESS de menor massa e a fonte de autonomia no fornecimento contínuo de toda a potência requerida pelo veículo. A EGP gerencia o fluxo de potências entre a ESS e a fonte de autonomia de forma que a potência requerida pelo veículo em um determinado ciclo de velocidade seja satisfeita. A EGP

apresentada nesta seção é fundamentada em regras e apresenta os seguintes princípios básicos:

- a potência fornecida pela fonte de autonomia é igual ao valor da potência média requerida nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 para os veículos V1, V2 e V3, respectivamente.
- o acionamento da fonte de autonomia é fundamentado no controle do tipo 'liga-desliga' ou 'on-off'. Neste tipo de controle, ou a fonte de autonomia fornece potência constante ou está desligada. O acionamento da fonte de autonomia acontece da seguinte forma: a fonte de autonomia é acionada quando a potência máxima da bateria é alcançada e permanece ligada, fornecendo potência para a recarga da BT e/ou para a propulsão do veículo até que o  $SoC_{BTmax}$  seja alcançado. Uma vez alcançado o valor de  $SoC_{BTmax}$ , a fonte de autonomia é desligada, e somente a ESS fornece potência ao veículo. A fonte de autonomia é novamente acionada quando o valor da potência requerida da bateria é igual à  $P_{BTmax}$ . Nos ciclos de condução NYCC e HWFET, a máxima potência requerida é inferior à  $P_{BTmax}$ . Nestes casos, a fonte de autonomia é acionada em função do valor mínimo de  $SoC_{BT}$  igual a 0,9;
- o SC deve ser mantido, aproximadamente, em meia carga ( $V_{t\text{tg}} \cong 330 \text{ V}$ ), com capacidade de fornecer ou regenerar potências abruptas protegendo a BT de altas correntes de descarga e recarga; e
- o SC é recarregado apenas pela frenagem regenerativa.

As quantidades limitantes da EGP são a potência máxima,  $P_{BTmax}$  (expressão (5.3)) que a bateria pode fornecer, a potência requerida do veículo e a tensão terminal do SC.

As regras derivadas para a EGP estão representadas nos dois planos cartesianos da Figura 5.23. A Figura 5.23 (a) é referente às regras com a fonte de autonomia desligada e a Figura 5.23 (b) é referente às regras com a fonte de autonomia ligada.

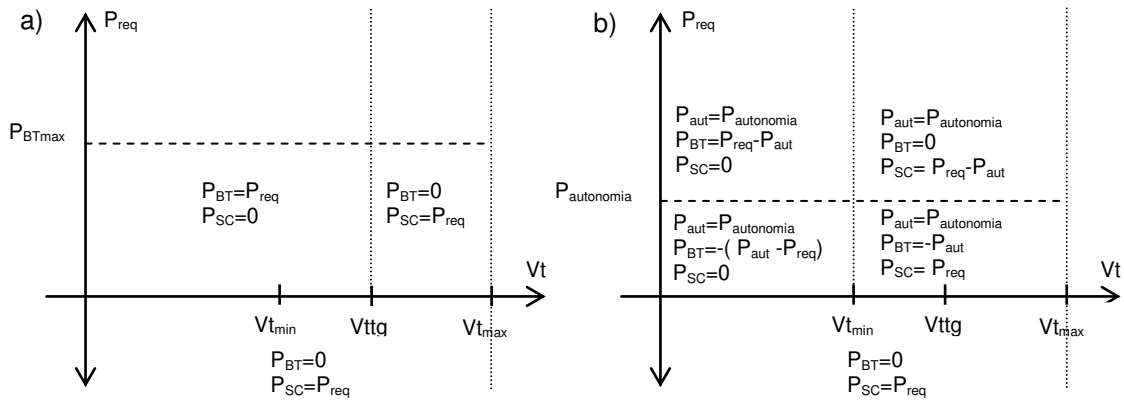


Figura 5.23 - EGP fundamentada em regras.

Os resultados da aplicação desta EGP aos três tipos de veículos são apresentados nas subsecções 5.4.1 a 5.4.3.

As simulações foram obtidas: (i) para as combinações de fontes de menor massa da seção anterior; (ii) com os bancos de BTs e SCs inicialmente carregados e (iii) para dez repetições de cada ciclo de condução empregado no dimensionamento das respectivas ESSs dos veículos V1, V2 e V3.

#### 5.4.1 EGP Fundamentada em Regras para o Veículo V1

A Figura 5.24 mostra o processo de descarga da ESS de menor massa – 42 ‘strings’ de BTs íon de lítio e 2 ‘strings’ de SCs de 58 F – do veículo V1 dimensionada para o período de tempo T3. Observa-se que as restrições operacionais da BT e do SC não foram violadas: a tensão mínima do SC é de 250 V e o estado de carga da BT é maior que 0,6.

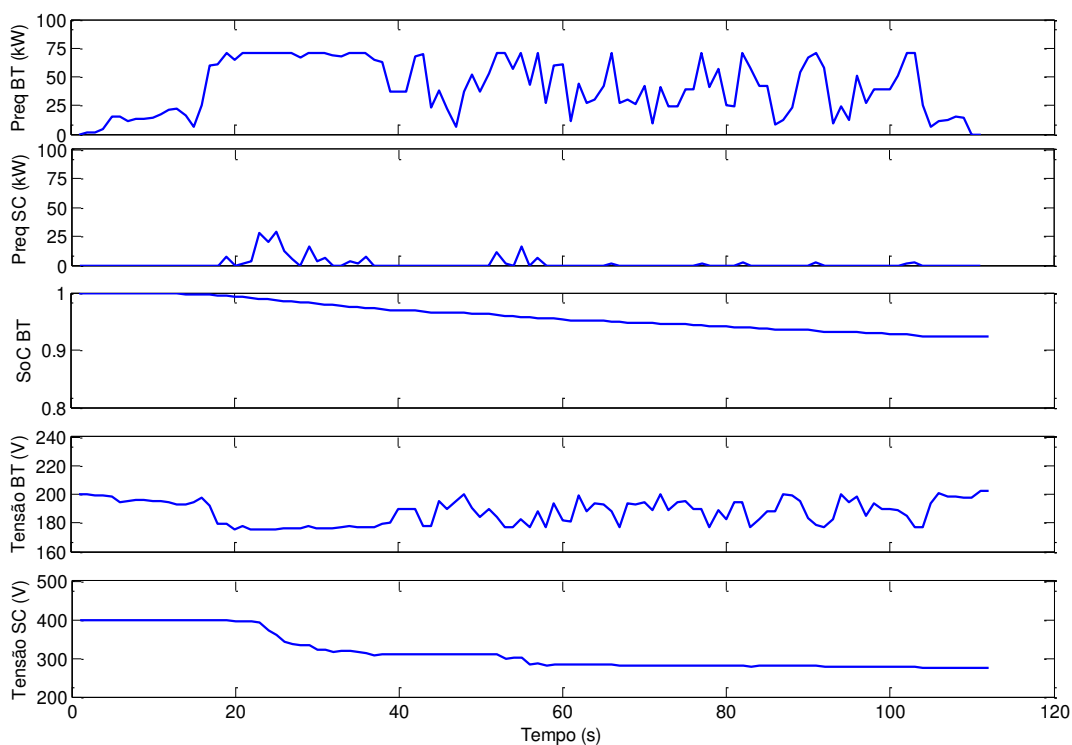


Figura 5.24 - De cima para baixo, potência requerida da BT, potência requerida do SC, estado de carga da BT, tensão da BT e tensão do SC para o período T3 do veículo V1.

A potência fornecida pela fonte de autonomia é igual à potência média de 33 kW do perfil da Figura 5.6. De acordo com a seção 5.4, a fonte de autonomia é acionada quando a potência máxima da BT é alcançada. Este valor de potência segue a expressão (5.3) e é igual a 70,56 kW. Nos ciclos NYCC e HWFET esse valor não é alcançado. Nestes casos a fonte de autonomia é acionada em função do valor mínimo de  $SoC_{BT}$  igual a 0,9.

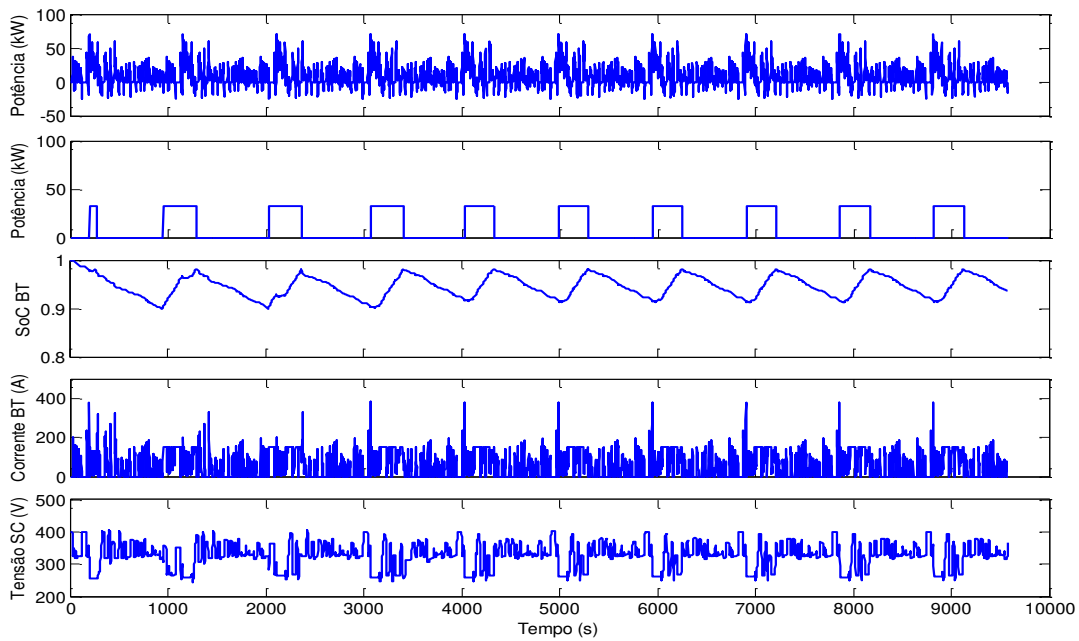


Figura 5.25 - Potência requerida no ciclo UDDS, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.

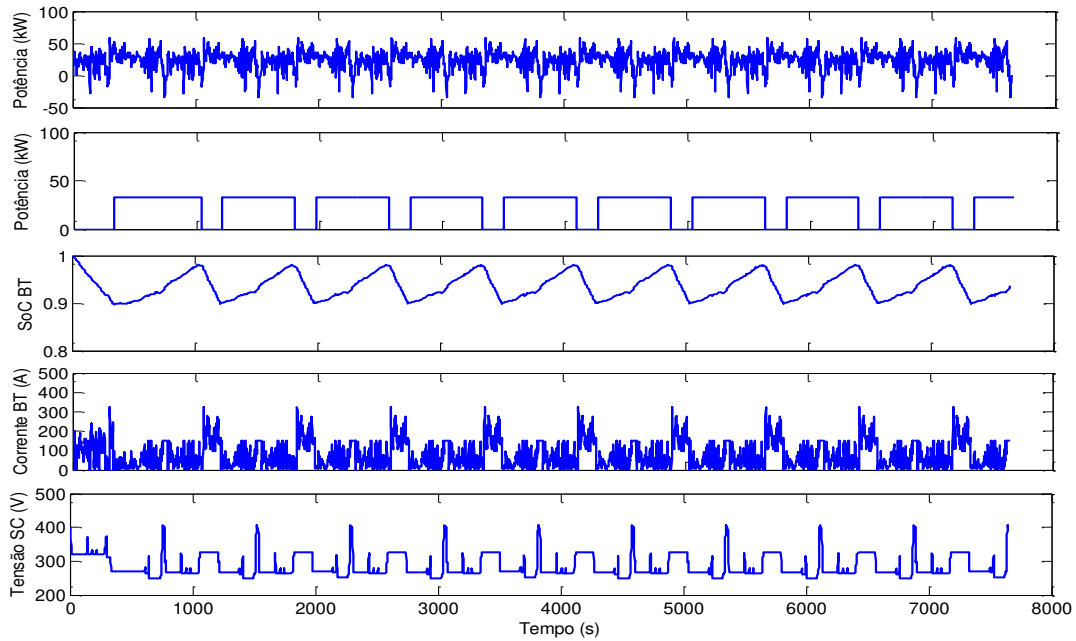


Figura 5.26 - Potência requerida no ciclo HWFET, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.



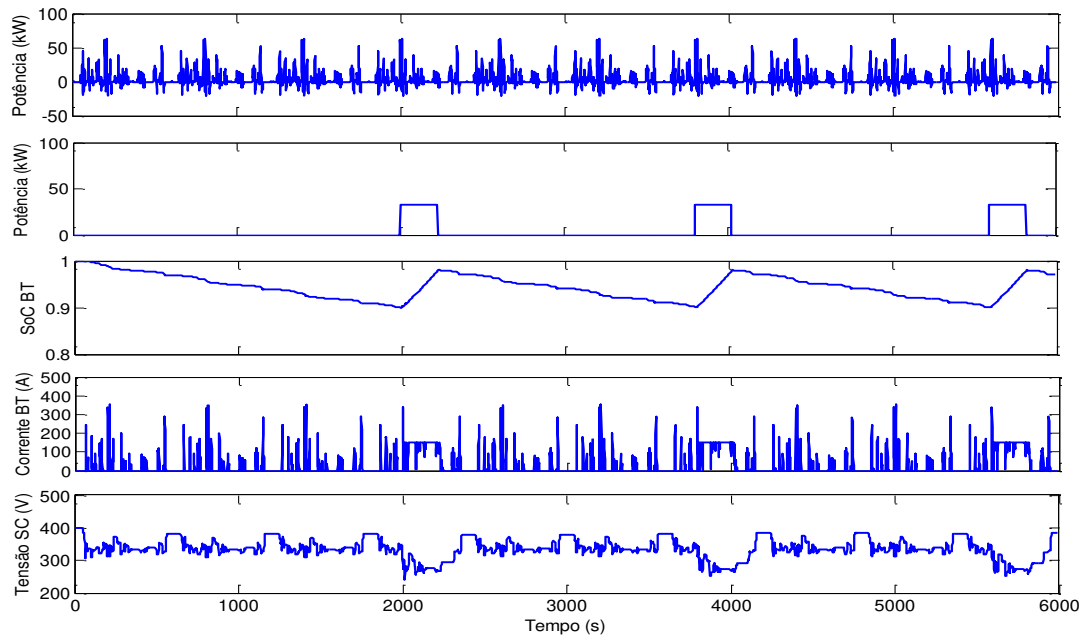


Figura 5.27 - Potência requerida no ciclo NYCC, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.

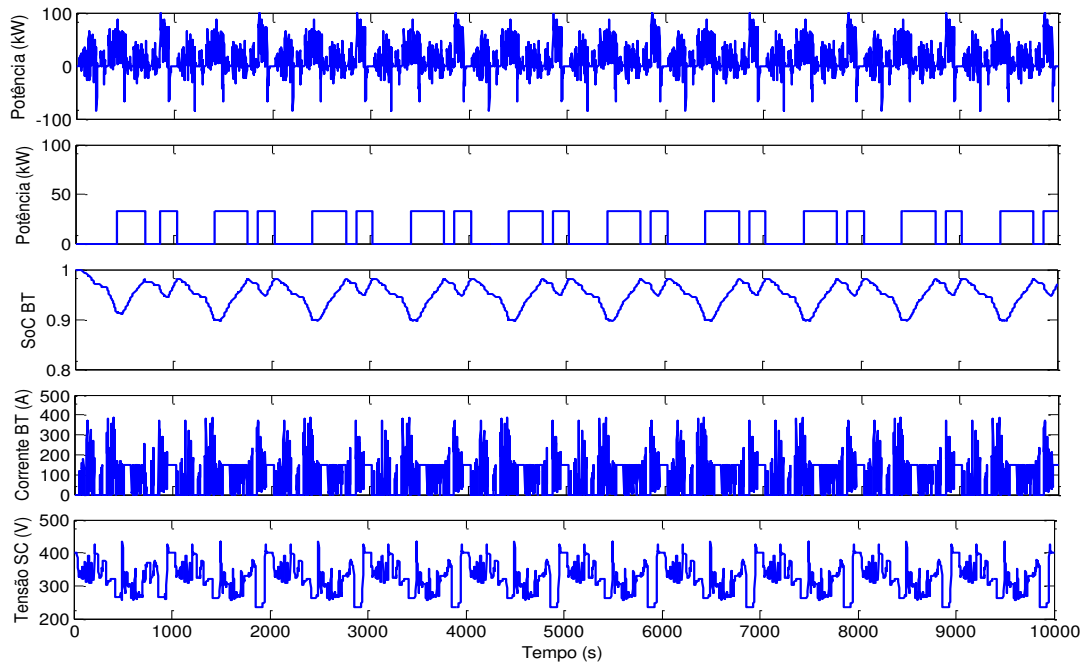


Figura 5.28 - Potência requerida no ciclo LA92Short, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.

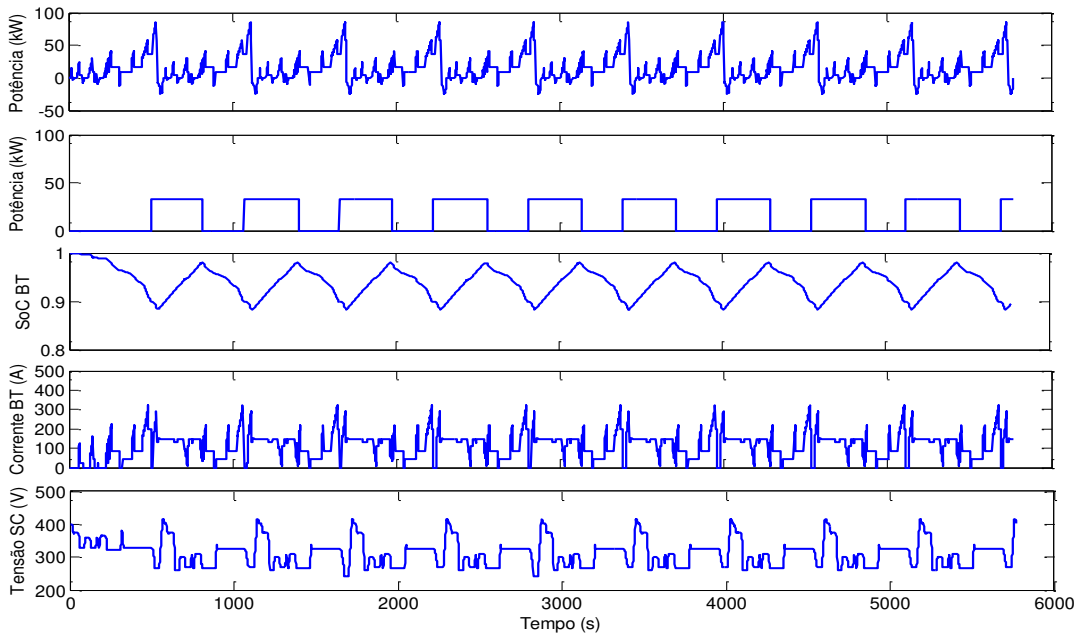


Figura 5.29 - Potência requerida no ciclo ECEEUDC, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V1.

A partir dos resultados do gerenciamento de potências fundamentado em regras das fontes de energia do veículo V1, em relação ao ciclo de condução UDDS, observa-se que o menor tempo de atuação da fonte de autonomia, de 197 a 266 segundos, é de 69 segundos. Esse intervalo de tempo pode ser aumentado para valores iniciais de  $SoC_{BT}$  menores do que 1. Os outros períodos de acionamento da fonte de autonomia têm duração em torno de 5 minutos, e permanecendo desativada por aproximadamente onze minutos no período subsequente.

Para o ciclo de condução HWFET, o tempo aproximado de atuação da fonte de autonomia, quando acionada, é de 10 minutos. Esse aumento no tempo deve-se ao fato do ciclo HWFET apresentar maior demanda de potência que o ciclo UDDS, exigindo assim que a fonte de autonomia tenha uma participação maior no fornecimento de potência. Como ilustrado na Figura 5.1, o HWFET é um ciclo que retrata condição de direção em autoestrada, requerendo a maior parte do tempo velocidades em torno de 100 km/h. Devido a esta característica, este ciclo exige maior participação da fonte de autonomia em relação aos demais ciclos, pois é o que apresenta maior valor de potência requerida média igual a 24 kW.

Observa-se, também, que para todos os ciclos de condução, a fonte de autonomia apresentou comportamento de “liga-desliga”. A potência nominal desta fonte é igual à potência

média (de 33 kW) do envelope de potências da Figura 5.6. Este valor é maior que as potências médias individuais de cada ciclo de condução. Por este motivo, a fonte de autonomia não precisa fornecer potência em tempo integral, pois quando acionada fornece potência acima do valor médio de cada ciclo de condução.

A potência máxima do ciclo de condução NYCC é inferior à potência máxima que o banco de BTs pode disponibilizar. Por esse motivo, o acionamento da fonte de autonomia é imposta sobre o valor de  $SoC_{BT}$ . Observa-se que, quando acionada, a fonte de autonomia opera em torno de 4 minutos permanecendo em média 25 minutos desligada. Na prática, esse tempo de atuação pode ser aumentado pela redução do valor de  $SoC_{BT}$ . Quanto menor o valor de  $SoC_{BTmin}$ , mais tempo a fonte de autonomia permanecerá acionada fornecendo potência para o sistema de tração do veículo e para a recarga do banco de BTs. Porém, a fim de se observar a atuação de todas as fontes no intervalo de tempo da Figura 5.27, assume-se que o valor de  $SoC_{BTmin}$  é igual a 0,9.

Os ciclos que apresentam os maiores valores de potência máxima requerida, em torno de 100 kW, são o LA92Short e o ECEEUDC. Porém, o tempo de atuação da fonte de autonomia neste último é menor, pois a sua potência média é também menor em relação ao ciclo LA92Short.

Nas Figuras 5.25 a 5.29 observa-se que o valor mínimo do estado de carga das BTs permaneceu em torno de 0,9. Nos ciclos HWFET e NYCC a fonte de autonomia (e consequente recarga das BTs) foi acionada para  $SoC_{BT}$  igual a 0,9. Nos demais ciclos, a potência máxima requerida das BTs coincidiu com o estado de carga mínimo alcançado de 0,9. O número de repetições (dez vezes) de cada ciclo de condução foi suficiente para mostrar a eficiência da metodologia de dimensionamento da ESS.

#### **5.4.2 EGP Fundamentada em Regras para o Veículo V2**

A Figura 5.30 mostra o processo de descarga da ESS de menor massa – 156 ‘strings’ de BTs íon de lítio e 8 ‘strings’ de SCs de 58 F – do veículo V2 dimensionada para o período de tempo T3. Observa-se que as restrições operacionais da BT e do SC não foram violadas: a tensão mínima do SC é de 250 V e o estado de carga da BT é maior que 0,6.

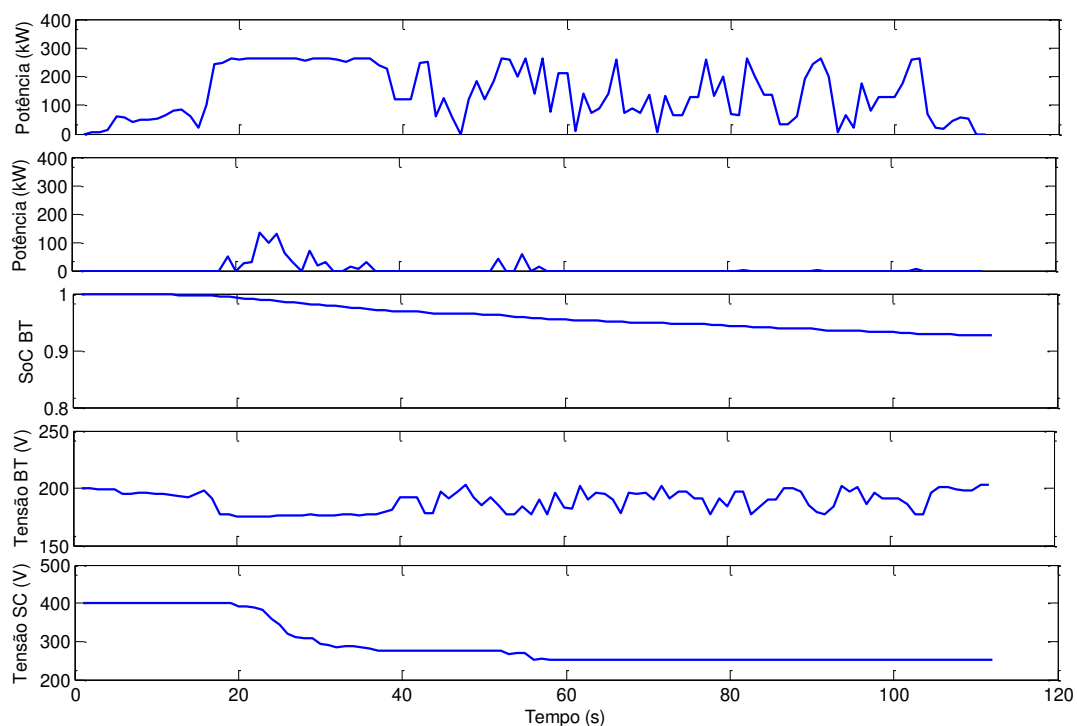


Figura 5.30 - De cima para baixo, potência requerida da BT, potência requerida do SC, estado de carga da BT, tensão da BT e tensão do SC para o período T3 do veículo V2.

A potência máxima que pode ser fornecida pela fonte de autonomia é igual à potência média de 119 kW do perfil de potência da Figura 5.7. O valor da potência máxima que a BT pode fornecer segue a expressão (5.3), e é igual a 262 kW. Como nos ciclos NYCC e HWFET, a máxima potência requerida não alcança este valor. Nestes casos, a fonte de autonomia é acionada para  $SoC_{BT}$  igual a 0,9.

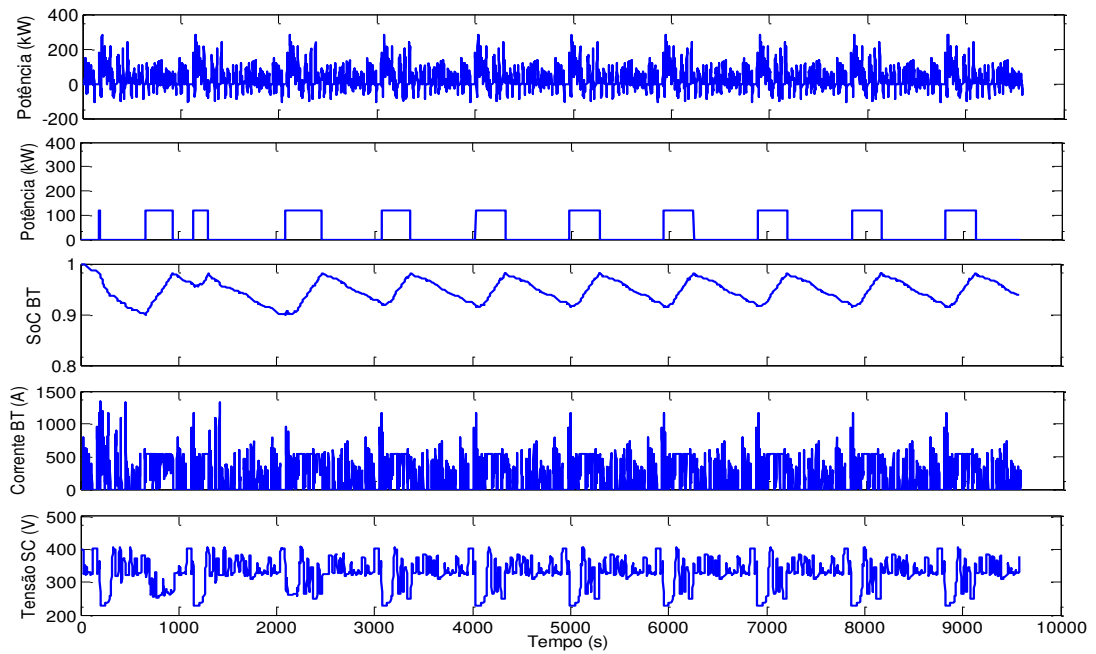


Figura 5.31 - Potência requerida no ciclo UDDS, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.

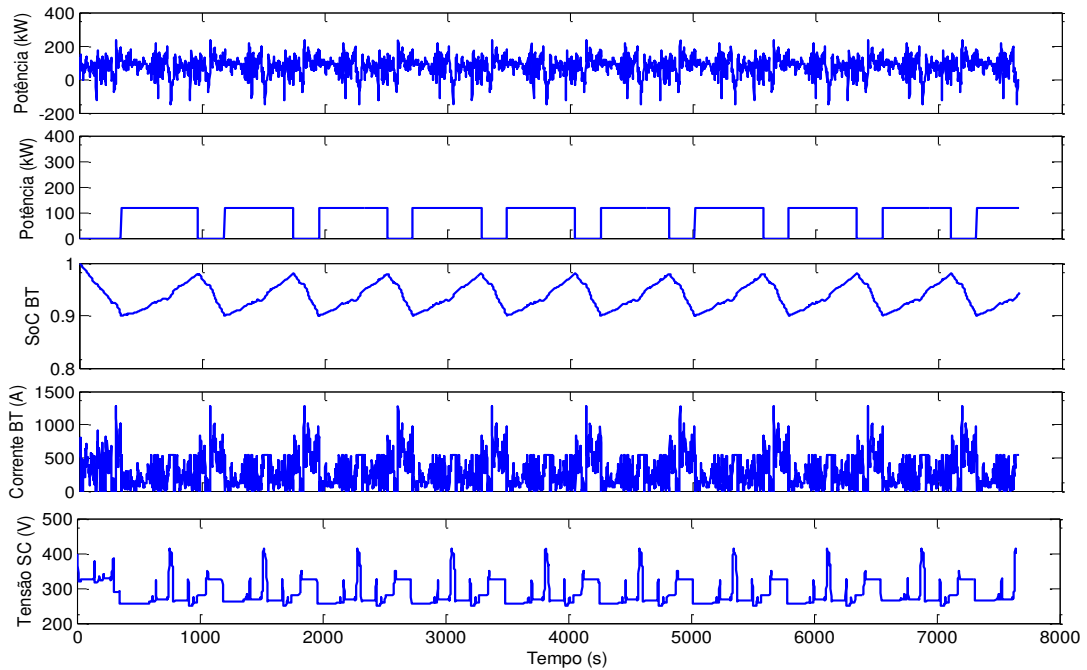


Figura 5.32 - Potência requerida no ciclo HWFET, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.

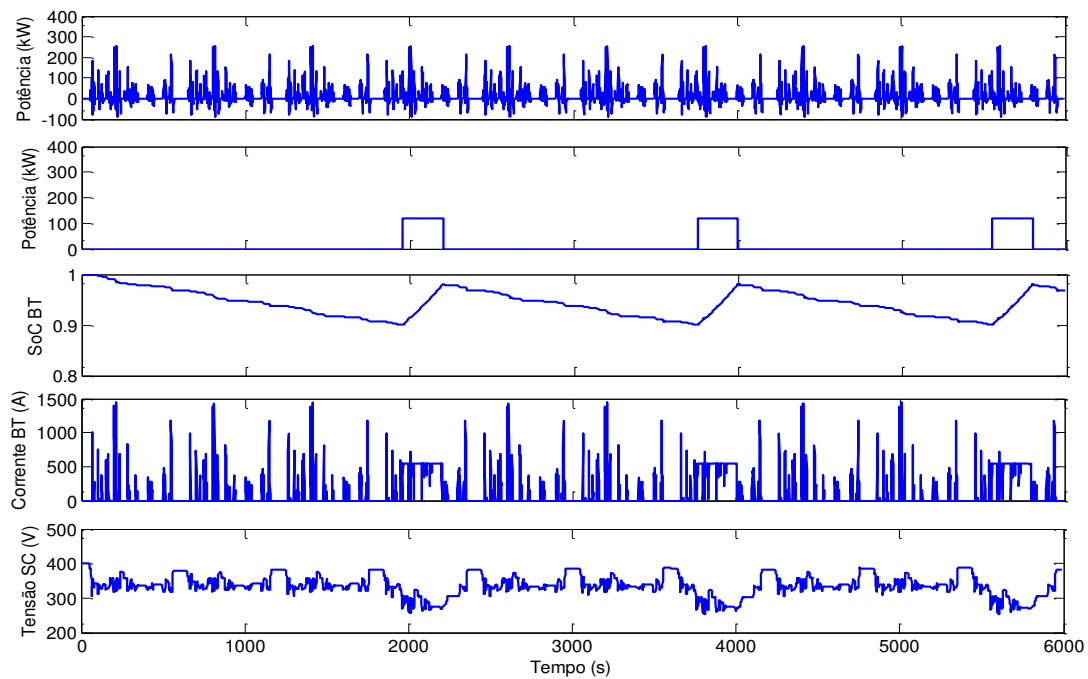


Figura 5.33 - Potência requerida no ciclo NYCC, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.

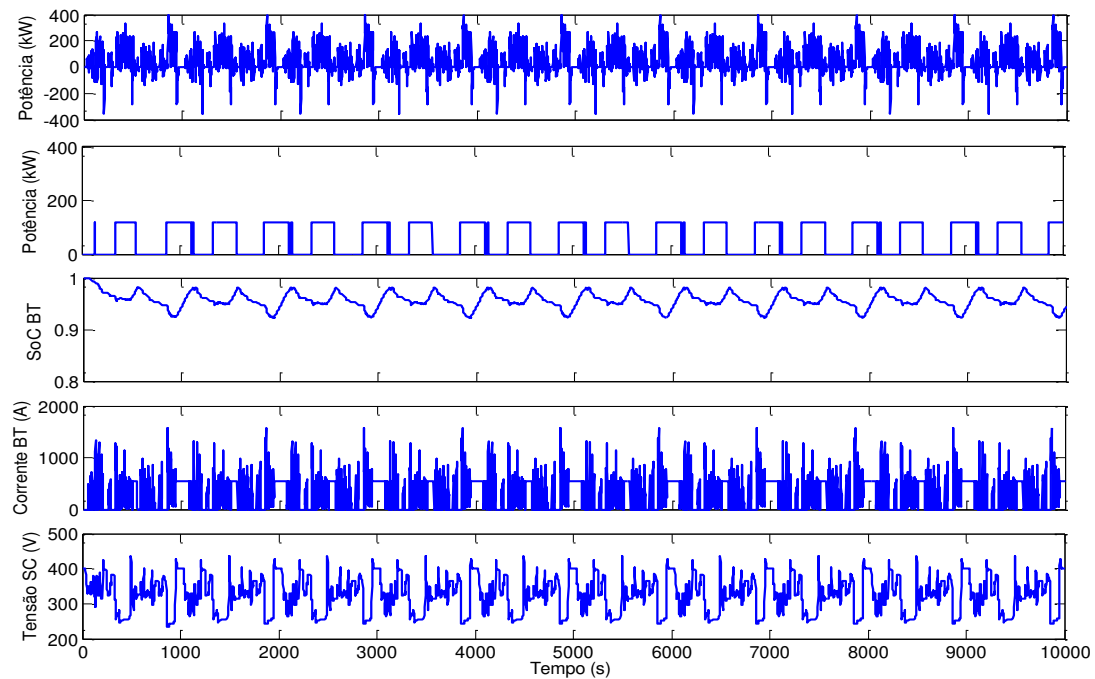


Figura 5.34 - Potência requerida no ciclo LA92Short, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.

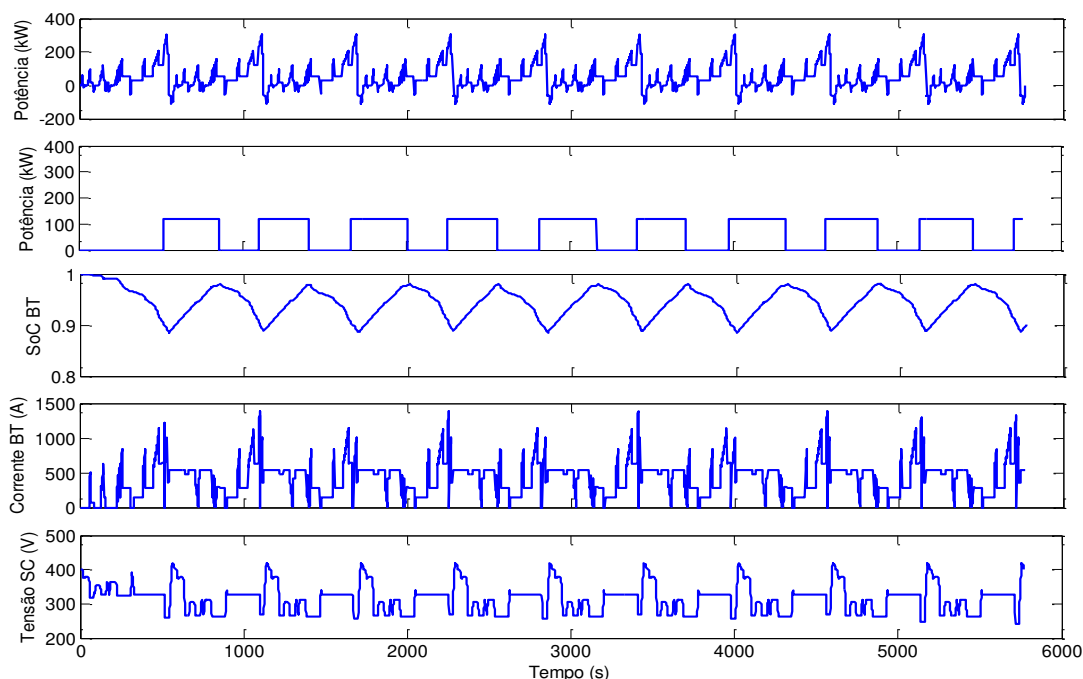


Figura 5.35 - Potência requerida no ciclo ECEUUDC, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V2.

Observa-se que os resultados obtidos com o emprego da EGP no veículo V2 são similares aos apresentados pelas fontes do veículo V1. Esta similaridade pode ser vista na duração dos períodos de atuação da fonte de autonomia, na variação do estado de carga das BTs e na variação da tensão dos SCs.

Como indicado na Tabela 3.1, a massa de V2 é quase quatro vezes maior que a massa do veículo V1. Portanto, a potência requerida por V2 nos ciclos de condução, calculada pela expressão (3.1), também é quase quatro vezes maior que a requerida por V1. Apesar da grande diferença entre os valores de potência requerida, a metodologia de dimensionamento deu origem a resultados equivalentes, em relação ao tempo de atuação das fontes, para os dois veículos.

Na Figura 5.34, a fonte de autonomia apresenta vários períodos consecutivos de 15 segundos desligada e 15 segundos ligada. Esse comportamento pode ser explicado pela regra da EGP que aciona a fonte de autonomia quando  $P_{req}$  é igual à  $P_{BTmax}$  e pela regra que desliga a fonte quando  $SoC_{BTmax}$  é alcançado.

Vale lembrar que a mesma EGP e as mesmas condições iniciais das fontes são aplicadas aos veículos V1 e V2 em todos os ciclos de condução. O que muda são as quantidades limitantes da EGP: potência máxima da BT e a potência nominal da fonte de autonomia.

### 5.4.3 EGP Fundamentada em Regras para o Veículo V3

A Figura 5.36 mostra o processo de descarga da ESS de menor massa – 56 ‘strings’ de BTs íon de lítio e 2 ‘strings’ de SCs de 165 F – do veículo V3, dimensionada para o período de tempo T4 da Figura 5.8. Observa-se que as restrições operacionais da BT e do SC não foram violadas: a tensão mínima do SC é de 250 V e o estado de carga da BT é maior que 0,6.

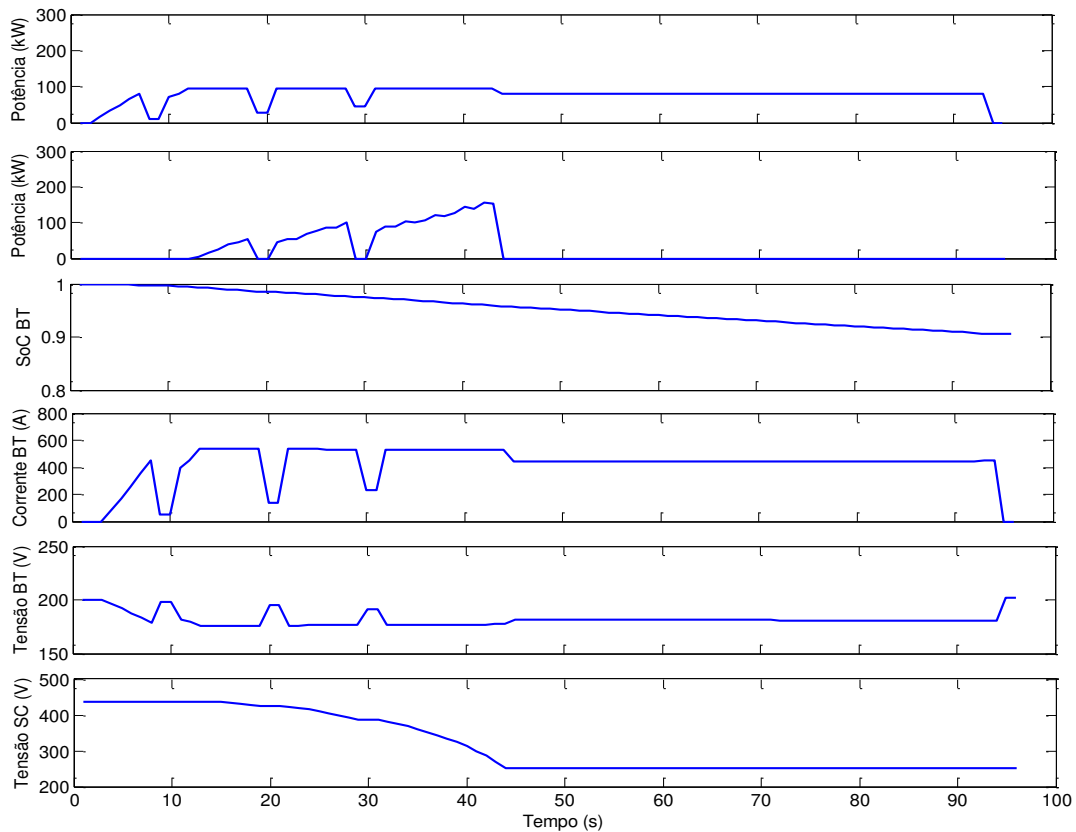


Figura 5.36 - De cima para baixo, potência requerida da BT, potência requerida do SC, estado de carga da BT, tensão da BT e tensão do SC para período T4 do veículo V3.

A potência máxima que a fonte de autonomia pode fornecer é igual à potência média, 48,2 kW, do perfil da Figura 5.8. O valor da potência máxima que a BT pode fornecer segue a expressão (5.3) e é igual a 94,08 kW.



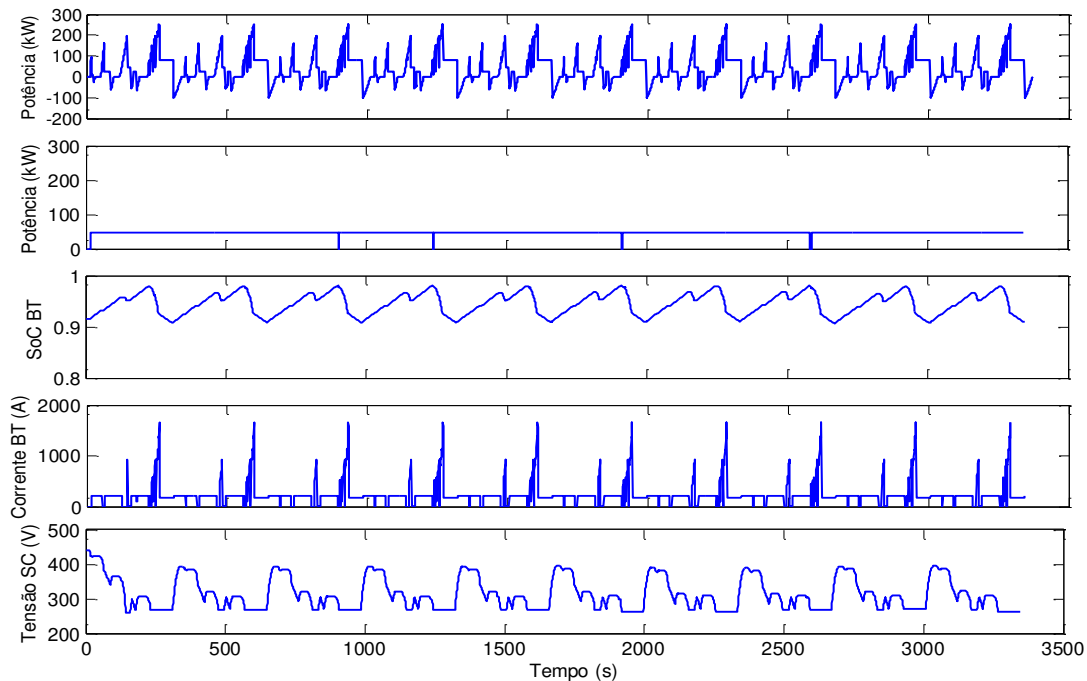


Figura 5.37 - Potência requerida no ciclo da Figura 5.2, potência da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para o veículo V3.

Na Figura 5.37 o estado de carga inicial é menor que 1 a fim de evitar sucessivas situações de liga e desliga em curtos períodos de tempo (de 1 a 2 segundos) da fonte de autonomia. A tensão terminal inicial dos SCs é de 440 V, este valor corresponde à tensão dos nove SCs de 165 F, com 48,6 V cada, conectados em série.

Observa-se que a fonte de autonomia permanece acionada ao longo do tempo das dez repetições do ciclo de condução da Figura 5.2. Esse comportamento já era previsto, visto que a potência nominal da fonte de autonomia é igual ao valor da potência média requerida pelo único perfil de potência (Figura 5.8) considerado no dimensionamento da ESS do veículo V3. Nos resultados verificados para os veículos V1 e V2, a potência da fonte de autonomia foi definida pela média do envelope de potência de vários perfis, que é maior que a média da potência de cada perfil individual.

Para o veículo V3, a ESS dimensionada pela metodologia proposta também mostrou desempenho satisfatório, como ilustrado na Figura 5.37, quanto ao fornecimento da potência requerida pelo sistema de tração.

## 5.5 EGP Fundamentada em Otimização não Linear

Esta seção tem a intenção de mostrar que o dimensionamento da seção 0 pode ser seguido pelo emprego de uma EGP também fundamentada em Otimização não Linear, no lugar do emprego da EGP fundamentada em regras da seção anterior. Pretende-se verificar se a atuação da fonte de autonomia pode ser minimizada, reduzindo-se assim o consumo de combustível.

A EGP fundamentada em Otimização não Linear do artigo (Lopes, et al., 2010) é responsável pelo gerenciamento de potências entre uma unidade MCI/gerador (fonte de autonomia) e um banco de BTs chumbo ácidas. Este artigo forneceu as bases para a elaboração da presente EGP, também fundamentada em Otimização não Linear, que gerencia a fonte de autonomia, as BTs e os SCs. Assim como em (Lopes, et al., 2010), o objetivo desta EGP é a minimização do consumo de combustível da fonte de autonomia. Este objetivo é entendido como a minimização da energia líquida consumida pela fonte de autonomia no intervalo de tempo analisado. Assim, a energia líquida consumida pela fonte de autonomia no instante de tempo  $t$  é

$$E_{\text{autonomia}}(t) = \int_0^t P_{\text{autonomia}}(\tau) d\tau. \quad (5.7)$$

As restrições do problema de otimização estão:

- na equação de balanço de potências, que assegura que a soma das potências da ESS e da fonte de autonomia seja igual à potência requerida pelo veículo:

$$P_{\text{ESS}}(t) + P_{\text{autonomia}}(t) = P_{\text{req}}(t), \quad (5.8)$$

- na limitação da potência fornecida pela fonte de autonomia entre o valor máximo  $P_{\text{aut\_max}}$  e o valor mínimo igual a zero, pois esta fonte não pode ser recarregada pela ESS ou pela frenagem:

$$P_{\text{aut\_max}} \geq P_{\text{autonomia}}(t) \geq 0, \quad (5.9)$$

- nos valores máximos e mínimos de potência da BT e potência do SC. Assim como nas expressões (5.3), a potência disponível é dada em função dos máximos coeficientes de potências específicas das BTs e dos SCs. O valor mínimo de potência é referente à máxima potência de recarga da BT,  $P_{\text{BTmin}}$ , e do SC,  $P_{\text{SCmin}}$ . Para a BT,

$P_{BTmin}$  é igual à potência máxima que a fonte de autonomia pode fornecer; para o SC,  $P_{SCmin}$  é igual à potência máxima proveniente da frenagem regenerativa:

$$-P_{aut\_max} = P_{BTmin} \leq P_{BT} \leq \rho_{BTmax} \cdot n_{BT} \cdot m_{BT} = P_{BTmax}, \quad (5.10)$$

$$P_{SCmin} \leq P_{SC} \leq \rho_{SCmax} \cdot n_{SC} \cdot m_{SC} = P_{SCmax},$$

- restrições sobre a tensão terminal dos SCs e sobre o estado de carga das BTs, expressões (5.4) e (5.5).

Assim, a EGP, vista como um problema de otimização, pode ser colocada da seguinte forma: encontrar  $P_{autonomia}(t)$  que minimize a função objetivo

$$V[P_{autonomia}(t)] = \int_0^T P_{autonomia}(t) dt, \quad (5.11)$$

sujeita às restrições (5.4), (5.5), (5.8), (5.9) e (5.10). Este problema também foi resolvido pelo emprego da mesma técnica de otimização usada no dimensionamento da seção 0.

As variáveis do problema são as potências alocadas para a BT, o SC e a fonte de autonomia. Os resultados da aplicação desta EGP aos três tipos de veículos são apresentados nas subseções 5.5.1 a 5.5.3. As configurações de ESSs dos três tipos de veículos são as mesmas da seção anterior. Os perfis de potência da fonte de autonomia, da BT e do SC obtidos com o emprego da EGP fundamentada em regras foram utilizados como pontos de inicialização para a rotina de otimização.

Para os veículos V1 e V2, os ciclos de condução escolhidos são o LA92Short e o ECEEUDC. Como os ciclos LA92Short e ECEEUDC tem 970 e 600 segundos de duração, respectivamente, trabalhará-se com um número de variáveis total igual a três vezes o tamanho desses ciclos. Devido a esse grande número de variáveis as simulações foram inviabilizadas pelos recursos computacionais disponíveis. Por esse motivo, a EGP não é empregada no ciclo inteiro, mas sim em determinados períodos dos ciclos nos quais há atuação da fonte de autonomia.

### 5.5.1 EGP Ótima para o Veículo V1

A ESS deste veículo é constituída por 42 ‘strings’ de BTs íon de lítio e 2 ‘strings’ de SCs de 58 F. O período de tempo selecionado para os valores iniciais das variáveis representadas pelas potências do ciclo de velocidade LA92Short é o de 2.500 a 2.650 segundos, Figura 5.28,

e do ciclo de velocidade ECEEUDC, de 1.050 a 1.200 segundos, Figura 5.29. As Figuras 5.38 e 5.39 mostram o comportamento temporal das fontes, nos períodos citados acima, produzido pelo gerenciamento ótimo nos ciclos LA92Short e ECEEUDC, respectivamente.

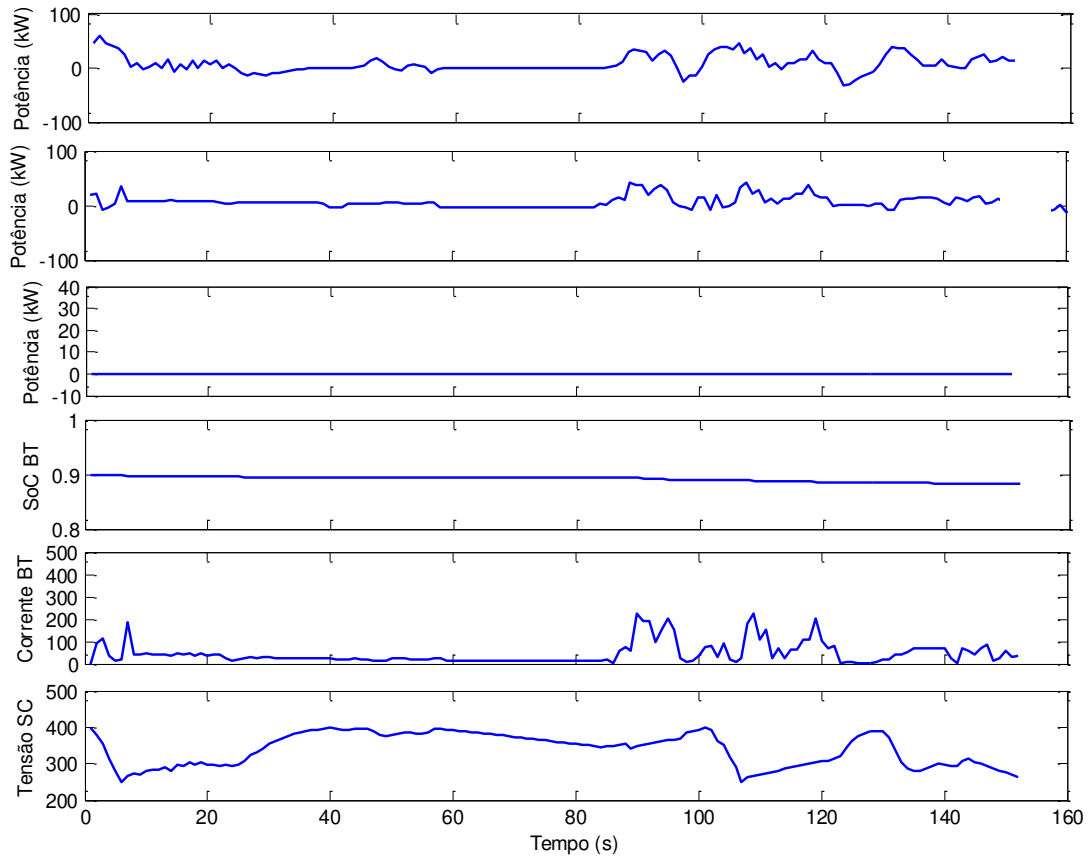


Figura 5.38 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo LA92Short, da BT, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V1.

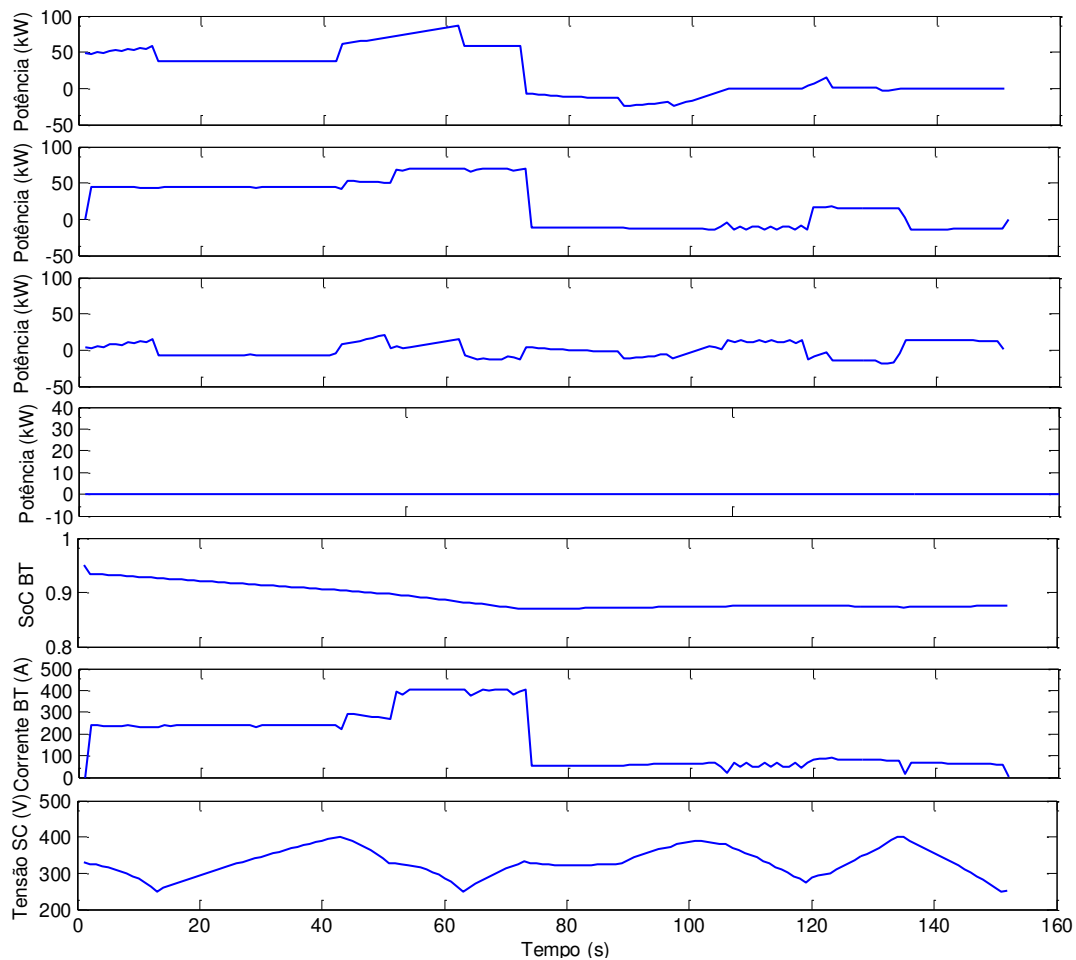


Figura 5.39 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo ECEEUDC, da BT, do SC, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V1.

Nas Figuras 5.38 e 5.39 observa-se que a potência máxima de 70,56 kW que o banco de BTs pode fornecer não foi excedido; não houve participação da fonte de autonomia no fornecimento de potência requerida pelo veículo; o estado de carga do banco de BTs está entre os limites 0,6 e 1; a tensão do banco de SCs permaneceu entre os valores máximo de 400 V e mínimo de 250 V. Ou seja, todos os resultados obtidos com o emprego da EGP fundamentada em Otimização não Linear estão dentro dos limites especificados para as grandezas em análise.

### 5.5.2 EGP Ótima para o Veículo V2

A ESS deste veículo é constituída por 156 ‘strings’ de BTs íon de lítio e 8 ‘strings’ de SCs de 58 F. O período de tempo selecionado para os valores iniciais das variáveis representadas pelas potências do ciclo de velocidade LA92Short é o de 900 a 1.050 segundos, Figura 5.34, e do ciclo de velocidade ECEEUDC, de 1.100 a 1.250 segundos, **Erro! Fonte de referência não encontrada..** As Figuras 5.40 e 5.41 mostram o comportamento temporal das fontes, nos períodos citados acima, produzido pelo gerenciamento ótimo nos ciclos LA92Short e ECEEUDC, respectivamente.

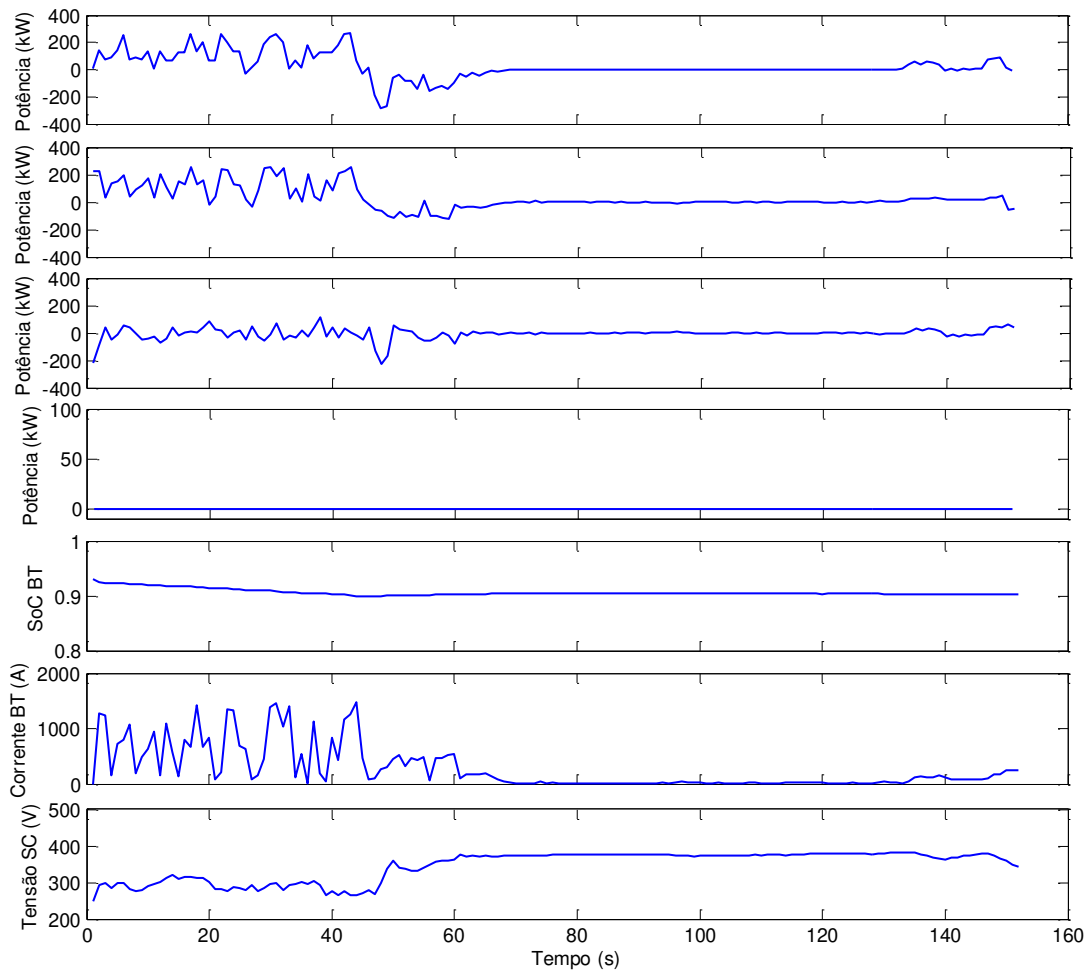


Figura 5.40 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo LA92Short, da BT, do SC, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V2.

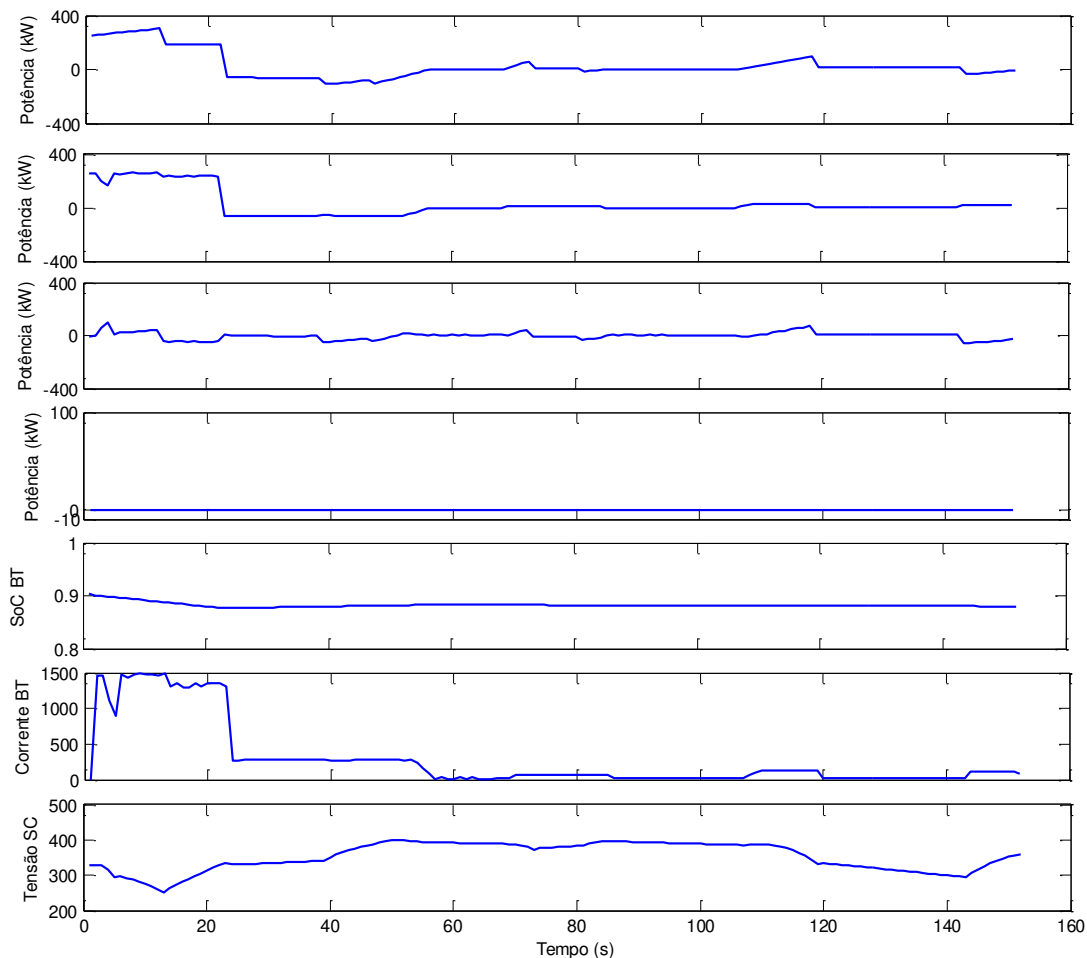


Figura 5.41 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo ECEEUDC, da BT, do SC, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V2.

Nas Figuras 5.40 e 5.41, observa-se que a potência máxima, 262 kW, que o banco de BTs pode fornecer não foi excedido. As demais observações, em relação às grandezas em análise, feitas na seção anterior para V1 também são verificadas para o veículo V2.

### 5.5.3 EGP Ótima para o Veículo V3

A ESS deste veículo é constituída por 56 ‘strings’ de BTs íon de lítio e 2 ‘strings’ de SCs de 165 F. O período de tempo selecionado para os valores iniciais das variáveis representadas pelas potências se encontra entre 100 e 250 segundos, Figura 5.37. A Figura 5.42 mostra o

comportamento temporal das fontes, no período citado acima, produzido pelo gerenciamento ótimo no ciclo de velocidade da Figura 5.2.

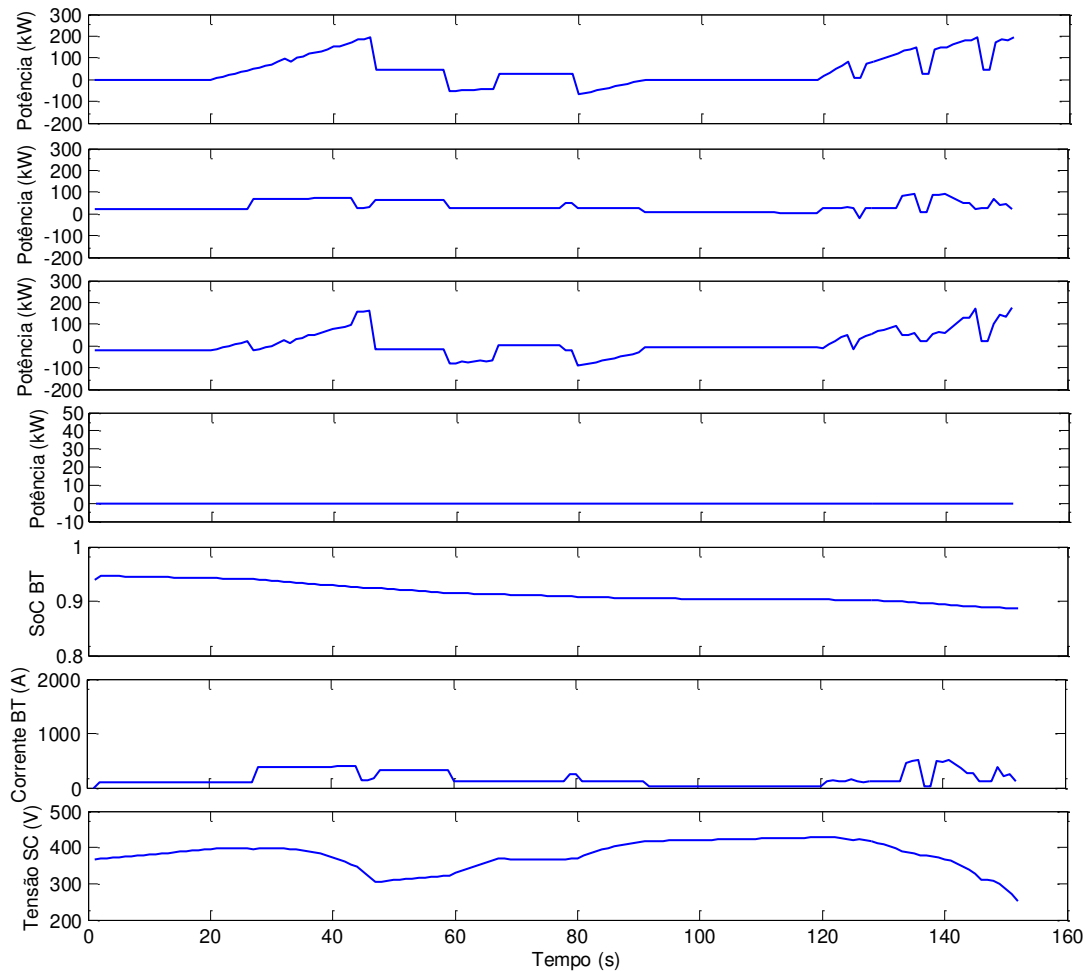


Figura 5.42 - De cima para baixo: potência requerida do ciclo, da BT, do SC, da fonte de autonomia, estado de carga da BT, corrente da BT e tensão no SC para V3.

Na Figura 5.42, observa-se que a potência máxima de 94 kW que o banco de BTs pode fornecer não foi excedido. As demais observações, em relação às grandezas em análise, também se aplicam ao veículo V3.

Uma vantagem da EGP fundamentada em Otimização não Linear em relação à EGP fundamentada em regras, está na garantia em manter todas as grandezas dentro de seus limites máximos e mínimos de operação. Na EGP fundamentada em regras isso pode não ocorrer, principalmente em instantes de tempo nos quais a tensão do banco de SCs é mínima, 250 V, e a potência requerida é maior que a soma das potências da fonte de autonomia e



$P_{BTmax}$ . Neste caso, o fornecimento extra de potência requerida fica a cargo do banco de BTs, mesmo para valores acima de  $P_{BTmax}$ . Essa regra pode ser vista no segundo plano da Figura 5.23.

Outra vantagem é a alocação ótima das potências para os bancos de BTs e SCs, uma vez que essas potências também são variáveis do problema de otimização. O gerenciamento ótimo é tal que a potência requerida pelo sistema de tração é atendida, em todo instante de tempo, pela soma das potências da ESS e da fonte de autonomia, expressão (5.8). Essa restrição é atendida sem que para isso os limites de operação impostos às fontes sejam extrapolados.

Obter resultados como os apresentados nesta seção com o emprego de EGPs fundamentadas em regras é difícil, pois neste caso a divisão de potência entre as fontes ocorre em cada instante de tempo. Já a EGP ótima realiza essa distribuição tendo em vista todo o horizonte de atuação do veículo, que neste caso, são os períodos escolhidos para o gerenciamento.

A fonte de autonomia, por sua vez, não foi acionada justamente para períodos nos quais atuou com o emprego da EGP em regras. Ou seja, é possível obter maior economia de combustível com o emprego da EGP ótima, para as mesmas configurações de ESSs e potências nominais da fonte de autonomia (adotadas nos três tipos de veículos), em relação à EGP em regras.



# Capítulo 6

## Conclusões

A metodologia empregada no dimensionamento da ESS proposta no Capítulo 4 é válida para potência requerida constante. Neste sentido, a menor massa da ESS é sempre obtida com a fonte de energia (BT ou SC) que apresentar o maior valor de coeficiente de potência específica, expressão (4.1). Estes coeficientes são encontrados pela intersecção entre a reta de tempo, no qual a potência constante é requerida, e a curva de Ragone da fonte. Logo, o dimensionamento das fontes por gráfico de Ragone é diretamente dependente do intervalo tempo em que a potência constante é requerida. Nesse sentido, uma ESS híbrida sempre vai apresentar maior massa que uma ESS com BTs ou SCs, pois, segundo esta metodologia, a fonte com maior coeficiente de potência específica é a que originará a ESS de menor massa.

As curvas de Ragone dos SCs de 58 F e 165 F são interseccionadas pela reta de tempo de 13 segundos, Figura 4.4, o que não ocorre com as curvas das BTs. Isso significa que os SCs fornecem toda a sua energia disponível no intervalo de tempo considerado para o dimensionamento. O tipo de SC que apresentou a menor massa é o de 165 F, pois o seu coeficiente de potência específica é maior que o do SC de 58 F para a corrente aplicação.

A metodologia proposta no Capítulo 5 foi aplicada no dimensionamento da ESS dos três tipos de veículos analisados. As configurações, de menor massa da ESS, obtidas tem 30 *strings* de BTs íon de lítio e 2 *strings* de SCs de 58 F, com massa total de 175,5 kg, para V1; 156 *strings* de BTs íon de lítio e 8 *strings* de SCs de 58 F, com massa total de 1.000 kg, para V2; 56 *strings* e BTs íon de lítio e 2 *strings* de SCs de 165 F, com massa total de 511,8 kg, para V3. Em relação ao custo, observou-se que o valor das configurações das ESSs obtidas cai consideravelmente com a redução do número de módulos de SCs. Essa característica pode ser explicada pelos valores unitários dos módulos de supercapacitores que são muito maiores que os valores unitários dos módulos de baterias.

Os resultados do emprego da EGP em regras, seção 5.4, mostraram desempenho satisfatório no gerenciamento das ESSs de menor massa e das fontes de autonomia dos

veículos V1, V2 e V3. O fornecimento da potência média requerida no envelope de potências (Figura 5.6 para V1 e Figura 5.7 para V2) ficou a cargo da fonte de autonomia. São verificadas situações sucessivas de “liga-desliga” desta fonte para os veículos V1 e V2, pois a potência média individual de cada ciclo de condução é menor que a potência média do envelope de potências. Essa característica não ocorre para o veículo V3, visto que a potência máxima que a fonte de autonomia pode fornecer é igual à potência média do único ciclo de condução na Figura 5.8 seguido por este veículo.

A EGP fundamentada em Otimização não Linear foi aplicada a determinados períodos, dos ciclos de condução nos quais há atuação da fonte de autonomia. Para os três veículos verificou-se que a fonte de autonomia permaneceu desativada, e que todas as grandezas, como a tensão dos SCs e o estado de carga das BTs, permaneceram dentro de seus limites máximos e mínimos de operação. Ou seja, é possível obter maior economia de combustível com o emprego da EGP ótima para as mesmas configurações de ESSs e potências nominais da fonte de autonomia (adotadas nos três tipos de veículos), em relação à EGP em regras.

Pretende-se dar continuidade e aprimorar os estudos desenvolvidos nesta Tese de acordo com as seguintes linhas:

- Utilização de uma estratégia de gerenciamento de potência fundamentada em Controle Preditivo. A idéia é introduzir uma estratégia de controle em malha fechada, que ao mesmo tempo produza economia de combustível da fonte de autonomia e leve em conta incertezas em relação à operação em tempo real do veículo (Camacho & Alba, 2007). O emprego desta técnica possibilitaria a investigação de períodos de tempo maiores, que os apresentados nas Figuras 5.38 a 5.42, com resultados “quase ótimos”.
- Inserção de um modelo de célula a combustível a ser incorporado ao modelo de otimização que dimensiona as fontes. Com isso também poderão surgir novas alternativas de configuração entre ESSs e a fonte de autonomia.
- Realização da análise conjunta do dimensionamento das fontes com conversores eletrônicos. Neste contexto, características do conversor bidirecional (que conecta as baterias) e do conversor de saída serão tratados como restrições no modelo de otimização para o dimensionamento das fontes.

- Melhoria nos modelos de baterias para avanço no programa de otimização.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

39pw.us, 2010. [Online]

Disponível em: <http://www.39pw.us/car/peukertEffect.html>

[Acesso em 8 de Março 2012].

Alibaba.com, 2012. [Online]

Disponível em: <http://www.alibaba.com/showroom/panasonic-cgr18650.html>

[Acesso em 8 de Março 2012].

Bauman, J. & Kazerani, M., 2008. A Comparative Study of Fuel-Cell-Battery, Fuel-Cell-Ultracapacitor, and a Fuel-Cell-Battery-Ultracapacitor Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Março, 57(2), pp. 760-769.

Christen, T. & Carlen, M. W., 2000. Theory of Ragone plots. *Journal of Power Sources*, Dezembro, 91(2), pp. 210 - 217.

Belhachemi, F., Rael, S. & Davat, B., 2000. *A physical based model of power electric double-layer supercapacitors*. Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, Roma, s.n., pp. 3069 - 3076.

Bertsekas, D. P., 1999. *Nonlinear Programming*. 2a Edição ed. Belmont: Athena Scientific.

Camacho, E. F. & Alba, C. B., 2007. *Model Predictive Control*. 2 ed. s.l.:Springer.

Carson, I. & Vaitheeswaran, V. V., 2008. *Zoom a Corrida Global para Abastecer o Carro do Futuro*. Nova York: Landscape.

CBA 2010, 2010. [Online]

Disponível em: <http://www.dee.feis.unesp.br/cba2010/>

[Acesso em 2 de Janeiro 2012].

Cerruto, E., Consoli, A., Raciti, A. & Testa, A., 1994. *Fuzzy logic based efficiency improvement of an urban electric vehicle*. 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON '94, Bologna, s.n., pp. 1304 - 1309.

Chau, K. T. & Wong, Y. S., 2002. Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Elsevier Science Ltd*, 43(15), pp. 1953-1968.

Conway, B.E., 1999. *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*, Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E. & Emadi, A., 2005. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: fundamentals, theory, and Design..* 1 ed. Boca Raton: CRC PRESS.

Electric Motor Store, 2012. [Online]  
Disponível em: <http://electricmotorstore.net/>  
[Acesso em 8 de Março 2012].

epa.gov, 2012. *Testing and measuring emissions.* [Online]  
Disponível em: <http://www.epa.gov/nvfe/testing/dynamometer.htm>  
[Acesso em 3 de Abril 2012].

EPRIPEAC Corporation. *Market Assessment of Asymmetrical Ultracapacitors for Medium and High Power Applications.* EPRI Solutions, Inc., Palo Alto, California, 2000.

Ferreira, A. A., "Sistema Supervisório de Gestão de Múltiplas Fontes de Suprimento para Aplicações em Veículos Elétricos". Tese de doutorado em Engenharia Elétrica - Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

Ferreira, A. A. & Pomilio, J. A., 2005. Estado da Arte sobre Aplicação de Supercapacitores em Eletrônica de Potência. *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, Volume 10, pp. 25-32.

Gillespie, T. D., 1992. *Fundamentals of Vehicle Dynamics.* 1 ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc..

Husain, I., 2005. *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals.* s.l.:CRC Press.

Hyundai, 2012. [Online]  
Disponível em: <http://www.hyundai.co.uk>  
[Acesso em 9 de Janeiro 2012].

Koo, E.-S., Lee, H.-D., Sul, S.-K. & Kim, J.-S., 1998. *Torque control strategy for a parallel hybrid vehicle using fuzzy logic.* The 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting, St. Louis, MO, USA, s.n., pp. 1715 - 1720.

Kroeze, R. C. & Krein, P. T., 2008. *Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations.* IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Grécia, s.n., pp. 1336 - 1342 .



Larminie, J. & Lowry, J., 2003. *Electric Vehicle Technology Explained*. 1 ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

Lin, C.-C., Kang, J.-M., Grizzle, J. W. & Peng, H., 2001. *Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck*. Proceedings of the 2001 American Control Conference, Arlington, VA, s.n., pp. 2878 - 2883.

Lin, C.-C., Peng, H., Grizzle, J. W. & Kang, J.-M., 2003. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 11(6), pp. 839 - 849.

Liu, X., Diallo, D. & Marchand, C., 2009. *Cycle-Based Design Methodology of Hybrid Electric Vehicle Powertrain: Application to Fuel Cell Vehicles*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, s.n., pp. 1853 - 1857 .

LOGIK|Energia limpa, Sistemas sustentáveis, 2012. [Online]  
Disponível em: <http://www.logik.com.br/>  
[Acesso em 8 de Março 2012].

Lopes, J., "Estratégias de Gerenciamento de Potência em Ônibus de Transporte Urbano Elétrico Híbrido Série". Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

Lopes, J., Pomilio, J. A. & Ferreira, P. A. V., 2012. Optimal Sizing of Energy Sources based on Multiple Driving Cycles for Electric Vehicles. *Transaction on Vehicular Technology*. Submetido para publicação.

Lopes, J., Pomilio, J. A. & Valente Ferreira, P. A., 2011. *Optimal sizing of batteries and ultracapacitors for fuel cell electric vehicles*. IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, VIC, IEEE Xplore, pp. 4603 - 4608 .

Lopes, J., Pomilio, J. A. & Valente Ferreira, P. A., 2012. *Optimal Sizing and Power Management Methodologies for Electric Vehicles*. 13th Edition of the European PhD School: Power Electronics for Electrical Machine and Energy Control, Gaeta, Itália, s.n.

Lopes, J., Pomilio, J. A., Valente Ferreira, P. A. & Kido, R. H. Z., 2010. *Gerenciamento ótimo de potência de um ônibus elétrico híbrido série para transporte urbano*. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito, MS, s.n., pp. 447-454.

Marcopolo, 2012. [Online]  
Disponível em: <http://www.marcopolo.com.br/website/2011/>  
[Acesso em 8 de Março 2012].

Maxwell Technologies, 2012. [Online]  
Disponível em: <http://www.maxwell.com/>  
[Acesso em 8 de Março 2012].

Minas Máquinas, 2012. [Online]  
Disponível em: [http://www.minasmaquinas.com.br/site/imgs/modelos/LO\\_915.pdf](http://www.minasmaquinas.com.br/site/imgs/modelos/LO_915.pdf)  
[Acesso em 8 de Março 2012].

Musardo, C., Rizzoni, G. & Staccia, B., 2005. *A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management*. 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference, s.l., s.n., pp. 1816 - 1823.

Omar, N. et al., 2010. *Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, s.l., s.n., pp. 1-6.

Optima Batteries, 2012. [Online]  
Disponível em: [www.optimabatteries.com](http://www.optimabatteries.com)  
[Acesso em 8 de Março 2012].

Paladini, V., Donato, T., Risi, A. d. & Laforgia, D., 2007. *Super-capacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development*. 19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Aghia Pelagia, Creta, Grécia, Elsevier, p. 3001–3008.

Perez, L. V., Bossio, G. R., Moitre, D. & García, G. O., 2006. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. *Mathematics and Computers in Simulation*, 73(1-4), p. 244–254.

PhD School, 2012. [Online]  
Disponível em: <http://www.eng.eventi.unicas.it/European-PhD-School>  
[Acesso em 2 de Julho 2012].

Pisu, P., Koprubasi, K. & Rizzoni, G., 2005. *Energy Management and Drivability Control Problems for Hybrid Electric Vehicles*. Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference, s.l., s.n., pp. 1824 - 1830.

Richardson RFPD, 2011. [Online]  
Disponível em: <http://www.richardsonrfpd.com/Pages/home.aspx>  
[Acesso em 18 de Março 2011].

RMIT University, 2011. [Online]  
Disponível em: <http://www.iecon2011.org/>  
[Acesso em 2 de Janeiro 2012].

Schouten, N. J., Salman, M. A. & Kheir, N. A., 2002. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 10(3), pp. 460 - 468.

Schupbach, R. M. & Balda, J. C., 2003. *The Role of Ultracapacitors in an Energy Storage Unit for Vehicle Power Management*. Vehicular Technology Conference, Orlando, USA, s.n., pp. 3236-3240.

Schupbach, R. M., Balda, J. C., Zolot, M. & Kramer, B., 2003. *Design Methodology of a Combined Battery-Ultracapacitor Energy Storage Unit fo Vehicle Power Management*. Power Electronic Specialist Conference, Acapulco, México, s.n., pp. 88-93.

Silva, E. P., Camargo, J. C., Sordi, A. & Resende Santos, A. M., 2003. Recursos Energéticos, Meio Ambiente e Desenvolvimento. *Revista Eletrônica Multiciência*, Outubro. número 1.

Via Circular, 2012. *viacircular*. [Online]  
Disponível em: [http://viacircular.com.br/site/?page\\_id=402](http://viacircular.com.br/site/?page_id=402)  
[Acesso em 8 de Março 2012].

Waltermann, P., 1998. *Modelling and control of the longitudinal and lateral dynamics of a series hybrid vehicle*. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Control Applications, Dearborn, MI, s.n., pp. 191-198.

Westbrook, M. H., 2001. *Electric and Hybrid Electric Car*. s.l. Society of Automotive Engineers Inc.



## **Anexos**



**Anexo A: Artigo do congresso CBA**





# GERENCIAMENTO ÓTIMO DE POTÊNCIA DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO SÉRIE PARA TRANSPORTE URBANO

JULIANA LOPES, JOSÉ A. POMÍLIO

*Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica, Depto. de Sistemas e Controle de Energia, Universidade Estadual de Campinas*

*Caixa Postal 6101, 13083-970 Campinas, SP, Brasil*

*E-mails: julilopes1@yahoo.com.br, antenor@dsce.fee.unicamp.br*

PAULO A. V. FERREIRA, RAFAEL H. Z. KIDO

*Laboratório de Telemática, Depto. de Telemática, Universidade Estadual de Campinas*

*Caixa Postal 6101, 13083-970 Campinas, SP, Brasil*

*E-mails: valente@dt.fee.unicamp.br, rafakido@gmail.com*

**Abstract**— Series Hybrid Electric Vehicles are a potential alternative to the fuel consumption and pollutant emissions reduction when used in public transport vehicles. In this vehicle the power sources to the electric traction system are composed of a battery and a unit power represented by the connection of an internal combustion engine and a generator. In this article, the power management between the sources of a Series hybrid electric bus for public transport is analyzed as a non linear optimization problem. The goal of this problem is the fuel consumption minimization by the engine while the bus follows an urban driving cycle. To this end, limits on the power delivered by the engine and on the battery state of charge are established. The problem is analyzed from the point of view of dynamic optimization (optimal control) with finite horizon. The results showed that it is possible to reduce the fuel consumption by the engine when they are compared with results obtained by power management strategy based on rules.

**Keywords**— Series Hybrid Electric Vehicle, Power Management Strategy, Optimal Control.

**Resumo**— Veículos Elétrico Híbridos Série são uma alternativa potencial para a redução do consumo de combustível e emissões de poluentes quando empregados no transporte público urbano. Neste veículo as fontes de potência para o sistema de tração elétrica são compostas por bateria de ácido e chumbo e um motor à combustão interna conectado a um gerador. Neste artigo o gerenciamento de potência entre as fontes de um ônibus elétrico híbrido Série para transporte urbano é analisado como um problema de otimização não linear. O objetivo deste problema é a minimização do consumo de combustível pelo motor à combustão enquanto o ônibus segue um ciclo de condução urbano. Para isto são estabelecidos limites sobre a potência fornecida pelo motor à combustão e sobre o estado de carga da bateria. O problema é analisado do ponto de vista de otimização dinâmica (controle ótimo) com horizonte finito. Os resultados mostraram menor consumo de combustível pelo motor à combustão quando comparado a resultados obtidos por estratégias de gerenciamento de potência fundamentadas em regras.

**Palavras-chave**— Veículo Elétrico Híbrido Série, Estratégia de Gerenciamento de Potência, Controle Ótimo.

## 1. Introdução

Nas últimas décadas, no mundo inteiro, tem-se discutido o impacto da ação do homem sobre o meio ambiente e o que fazer para reverter ou estabilizar esse quadro. No Brasil, a frota veicular é responsável por 40 % das emissões de CO<sub>2</sub> de acordo com Silva, et al., (2003). Essas emissões contribuem, entre outros fatores, para a poluição do ar e efeito estufa, prejudicando a qualidade de vida da população.

Os veículos elétricos híbridos (VEH) representam uma alternativa em potencial para a redução do consumo de combustível e emissões de poluentes nos grandes centros urbanos. Agregado a esses benefícios, o VEH mantém as características atribuídas aos veículos convencionais como desempenho veicular, segurança e confiabilidade.

Qualquer veículo que tenha mais de uma fonte de energia para propulsão, de natureza distinta, pode

ser classificado como um veículo elétrico híbrido segundo Chau e Wong (2002). A configuração de VEHs mais bem conhecida e a de interesse neste artigo é a que apresenta um MCI e um motor elétrico conhecida por VEH Série como citado por Barsali, et al., (2004).

As fontes de energia do VEH Série, aqui analisadas, são uma bateria e um motor à combustão interna acoplado a um gerador, este último conhecido por *Auxiliary Power Unit* – APU, como encontrado na literatura. Neste veículo o MCI não apresenta conexão com o sistema de tração sendo controlado com base em uma velocidade de referência de rotação de baixo consumo e alta eficiência. Esta característica é particularmente interessante para veículos de tráfego urbano, pois contribui significativamente para a redução da poluição devido a eliminação do funcionamento do MCI em regiões ineficientes de operação.

Para que um VEH apresente condições satisfatórias de operação é necessária a implantação de uma estratégia de gerenciamento de potência (EGP) entre

as fontes para o fornecimento de potência ao sistema de tração elétrico. Neste artigo são propostas duas estratégias de gerenciamento de potência para um ônibus elétrico híbrido Série de transporte urbano, uma fundamentada em regras e a outra em otimização não linear. Na presente proposta, o sistema representado pelo VEH foi desenvolvido no Matlab® 7.1.

O presente artigo está estruturado como segue: na Seção 2 é exposta a modelagem referente aos sistemas do VEH Série incluindo sua aceleração longitudinal e modelagem da bateria. As bases necessárias para a implantação das EGPs propostas são discutidas na Seção 3, e os resultados das simulações e conclusões são dados nas Seções 4 e 5, respectivamente.

## 2. Estudo de Caso

### 2.1. Modelagem da Dinâmica Veicular

Neste artigo, a dinâmica veicular de interesse é a longitudinal. Neste caso, o *powertrain*, consiste de um motor elétrico para tração do veículo, um diferencial, eixos rígidos (*driveshaft* e *axle shafts*) e rodas, Fig. 1.

As características físicas consideradas para a modelagem do VEH proposto são dadas na Tabela 1.

Segundo Gillespie (1992), Para o cálculo da aceleração longitudinal devem ser consideradas as forças de resistência atuantes no veículo em movimento, que neste artigo são as forças de resistência ao rolamento ( $R_r$ ) (eq. (1)), de resistência devido à inclinação do pavimento ( $R_g$ ) (eq. (2)) e de resistência do ar ( $R_a$ ) (eq. (3)).

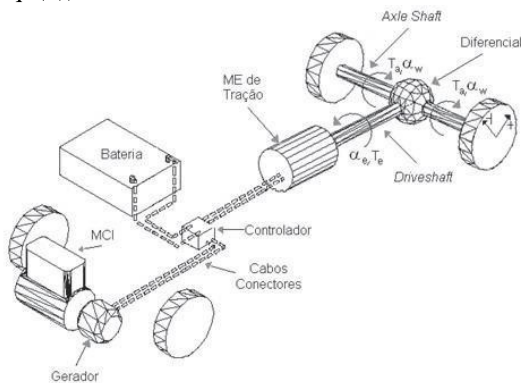


Figura 1. Modelo do *Powertrain* para um VEH Série.

$$R_r = f \cdot W \tag{1}$$

$$R_g = \frac{W \cdot G}{100} \tag{2}$$

Tabela 1. Características Físicas do VEH Série

Configuração de VEH	Série
Massa total, (Kg)	18000
Massa das componentes em rotação, (Kg)	1800
Altura do CG, (m)	1.5
Entre eixos, (m)	8
Distância centro de massa ao eixo dianteiro, (m)	3
Área frontal, (m <sup>2</sup> )	8
Coefficiente de resistência ao rolamento, f	0.012
Coefficiente de arraste aerodinâmico, C <sub>a</sub>	0.79
Aceleração da gravidade, (m/s <sup>2</sup> )	9.8
Densidade do ar, ρ (Kg/m <sup>3</sup> )	1.23
Raio da roda, r (m)	0.507
Fator de redução do diferencial, N	12

$$R_a = \frac{C_a \cdot \rho \cdot A \cdot v_r^2}{2} \tag{3}$$

nas quais W é o peso do veículo, G é a inclinação do pavimento em porcentagem e  $v_r$  é a velocidade relativa entre o veículo e o ar.

A aceleração longitudinal do veículo, a partir do torque fornecido pelo motor elétrico de tração, é dada por:

$$a_x = \left( \frac{1}{M + M_r} \right) \left[ \frac{T_e \cdot N \cdot \eta}{r} - R_r - R_a - R_g \right] \tag{4}$$

na qual  $T_e$  é o torque do motor elétrico de tração e do *driveshaft*,  $\eta$  é a eficiência resultante do sistema de transmissão do *driveshaft* às rodas.  $M_r$  é a massa equivalente das componentes (*driveshaft*, *axle shafts* e rodas) do *drivetrain* em rotação, e neste artigo é assumido  $M_r$  igual a 10 % do valor da massa do veículo (Gillespie 1992).

### 2.2 Ciclo de Condução

O ciclo de condução é a entrada principal do modelo do VEH Série fornecendo o valor de velocidade de referência do mesmo. O ciclo de condução utilizado é o europeu ECE 15, também utilizado por Ferreira (2007), (Fig. 2). Este ciclo é apropriado para o estudo do VEH Série, uma vez que retrata o perfil de velocidade adequado para um ônibus de transporte urbano.

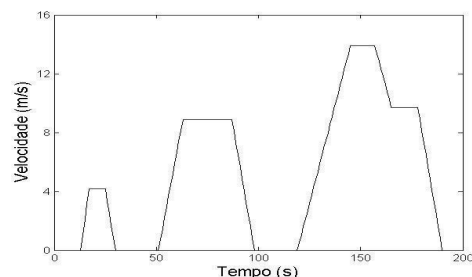


Figura 2. Ciclo de condução ECE 15.

### 2.3. Dimensionamento das Fontes de Potência

A APU e a bateria são dimensionados para fornecer, em regiões eficientes de operação, potência de demanda média e dinâmica, respectivamente, segundo Ehsani, et al., (1999). O perfil da potência requerida no ciclo ECE15 foi calculado pela eq. (5) e é dado pela Fig. 3.

$$P_{REQ} = ((M + M_r)a_x + R_r + R_a + R_g).V_{vel} \quad (5)$$

na qual  $V_{vel}$  é a velocidade do veículo.

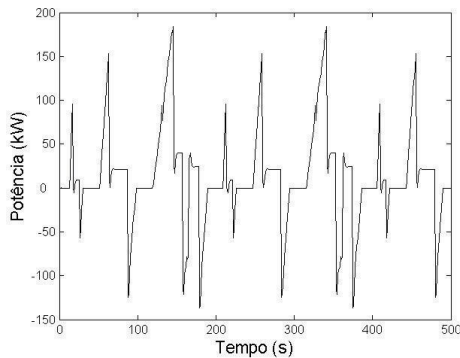


Figura 3. Potência requerida.

Tabela 2. Valores da potência de demanda média e dinâmica.

	$P_{REQmed}$ (kW)	$P_{REQdin,máx}$ (kW)
ECE 15	12,3	172

No entanto, neste artigo a máxima potência ( $P_{A-PUmáx}$ ) fornecida pela APU é de 70 kW, esse valor de potência corresponde à velocidade de rotação de 1500 rpm de menor consumo de combustível para um MCI MWM de 163 CV (Lopes 2008). O maior alcance na potência fornecida pela APU, acima de  $P_{REQmed}$  (kW), permite reduzir a faixa de demanda de potência do banco de baterias ficando encarregado pelo suprimento máximo de 102 kW que somado aos 70 kW, fornecido pela APU, garante o cumprimento da demanda de potência do sistema de tração. Para a bateria optou-se pela escolha de uma configuração ácido e chumbo com 120 células e capacidade de 50 Ah. Este artigo restringe-se à análise da potência solicitada à APU pelas EGP's não sendo necessária a modelagem do mesmo.

### 2.4. Modelagem da Bateria

A bateria utilizada como fonte de energia para o VEH Série é do tipo ácido e chumbo e sua modelagem está restrita às considerações expostas por Larmine e Lowry (2003).

#### 2.4.1. Circuito Equivalente da Bateria

O circuito equivalente para a modelagem da bateria está na Fig. 4. A tensão de circuito aberto  $E$  varia com a profundidade de descarga (*Depth of Discharge – DoD*) da bateria. Para a bateria de ácido e chumbo, com número  $m$  de células, o valor de  $E$  é aproximadamente proporcional ao DoD como mostrado na eq. (6).

$$E = m.(2.15 - DoD.(2.15 - 2.00)). \quad (6)$$

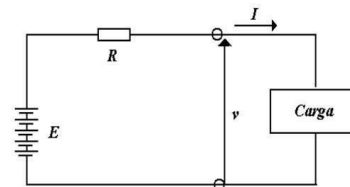


Figura 4. Modelo simplificado de circuito para uma bateria em que  $R$  é a resistência interna;  $E$ , a tensão de circuito aberto;  $I$  a corrente e  $v$  a tensão de alimentação.

A resistência interna ( $R$ ) é aproximadamente constante para uma bateria, mas também é afetado pelo DoD e pela temperatura. Uma aproximação de primeira ordem para a resistência interna de uma bateria de ácido e chumbo pode ser dada por:

$$R = m. \frac{0.022}{C_{10}}, \quad (7)$$

em que  $C_{10}$  é a capacidade em Ampère-hora para uma taxa de descarga de dez horas.

#### 2.4.2. Modelagem da Capacidade da Bateria

Uma bateria apresenta capacidade menor que a esperada quando altas taxas de descarga de corrente são solicitadas. Por esse motivo, é importante prever o efeito da corrente sobre a capacidade e, para isso, utiliza-se o modelo de Peukert ( $C_p$ ):

$$C_p = I^k.t, \quad (8)$$

na qual  $k$  é o coeficiente de Peukert e  $t$  é o tempo. Para baterias de ácido chumbo o valor de  $k$  é constante e igual a 1.2.

#### 2.4.3. Profundidade de Descarga da Bateria

Seja  $\delta t$  o intervalo de tempo em segundos entre cálculos consecutivos, para uma solicitação de corrente constante, a carga efetiva removida da bateria será igual ao produto  $\delta t.I^k$ . A carga total removida ( $CR_n$ ) de uma bateria (Ah) no  $n$ -ésimo passo de simulação é dada por:

$$CR_{n+1} = CR_n + (\delta t.I^k)/3600. \quad (9)$$

A profundidade de descarga da bateria é dada pela razão entre a carga removida e a capacidade original:

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p} \tag{10}$$

Dessa forma, os valores encontrados para DoD podem ser utilizados no cálculo da tensão de circuito aberto E da eq. (6) e conseqüentemente no cálculo da tensão nos terminais da bateria como na eq. (11):

$$V_b = E + R.I, \tag{11}$$

na qual:  $V_b$  é a tensão nos terminais da bateria.

Na literatura, é comum encontrar o termo “estado de carga” do termo em inglês *state of charge*, que é definido como a diferença entre a máxima carga possível da bateria (100%) e a quantidade de descarga imposta, ou seja:

$$SoC_n = 1 - DoD_n, \tag{12}$$

na qual SoC é o estado de carga da bateria.

#### 2.4.4. Potência Requerida da Bateria

A potência requerida do banco de baterias ( $P_b$ ) é dada por:

$$P_b = V_b . I. \tag{13}$$

A eq. (13) combinada com a eq. (11) fornece a corrente solicitada da bateria pela EGP:

$$I = \frac{(-E + \sqrt{E^2 + 4.R.P_b})}{2.R} \tag{14}$$

### 3. Estratégias de Gerenciamento de Potência em VEHS

O objetivo primário de qualquer estratégia de controle é satisfazer a demanda de potência imposta pelo motorista através do gerenciamento de potência entre as fontes.

Algumas técnicas de controle de EGPs são propostas na literatura. Em particular, segundo Lin, et al., (2001), as EGPs podem ser classificadas por: otimização por programação dinâmica (PD), como em Lin, et al., (2003) e Pérez, et al., (2006); utilização de métodos por otimização estática, de acordo com Pisu, et al., (2005) e Musardo, et al., (2005); e técnicas de controle inteligente, como o baseado em regras e sistemas fuzzy utilizados por Schouten, et

al., (2002), Lee et al., (2000). Em aplicações práticas, o comportamento real do veículo será significativamente diferente para cada solução adotada.

Das categorias de EGPs citadas, as fundamentadas em regras e em otimização não linear são as de interesse para o estudo do VEH em questão. Nas EGPs analisadas a potência requerida pelo sistema de tração elétrico é chamada de  $P_{REQ}$ , a solicitada à APU de  $P_{APU}$  e a solicitada ao banco de baterias de  $P_{BAT}$ .

#### 3.1. EGP Fundamentada em Regras

A EGP fundamentada em regras é orientada de acordo com o SoC do banco de baterias. Quando o SoC for maior que 0.5 (bateria à meia carga) e menor que 1 (bateria completamente carregada) a EGP opera da seguinte forma: a APU opera fornecendo o valor de potência solicitado pelo sistema de tração elétrico ( $P_{REQ}$ ), atuando em sua capacidade máxima quando necessário ( $P_{APUmáx}$ ). Quando  $P_{REQ}$  ultrapassa o valor  $P_{APUmáx}$ , a bateria é a fonte responsável pelo fornecimento da potência excedente.

Quando o SoC for menor que 0.5 e maior que 0 (bateria completamente descarregada) a bateria é recarregada e a EGP opera de acordo com o diagrama da Fig. 5, segundo Lopes (2008).

Se	Então
$P_{REQ} > P_{APUmáx}$	$P_{APU} = P_{APUmáx}$ $P_{BAT} = P_{REQ} - P_{APUmáx}$
$P_{APUmáx} > P_{REQ} > 0$ e $P_{APUmáx} - P_{REQ} > P_{BATcarga}$	$P_{APU} = P_{REQ} + P_{BATcarga}$ $P_{BAT} = - P_{BATcarga}$
$P_{APUmáx} > P_{REQ} > 0$ e $P_{APUmáx} - P_{REQ} < P_{BATcarga}$	$P_{APU} = P_{APUmáx}$ $P_{BAT} = P_{REQ} - P_{APUmáx}$
$P_{REQ} = 0$	$P_{APU} = P_{BATcarga}$ $P_{BAT} = - P_{BATcarga}$
$ - P_{REQ}  < P_{BATcarga}$	$P_{APU} = P_{BATcarga} -  P_{REQ} $ $P_{BAT} = - P_{REQ} - P_{APU}$
$ - P_{REQ}  > P_{BATcarga}$	$P_{APU} = 0$ $P_{BAT} = - P_{BATcarga}$ $P_{perde} =  - P_{REQ}  - P_{BATcarga}$

Figura 5. EGP para SoC da bateria menor que 0.5.

#### 3.2. EGP Fundamentada em Otimização

Aqui são discutidas as bases para implantação da otimização não linear no gerenciamento de potência do VEH de interesse. A definição da EGP, do ponto de vista de otimização, compreende um objetivo de controle, uma ação de controle (variável independente) e uma variável de estado (variável dependente) e restrições do sistema.

### 3.2.1. Modelo Abstrato

Segundo Pérez, et al., (2006), a EGP, como um problema de otimização, pode ser representada por um modelo abstrato (Fig. 6). Este modelo considera somente o fluxo de potência líquido fornecido pela APU ( $P_{APU}(t)$ ) e pela bateria ( $P_{BAT}(t)$ ) no instante de tempo  $t$ . O fluxo de potência da bateria é considerado positivo no fornecimento de potência e negativo quando recarregada. Já o fluxo de potência da APU é sempre considerado positivo uma vez que não admite recarga.

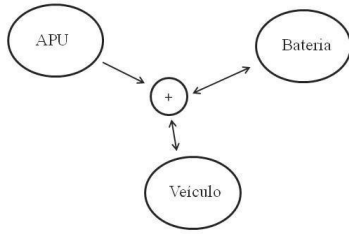


Figura 6. Modelo abstrato para um VEH Série.

A soma dos fluxos de potência das fontes, para todo instante de tempo, deve satisfazer a potência requerida (eq. (5)) pelo sistema de tração do veículo de acordo com a eq. (15):

$$P_{APU}(t) + P_{BAT}(t) = P_{REQ}(t). \quad (15)$$

A potência que a bateria e a APU fornecem está restrita ao valor do estado de carga (Seção 2.4.3) e à potência do MCI definida na Seção 2.3, respectivamente.

### 3.2.2. Objetivo de Controle

O objetivo de controle da presente EGP, similar ao adotado por Pérez, et al., (2006), é a minimização do consumo de combustível. Este objetivo é entendido como a minimização da energia líquida consumida do tanque de combustível pelo MCI da fonte APU no intervalo de tempo  $[0, T]$  compreendido pelo ciclo de condução ECE 15. Assim, a energia líquida consumida do tanque de combustível no instante de tempo  $t$  ( $E_{APU}(t)$ ) é dada por:

$$E_{APU}(t) = \int_0^t P_{APU}(\tau) d\tau. \quad (16)$$

### 3.2.3. Ação de Controle e Variável de Estado

Utilizando a equação de balanço de potências (eq. (15)) é possível eliminar a variável  $P_{BAT}$ . Neste artigo  $P_{APU}$  é a variável independente sobre a qual a minimização é realizada e  $P_{BAT}$  é a variável dependente, obtida a partir da primeira. Isto significa que a EGP é operada de acordo com o comando de aceleração do MCI.

### 3.2.4. Restrições

As restrições impostas ao problema de otimização estão na limitação da potência fornecida pela APU, nos valores máximo e mínimo permitidos para o estado de carga da bateria e sobre equação de balanço de potências. Perez, et al., (2006) impõe a restrição sobre o fluxo de potência na bateria através da limitação da energia fornecida pela mesma, enquanto que neste artigo esta limitação está nos valores máximo e mínimo do estado de carga.

Dada a limitação física desta fonte não admitir recarga, o limite mínimo de potência imposto é zero (eq. (17)).

$$0 \leq P_{APU}(t) \leq P_{APUmáx}, \forall t. \quad (17)$$

A potência fornecida pela bateria depende de seu estado de carga, estando completamente carregada para SoC igual a 1 e descarregada para SoC igual a zero. Esta restrição sobre o SoC garante que a bateria não opere em situação de depleção ou sobrecarga, sendo mantida em condição apropriada de operação para todo instante de tempo  $t$ .

$$SoC_{\min} \leq SoC(t) \leq SoC_{\max}, \forall t. \quad (18)$$

A última restrição é sobre a equação de balanço assegurando que a soma da potência das fontes satisfaça, para todo instante de tempo  $t$ , a potência requerida pelo sistema de tração elétrica.

$$P_{APU}(t) + P_{BAT}(t) - P_{REQ}(t) = 0, \forall t. \quad (19)$$

A partir da Seção 3.2.1, a EGP, como um problema de otimização, pode ser colocada da seguinte forma: achar  $P_{APU}(t)$  que minimize a função objetivo:

$$V[P_{APU}(t)] = \int_0^T P_{APU}(t) dt. \quad (20)$$

Sujeito às eqs. (17), (18) e (19) para  $t \in [0, T]$ .

## 4. Resultados

Nesta Seção são analisadas as duas estratégias de gerenciamento de potência propostas. As principais análises referem-se à observância do estado de carga da bateria entre seus valores limites ( $SoC_{\min}$  e  $SoC_{\max}$ ) pré determinados, e à potência disponibilizada pela APU. Para todas as simulações realizadas, os valores de  $SoC_{\min}$  e  $SoC_{\max}$  são 0 e 1, respectivamente, e o valor da potência máxima fornecida pela APU,  $P_{APUmáx}$ , fixado em 70 kW.



Cada EGP é aplicada ao ciclo de condução de interesse, ECE15, considerando-se operação do veículo em pavimento plano. Para a análise do comportamento das duas EGPs empregadas foram realizadas simulações com a bateria inicialmente carregada (estado de carga igual a 1) e à meia carga (estado de carga igual a 0.5).

Os perfis de potência de  $P_{APU}$  e  $P_{BAT}$  foram obtidos para diferentes escalas a fim de facilitar a visualização do comportamento das fontes dada potência requerida  $P_{REQ}$  (Fig. 3). Para a obtenção dos respectivos perfis de potência e de SoC, o ciclo de condução ECE15 foi repetido três vezes.

#### 4.1. EGP fundamentada em Regras

Abaixo seguem os perfis de potência solicitada à APU e à bateria, e o perfil do SoC para a bateria inicialmente carregada (Fig. 7 (a)-(c)) e para bateria à meia carga (Fig. 8 (a)-(c)), obtidos pelo emprego da EGP fundamentada em regras (Seção 3.1).

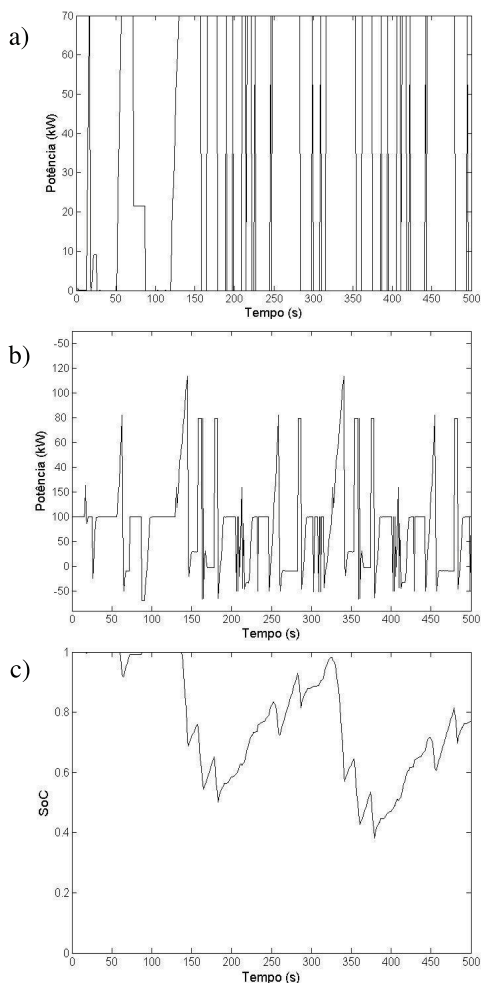


Figura 7. Perfis de potência, da APU (a) e da bateria (b), e perfil do SoC (c) para bateria inicialmente carregada empregando EGP fundamentada em regras.

Em relação à Fig. 7 (c), pode-se observar que o SoC é mantido em torno de seu valor máximo 1 nos primeiros 100 segundos de simulação. A partir daí, o

SoC apresenta altas taxas de variação (de 0.5 a 1 entre 150 e 400 segundos, por exemplo) com observável decaimento até 500 segundos. Este comportamento pode ser explicado pela alta solicitação de potência da bateria com poucos intervalos de tempo para recarga da mesma pela frenagem regenerativa e/ou pela APU. Dessa forma, o SoC sofre decaimento não sendo mantido numa região estável de operação da bateria.

A Fig. 8 foi obtida para bateria inicialmente à meia carga, ou seja, para SoC igual a 0.5. O perfil do SoC da Fig. 7 (c) é similar ao da Fig. 8 (c) exceto nos primeiros 100 segundos de simulação quando a bateria necessita de recarga até atingir seu estado de máxima carga. Neste período de tempo, existe maior solicitação de potência da APU para recarga da bateria fazendo com que o MCI opere por mais tempo e consumindo mais combustível.

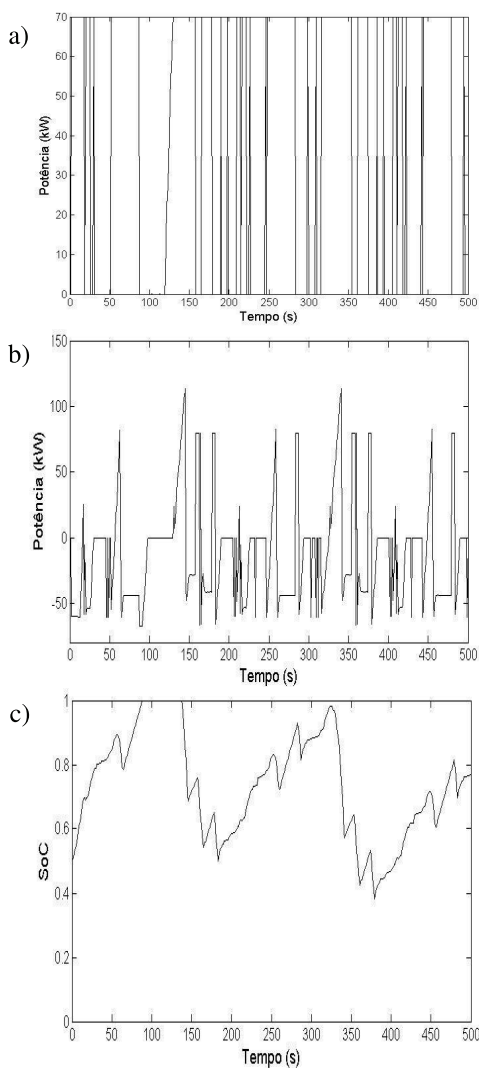


Figura 8. Perfis de potência, da APU (a) e da bateria (b), e perfil do SoC (c) para bateria inicialmente à meia carga empregando EGP fundamentada em regras.

#### 4.2. EGP fundamentada em Otimização

Como exposto na Seção 3.2, a EGP analisada como um problema de otimização não linear tem como objetivo minimizar o consumo de combustível (eq. (20)) sujeito às restrições dadas pelas eqs. (17) a (19). Para tal procedimento o perfil de potência inicial de  $P_{APU}$  para as simulações realizadas, com bateria inicialmente carregada e posteriormente à meia carga, são os perfis das Figs. 7 (a) e 8 (a) obtidos pela EGP fundamentada em regras. Ou seja, espera-se com o emprego otimização não linear otimizar a operação do MCI para que o consumo de combustível seja minimizado. O problema de otimização foi resolvido por meio da rotina “fmincon” do toolbox de otimização do software Matlab/Simulink® 7.1. A rotina “fmincon” implementa um método do tipo Quase-Newton para otimização restrita conhecido como Programação Quadrática Sequencial.

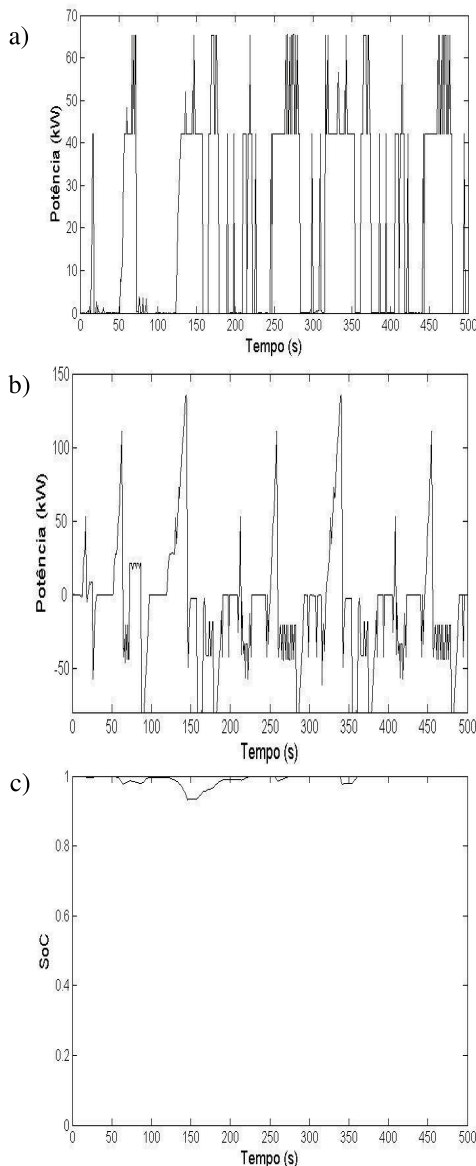


Figura 9. Perfis de potência, da APU (a) e da bateria (b), e perfil do SoC (c) para bateria inicialmente carregada empregando EGP fundamentada em otimização.

Os perfis de potência solicitada à APU e à bateria, e o perfil do SoC para a bateria inicialmente carregada e para bateria à meia carga estão nas Figs. 9 (a)-(c) e 10 (a)-(c)), respectivamente.

Para a Fig. 9 (a), em relação à EGP fundamentada em regras, observa-se menor atuação da fonte APU não atingindo seu valor máximo de 70 kW, como o esperado, e ainda com pouca variação do SoC permanecendo sempre igual ou próximo de seu valor máximo, 1.

Na Fig. 10 (c) pode-se notar que o perfil de SoC manteve-se entre 0.4 e 0.6 apresentando grande diferença para a Fig. 8 (c) com emprego de EGP fundamentada em regras para simulação iniciada com bateria à meia carga. Nesta situação, a APU também não atinge o seu valor máximo, como o esperado.

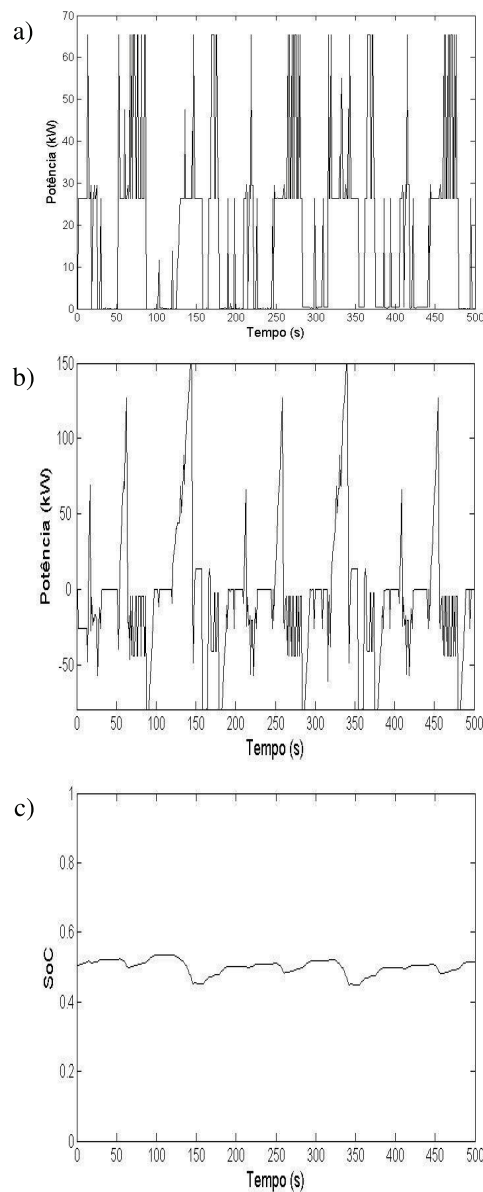


Figura 10. Perfis de potência, da APU (a) e da bateria (b), e perfil do SoC (c) para bateria à meia carga empregando EGP fundamentada em otimização.

## 5. Conclusão

Para as duas EGPs analisadas, a potência máxima de recarga da bateria foi fixada em 79.5 kW. Ou seja, toda potência regenerada acima deste valor foi descartada.

Como citado, os perfis de potência  $P_{APU}$  obtidos com o emprego da EGP fundamentada em regras foram utilizados como valor inicial para a rotina de otimização empregada na EGP da Seção 4.2. Com os resultados das simulações presentes nas Figs. 9 e 10 foi possível observar que a potência fornecida pela APU não atingiu seu valor máximo de 70 kW indicando, consequentemente, menor consumo de combustível pelo MCI. Na Tabela 3 estão os valores da energia total obtida do combustível utilizado pelo MCI ( $V[P_{APU}]$ ) durante a operação do veículo no ciclo de condução ECE 15. Os valores iniciais de  $V[P_{APU}]$  foram obtidos pelo emprego da EGP fundamentada em regras, e os valores finais foram obtidos pela EGP fundamentada em otimização não linear.

Na Tabela 3, para as simulações com a bateria inicialmente à meia carga é observado diferença entre os valores inicial e final de  $V[P_{APU}]$  de 9493130 J e para a bateria inicialmente com carga completa, essa diferença é de 5756700 J.

Tabela 3. Valor inicial e final para a função da eq. (20).

SoC \ $V(P_{APU})$	Energia Inicial (J)	Energia Final (J)
1	$1.60 \times 10^7$	$1.03 \times 10^7$
0.5	$1.83 \times 10^7$	$8.87 \times 10^6$

Dos resultados obtidos pode-se concluir que o método otimização não linear por programação quadrática sequencial aplicado à EGP da Seção 4.2 apresentou desempenho superior à EGP fundamentada em regras. A melhora no desempenho está na utilização da bateria, que apresenta pouca variação no SoC, e na redução do consumo de combustível sem o comprometimento do desempenho veicular dada a potência requerida pelo sistema de tração.

## Referências Bibliográficas

- Barsali, S., Miulli, C., Possenti, A., 2004. A Control Strategy to Minimize Fuel Consumption of Series Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1(19), pp.187-195.
- Chau, K. T., Wong, Y. S., 2002. Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy conversion and Management*. Elsevier Science Ltd, 15(43), pp.1953-1968.
- Ehsani, M., et al., 1999. Application of Electrically Peaking Hybrid (ELPH) Propulsion System to a Full-Size Passenger Car with Simulated Design Verification. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 6(48), pp.1779-1787.
- Ferreira, A.A., 2007. Sistema Supervisório de Gestão de Múltiplas Fontes de Suprimento para Aplicações em Veículos Elétricos. Tese (Engenharia Elétrica): Universidade Estadual de Campinas.
- Gillespie, T.D., 1992. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale: SAE, Inc.
- Larminie, J., Lowry, J., 2003. *Electric Vehicle Technology Explained*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Lee, H.D. et al., 2000. Torque Control Strategy for a Parallel-Hybrid Vehicle Using Fuzzy Logic. *IEEE Industry Applications Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 6(6), pp.36-38.
- Lin, C.C., 2001. Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck. *American Control Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* Arlington, 7 august 2002.
- Lin, C.C., 2003. Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 6(11), pp.839-849.
- Lopes, J., 2008. Estratégias de Gerenciamento de Potência em Ônibus de Transporte Urbano Elétrico Híbrido Série. Dissertação (Engenharia Mecânica/EESC): Universidade de São Paulo.
- Musardo, C., Rizzoni, G., Staccia, B. A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005, Seville, Espanha. 12 dezembro 2005. United States: Piscataway.
- Pérez, L.V. et al., 2006. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. *Mathematics and Computers in Simulation*. Elsevier. 1-4(73), pp.244-254.
- Pisu, P., Koprubasi, K., Rizzoni, G. Energy Management and Drivability Control Problems for Hybrid Electric Vehicles. 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005, 2005, Seville. Seville, Espanha. 12 janeiro 2006. United States: Piscataway.
- Schouten, N.J., Salman, M.A., Kheir, N.A., 2002. Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 3(10). pp.460-468.
- Silva, E. P., Camargo, J. C., Sordi, A., Santos, A.M.R., 2003. Recursos Energéticos, Meio Ambiente e Desenvolvimento. [Online] COCEN/UNICAMP. Disponível em: <http://www.multiciencia.unicamp.br/art04.htm> [Acessado Outubro 2003].



**Anexo B: Artigo do congresso IECON**



# Optimal Sizing of Batteries and Ultracapacitors for Fuel Cell Electric Vehicles

J. Lopes, J. A. Pomilio, P. A. V. Ferreira  
University of Campinas

School of Electrical and Computer Engineering  
13083-852 Campinas, São Paulo, Brazil

julilopes1@yahoo.com.br, antenor@dsce.fee.unicamp.br, valente@dt.fee.unicamp.br

**Abstract-** Fuel cell electric vehicles with a single energy storage system can be heavier than vehicles with a hybrid energy storage system. This happens because different sources exhibit different specific energy and power values. With a hybrid energy storage system it is possible to use determined sources to supply high peaks with high specific power and other ones for long peaks power with high specific energy. For this reason hybrid energy storage systems can be lighter. A sizing methodology based on nonlinear optimization is proposed in this article. The goal of the methodology is to find the lowest mass for the hybrid energy storage system. The maximum values that the specific energy and power can reach, related to Ragone plots, are constraints of the optimization problem.

## INTRODUCTION

The impact of human activity on the environment and what to do to reverse or stabilize this situation has been discussed worldwide. The vehicle fleet in Brazil is responsible for 40 % of CO<sub>2</sub> emissions [1]. Gas emissions contribute to, among other factors, air pollution and the greenhouse effect, harming the quality of life. In this context, electric vehicles are a potential alternative for reducing pollutants in urban centers.

Electric vehicles with a single energy storage system (ESS) as batteries (BT) or ultracapacitors (UC) can have a total weight greater than electric vehicles with hybrid ESSs. BTs and UCs have different specific energy (Wh/kg) and specific power (W/kg) values, and the use of a hybrid energy storage system (ESS), with BTs and UCs, can increase the efficiency and reduce the weight of the vehicle. Usually, fuel cells are sized to supply the average or steady state power [2]. On the other hand, ESSs are sized to supply the transient power or peak power.

Batteries and ultracapacitors have different characteristics and the choice of one, or a combination of them, depends on the characteristics of the required energy [3].

Batteries have low specific power and are suitable for providing long term pulse power (> 100 s). Therefore, their limiting factor is the power capacity. Ultracapacitors can supply high peak power in short periods of time. However, the limiting factor of UCs is the energy storage capacity. Based on these features, an ESS composed only of batteries or ultracapacitors can be heavy and expensive.

Many articles have proposed solutions to ESS sizing problem as [4], [2], [5] e [6]. In [4] two different ESSs have been studied, one of them is composed of BTs and by UCs. Analyses of cost, weight, vehicle performance and fuel cell consumption are provided.

A sizing methodology to an ESS composed of BTs and UCs is also proposed by [2]. The methodology uses the Ragone Theory to sizing BTs and UCs based on their specific energy and power coefficients. It is suggested that a hybrid ESS (BTs and UCs) can be obtained by optimization methods.

A near-optimal comparison of ESSs composed of UCs, BTs and BTs and UCs was made in [5]. Performance, fuel economy and powertrain costs compose the objective function. A methodology based on the energy required in different driving cycles is developed in [6] to reduce the size of fuel cells, BTs and UCs.

The ESS sizing under the condition of maximum required power during acceleration time for an electric vehicle is the goal of the present article. The sizing methodology combines the Ragone Theory [2] with a non linear optimization technique in order to reduce the size a hybrid ESS composed of BTs and UCs.

Here, the required power and energy are normalized to facilitate a better view of the total power and energy in the period of acceleration considered.

The resulting hybrid ESS represents lighter mass than ESSs composed only of BTs or UCs. The technique proposed also provides an efficient power management of BTs and UCs. The power supplied by the BTs and UCs and the number of modules of these sources are variables of optimization problem.

## CASE STUDY

### 1. Vehicular Dynamics Modeling

The required power from the electric traction system to the energy sources is based on the longitudinal vehicular dynamics. The vehicle powertrain is considered composed of a differential, rigid axles (driveshaft and axle shafts) and wheels. A mid-size SUV is the vehicle of interest in this paper. Table 1 shows its physical characteristics [2].

The rolling resistance force (1) and the aerodynamic drag force (2) are used to compute the longitudinal acceleration [7]. As the vehicle is driven at the ground level, the road grade force is not considered.

$$R_r = f.M.g \quad (1)$$

$$R_a = (C_a \cdot \rho \cdot A \cdot V^2) / 2, \quad (2)$$

where  $V$  is the vehicle speed.

The vehicle longitudinal acceleration  $a_x$  from the torque  $T_e$ , of the electric motor traction, to the wheels is

$$a_x = (1/(M + M_r))[(T_e \cdot N \cdot \eta)/r - R_a - R_r], \quad (3)$$

where  $\eta$  is the resulting efficiency of the transmission system from the driveshaft to the wheels and  $M_r$  is the equivalent mass of the rotating components (driveshaft, axle shafts and wheels). In this article,  $M_r$  corresponds to 10 % of the vehicle mass [7].

## 2. Driving Cycle

The driving cycle adopted is the Z85 [2], in which the vehicle is accelerated from 0 to 38 m/s in 21 seconds. This driving cycle is suitable for the ESS sizing problem because it represents a high power profile [2].

The power profile  $P$  is calculated by

$$P = [(M + M_r) a_x + R_r + R_a] V, \quad (4)$$

and illustrated in Fig. 1.

## 3. Energy Sources

The electric vehicle energy sources of interest are BTs, UCs and fuel cells. It is considered that the fuel cell supplies average power and the ESS supplies the peak power of the power profile.

A hybrid ESS enables a decomposition between the required specific energy and the specific power.

TABLE I  
ELECTRIC VEHICLE PHYSICAL CHARACTERISTICS

Total mass, $M$	1850 kg
Mass of the rotating components, $M_r$	185 kg
Frontal area, $A$	2.66 m <sup>2</sup>
Rolling coefficient, $f$	0.012
Aerodynamic drag coefficient, $C_a$	0.44
Gravity acceleration, $g$	9.81 m/s <sup>2</sup>
Air density, $\rho$	1.23 kg/m <sup>3</sup>
Wheel radius, $r$	0.343 m
Combined ratio of transmission and final drive, $N$	4.6

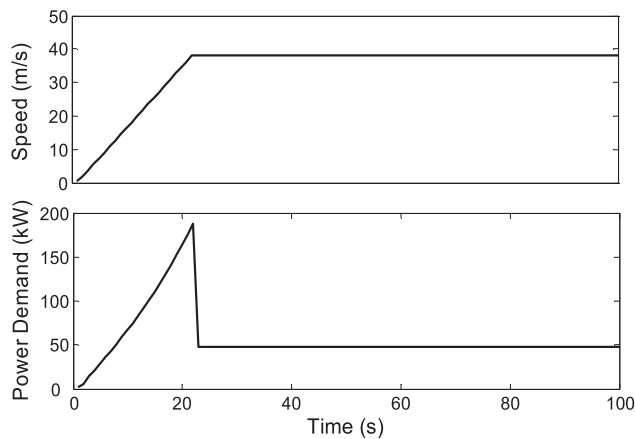


Fig. 1. Speed profile of the Z85 driving cycle and its required power profile.

The power required above and below the average speeds can be supplied by batteries, as they have high specific energy [2], [3]. Due to its low specific power, this source is not used to supply power peaks. Ultracapacitors can improve the response of the hybrid ESS during transient load disturbances. Fuel cells could be employed as the only energy source in electric vehicles, since they storage enough energy for the operation of the vehicle. However, fuel cells present poor efficiency under low power demand, slow energy transfer in transient situations and high cost per watt.

## 4. Battery Modeling

The battery model is based on Moura Batteries lead-acid Log Monobloco 12ML85 12 V, which represents 85 Ah capacity for 20 hours of discharge. The module mass is 21.8 kg [8]. The modeling of this source is based on [9].

Table 2 enumerates the coefficients and parameters that were used in battery modeling.

The battery equivalent circuit is shown in Fig. 2. In lead acid batteries, the open circuit voltage is proportional to the depth of discharge (5):

$$E = m \cdot [2.15 - 0.15 \text{DoD}]. \quad (5)$$

A first order approach to internal resistance of lead acid batteries is

$$R_{BT} = m \cdot (0.022 / C_{85}). \quad (6)$$

The depth of discharge is calculated as the ratio between the removed charge and the original capacity:

$$\text{DoD}_n = (CR_n) / C_p. \quad (7)$$

The original capacity is calculated by the Peukert model which describes the current effect on capacity:

$$C_p = I_{BT}^k \cdot t. \quad (8)$$

For lead acid batteries,  $k$  is considered about 1.2. The total charge removed  $CR_n$  from the battery on the  $n$ th simulation step is:

TABELA II  
BATTERY MODELING VARIABLES

$E$	Open circuit voltage
$m$	Cell number
$\text{DoD}$	Depth of discharge
$R_{BT}$	Internal resistance
$C_{85}$	Capacity at the 20 hour rate
$k$	Peukert Coefficient
$t$	Time
$C_p$	Peukert Capacity
$CR$	Removed charge
$V_{BT}$	Terminal voltage
$\text{SoC}_{BT}$	State of charge
$P_{BT}$	Required Power
$I_{BT}$	Current

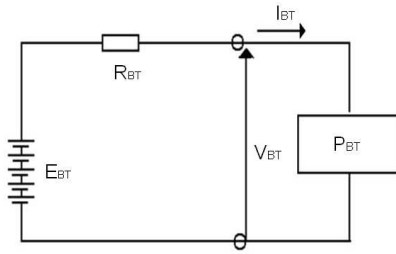


Fig. 2. Simplified circuit model for a bateria.

$$CR_{n+1} [Ah] = CR_n + \frac{\delta t \cdot I_{BT}^k}{3600} Ah \quad (9)$$

where  $\delta t$  is the time interval between calculations. For a constant current required, the charge removed from the battery is  $\delta t \cdot I^k$ .

The battery state of charge is defined as the difference between its total charge (100 %) and the depth of discharge:

$$SoC_{BTn} = 1 - DoD_n \quad (10)$$

The battery terminal voltage is

$$V_{BT} = E - R_{BT} \cdot I_{BT} \quad (11)$$

The battery required power is

$$P_{BT} = V_{BT} \cdot I_{BT} \quad (12)$$

The required current from the battery is calculated by (11) and (12).

$$I_{BT} = (E + \sqrt{E^2 - 4 \cdot R_{BT} \cdot P_{BT}}) / 2 \cdot R_{BT} \quad (13)$$

### 5. Ultracapacitor Modeling

The ultracapacitor model is based on Maxwell Ultracapacitors BMOD0058-15, which present capacitances of 58 F and nominal voltage of 15 V. The module mass is 0.68 kg. The internal resistance is considered constant and equal to 0.019  $\Omega$  [10]. The modeling of the ultracapacitor module is based on [11]. Table 3 enumerates the parameters that were used in ultracapacitor modeling. The ultracapacitor equivalent circuit is shown in Fig. (3).

The ultracapacitor terminal voltage depends on the required power,  $P_{UC}$ :

TABLE III  
SUPERCAPACITOR MODELING VARIABLES

C	Capacitance
V <sub>UCmax</sub>	Maximum voltage
R <sub>UC</sub>	Internal resistance
V <sub>UC</sub>	Voltage
E <sub>UC</sub>	Energy
V <sub>t</sub>	Terminal Voltage
I <sub>UC</sub>	Current
SoC <sub>UC</sub>	State of Charge

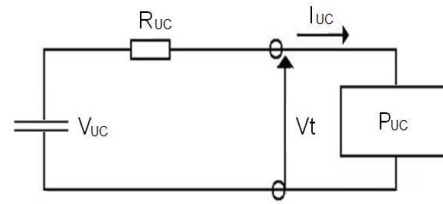


Fig. 3. Simplified circuit model for an ultracapacitor.

$$V_t = V_{UC} - R_{UC} \cdot I_{UC} = (V_{UC} + \sqrt{V_{UC}^2 - 4 \cdot P_{UC} \cdot R_{UC}}) / 2 \quad (14)$$

The ultracapacitor current is

$$I_{UC} = P_{UC} / V_t \quad (15)$$

The total energy removed from the ultracapacitor on the nth simulation interval, is

$$E_{UCn+1} = E_{UCn} + V_{UC} \cdot I_{UC} \cdot \delta t \quad (16)$$

The ultracapacitor stored energy is

$$E_{UC} = (1/2) \cdot C \cdot V_{UC}^2 \quad (17)$$

The ultracapacitor state of charge is calculated as the ratio between its actual and maximum voltage [11]:

$$SoC_{UC} = (V_{UC} / V_{UCmax})^2 \quad (18)$$

### 6. Power and Energy Available in the Sources

The fuel cell is sized to supply the average power, 50 kW, of the Z85 driving cycle [2]. It is assumed that the time delay of the fuel cell is 2 seconds.

The use of a methodology for determining which source (BT, UC or both) is more suitable in a particular application is fundamental [2]. The Ragone plots are useful to sizing the sources, as it shows the energy and power available in these sources.

The energy and power available in BTs and UCs are estimated by computer simulations starting from the sources fully charged (SoC<sub>BT</sub> and SoC<sub>UC</sub> equal to 100%) and subject to constant intervals of required power (10 W/kg to 2500 W/kg with a step of 10 W/kg).

Power is supplied until the BT reaches 60% of its state of charge and the UC terminal voltage reaches half of its maximum voltage ( $V_t = V_{UCmax} / 2$ ). The time discharge of the sources is used to compute their available energy for each power value.

Simulations results are expressed in a log-log plot (Ragone plot), as shown in Fig. 4, which contains information about weight and time. Thus, it is possible to find the coefficients of specific power ( $\rho_{BT}$  to the BT and  $\rho_{UC}$  to the UC) and specific

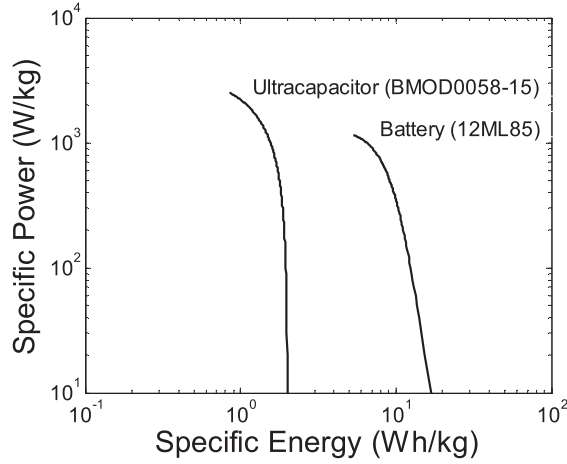


Fig. 4. BT and UC Ragone plots.

energy ( $\delta_{BT}$  to the BT and  $\delta_{UC}$  to the UC) from the required power and energy from the BTs and UCs. The minimum mass of BTs and/or UCs, for a specific application, is obtained by the general expression:

$$\begin{aligned} \text{Mass}[\text{kg}] &= \text{Power}[\text{W}] / \rho[\text{W}/\text{kg}], \text{ or} \\ \text{Mass}[\text{kg}] &= \text{Energy}[\text{Wh}] / \delta[\text{Wh}/\text{kg}] \end{aligned} \quad (19)$$

where  $\rho$  and  $\delta$  are specific power and energy coefficients, respectively.

#### 7. ESS Sizing

The ESS nominal size is determined by the worst power condition. For the Z85 driving cycle, this condition is in 21 seconds to maximum speed of 38 m/s, in which the required power is 187.71 kW. See Fig. 5 (a). After that, the vehicle remains in constant speed of 38 m/s and the required power falls to 50 kW.

In acceleration the fuel cell begins to deliver its nominal power when the required power reaches 50 kW, at 8. Thus, the fuel cell acts between 8 and 21 seconds in acceleration resulting in a total time of 13 seconds.

For illustrative reasons, the total power and energy required from ESS were normalized to a time of 13 seconds, being equal to 84.239 kW and 304.1986 Wh, respectively. This normalization is shown in Fig. 5 (b).

The shadowed areas represent the total energy required from the ESS during acceleration, and consequently the sum of the areas A and B corresponds to the area C.

#### 8. BTs or UCs Sizing with no Time Delay

Initially the ESS is sized to supply the power and energy described by area C during 13 seconds, as shown in Fig. 5 (b). Under this condition, the fuel cell supplies its rated power with no time delay.

In Fig. 6, the 13-seconds line intersects the UC Ragone plot at the point 'b'. Therefore, the corresponding coefficients  $\rho_{UC}$

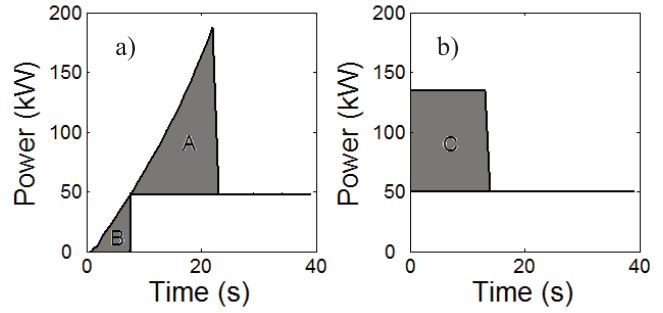


Fig. 5. ESS required power (a) and the normalized required power for 13 seconds (b).

and  $\delta_{UC}$  ensure that UCs will provide their available power in exactly 13 seconds.

These coefficients are 493.55 W/kg and 1.7823 Wh/kg. The minimum mass of UCs is 170.67 kilograms.

The battery Ragone plots is not intersected by the 13-seconds line. This shows that BTs cannot deliver their energy in 13 second, unless the SoC<sub>BT</sub> control variable reaches values less than 60%. Thus, the coefficient that gives the minimum mass of BTs is the maximum specific power  $\rho_{BTmax}$  coefficient equals to 600 W/kg. See Fig. 6. The minimum mass of BTs required is 140.4 kg.

The  $\rho_{BTmax}$  coefficient ensures that BTs work with an efficiency of 86 %. In other words, for coefficients greater than this value, the BT efficiency will be less than 86 %.

This coefficient was estimated, for one battery module, through the ratio of the required power,  $P_{BT}$ , and the battery power,  $P_{bat}$ , that would result in battery efficiency of 86%,  $\eta_{BT}$ :

$$\eta_{BT} = P_{BT} / P_{bat} = 86\%. \quad (20)$$

This efficiency value is reached when  $P_{BT}$  is equal to 13.08 kW, and  $P_{bat}$  equals to 15.25 kW.

By using BT Ragone plots, it was possible to find the coefficient that ensures an efficiency of 86 %:

$$\rho_{BTmax} = P_{BT} / m_{BT}, \quad (21)$$

where  $m_{BT}$  is the mass of each BT module.

#### 9. BTs or UCs Sizing with Time Delay

If the fuel cell time delay is considered, this source will supply its rated power at time 10 seconds, 2 seconds after the previous study, as shown in Fig. 7 (a). In this case, the ESS must also supply the power required during the time delay until the fuel cell reaches its rated power. In Fig. 7, the areas D and E are equal. According to Fig. 7 (b), the maximum power that the ESS must supply is 134.24 kW (84.24 kW added to 50 kW).



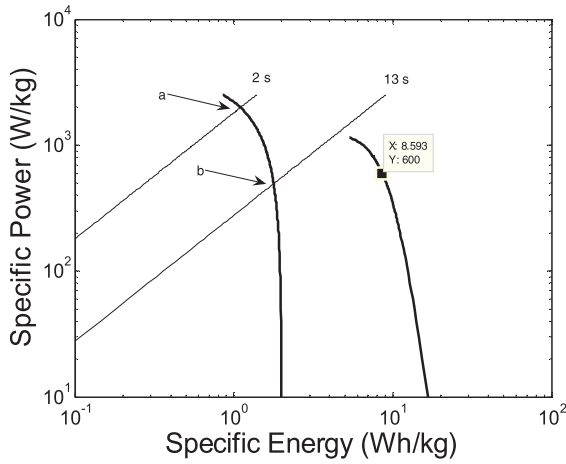


Fig. 6. BT and UC Ragone plots and the 2 and 3 seconds time lines.

As the limiting factor to size the BTs is its power capacity the mass of BTs is computed to provide 134.24 kW resulting in 223.73 kg.

On the other hand, the UCs mass can be computed in two steps: the UC mass to supply 84.24 kW in 13 s ( $\rho_{UC}$  equals to 493.55 W/kg), and the UC mass to supply 50 kW in 2 s ( $\rho_{UC}$  equals to 1985 W/kg). These coefficients are indicated by the 'b' and 'a' points in Fig. 6. Therefore, the UCs minimum mass to this application is 195.9 kg.

#### 10. BTs and UCs Sizing with Time Delay

A hybrid ESS can use UCs to supply the required power during the time delay (50 kW per 2 second) and the BTs to supply 84.24 kW per 13 seconds.

The BTs minimum mass in the current application is the same of Section 8, 140.4 kg, and the UCs minimum mass is 25.2 kg as found in Section 9. Therefore, the total mass of the hybrid ESS is 165.6 kg.

#### 11. BTs and UCs Optimal Sizing with Time Delay

A hybrid ESS sizing by a non linear optimization technique is proposed in this Section. The goal is the BTs and UCs total mass,  $M_{ESS}$ , minimization.

See [2] for an alternative approach, for ESS sizing based on an optimization technique. The objective function of the present problem is

$$M_{ESS} = M_{UC} + M_{BT} = n_{BT} \cdot m_{BT} + n_{UC} \cdot m_{UC}, \quad (22)$$

where  $n_{BT}$  and  $n_{UC}$  are the BTs and UCs number of modules, respectively, and  $m_{UC}$  is the mass of a UC module.

The considered constraints are the power balance equation, the maximum values for  $P_{BT}$  and  $P_{UC}$ , and the energy and power required that cannot be greater than the energy and power available in the sources.

According to the power balance equation, the sum of the powers supplied by BTs and UCs, must be equal to the required power from the ESS ( $P_{ESS}$ ):

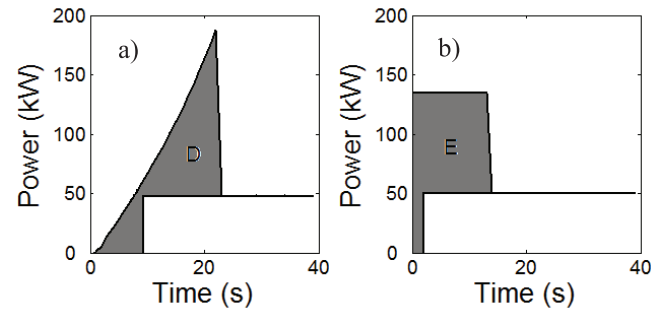


Fig. 7. ESS required power with time delay (a) and the respective normalized required power for 13 seconds. (b).

$$P_{ESS} = P_{UC} + P_{BT}. \quad (23)$$

The maximum values that  $P_{BT}$  and  $P_{UC}$  can assume depend on the  $\rho_{UC}$  and  $\rho_{BT}$  maximum coefficients:

$$P_{UC} \leq \rho_{UCmax} \cdot M_{UC}, \quad (24)$$

$$P_{BT} \leq \rho_{BTmax} \cdot M_{BT}, \quad (25)$$

where  $\rho_{UCmax}$  is the maximum specific power coefficient to UCs, 493.55 W/kg.

The last one constraint ensures that the energy and power required from BTs and UCs cannot be greater than that available in these sources.

$$E_{UC} \leq \delta_{UC} \cdot M_{UC} \text{ and } P_{UC} \leq \rho_{UC} \cdot M_{UC}, \quad (26)$$

$$E_{BT} \leq \delta_{BT} \cdot M_{BT} \text{ and } P_{BT} \leq \rho_{BT} \cdot M_{BT}. \quad (27)$$

Therefore, the BTs and UCs sizing problem can be seen as an optimization problem: Find  $n_{BT}$ ,  $n_{UC}$ ,  $P_{BT}$  and  $P_{UC}$  that minimizes the objective function

$$M_{ESS} = n_{BT} \cdot m_{BT} + n_{UC} \cdot m_{UC}, \quad (28)$$

subject to (23) - (27).

This mixed-integer optimization problem – note that  $n_{BT}$  and  $n_{UC}$  are integer variables – was solved by using a Branch-and-Bound algorithm [12], implemented through the routines of the Matlab Optimization Toolbox [13].

## RESULTS & DISCUSSION

The sizing methodologies presented in this paper were tested to the Z85 driving cycle, Fig. 1 (a). This cycle presents a powerful acceleration reaching a constant speed of 38 m/s in 21 s.

TABLE IV  
RESULTS OFF THE ESS SIZING PROBLEM

	With no Time Delay		With Time Delay			
	Only UC	Only BT	Only UC	Only BT	UC and BT	UC and BT optimization model
<b>UC (kg)</b>	170.68	-	196.52	-	25.84	27.88
<b>BT (kg)</b>	-	152.6	-	239.8	152.6	130.8
<b>Total (kg)</b>	170.68	152.6	196.52	239.8	178.44	158.68

Table 4 summarizes the data collected from Section 8 to Section 11. These data, except in Section 11, were approached to integer numbers of BTs and UCs.

Two different conditions were analyzed. In the first one, analyzed in Section 8, the fuel cell time delay was not considered, i.e. the fuel cell provided its nominal rated power after 8 seconds. In this condition, the demand of energy and power, normalized to the period of 13 seconds, implied in almost 19 kg more for the ESS composed of UCs. In this situation, the high specific energy of these BTs enables their use when large peak power is required.

In the second condition, analyzed through the Sections 9-11, the fuel cell time delay was considered, i.e., the fuel cell provided its nominal rated power after 10 seconds (2 seconds more than the first situation).

In Section 9, the ESS composed just of BTs is almost 43 kg heavier than that composed just of SCs. As also observed in [3], this result shows an over sizing of BTs just to supply a peak power of 134.24 kW per 2 seconds, not representing a cost-effective solution.

The specific power and energy characteristics, of BTs and UCs, enable the use of UCs for short periods of time and the use of BTs for long periods of time. As the result of Section 10 shows, the hybrid ESS is lighter than the ESSs of Sections 8 and 9.

The hybrid ESS, obtained by the non linear optimization technique proposed in Section 11, was sized to supply a maximum power of 91932 W. This is the normalized power for the 13 seconds time considering the fuel cell time delay.

As in Section 10, the BT power is limited to 84.24 kW. The maximum specific power coefficient to UCs, considered for this application, is 493.55 W/kg. The ESS sizing problem, solved by this optimization technique, resulted in 130.8 kg (6 modules) of BTs and 27.88 kg (41 modules) of UCs. This result is almost 20 kg lighter than the hybrid ESS of Section 10. The power supplied by the BTs and UCs is 78.48 kW and 13.452 kW, respectively.

#### CONCLUSIONS

From the results we can note that fuel cell electric vehicles with hybrid ESSs can be lighter than vehicles with a single

energy storage system. Table 4 shows that when the hybrid configuration of ESS is adopted, the total mass is lighter. The optimization approach proposed, in Section 11, resulted in almost 20 kg less than that provided by the Ragone methodology in Section 10. The way to connect the sources between themselves and the electrical efficiency of electronic converters required to this application are under study.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This work was partially sponsored by FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo and CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

#### REFERENCES

- [1] E. P. Silva, J. C. Camargo, A. Sordi, A.M.R. Santos, "Recursos Energéticos, Meio Ambiente e Desenvolvimento". (In Portuguese) In Revista Eletrônica Multiciência, no. 01, outubro/2003, COCEN/UNICAMP.
- [2] R. M. Schupbach, J. C. Balda, M. Zolot, B. Kramer, "Design methodology of a combined battery-ultracapacitor energy storage unit for vehicle power management", Power Electronics Specialists Conference, Acapulco, Mexico, June 15-19, 2003.
- [3] R. M. Schupbach, J. C. Balda, "The role of ultracapacitors in an energy storage unit for vehicle power management", in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., Orlando, FL, 2003, pp. 3236-3240.
- [4] W. Gao, "Performance comparison of a fuel cell-battery hybrid powertrain and a fuel-cell ultracapacitor hybrid powertrain", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 54, no. 3, pp. 846-855, May 2005.
- [5] J. Bauman, M. Kazerani, "A comparative study of fuel-cell-battery, fuel-cell-ultracapacitor, and fuel-cell-battery-ultracapacitor vehicles", IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 57, no. 2, pp. 760-769, March 2008.
- [6] X. Liu, D. Diallo, C. Marchand, "Cycle-based design methodology of hybrid electric vehicle powertrain: application to fuel cell vehicles", Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, United States, Sept. 7-10, 2009.
- [7] T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics. CA: SAE, 1992.
- [8] Moura Batteries. [Online]. Available: <http://www.moura.com.br>
- [9] J. Larminie, J. Lowry, Electric Vehicle Technology Explained, England, CA: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [10] Maxwell Ultracapacitors. [Online]. Available: <http://www.maxwell.com>
- [11] H. Mehrjerdi, J. Ghouili, "Strategies comparison for optimization of multi objective function in a fuel cell electrical vehicle", Electrical and computing engineering, 2006. CCECE '06. Canadian Conference on, On page(s): 1337 - 1341, Volume: Issue: , May 2006.
- [12] Bertsekas, D. P., Nonlinear Programming, 2nd. Edition, Athena Scientific, 1999, pg. 567.
- [13] <http://www.mathworks.com/>



## **Anexo C: Artigo do PhD School**



UNIVERSITY OF CAMPINAS  
SCHOOL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

***“Optimal Sizing and Power Management Methodologies for  
Electric Vehicles”***

**PhD Student:** Juliana Lopes

**Supervisors:** Prof. Dr. José Antenor Pomilio  
Prof. Dr. Paulo Augusto Valente Ferreira

**Support:**  
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP

Campinas, May/2012

# Abstract

This research project proposes a sizing methodology for the sources of an energy storage system (ESS), composed of batteries (BT) and ultracapacitors (UC), of an electric vehicle. The autonomy source can be composed of fuel cells or by an internal combustion engine/generator unity. The ESS sources are sized by a nonlinear optimization technique, to operate in a given period of high required power with the autonomy source turned off. The goal is to find the configuration of BTs and UCs (in integer modules) with minimum total mass needed to supply the required power. The viability of the sizing methodology proposed is demonstrated by the use of a power management strategy (PMS) applied to the sources when the vehicle is operated in a specified driving cycle.

## 1. Introduction

The impact of human activity on the environment and what to do to reverse or stabilize this situation have been discussed worldwide. The vehicle fleet is responsible for 40 % of CO<sub>2</sub> emissions in Brazil [1]. Gas emissions contribute to, among other factors, air pollution and to the greenhouse effect, harming the quality of life. In this context, electric vehicles are a potential alternative for reducing pollutants in urban centers.

The autonomy source of an electric vehicle is generally sized to supply its average or the stationary power [2], while the ESS is sized to supply the peak or the transient power. Electric vehicles with a single energy storage system (ESS) as batteries or ultracapacitors usually have a total weight greater than electric vehicles with hybrid ESSs. Batteries and ultracapacitors have different characteristics and the choice of one or a combination of them depends on the required power [3]. Batteries are suitable for providing long-term pulse power (> 100 sec), and due to low specific power (W/kg), their limiting factor is the power capacity. Ultracapacitors can supply high peak power in short periods of time, and due to low specific energy (Wh/kg), their limiting factor is the energy storage capacity. Based on these features, an ESS composed only of batteries or ultracapacitors are normally heavy and expensive. Therefore, the use of a hybrid ESS can increase the efficiency and reduce the weight of the vehicle.

Many articles, as [3], [2], [4], and [5], have proposed solutions to the ESS sizing problem. In [4] two different ESS configurations have been studied, one composed of BTs and the other of UCs. Analysis of cost, weight, vehicle performance and fuel cell consumption are provided. A detailed study of different ESS configurations composed of UCs, BTs and UCs and BTs is given in [5]. The authors use an optimization technique where performance, fuel economy and powertrain costs define the objective function. They concluded that the hybrid ESS is the best choice. The hybrid ESS sizing methodology proposed by [2] is based on the Ragone theory, centered in the use of specific energy and specific power of the sources. The authors provide an ESS sizing obtained through nonlinear optimization technique resulting in a lighter ESS. An extension of the study developed in [2] is presented in [3]. An improved PMS obtained with an optimization technique resulted in the best result found.

The above studies strongly contribute for the development of source-sizing methodologies. However they do not analyze the autonomy of the sources or take into account different urban and extra-urban driving cycles.

In this project, we propose a sizing methodology for a hybrid ESS based on a nonlinear optimization technique, aiming at the ESS total mass minimization. The methodology is applied to a period of high required power, in which the sources supply energy subject to the physical limitations of the UCs voltage and the BT state of charge (SOC). The vehicle autonomy is tested by adding a third source – an autonomy source. An efficient power management of the three sources shows that the vehicle is capable of operating continuously and in different driving cycles.

## 2. Case Study

### 2.1 Vehicular Dynamics

The vehicular dynamics of interest is the longitudinal, which in elementary analyses considers all of the vehicle components in simultaneous movement. In this case the vehicle can be viewed like a rigid body.

The vehicle required power,  $P_{req}$ , in a given driving cycle is modeled by (1). The resistance forces acting on the vehicle are: the aerodynamic drag force, the second term of (1), and the rolling resistance force, the third term of (1). As the vehicle is driven at the ground level, the road grade force is not considered:

$$P_{req} = ((M + M_r) \cdot dV/dt + C_a \cdot \rho \cdot A \cdot V^2/2 + f \cdot M \cdot g) \cdot V, \quad (1)$$

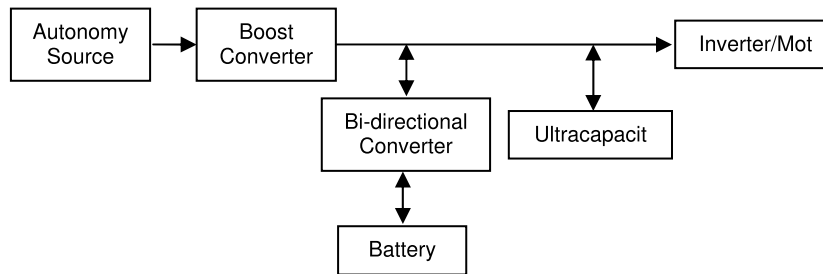
where  $M$  is the gross vehicle weight, equal to 2050 kg and  $M_r$  is the equivalent mass of the rotating components (driveshaft, axle shafts and wheels). In this article,  $M_r$  corresponds to 10 % of the curb weight and is equal to 154.8 kg;  $V$  is the vehicle speed. The vehicle physical characteristics are presented in Table 1 and correspond to a Hyundai 'Tucson SUV' model, [6].

**Table 1: EV Physical Characteristics**

Frontal area, $A$	3.1659 m <sup>2</sup>
Rolling coefficient, $f$	0.015
Aerodynamic drag coefficient, $C_a$	0.45
Gravity acceleration, $g$	9.81 m/s <sup>2</sup>
Air density, $\rho$	1.23 Kg/m <sup>3</sup>

### 2.2 EV Topology

The adopted EV topology, shown in Fig. 1, is considered the best alternative among those analyzed in [5]. The UC bank is directly connected to the dc bus.



*Fig. 1. Electric vehicle topology chosen for this research project.*

### 2.3 Driving Cycles

In this research project we consider five different driving cycles, shown in Fig. 2, [7]. The driving cycles represent urban driving conditions like: Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), New York City Cycle (NYCC), Elementary Urban Cycle plus Extra-Urban Driving Cycle (ECEUUDC). They also represent extra urban driving conditions like: LA92Short which contains the first 969 seconds of the Unified Dynamometer Driving Schedule, and the Highway Fuel Economy Driving Schedule (HWFET).

To compute the power profiles of the driving cycles shown in Fig. 3, we considered the efficiencies of the differential (90 %), traction electric motor (90 %), and converter (95 %). Therefore the resulting efficiency is 73 %. In other words, in acceleration, expression (1) is divided to 0.73, while in braking it is multiplied by 0.73.

An important aspect to be considered in the sizing methodology is the definition of the time period or cycle condition for which the ESS will be sized. We found reasonable to size the ESS for a period of high required power. Working with different driving cycles allows us to take into account a large number of vehicle operation possibilities.

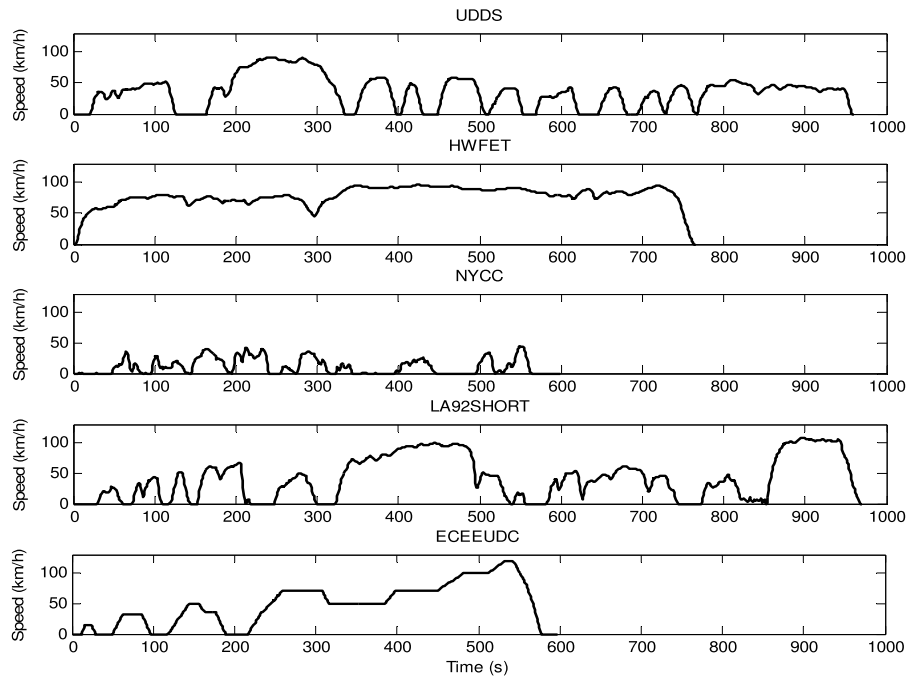


Fig. 2. Driving cycles.

As the vehicle can be driven in each of Fig. 2 driving cycles or in a driving cycle which is a combination of them, we considered the period of highest required power obtained by the interpolation of the power profiles of Fig. 3 as the sizing period.

Fig. 4 shows the envelope of required power resulted from the interpolation, and the period from de 840 to 969 seconds considered for the sizing problem. Note that this is the period of maximal required power.

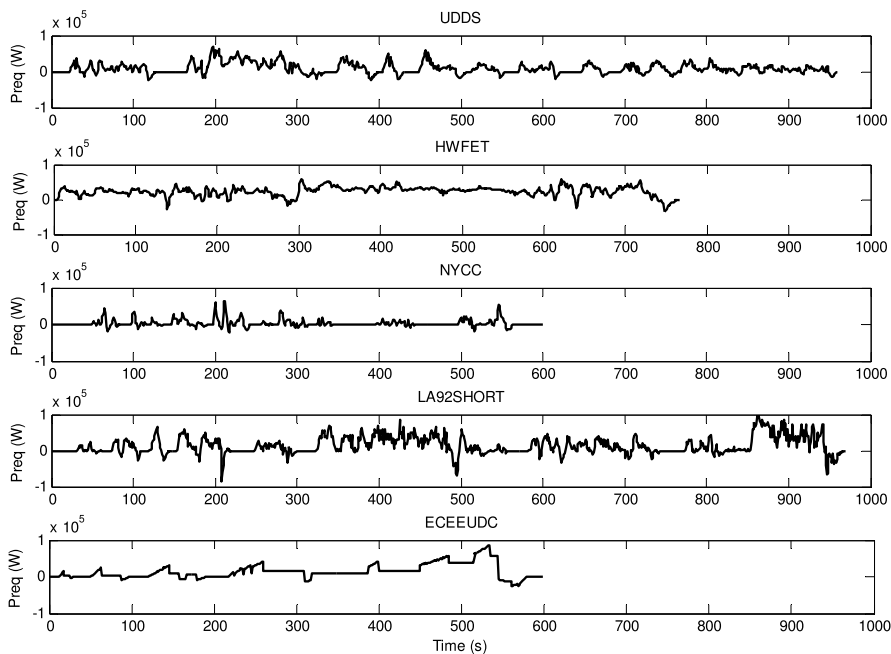


Fig. 3. Required power profiles.

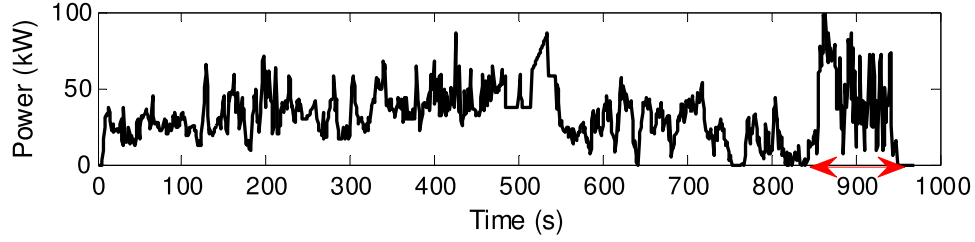


Fig. 4. Envelope of the positive path of power profiles from Fig. 3, and the period selected for the sizing problem.

## 2.4 ESS Energy Sources

### 2.4.1 Battery

The battery model is based on ATMPower lead-acid batteries [8]. Each BT module has 12 V of terminal voltage, 90 Ah of capacity for 10 hours of discharge, and mass,  $m_{BT}$ , equal to 28.5 kg. The internal resistance is considered constant and equal to 0.0052  $\Omega$ .

The battery equivalent circuit is shown in Fig. 5.

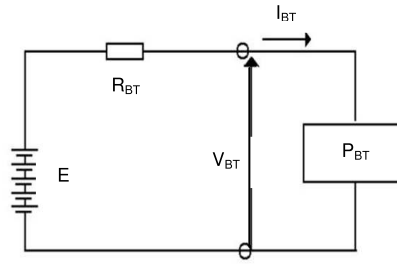


Fig. 5. Simplified circuit model for the battery.

In lead-acid batteries, the open circuit voltage ( $E$ ) is proportional to the depth of discharge (DoD). Considering that DoD is 0 for a completely charged BT and 1 when the BT is completely discharged, the open circuit voltage is:

$$E = m \cdot (2,15 - \text{DoD} \cdot (2,15 - 2,00)), \quad (2)$$

where  $m$  is the number of cells in the BT.

The DoD can be computed as the ratio between the removed charge (CR) and the original capacity ( $C_p$ ):

$$\text{DoD} = \text{CR}/C_p. \quad (3)$$

The original capacity is computed by the Peukert model, which describes the effect of the current on the capacity:

$$C_p = I^k \cdot t, \quad (4)$$

where  $k$  is the Peukert coefficient equal to 1.2 in lead-acid BTs and  $t$  is the discharge time.

The total removed charge  $\text{CR}_n$  from the battery on the  $n$ th simulation step is:

$$\text{CR}_{n+1}[\text{Ah}] = \text{CR}_n + \frac{\delta t \cdot I^k}{3600} \text{ Ah}, \quad (5)$$

where  $\delta t$  is the time interval between calculations.

The state of charge ( $\text{SoC}_{BT}$ ) is defined as:

$$\text{SoC}_{BT} = 1 - \text{DoD}. \quad (6)$$

The BT terminal voltage ( $V_{BT}$ ) is:

$$V_{BT} = E - R_{BT} \cdot I_{BT}, \quad (7)$$

where  $R_{BT}$  is the BT internal resistance.

The BT required power ( $P_{BT}$ ) is:

$$P_{BT} = V_{BT} \cdot I_{BT}. \quad (8)$$

The required current from the BT ( $I_{BT}$ ) is computed as:

$$I_{BT} = \frac{(E + \sqrt{E^2 + 4 \cdot R_{BT} \cdot P_{BT}})}{2 \cdot R_{BT}}. \quad (9)$$

The BT state of charge varies between 1 ( $SoC_{BTmax}$ ) and 0.6 ( $SoC_{BTmin}$ ). The number of BTs in series,  $n_{BT}$ , is a variable of the sizing problem. There are not strings of BTs in parallel.

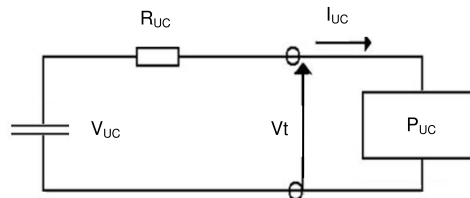
## 2.4.2 Ultracapacitor

The ultracapacitor model is based on Maxwell Ultracapacitors BMOD0058-15 [9]. Each module has capacitance of 58 F, nominal voltage of 15 V and mass,  $m_{UC}$ , of 0.68 kg. The internal resistance is considered constant and equal to 0.019  $\Omega$ . Table 2 presents the parameters used in the ultracapacitor model.

**Table 2:** Ultracapacitor Parameters

Capacitance	C
Maximum Voltage	$V_{UCmax}$
Internal Resistance	$R_{UC}$
Voltage	$V_{UC}$
Energy	$E_{UC}$
Terminal Voltage	$V_t$
Current	$I_{UC}$
State of Charge	$SoC_{UC}$

The UC equivalent circuit is shown in Fig. 6.



*Fig. 6. Simplified circuit model for the ultracapacitor.*

The UC terminal voltage depends on the required power:

$$V_t = V_{UC} - R_{UC} \cdot I_{UC} = \left( V_{UC} + \sqrt{V_{UC}^2 - 4 \cdot P_{UC} \cdot R_{UC}} \right) / 2. \quad (10)$$

The UC required current is:

$$I_{UC} = P_{UC} / V_t. \quad (11)$$

The total removed energy from the UC in the  $n$ th simulation step is:

$$E_{UCn+1} = E_{UCn} - V_{UC} \cdot I_{UC} \cdot \delta t, \quad (12)$$

The UC stored energy is:

$$E_{UC} = (1/2) \cdot C \cdot V_{UC}^2. \quad (13)$$

The UC state of charge is calculated as the ratio between its actual and maximum voltage [10]:



$$\text{SoC}_{\text{UC}} = (V_{\text{UC}}/V_{\text{UCmax}})^2. \quad (14)$$

The UC terminal voltage varies between two limits: the maximum limit is 405 V ( $V_{t_{\text{max}}}$ ) and the minimum limit is 250 V ( $V_{t_{\text{min}}}$ ). The series UCs number is fixed and equals to 27, therefore, the number of strings in parallel,  $n_{\text{UC}}$ , is a variable of the sizing problem.

## 2.5 ESS Sizing Methodology

A hybrid ESS sizing methodology based on a nonlinear optimization technique is proposed in this Section. The sources are sized to the time period from 840 to 969 seconds shown in Fig. 4; the sources must supply their energy subject to the physical limitations of UC voltage and BT state of charge (SOC).

The goal of the proposed technique is the BTs and UCs total mass minimization:

$$M_{\text{ESS}} = n_{\text{BT}} \cdot m_{\text{BT}} + n_{\text{UC}} \cdot m_{\text{UC}}. \quad (15)$$

The optimization variables are  $n_{\text{BT}}$ ,  $n_{\text{UC}}$ , the BT required power ( $P_{\text{BT}}$ ) and the UC required power ( $P_{\text{UC}}$ ). The constraints of the optimization problem are:

- the power balance equation, by which the required power from the BTs and UCs must be equal to the required power from the ESS ( $P_{\text{ESS}}$ ):

$$P_{\text{ESS}} = P_{\text{BT}} + P_{\text{UC}}; \quad (16)$$

- the maximum values that the required power from the BT,  $P_{\text{BTmax}}$ , and the UC,  $P_{\text{UCmax}}$ , can assume. The required power from the sources cannot be greater than the available power. The available power in the sources is given as a function of their maximum specific power,  $\rho_{\text{BTmax}} = 170$  W/kg for the BT and  $\rho_{\text{UCmax}} = 1985$  W/kg for the UC:

$$P_{\text{BT}} \leq \rho_{\text{BTmax}} \cdot n_{\text{BT}} \cdot m_{\text{BT}}, \quad (17)$$

$$P_{\text{UC}} \leq \rho_{\text{UCmax}} \cdot n_{\text{UC}} \cdot m_{\text{UC}};$$

- the UC terminal voltage must remain between  $V_{t_{\text{max}}}$  (405 V) and  $V_{t_{\text{min}}}$  (250 V):

$$V_{t_{\text{max}}} \geq V_t \geq V_{t_{\text{min}}}; \text{ and} \quad (18)$$

- the BT state of charge must remain between  $\text{SoC}_{\text{BTmax}}$  (1) and  $\text{SoC}_{\text{BTmin}}$  (0.6):

$$\text{SoC}_{\text{BTmax}} \geq \text{SoC}_{\text{BT}} \geq \text{SoC}_{\text{BTmin}}. \quad (19)$$

Thus, the ESS sizing problem can be viewed as the following optimization problem: find  $n_{\text{BT}}$ ,  $n_{\text{UC}}$ ,  $P_{\text{BT}}$  and  $P_{\text{UC}}$  that minimize the objective function:

$$M_{\text{ESS}} = n_{\text{BT}} \cdot m_{\text{BT}} + n_{\text{UC}} \cdot m_{\text{UC}}, \quad (20)$$

subject to (16) - (19).

This mixed-integer optimization problem – note that  $n_{\text{BT}}$  and  $n_{\text{UC}}$  are integer variables – was solved by using a Branch-and-Bound algorithm [11], implemented through the routines of the Matlab Optimization Toolbox.

## 2.6 Autonomy Source Sizing

The autonomy source is sized to supply an average power of 33 kW computed with bases on the power profile of Fig. 4.

## 2.7 PMS

The PMS controls the power flow between the ESS and the autonomy source in order to provide the required power by the vehicle in a given driving cycle. The PMS basic principles are:

- the BT is charged by the autonomy source only;
- the autonomy source operation is based on the 'Thermostat' control. The autonomy source supplies constant power (its nominal power) or it is turned off. The autonomy source operation is as follows: the autonomy source is turned on when the BT maximum power is reached. In this condition, the autonomy source supplies power to recharge the BT and/or to

propelling the vehicle until  $SoC_{BTmax}$  is reached. When  $SoC_{BTmax}$  is reached, the autonomy source is turned off and the ESS supplies all the power to propelling the vehicle. The autonomy source is again turned on when  $P_{BTmax}$  is reached;

- the UC is kept in half load ( $V_{ttg} \sim 330$  V) allowing the BT to operate efficiently both in charging and discharging modes; and
- the UC is charged by the regenerative braking only.

The PMS limiting quantities are the BT maximum power, the vehicle required power and the UC terminal voltage. The rules of the PMS are described in two Cartesian planes of Fig. 7. Fig. 7 (a) describes the rules applicable when the autonomy source is turned off; Fig. 7 (b) describes the rules applicable when the autonomy source is turned on.

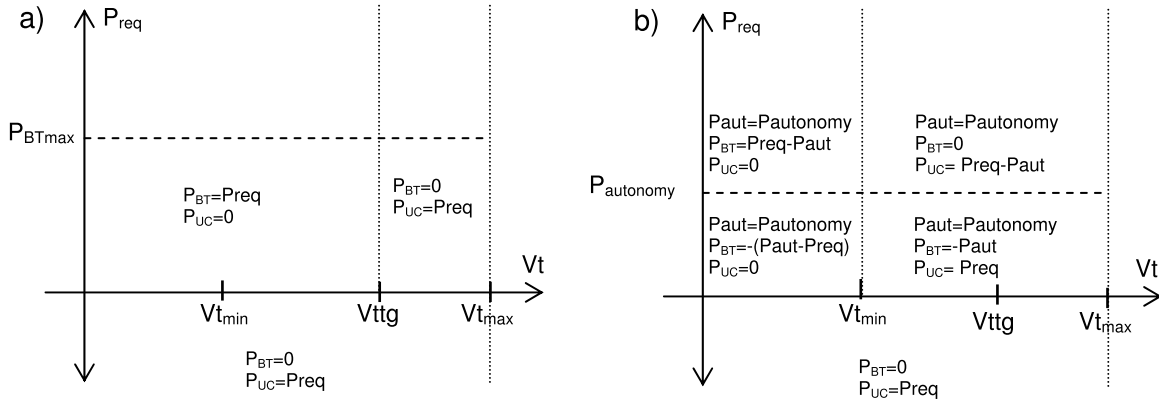


Fig. 7. PMS rules (a) when the autonomy source is turned off and rules (b) when the autonomy source is turned on.

### 3. Results

This Section presents the ESS sizing obtained by using the methodology presented in Section 2.4, and the PMS performance when the vehicle is driven in the LA92Short driving cycle.

The sizing methodology allowed finding several configurations for the ESS, as shown in Table 3. For each possible ESS configuration, Table 4 presents the number of BTs connected in series and the number of UCs strings connected in parallel. The ESS configuration of minimum mass has 11 BTs and 7 UCs strings. The ESS configurations with one to four BTs would require a high static gain from their converters, as the minimum operating voltage of the bus is 250 V. All the ESS configurations are expressed in integer modules of BTs and UCs.

**Table 3:** ESS Sizing.

$n_{BT}$	$n_{UC}$	mass (kg)
5	23	564,78
6	20	538,2
7	17	511,62
8	14	485,04
9	12	476,82
10	10	468,6
11	7	442,02
12	6	452,16

Fig. 8 shows the discharge process of the ESS with minimum mass in the time period considered for the sizing. The physical operational constraints for BTs and UCs were not violated: UC minimum voltage is 250 V and the maximum current required from the BT did not exceeded 500 A.

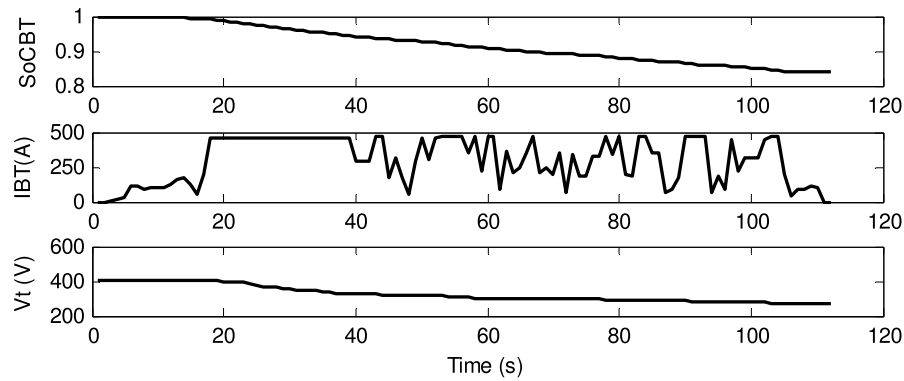


Fig. 8. Discharge process of  $SoC_{BT}$ ,  $I_{BT}$  and  $V_t$  in the specified time period for the ESS of minimum mass.

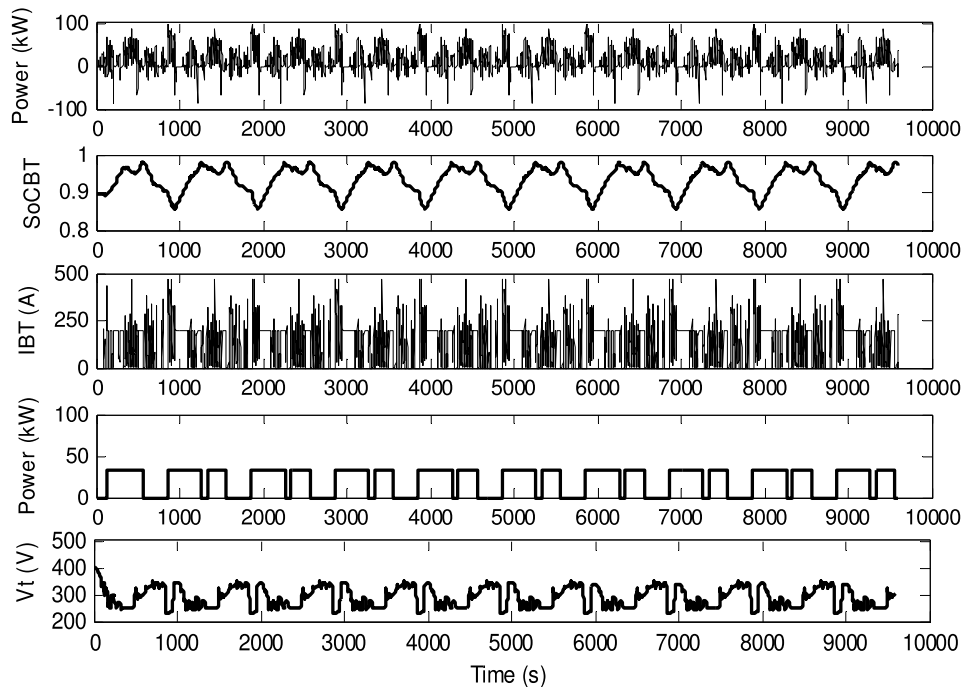


Fig. 9. Autonomy source and ESS time performance when the vehicle is driven in the LA92Short driving cycle.

The vehicle energy sources were controlled by the PMS proposed in Section 2.6. The use of this PMS allowed us to verify the performance of the ESS of minimum mass when combined with the autonomy source to provide the vehicle required power. The PMS was tested in all the driving cycles of Fig. 2, but Fig. 9 shows the results to the LA92Short driving cycle, the cycle that requires maximal power. The curves of Fig. 9 were obtained after ten repetitions of this driving cycle. We noted that the physical operational constraints were not violated. To avoid that the autonomy source were turned on and turned off in short periods of time (from 1 to 2 seconds), the  $SoC_{BT}$  was initially set 0.9.

## 4. Final Considerations

In this research project we proposed a nonlinear optimization technique for sizing the ESS energy sources of an SUV electric vehicle. The time period considered for the ESS sizing was the period of maximal required power of the envelope profile shown in Fig. 4. The sizing methodology provided an ESS of minimum mass with 11 BTs in series and 7 UCs strings in parallel.

At the end of the sizing period the UCs bank reached the minimum terminal voltage equal to 250 V. As indicated in [2] and [5], it is not appropriate to use the autonomy source and/or the BTs to recharge de UCs bank, for this purpose only the regenerative braking must be used.

However, as the ESS cannot be solely charged by the regenerative braking, a third source, an autonomy source, was necessary to keep the ESS in an appropriate level of energy. Therefore, the optimum sizing obtained is valid only when an autonomy source is considered.

The autonomy source must be fed by fuel (as fuel cells or a unit of internal combustion engine/generator) or has sufficient capacity to work for a long period of time (as BTs with high specific energy). According to [12], this source must be designed to supply the average power – constant power – required by the power profile. The rules for the operation of this source are described in Fig. 7.

The type and physical characteristics of the autonomy source were not specified, but it can be considered in the sizing methodology as in [5] and [13]. The methodology can include, for example, a fuel consumption analysis, its operation in the cycle, its number of cells (for fuel cells), operational costs, etc. The analysis of other BT types can be also incorporated to our analysis.

## Bibliografy

- [1] J.C. Camargo, A. Sordi, A.M.R. Santos, E.P. Silva, "Recursos Energéticos, Meio Ambiente e Desenvolvimento," *Revista Eletrônica multicidência*, no. 1, October 2003.
- [2] Roberto M. Schupbach, Juan C. Balda, Matthew Zolot, and Bill Kramer, "Design Methodology of a Combined Battery-Ultracapacitor Energy Storage Unit for Vehicle Power Management," in *Power Electronics Specialists Conference*, Acapulco, Mexico, 2003, pp. 15-19.
- [3] Roberto M. Schupbach and Juan C. Balda, "The Role of Ultracapacitors in an Energy Storage Unit for Vehicle Power Management," in *Proceedings of the IEEE Vehicle Technology Conference*, Orlando, USA, 2003, pp. 3236-3240.
- [4] Wenzhong Gao, "Performance Comparison of a Fuel-Cell Battery Hybrid Powertrain and a Fuel-Cell Ultracapacitor Hybrid Powertrain," *IEEE Transactions Vehicle Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 846-855, May 2005.
- [5] Jennifer Bauman and Mehrdad Kazerani, "A Comparative Study of Fuel-Cell-Battery, Fuel-Cell-Ultracapacitor, and a Fuel-Cell-Battery-Ultracapacitor Vehicles," *IEEE Transactions Vehicle Technologies*, vol. 57, no. 2, pp. 760-769, March 2008.
- [6] Hyundai. (2012, January) Hyundai Tucson. [Online]. <http://www.hyundai.co.uk>
- [7] U. S. Environmental Protection Agency. (2012, Abril) Testing and measuring emissions. [Online]. <http://www.epa.gov/nvfe/testing/dynamometer.htm>
- [8] (2011, November) Baterias ATMPOWER. [Online]. <http://www.atmpower.com.br/baterias-vrla.asp>
- [9] (2011, February) Maxwell Ultracapacitors. [Online]. <http://www.maxwell.com>
- [10] Juliana Lopes, Jose A. Pomilio, and Paulo A.V. Ferreira, "Optimal Sizing of Batteries and Ultracapacitors for Fuel Cell Electric Vehicles," in *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, AUS, 2011, pp. 4603 - 4608.
- [11] D. P. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, 2nd ed. Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 1999.
- [12] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastian E. Gay, and Ali. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: fundamentals, theory, and Design.*, 1st ed. Boca Raton, Florida: CRC PRESS, 2005.
- [13] Xiaofeng Liu, Demba Diallo, and Claude Marchand, "Cycle-Based Design Methodology of Hybrid Electric Vehicle Powertrain: Application to Fuel Cell Vehicles," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*, Dearborn, 2009, pp. 1853 - 1857.
- [14] (2011, February) Matlab. [Online]. <http://www.mathworks.com/>

**Anexo D: Artigo submetido à revista IEEE**



# Optimal Sizing of Energy Sources based on Multiple Driving Cycles for Electric Vehicles

Juliana Lopes, José A. Pomilio, *Senior Member, IEEE*, and Paulo A. V. Ferreira

**Abstract**— This article proposes a sizing methodology for the sources of an energy storage system (ESS), composed of batteries and ultracapacitors, of an electric vehicle. The autonomy source can be composed of fuel cells or an internal combustion engine/generator unity. The ESS sources are sized by a nonlinear optimization technique to operate in a certain period of high power required with the autonomy source turned off. The goal is to find the configuration of batteries and ultracapacitors (in integer modules) with minimum total mass needed to supply the power required. The viability of the sizing methodology proposed is demonstrated by using a power management strategy applied to the sources when the vehicle is operated in a specific driving cycle.

**Index Terms**—Battery, electric vehicle, optimization methods, power management strategy.

## I. INTRODUCTION

The impact of human activity on the environment and what to do to reverse or stabilize this situation have been discussed worldwide. The vehicle fleet is responsible for 40 % of CO<sub>2</sub> emissions in Brazil [1]. Gas emissions contribute to, among other factors, air pollution and to the greenhouse effect, harming the quality of life. In this context, electric vehicles are a potential alternative for reducing pollutants in urban centers.

The autonomy source of an electric vehicle is generally sized to supply its average or the stationary power [2], whereas the ESS is sized to supply the peak or the transient power. Electric vehicles with a single energy storage system (ESS), as batteries or ultracapacitors, usually have a total weight greater than electric vehicles with hybrid ESSs. Batteries and ultracapacitors have different characteristics and the choice of one or a combination of them depends on the power required [3]. Batteries are suitable for providing long-term pulse power (> 100 sec), and due to low specific power (W/kg), their

limiting factor is the power capability. Ultracapacitors can supply high peak power in short periods of time, and due to low specific energy (Wh/kg), their limiting factor is the energy storage capability. Based on these features, an ESS composed only of batteries or ultracapacitors are normally heavy and expensive. Therefore, the use of a hybrid ESS can increase the efficiency and reduce the weight of the vehicle.

Many articles, as [3], [2], [4], [5], and [6] have proposed solutions to the ESS sizing problem. In [4] two different ESS configurations have been studied, one composed of BTs and the other of UCs. Analysis of cost, weight, vehicle performance and fuel cell consumption are performed. A detailed study of different ESS configurations composed of UCs or BTs, and of UCs and BTs is given in [5]. The authors use an optimization technique where performance, fuel economy and powertrain costs define the objective function. They concluded that the hybrid ESS is the best choice. The hybrid ESS sizing methodology proposed by [2] is based on the Ragone theory, centered in the use of specific energy and specific power of the sources. The authors provide an ESS sizing obtained through nonlinear optimization technique resulting in a lighter ESS. An extension of the study developed in [2] is presented in [3]. An improved power management strategy (PMS) obtained with an optimization technique resulted in the best result found. Reference [6] presents two methodologies to sizing the ESS for the maximum power required during an acceleration period of the vehicle. The first one methodology is based on Ragone plots, and the second one on nonlinear optimization technique whose objective function goal is the mass minimization of the ESS. This reference provided the basis of the study shown in this article.

The above studies strongly contribute for the development of source-sizing methodologies. However they do not analyze the autonomy of the sources or take into account different urban and extra-urban driving cycles.

In this article, we propose a sizing methodology for a hybrid ESS based on a nonlinear optimization technique, aiming at the ESS total mass minimization. In order to analyze weight and cost alternatives we considered two different configurations of hybrid ESSs. Both have the same type of BTs, however the first one has UCs modules of 58 F and the second one has UCs modules of 165 F. The methodology is applied to a period of high power required, in which the sources supply energy subject to the physical limitations of the UCs terminal voltage and the BTs state of charge (SoC<sub>BT</sub>). The

Manuscript received month, day, and year. Accepted for publication month, day, and year. This work was supported by FAPESP (proc. no 2008/01162-6), CNPq, CAPES, and FAEPEX/Unicamp.

Copyright © 2012 IEEE. Personal use of this material is permitted. However, permission to use this material for any other purposes must be obtained from the IEEE by sending a request to [pubs-permissions@ieee.org](mailto:pubs-permissions@ieee.org)

J. Lopes is with University of Campinas, Brazil. (e-mail: [julilopes1@yahoo.com.br](mailto:julilopes1@yahoo.com.br)).

J. A. Pomilio is with University of Campinas, Brazil (e-mail: [antenor@fee.unicamp.br](mailto:antenor@fee.unicamp.br)).

P. A. V. Ferreira is with University of Campinas, Brazil (e-mail: [valente@dt.fee.unicamp.br](mailto:valente@dt.fee.unicamp.br)).

vehicle autonomy is tested by adding a third source – an autonomy source. An efficient power management of the three sources shows that the vehicle is capable of operating continuously and in different driving cycles.

The article is divided as follows: the vehicle, battery and ultracapacitor models are given in chapter 2. The basis and results of the optimal ESS sizing methodology are given in chapter 3. The rules and the results obtained from the power management strategy are given in chapter 4. Conclusions and References are given in chapters 5 and 6, respectively.

## II. MODELS

### A. Vehicular Dynamic

The vehicular dynamics of interest is the longitudinal, which in elementary analyses considers all of the vehicle components in simultaneous movement. In this case the vehicle can be viewed like a rigid body.

The vehicle power required,  $P_{req}$ , in a certain driving cycle is modeled by

$$P_{req} = ((M + M_r) \cdot dV/dt + C_{a \cdot \rho} \cdot A \cdot V^2 / 2 + f \cdot M \cdot g) V \quad (1)$$

where  $M$  is the gross vehicle weight, equal to 2050 kg, and  $M_r$  is the equivalent mass of the rotating components (driveshaft, axle shafts and wheels), and corresponds to 10 % of the curb weight, equal to 154.8 kg.  $V$  is the vehicle speed.

The resistance forces acting on the vehicle are: the aerodynamic drag force, the second term on the right side of (1), and the rolling resistance force, the third term on the right side of (1). As the vehicle is driven at the ground level, the road grade force is not considered.

The vehicle characteristics are presented in Table 1 and correspond to a Hyundai ‘Tucson SUV’ model, [7].

TABLE 1: EV PHYSICAL CHARACTERISTICS.

Frontal area, $A$	3.1659 m <sup>2</sup>
Rolling coefficient, $f$	0.015
Aerodynamic drag coefficient, $C_a$	0.45
Gravity acceleration, $g$	9.81 m/s <sup>2</sup>
Air density, $\rho$	1.23 Kg/m <sup>3</sup>

To compute the power profile of a driving cycle we considered the efficiencies of the differential (90 %), traction electric motor (90 %), and converter (95 %). Therefore the resulting efficiency is 73 %. In other words, in acceleration, (1) is divided by 0.73, whereas in braking it is multiplied by 0.73.

### B. Vehicular Topology

The adopted EV topology, shown in Fig. 1, is considered the best alternative among those analyzed in [5]. The UC bank is directly connected to the dc bus, so the number of UCs in series is fixed. The motor inverter must be capable of operating with variable voltage on the dc side.

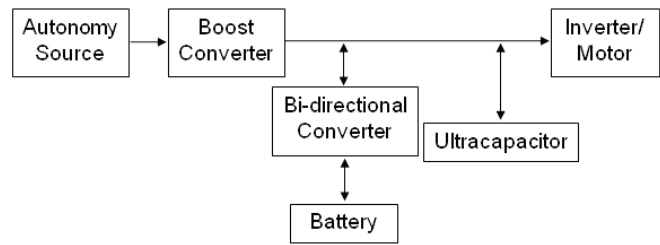


Fig. 1. Electric vehicle topology.

### C. Battery Model

The battery model is based on Panasonic/CGR1860A lithium ion cell. In order to work with lithium ion battery modules instead of cells, we considered that a module has 10 cells. Each module has 37 V of terminal voltage (3,7 V per cell), 22 Ah of capacity for 1 hour of discharge, and mass equal to 0.96 kg. The cell cost is \$2.8. We considered that a cost of \$15 is added to each group of 10 cells for cell balancing and packaging [5]. Therefore, the cost of a BT module is \$43.

We considered that BTs and UCs are organized into fixed strings. One string of BT has five modules. Therefore, the mass,  $m_{BT}$ , and the cost of one BT string are 4.8 kg and \$215, respectively. The number of strings of BTs in series,  $n_{BT}$ , is a variable of the optimization problem. There are not strings of BTs connected in parallel.

The battery equivalent circuit is shown in Fig. 2.

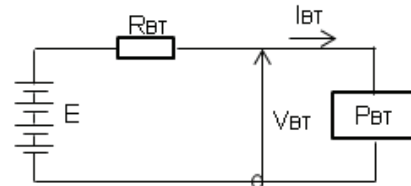


Fig. 2. Model of the battery circuit.

For a lithium ion BT the open circuit voltage ( $E$ ) varies with the state of charge ( $SoC_{BT}$ ), [8]. The  $SoC_{BT}$  is 1 for a battery completely charged and 0 for a battery completely discharged. The open circuit voltage is

$$E = m \cdot (-108.97SoC_{BT}^6 + 355.88SoC_{BT}^5 - 453.64SoC_{BT}^4 + 284.33SoC_{BT}^3 - 90.038SoC_{BT}^2 + 13.433SoC_{BT} + 3), \quad (2)$$

where  $m$  is the number of cells in the BT.

The internal resistance of the lithium ion BT,  $R_{BT}$ , varies with the  $SoC_{BT}$ , and is described by [8]

$$R_{BT} = m \cdot (-0.049SoC_{BT}^5 - 0.1297SoC_{BT}^4 + 0.4965SoC_{BT}^3 - 0.4577SoC_{BT}^2 + 0.144SoC_{BT} + 0.0482). \quad (3)$$

The original capacity is computed by the Peukert model, which describes the effect of the current on the capacity, [9],



$$C_p = I^k t, \quad (4)$$

where  $k$  is the Peukert coefficient equal to 1.03 for lithium ion BTs and  $t$  is the discharge time, [10].

The total removed charge  $CR_n$  from the battery on the  $n$ th simulation step is

$$CR_{n+1}[\text{Ah}] = CR_n + \delta t \cdot I_{BT}^k / 3600 [\text{Ah}], \quad (5)$$

where  $\delta t$  is the time interval between calculations and  $I_{BT}$  is the current required from the BT.

The state of charge is defined such as

$$\text{SoC}_{BT} = 1 - CR/C_p. \quad (6)$$

The BT terminal voltage ( $V_{BT}$ ) is

$$V_{BT} = E - R_{BT} I_{BT}. \quad (7)$$

The BT power required ( $P_{BT}$ ) is

$$P_{BT} = I_{BT} V_{BT}. \quad (8)$$

The required current from the BT ( $I_{BT}$ ) is computed such as

$$I_{BT} = \left( E + \sqrt{E^2 + 4R_{BT}P_{BT}} \right) / 2R_{BT}. \quad (9)$$

#### D. Ultracapacitor Model

The two types of ultracapacitors models considered are based on Maxwell Ultracapacitors [11]. The first one has capacitance,  $C$ , of 58 F, nominal voltage of 16 V, internal resistance,  $R_{UC}$ , of 0.022  $\Omega$ , mass of 0.63 kg, and the cost of a module is \$301. The second one has capacitance of 165 F, nominal voltage of 48 V, internal resistance of 0.0063  $\Omega$ , mass of 13.5 kg, and the cost of a module is \$2851 (all costs are in U.S. dollars).

The UC equivalent circuit is shown in Fig. 3.

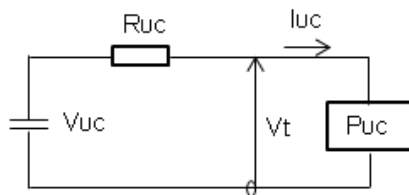


Fig. 3. Model of the ultracapacitor circuit.

The UC terminal voltage,  $V_t$ , depends on the power required

$$V_t = \left( V_{UC} + \sqrt{V_{UC}^2 - 4R_{UC}P_{UC}} \right) / 2, \quad (10)$$

where  $V_{UC}$  is the capacitor voltage and  $P_{UC}$  is the power

required from the UC.

The UC required current,  $I_{UC}$ , is

$$I_{UC} = P_{UC} / V_t. \quad (11)$$

The total energy removed from the UC,  $E_{UCn+1}$ , in the  $n$ th simulation step is

$$E_{UCn+1} = E_{UCn} - V_{UC} I_{UC} \delta t. \quad (12)$$

The UC stored energy is

$$E_{UC} = (1/2) C V_{UC}^2. \quad (13)$$

The UC state of charge,  $\text{SoC}_{UC}$ , is calculated as the ratio between its actual and maximum voltage [6]

$$\text{SoC}_{UC} = \left( V_{UC} / V_{UCmax} \right)^2. \quad (14)$$

According to Fig. 1, the number of UCs in series is fixed because they are directly connected to the dc bus. A reasonable value of the dc bus operating voltage varies between 250 V and 400 V [5]. Therefore, 25 modules of UCs of 58 F are needed to reach 400 V, and nine modules of UCs of 165 F are needed to reach a terminal voltage higher than 400V, resulting in 440 V. The strings of UCs are composed of 25 modules for UCs of 58 F and nine modules for UCs of 165 F. The mass,  $m_{UC}$ , and the cost of one string of 58 F UCs are 15.75 Kg and \$7525. For 165 F UCs, these values are 121.5 kg and \$25659.

The number of strings of UCs,  $n_{UC}$ , is a variable of the sizing problem.

### III. ESS SIZING METHODOLOGY

#### A. Driving Cycles

In this article we consider five different driving cycles, shown in Fig. 4, [12]. The driving cycles represent urban driving conditions such as: Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), New York City Cycle (NYCC), Elementary Urban Cycle plus Extra-Urban Driving Cycle (ECEEUUC). They also represent extra urban driving conditions such as: LA92Short which contains the first 969 seconds of the Unified Dynamometer Driving Schedule, and the Highway Fuel Economy Driving Schedule (HWFET).

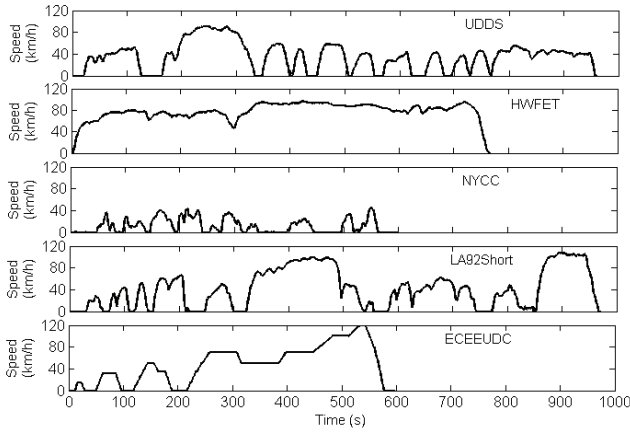


Fig. 4. Driving cycles.

### B. Envelope of Power Profiles

An important aspect to be considered in the sizing methodology is the definition of the time period or cycle condition which to the ESS will be sized. We found reasonable to size the ESS for a period of high power required. Different driving cycles allow us to take into account a large number of vehicle operation possibilities.

The vehicle can be driven in all driving cycles of the Fig. 4 or in a driving cycle which is a combination of them. Therefore, we considered the period of highest power required, obtained by the superposition of the power profiles shown in Fig. 5, as the period chosen to apply the ESS sizing methodology.

Fig. 6 shows the envelope of the power required resulted from the superposition of the power profiles, and the period from de 840 to 969 seconds chosen for the sizing problem. Note that this is the period of maximum power required.

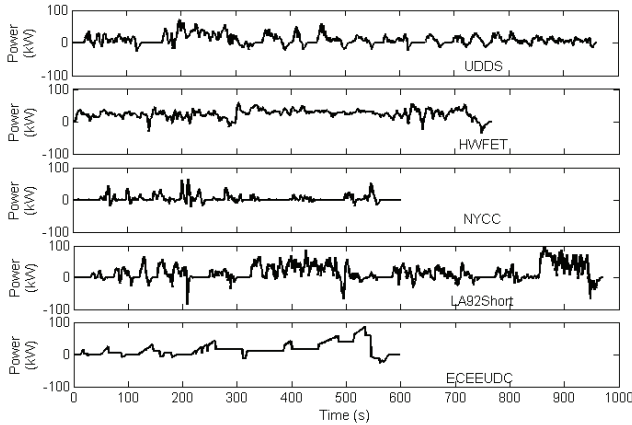


Fig. 5. Power required profiles.

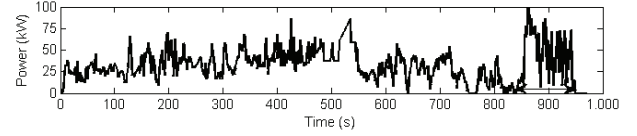


Fig. 6. Envelope of the positive path of power profiles, and the period selected for the sizing problem.

### C. Optimal Sizing Methodology

The sizing methodology based on a nonlinear optimization technique, applied to the hybrid ESS, is presented in this section. The ESS sources are sized to the time period from 840 to 969 seconds shown in Fig. 6; the sources must supply their energy subject to the physical limitations of UCs terminal voltage and BTs state of charge.

The goal of the methodology is the ESS total mass minimization, described by the following objective function

$$M_{ESS} = n_{BT}m_{BT} + n_{UC}m_{UC}, \quad (15)$$

where  $n_{BT,UC}$  and  $m_{BT,UC}$  are the number and mass of the strings, respectively.

The optimization variables are  $n_{BT}$ ,  $n_{UC}$ , the BT power required ( $P_{BT}$ ) and the UC power required ( $P_{UC}$ ). The constraints of the optimization problem are:

- the power balance equation, where the power required from the BTs and UCs must be equal to the power required from the ESS ( $P_{ESS}$ )

$$P_{ESS} = P_{BT} + P_{UC}; \quad (16)$$

- the maximum values that the power required from the BT,  $P_{BTmax}$ , and the UC,  $P_{UCmax}$ , can assume. The power required cannot be greater than the available power in the sources that is given as a function of their maximum specific power,  $\rho_{BT,UCmax}$ . These values for specific power are 350 W/kg, 2260 W/kg, and 3070 W/kg for the BT, the UC of 58 F, and the UC of 165 F, respectively

$$P_{BTmax} \leq \rho_{BTmax} \cdot n_{BT} \cdot m_{BT}, \quad (17)$$

$$P_{UCmax} \leq \rho_{UCmax} \cdot n_{UC} \cdot m_{UC};$$

- the UC terminal voltage must remain between  $V_{tmax}$  (400 V) and  $V_{tmin}$  (250 V)

$$V_{tmax} \geq V_t \geq V_{tmin}; \quad (18)$$

- and the BT state of charge must remain between  $SoC_{BTmax}$  (1) and  $SoC_{BTmin}$  (0.6)

$$SoC_{BTmax} \geq SoC_{BT} \geq SoC_{BTmin}. \quad (19)$$

Thus, the ESS sizing problem can be viewed as the

following optimization problem: find  $n_{BT}$ ,  $n_{UC}$ ,  $P_{BT}$  and  $P_{UC}$  that minimize the objective function

$$M_{ESS} = n_{BT}m_{BT} + n_{UC}m_{UC}, \quad (20)$$

subject to (16)-(19).

This mixed-integer optimization problem – note that  $n_{BT}$  and  $n_{UC}$  are integer variables – was solved by using a Branch-and-Bound algorithm [13], implemented through the routines of the Matlab Optimization Toolbox.

The proposed sizing methodology does not consider the costs of BTs and UCs in the formulation of the optimization problem. In that case, we chose to explore all possible combinations between BTs and UCs, of lowest mass, capable to attending the period of power required shown in Fig. 6. Therefore, the costs shown in the following subsection has been obtained from the combinations between BTs and UCs. The results of the sizing methodology are shown in the following subsection too.

#### D. ESSs Configurations

It is important highlight that all simulations were performed with the BTs and UCs bank fully charged.

For convenience, the ESSs configurations composed of lithium ion BTs and UCs of 58 F are called ESS1, and those composed of lithium ion BTs and UCs of 165 F are called ESS2.

Fig. 7 shows the best five results, of lowest mass, of the ESSs obtained by the sizing methodology. The cost of each obtained configuration of ESS is also presented on Fig. 8. The configurations of ESSs are given as a result of the number of strings of BTs and UCs.

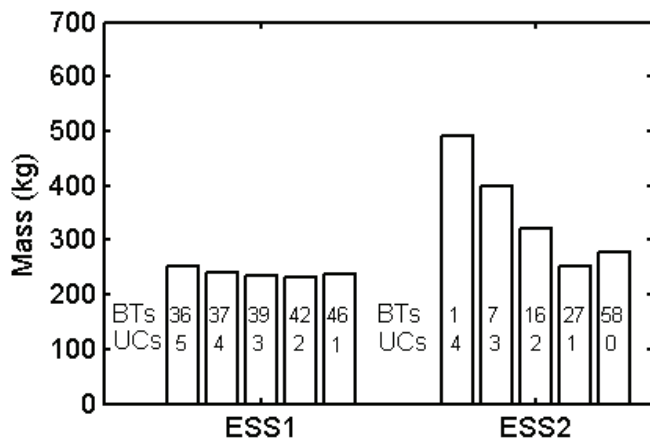


Fig. 7. Five best results for ESSs mass.

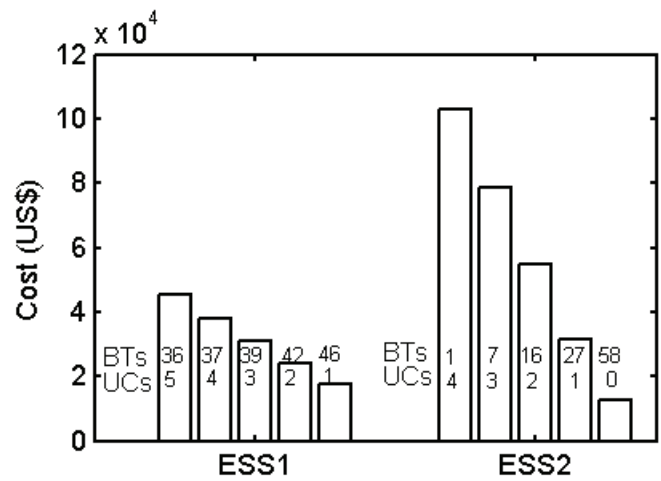


Fig. 8. Relative costs for the five best results.

The configurations of ESSs1 presented lower mass than ESSs2. The ESS of lowest mass, 233.1 kg, has 42 strings of BTs and 2 strings of UCs of 58 F. However the ESS configuration of lowest cost has 46 strings of BTs and 1 string of UCs of 58 F.

The ESSs2 are heavier and more expensive that ESSs1. The cost of the ESSs1 and ESSs2 drops with decreasing the strings number of both UCs types.

Fig. 9 shows the discharge process of the ESS with minimum mass in the time period considered for the sizing. We can note that the physical operational constraints for BTs state of charge and UCs terminal voltage were not violated. The BT maximum power required is less than 70.56 kW according to (17).

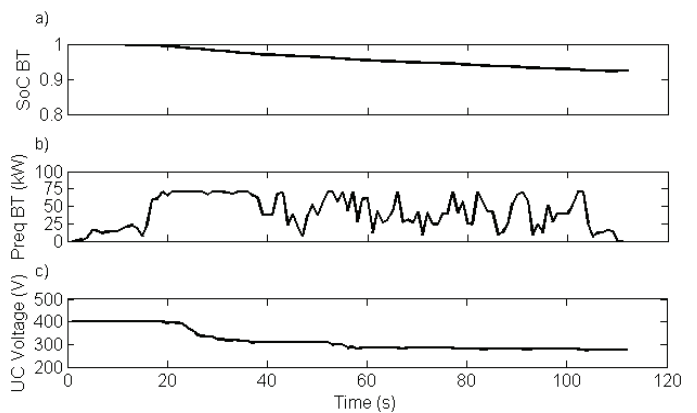


Fig. 9. Discharge process of the  $SoC_{BT}$  (a),  $P_{BT}$  (b), and UC terminal voltage (c) in the specified time period for the ESS of minimum mass.

#### IV. POWER MANAGEMENT STRATEGY

The power management strategy controls the power flow between the ESS and the autonomy source in order to provide the power required by the vehicle in a given driving cycle. This PMS is based on rules and its basic principles are:

- the power provided by the autonomy source is equal to the average of the power profile in Fig. 6. Therefore, the autonomy source is sized to supply an average power of 33 kW.
- the autonomy source operation is based on the ‘on-off’ control, in other words, or the autonomy source supplies constant power (its nominal power) or it is turned off. The autonomy source acts as follows: it is turned on when the BT maximum power is reached. In this condition, the autonomy source supplies power to recharge the BT and/or to propelling the vehicle until  $SoC_{BTmax}$  is reached. When  $SoC_{BT}$  is equal to  $SoC_{BTmax}$ , the autonomy source is turned off and the ESS supplies all power to propelling the vehicle. The autonomy source is again turned on when  $P_{BTmax}$  is reached. The maximum power required of the NYCC and HWFET driving cycles is less than the value of  $P_{BTmax}$ ; in such cases the autonomy source is turned on when  $SoC_{BT}$  is equal to 0.9.
- the UC bank is kept in half load ( $V_{tgg} \sim 330$  V) allowing the BT to operate efficiently both in charging and discharging modes; and
- the UC is only charged by the regenerative braking.

The PMS limiting quantities are the  $P_{BTmax}$ , the vehicle power required and the UC terminal voltage. The rules of the PMS are described in two Cartesian planes of Fig. 10. Fig. 10 (a) describes the rules applicable when the autonomy source is turned off; Fig. 10 (b) describes the rules when the autonomy source is turned on.

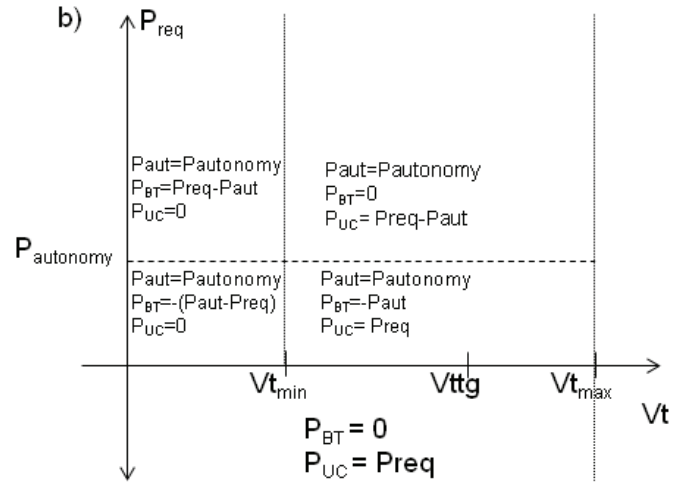
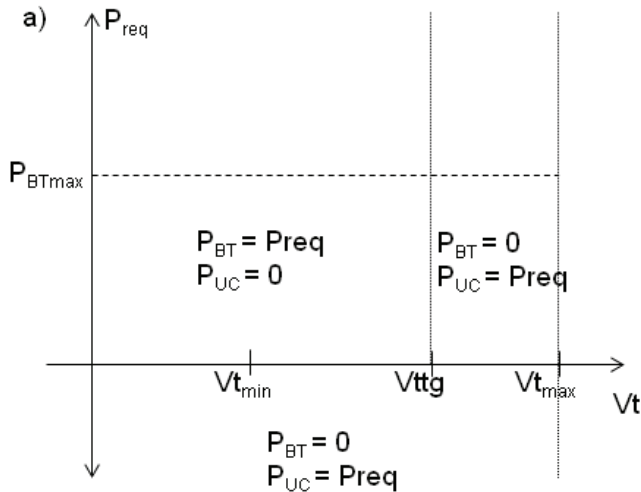


Fig. 10. PMS rules when the autonomy source is turned off (a) and when the autonomy source is turned on (b).

The results of the PMS are shown in the following subsection. These results were obtained: (i) for the combination, between BTs and UCs, of lowest mass; (ii) with the BTs and UCs bank fully charged; and (iii) for ten repetitions of each driving cycle shown in Fig. 4.

##### A. PMS Performance

The PMS was tested in all driving cycles of Fig. 4, but the results shown in Figs. 11 and 12 are related to HWFET and ECEEUDC driving cycles. These figures show the performance of the power management strategy, applied to the vehicle energy sources.

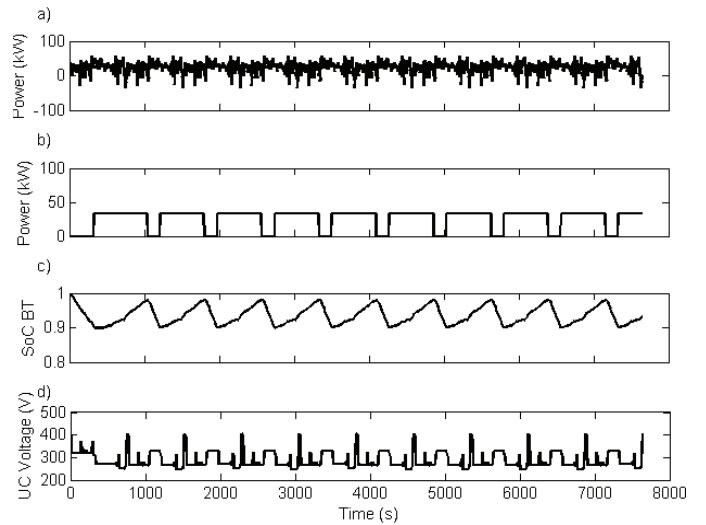


Fig. 11. Power required (a), autonomy source (b), and ESS time performance (c) and (d), when the vehicle is driven at HWFET driving cycle.

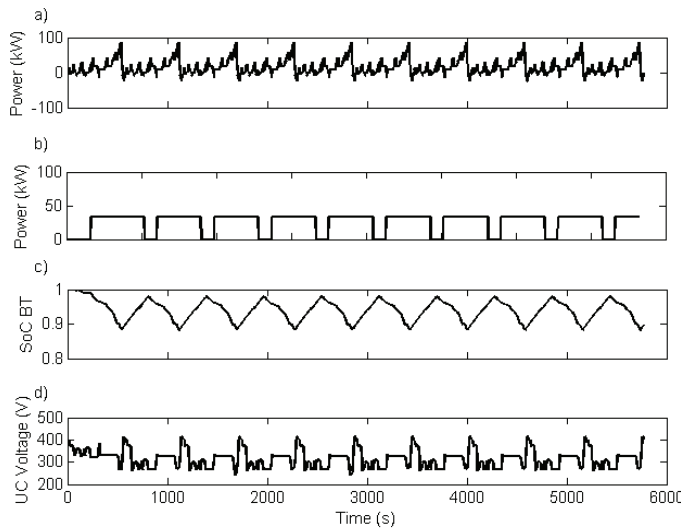


Fig. 12. Power required (a), autonomy source (b), and ESS time performance (c) and (d), when the vehicle is driven at ECEEUDC driving cycle.

Related to HWFET cycle, the estimated time of operation of the autonomy source, when turned on, is 10 minutes. In this cycle, the total time of operation of the autonomy source is greater when compared to other cycles, due to their high value of average power, 24 kW. This characteristic makes the autonomy source to operate longer.

The cycles LA92Short and ECEEUDC present the highest value of maximum power required, around 100 kW. However, the values of average power, for these cycles, are lower than 24 kW. Due to this characteristic, the total time of operation of the autonomy source is lower than the presented by HWFET cycle.

The behavior “on-off” of the autonomy source is presented in all driving cycles. The nominal power of this source, 33 kW, is greater than the individual values of average power of the driving cycles. Therefore, the autonomy source does not need to provide full-time power.

## V. CONCLUSION

In this article we proposed a nonlinear optimization technique for sizing the ESS energy sources of an SUV electric vehicle. The time period considered for the ESS sizing was the period of maximal power required of the envelope profile shown in Fig. 6. Between the ESSs configurations proposed, the sizing methodology provided an ESS of minimum mass, 233.1 kg, with 42 strings of BTs and 2 strings of UCs of 58 F.

At the end of the sizing period the UCs bank reached the minimum terminal voltage equal to 250 V. As indicated in [2] and [5], it is not appropriate to use the autonomy source and/or the BTs to recharge de UCs bank, for this purpose only the regenerative braking must be used.

However, as the ESS cannot be solely charged by the regenerative braking, a third source, an autonomy source was necessary to keep the ESS in an appropriate level of energy.

Therefore, the optimum sizing obtained is valid only when an autonomy source is considered.

The autonomy source must be fed by fuel (such as fuel cells or a unit of internal combustion engine/generator) or has sufficient capacity to work for a long period of time (as BTs with high specific energy). According to [14], this source was designed to supply the average power – constant power – required by the power profile.

The type and physical characteristics of the autonomy source were not specified, but it can be considered in the sizing methodology as in [5] and [15]. The methodology can include, for example, a fuel consumption analysis, its operation in the cycle, its number of cells (for fuel cells), operational costs, etc. The analysis of other BT types can be also incorporated to our analysis.

## REFERENCES

- [1] J.C. Camargo, A. Sordi, A.M.R. Santos, E.P. Silva, "Recursos energéticos, meio ambiente e desenvolvimento (Energy resources, environment and development)," *Eletronic Journal Multi-Science*, no. 1, Oct. 2003.
- [2] R. M. Schupbach, J. C. Balda, M. Zolot, and B. Kramer, "Design methodology of a combined battery-ultracapacitor energy storage unit for vehicle power management," presented at the 2003 Power Electronics Specialists Conf., Acapulco, GRO.
- [3] R. M. Schupbach and J. C. Balda, "The role of ultracapacitors in an energy storage unit for vehicle power management," in *Proc. of the IEEE Vehicle Technology Conf.*, Orlando, 2003, pp. 3236-3240.
- [4] W. Gao, "Performance comparison of a fuel-cell battery hybrid powertrain and a fuel-cell ultracapacitor hybrid powertrain," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 54, pp. 846-855, May 2005.
- [5] J. Bauman and M. Kazerani, "A comparative study of fuel-cell-battery, fuel-cell-ultracapacitor, and a fuel-cell-battery-ultracapacitor vehicles," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 57, pp. 760-769, March 2008.
- [6] J. Lopes, J. A. Pomilio, and P. A.V. Ferreira, "Optimal sizing of batteries and ultracapacitors for fuel cell electric vehicles," presented at the IECON 2011 - 37th Annual Conf. on IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, VIC.
- [7] Hyundai. (2012, January) Hyundai Tucson. [Online]. <http://www.hyundai.co.uk>
- [8] R. C. Kroeze and P. T. Krein, "Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations," presented at the IEEE Power Electronics Specialists Conf., Rhodes, GR, Jun. 15-19, 2008.
- [9] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2003, ch 2.
- [10] N. Omar et al., "Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application," presented at the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), Lille, FR, Sept. 1-3, 2010.
- [11] *Maxwell Ultracapacitors*. [Online]. Available: <http://www.maxwell.com>
- [12] *U. S. Environmental Protection Agency*. [Online]. Available: <http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm>
- [13] D. P. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, Massachusetts: Athena Scientific, 1999.
- [14] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design.*, Florida: CRC PRESS, 2005.
- [15] X. Liu, D. Diallo, and C. Marchand, "Cycle-based design methodology of hybrid electric vehicle powertrain: application to fuel cell vehicles," presented at the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), Dearborn, MI, 2009.



**Juliana Lopes** was born in São Carlos, Brazil, in 1981. She received the Bachelor's (2006) degree in Physics from the Federal University of São Carlos (UFSCar), the Master's (2008) degree in Mechanical Engineering from the University of São Paulo (USP), both at São Carlos, and she is currently working toward the Ph.D. degree in Electrical Engineering from the University of Campinas (UNICAMP), Campinas, Brazil.

Her main interests include energy sources for electric vehicles such as batteries and ultracapacitors, controls for power management strategy, techniques for sizing sources.

**José Antenor Pomilio** (M'92–SM'02) was born in Jundiaí, Brazil, in 1960. He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Campinas, Campinas, Brazil, in 1983, 1986, and 1991, respectively. From 1988 to 1991, he was the Head of the Power Electronics Group, Brazilian Synchrotron Light Laboratory. He was a Visiting Professor with the University of Padova, Padova, Italy, in 1993 and with the University of Rome III, Rome, Italy, in 2003. He is a Professor with the School of Electrical and Computer Engineering, University of Campinas, where he has been teaching since 1984.

His main interests are switching-mode power supplies, power-factor correction, and active power filters.

Dr. Pomilio was the President of the Brazilian Power Electronics Society in 2000–2002 and a member of the Administrative Committee of the IEEE Power Electronics Society in 1997–2002. He is currently an Associate Editor of the IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS

**Paulo A. V. Ferreira** was born in Belém, Brazil, in 1958. He received the B.Sc. degree in Electrical Engineering from the Federal University of Pará (UFPA) in 1982, and the M.Sc. and D.Sc. degrees in Electrical Engineering from the University of Campinas, Brazil, in 1983 and 1986, respectively. From 1986 to 1989 he was with the Center for Information Technology Renato Archer (CTI) in Campinas, Brazil, working on Computer-Aided Control System Design and Control of Industrial Processes. In 1989 he joined the Faculty of Electrical and Computer Engineering of UNICAMP, where he is currently an Associate Professor.

His teaching and research interests concentrate on the fields of Nonlinear Optimization and Control Theory.

## **Anexo E: Rotina de dimensionamento ótimo**





## ROTINA PRINCIPAL FMINCON

```
%=====
% PARÂMETROS DE ENTRADA E GLOBAIS DA BATERIA:
global Dt
global Vt
global Isc
global SoC_bt
global Ibt
global Vbt;
global massa_bt
global nserie

Dt = 1;
nserie = 5;
massa_bt = massa do string de BT íon de lítio ou massa do módulo de BT;
ro_bt_max = máxima densidade de potência da BT;

% =====
% =====
% PARÂMETROS DE ENTRADA E GLOBAIS DO SUPERCAPACITOR:
global SoC_sc
global massa_sc

massa_sc = massa de um string de SC;
ro_sc_max = máxima densidade de potência do SC;

% =====
% ROTINA FMINCON.
% =====

% Potência exigida na maior condição de demanda do ciclo.
global Pess1

btt=número inicial de strings ou de módulos de BTs;
scc=número inicial de strings de SCs;
Pbt=vetor inicial de potência requerida da BT;
Psc=vetor inicial de potência requerida do SC;

% Valor inicial do x.
x = [btt;scc;Pbt;Psc];

global T
T = length(Pess1);

% =====
% VETORES Aeq e beq DA RESTRIÇÃO: Aeq*x = beq. ESSA RESTRIÇÃO É A EQUAÇÃO DE
% BALANÇO DE POTÊNCIAS: Pbt + Psc = Pess.

Aeq = [zeros(T,3),eye(T,T),eye(T,T)];
beq=Pess1;

% =====
% VETORES A e b DA RESTRIÇÃO A*x <= b. ESSA RESTRIÇÃO LIMITA A POTÊNCIA
```

```

% MÁXIMA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DE POTÊNCIA MÁXIMA.

A=[-ro_bt_max*massa_bt*ones(T,1),zeros(T,2),eye(T,T),zeros(T,T)
    zeros(T,1),-ro_sc_max*massa_sc*ones(T,1),zeros(T,1),zeros(T,T),eye(T,T)
    0,-1,0,zeros(1,T),zeros(1,T)];

% b=zeros(2*T,1);
b=[zeros(2*T,1);-scc];

% =====
options=optimset('Display','iter','MaxFunEvals',5000000000000000000,'MaxIter',
5000000000000000000);
[x,n_total]=fmincon(@num_modulos,x,A,b,Aeq,beq,[],[],'non_linear',options);
% =====

```

### ROTINA FUNÇÃO OBJETIVO

```

function n_esu = num_modulos(x)
global massa_bt
global massa_sc

% Só queremos minimizar o número de BTs e SCs, por este motivo Pbt e Psc são
% iguais a zero no vetor g que multiplica o vetor x.

g = [massa_bt,massa_sc,0,zeros(1,(length(x)-3)/2),zeros(1,(length(x)-3)/2)];

n_esu = g*x;

return

```

## ROTINA DAS RESTRIÇÕES NÃO LINEARES

```
function [c,ceq] = nao_linear(x)

global T
global SoC_sc
global SoC_bt
global Vt
global Isc
global Vbt
global Ibt
global nserie

NoCells=número total de células das BTs conectadas em série;
c = [];
ceq = [];

% Condição inicial da bateria:

SoCmin_bt = 0; SoCmax_bt = 1; SoC_bt = []; CR = [];
CR(1) = 0; SoC_bt(1) = 1;
E = tensão de circuito aberto inicial;
Ibt(1) = corrente inicial;
Rin = resistência da BT;
Vbt(1) = E - Ibt(1)*Rin;

% Condição inicial do supercapacitor:
SoCmin_sc = 0; SoCmax_sc = 1;
Vtmin = 250; Vtmax = 400; Vt = []; SoC_sc = [];
Vt(1) = 400;
Isc(1) = 0;

% ROTINA RESTRIÇÃO NÃO LINEAR:

for i = 1:T

[SoC_bt(i+1),CR(i+1),Vbt(i+1),Ibt(i+1)]=calc_soc_bt(CR(i),SoC_bt(i),Vbt(i),Ibt
(i),x(3+i),x);
    c(i+1) = - SoCmax_bt + SoC_bt(i+1);
    c(i+T+1) = SoCmin_bt - SoC_bt(i+1);

    [SoC_sc(i+1),Vt(i+1),Isc(i+1)]=calc_vt(SoC_sc(i),Vt(i),Isc(i),x(3+T+i),x);
    c(2*T+i+1) = - Vtmax + Vt(1+i);
    c(3*T+i+1) = Vtmin - Vt(1+i);

end
return
```

## ROTINA DA BT ÍON DE LÍTIO

```
function [SoC_bt,CR,Vbt,Ibt] = calc_soc_bt(CR1,SoC_bt1,Vbt1,Ibt1,Pbt1,x)

global Dt
global nserie

NoCells=10*nserie;
Capacity=2.2*x(1);
k=1.03; % Peukert coefficient for lead acid batteries.
PeuCap = ((Capacity/1)^k)*1; % tempo de descarga de 1 hora.
E = (3 + 13.433*SoC_bt1 -90.038*(SoC_bt1^2)+284.33*(SoC_bt1^3)-
453.64*(SoC_bt1^4)+355.88*(SoC_bt1^5)-108.97*(SoC_bt1^6))*NoCells;

if Pbt1>0
    Rin = (0.0482+0.144*SoC_bt1 - 0.4577*(SoC_bt1^2)+0.4965*(SoC_bt1^3)-
0.1297*(SoC_bt1^4)-0.049*(SoC_bt1^5))*NoCells/x(1);
    Ibt1 = real((E - ((E*E) - (4*Rin*(Pbt1)))^0.5)/(2*Rin));
    CR1 = CR1 + (((Ibt1^k)*Dt)/3600);
    Vbt1 =real(E - Ibt1*Rin);

elseif Pbt1==0
    Ibt1 = 0;
    Vbt1 =real(E);

elseif Pbt1<0
    Rin = (0.051 + 0.2078*SoC_bt1 - 1.1148*(SoC_bt1^2) + 2.1656*(SoC_bt1^3) -
1.7766*(SoC_bt1^4) - 0.5251*(SoC_bt1^5))*NoCells/x(1);
    Pbat1 = - 1 * (Pbt1);
    Ibt1 = real((-E + (E*E + (4*2*Rin*Pbat1))^0.5)/(2*2*Rin));
    CR1 = CR1 - (((Ibt1)*Dt)/3600);
    Vbt1=real(E + Ibt1*Rin);

end

SoC_bt1=real(1-CR1/PeuCap);

Vbt = Vbt1;
CR = CR1;
SoC_bt = SoC_bt1;
Ibt = Ibt1;
```

## ROTINA DO SC DE 58 F

```
% Modelo do Supercapacitor Eletrolítico

function [SoC_sc1,Vt1,Isc1] = calc_vt(SoC_sc,Vt,Isc,Psc,x)

% Hipóteses: DVsc (variação da energia do sc)e Dt (discretização do tempo)são
pequenos;
%           R (resistência do sc)é constante;
% =====
% PARÂMETROS DE ENTRADA DE MÓDULO BMOD0058-15V
global Dt

C1 = 58; % Capacitância do sc.
Vscmax1 = 16; % Tensão máxima na célula do sc.
R1 = 0.022; % Resistência interna do sc.
ns = 25; % Número de SCs conectados em série.

% =====
% Os PARÂMETROS DE ENTRADA SÃO ATUALIZADOS CONSIDERANDO-SE CONEXÃO EM SÉRIE
% DOS SUPERCAPACITORES.

C = (C1/ns).*x(2); % Capacitância atual.
Vscmax = Vscmax1*ns; % Tensão terminal atual.
R = (R1*ns)./x(2); % Resistência atual

% =====

Vsc = (SoC_sc^0.5)*Vscmax; % Tensão inicial na célula do sc.
Esc = 0.5*C*(Vsc^2); % Energia inicial na célula do sc.

if Psc > 0

    Vt = real(Vsc + (Vsc^2 - 4*Psc*R)^0.5)/2; % Tensão nos terminais do sc.
    Isc = Psc/Vt; % Corrente no sc.
    DEsc = Vsc*Isc*Dt; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc - DEsc; % Energia atual do sc.

elseif Psc == 0
    DEsc = 0; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc - DEsc; % Energia atual do sc.

elseif Psc < 0
    Psc = -1 * Psc;
    Vt = real(Vsc + (Vsc^2 + 4*Psc*R)^0.5)/2; % Tensão nos terminais do sc.
    Isc = Psc/Vt; % Corrente no sc.
    DEsc = Vsc*Isc*Dt; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc + DEsc; % Energia atual do sc.

end

Vsc1 = real((2*Esc)/C)^0.5; % Tensão atual na célula do sc.
SoC_sc = real((Vsc1/Vscmax)^2); % Estado de carga atual do sc.
```

```
Vt1 = Vt;  
SoC_sc1 = SoC_sc;  
Isc1 = Isc;
```

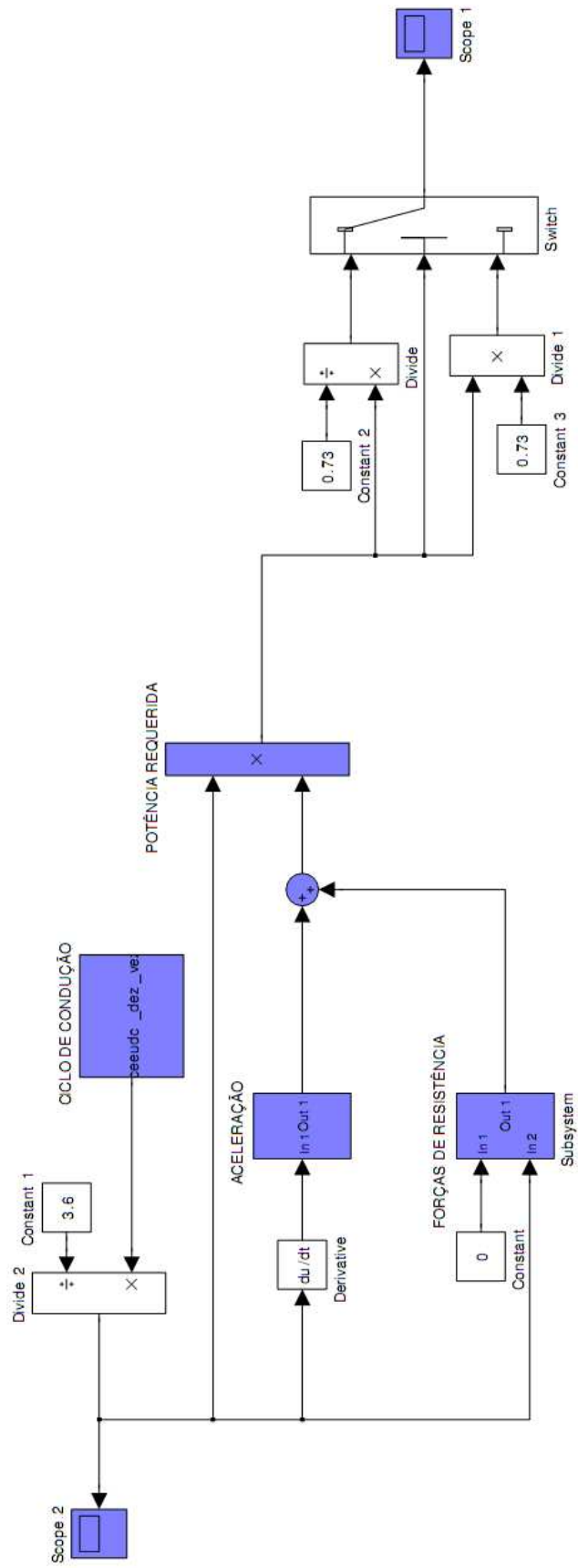
```
return
```

## **Anexo F: EGP em regras**

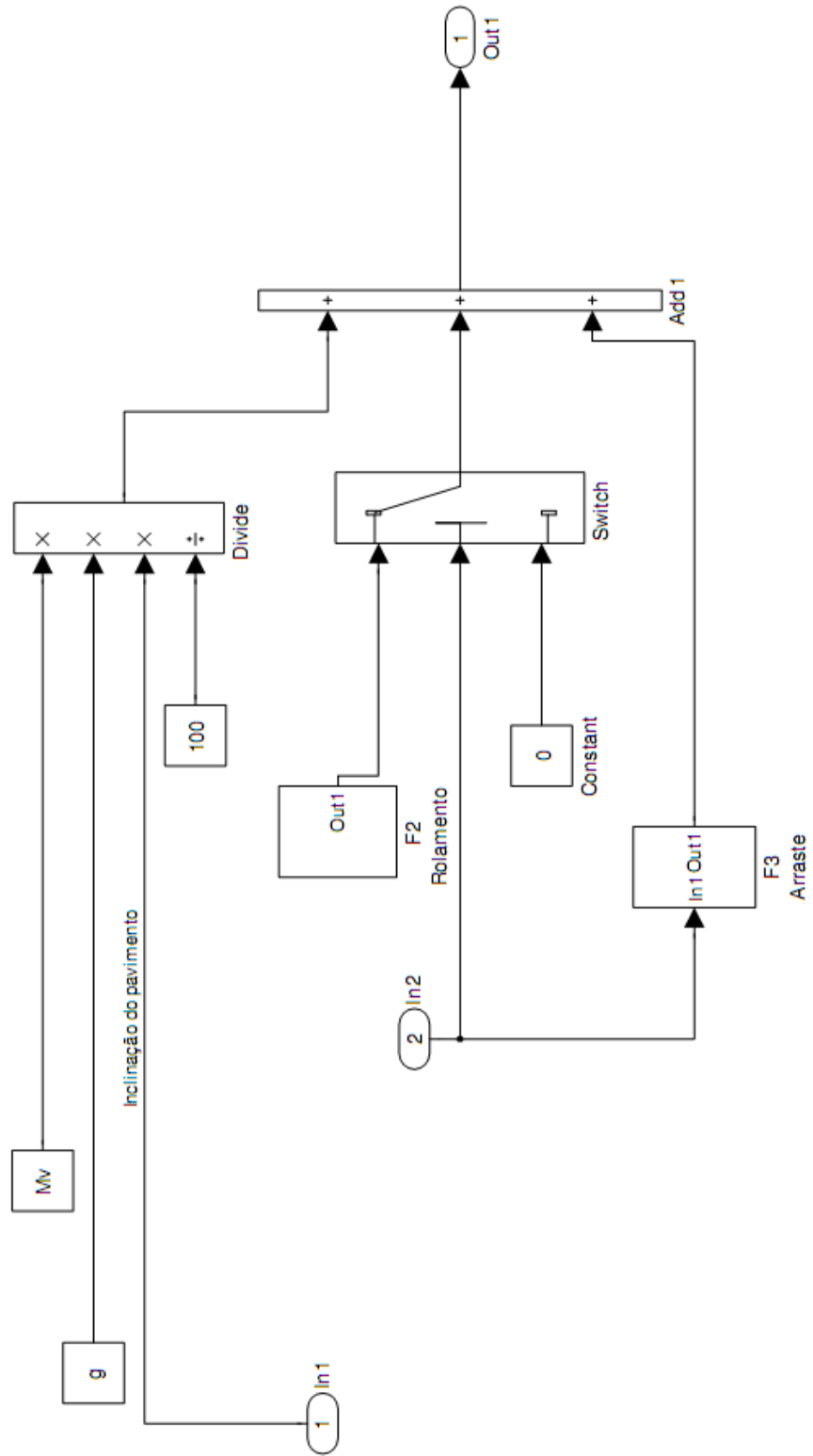




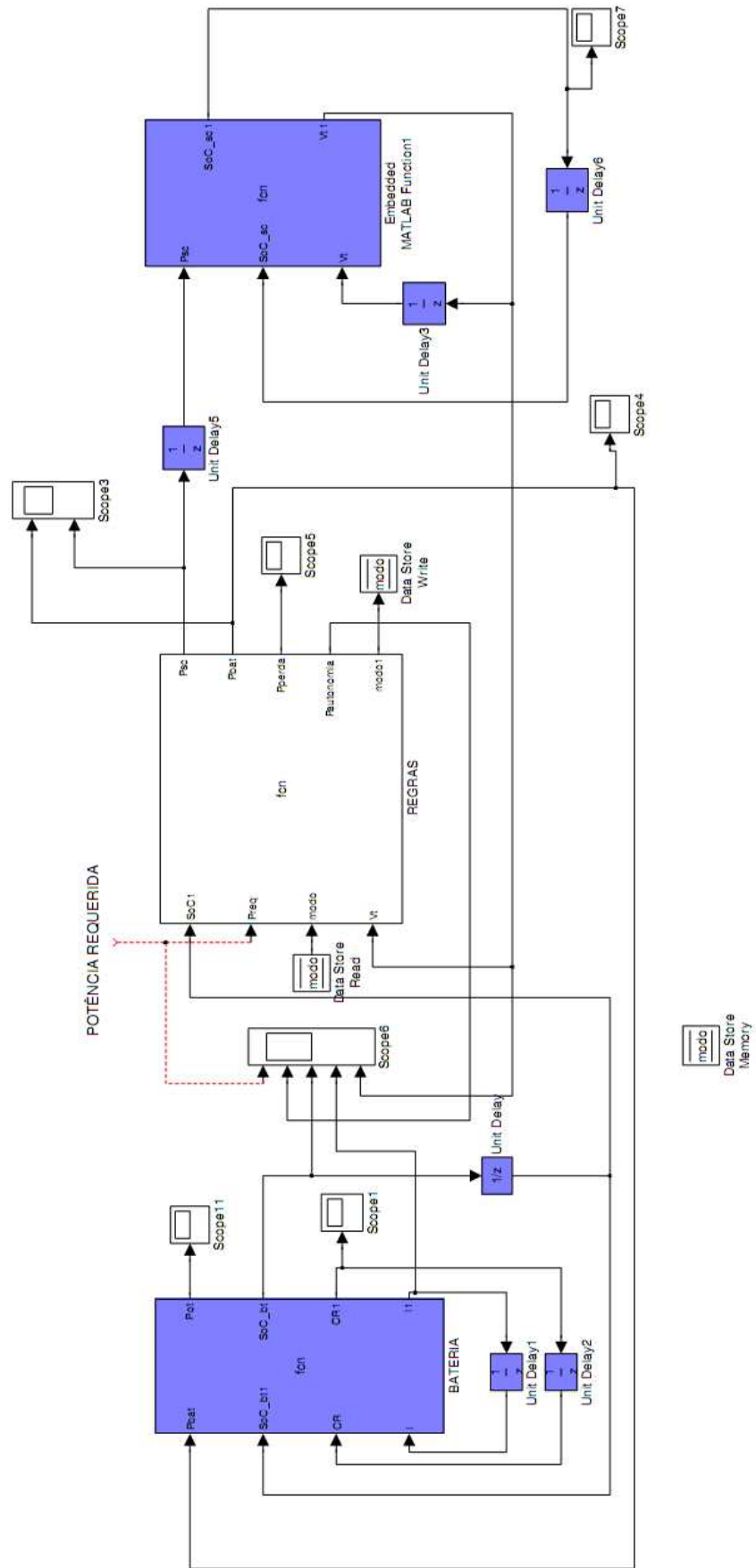
# DINÂMICA DO VEÍCULO



# FORÇAS DE RESISTÊNCIA



# EGP EM REGRAS



## ROTINA DA EGP EDITADA NO BLOCO “REGRAS”

```
function [Psc,Pbat,Pperda,Pautonomia,modol] = fcn(SoCl,Preq,modo,Vt)
```

```
Psc = 0;  
Pbat = 0;  
Pperda = 0;  
Pbatmax =156*0.96*5*350;  
Pmedia = 119000;  
Pautonomia = 0;  
Vtmax = 405;  
Vtmin = 250;  
Vttg = 330;  
erro = 50; %50  
erromin = 20; %20
```

```
if (Preq <= Pbatmax) && (modo == 0) % Região Ótima
```

```
    if Preq >= 0 && Vt<=(Vtmax+erro) && Vt > Vttg  
        Pbat = 0;  
        Psc = Preq;  
        Pautonomia = 0;
```

```
    elseif Preq >= 0 && Vt < Vttg  
        Pbat = Preq;  
        Psc = 0;  
        Pautonomia = 0;
```

```
    elseif Preq < 0 && Vt <= (Vtmax+erro)  
        Pbat = 0;  
        Psc = Preq;  
        Pautonomia=0;  
        Pperda = Preq-Psc;
```

```
    elseif Preq < 0 && Vt >= (Vtmax+erro)  
        Pbat = 0;  
        Psc = 0;  
        Pperda=Preq;
```

```
end
```

```
end
```

```

if (Preq > Pbatmax) || (modo == 1) || SoC1 < 0.8           % Região Crítica

Paut = Pmedia;
modo = 1;

if Preq >= 0 && Preq < Paut && Vt<=(Vtmax+erro) && Vt > (Vtmin+erromin)
    Pbat = -Paut;
    Psc = Preq;
    Pautonomia=Paut;

elseif Preq >= 0 && Preq < Paut && Vt <= (Vtmin+erromin)
    Pautonomia = Paut;
    Psc = 0;
    Pbat = -(Pautonomia-Preq); % potencia de recarga.

elseif Preq >= Paut && Vt<=(Vtmax+erro) && Vt > (Vtmin+erromin)
    Pbat = 0;
    Pautonomia=Paut;
    Psc = Preq-Pautonomia;

elseif Preq >= Paut && Vt <= (Vtmin+erromin)
    Psc = 0;
    Pautonomia = Paut;
    Pbat = Preq - Pautonomia; % nesse ponto pode extrapolar a potencia
máxima da bateria.

elseif Preq < 0 && Vt <(Vtmax+erro)
    Pbat = -Paut;
    %           Pbat = 0;
    Psc = Preq;
    Pautonomia=Paut;

elseif Preq < 0 && Vt >(Vtmax+erro)
    Pbat = -Paut;
    %           Pbat = 0;
    Psc = 0;
    Pperda = Preq-Psc;
    Pautonomia=Paut;

end

end

if (SoC1 >=0.98)
    modo = 0;
end

modol = modo;

```



## **Anexo G: Rotina da EGP ótima**





## ROTINA PRINCIPAL FMINCON

```
global SoC_bt
global Vt
global Ibt
global T
global DT
global Preq

% Dados de inicialização:
nbt = número de baterias;
mbt = massa da bateria; % kg
de_pot_bt = máxima densidade de potência da bateria; % W/kg

nsc = número de strings de supercapacitores;
msc = massa do string do supercapacitor; % kg
de_pot_sc = máxima densidade de potência do supercapacitor; % W/kg

DT = 1;

% Valores iniciais de potência da bateria, supercapacitor e potência
requerida.
Pauto = valor inicial da potência requerida da fonte de autonomia;
Pbate = valor inicial da potência requerida da BT;
Psupe = valor inicial da potência requerida do SC;

Preq = valor inicial da potência requerida da ESS;

% Tamanho do vetor Preq.
T = length(Preq);

% Valor de x0:
x = [Pauto;Pbate;Psupe];

% Restrição de igualdade: Aeq*x=beq, para a equação do balanço de potências.
Aeq = [eye(T,T),eye(T,T),eye(T,T)];
beq = Preq;

% Restrição de potência máxima: LB < x < UB.
Pbtmin = -máxima potência de recarga da BT; Pbtmax = nbt*de_pot_bt*mbt;
Pscmin = -máxima potência de recarga do SC; Pscmax = nsc*de_pot_sc*msc;
Pautomax = máxima potência fornecida pela fonte de autonomia;

LB = [zeros(T,1);ones(T,1)*Pbtmin;ones(T,1)*Pscmin];
UB = [ones(T,1)*Pautomax;ones(T,1)*Pbtmax;ones(T,1)*Pscmax];

options=optimset('Display','iter','MaxFunEvals',5000000000000000000000,'MaxI
ter',5000);
[x,economia]=fmincon(@Veconomia,x,[],[],Aeq,beq,UB,UB,'nao_linear',options);
```

## ROTINA FUNÇÃO OBJETIVO

```
function quero = Veconomia(x)

global T
global DT
g = [DT*ones(1,T), zeros(1,T), zeros(1,T)];
quero = g*x;

return
```

## ROTINA DAS RESTRIÇÕES NÃO LINEARES

```
function [c,ceq] = nao_linear(x)

global SoC_sc
global SoC_bt
global Vt
global Isc
global Vbt
global Ibt
global T

c = [];
ceq = [];

% Valores iniciais da BT:

NoCells=número total de células das BTs conectadas em série;
SoCmin_bt = 0.6; SoCmax_bt = 1;
SoC_bt = []; CR = [];
CR(1) = 40.055; SoC_bt(1) = 0.904;
Ibt(1) = 0;
E = (3 + 13.433*SoC_bt-90.038*(SoC_bt^2)+284.33*(SoC_bt^3)-
453.64*(SoC_bt^4)+355.88*(SoC_bt^5)-108.97*(SoC_bt^6))*NoCells;
Ibt(1) = 0;
Vbt(1) = E;

% SUPERCAPACITOR:

Vtmin = 250; Vtmax = 400; Vt = []; SoC_sc = [];
Vt(1) = 327; SoC_sc(1) = 0.673;
Isc(1) = 0;
```

```
% ROTINA RESTRIÇÃO NÃO LINEAR:
```

```
for i = 1:T
```

```
[SoC_bt(i+1),CR(i+1),Vbt(i+1),Ibt(i+1)]=calc_soc_bt(CR(i),SoC_bt(i),Vbt(i),Ibt(i),x(T+i));
```

```
    c(i) = - SoCmax_bt + SoC_bt(i+1);
```

```
    c(i+T) = SoCmin_bt - SoC_bt(i+1);
```

```
    [SoC_sc(i+1),Vt(i+1),Isc(i+1)]=calc_vt(SoC_sc(i),Vt(i),Isc(i),x(2*T+i));
```

```
    c(4*T+i) = - Vtmax + Vt(1+i);
```

```
    c(5*T+i) = Vtmin - Vt(1+i);
```

```
end
```

```
return
```

## ROTINA DA BT ÍON DE LÍTIO

```
function [SoC_bt,CR,Vbt,Ibt] = calc_soc_bt(CR1,SoC_bt1,Vbt1,Ibt1,Pbt)
```

```
nparalelo=156;
```

```
nserie=5;
```

```
NoCells=10*nserie; %string com 5 módulos de 10 células cada.
```

```
Capacidade=2.2*nparalelo;
```

```
k=1.03;
```

```
PeuCap = ((Capacidade/1)^k)*1; % tempo de descarga de 1 hora.
```

```
E = real((3 + 13.433*SoC_bt1 -90.038*(SoC_bt1^2)+284.33*(SoC_bt1^3)-  
453.64*(SoC_bt1^4)+355.88*(SoC_bt1^5)-108.97*(SoC_bt1^6))*NoCells);
```

```
if Pbt > 0
```

```
    Rin = real((0.0482+0.144*SoC_bt1 - 0.4577*(SoC_bt1^2)+0.4965*(SoC_bt1^3)-  
0.1297*(SoC_bt1^4)-0.049*(SoC_bt1^5))*NoCells/nparalelo);
```

```
    Ibt1 = (E - ((E*E) - (4*Rin*(Pbt)))^0.5)/(2*Rin);
```

```
    CR1 = CR1 + ((Ibt1^k)/3600);
```

```
    Vbt1 =real(E - Ibt1*Rin);
```

```
elseif Pbt == 0
```

```
    Ibt1 = 0;
```

```
    Vbt1 = E;
```

```
    CR1 = 0;
```

```
elseif Pbt < 0
```

```
    Rin = real((0.0482+0.144*SoC_bt1 - 0.4577*(SoC_bt1^2)+0.4965*(SoC_bt1^3)-  
0.1297*(SoC_bt1^4)-0.049*(SoC_bt1^5))*NoCells/nparalelo);
```

```
    Pbat1 = - 1 * (Pbt);
```

```
    Ibt1 = (-E + (E*E + (4*2*Rin*(Pbat1)))^0.5)/(2*2*Rin);
```

```
    CR1 = CR1 - ((Ibt1)/3600);
```

```
    Vbt1=real(E + Ibt1*Rin);
```

```
end
```

```
SoC_bt1=real(1-CR1/PeuCap);
```

```

if SoC_bt1<0.01
    Vbt1=0;
end

Vbt = Vbt1;
CR = CR1;
SoC_bt = SoC_bt1;
Ibt = Ibt1;

```

### ROTINA DO SC DE 58 F

```

function [SoC_sc1,Vt1,Isc1] = calc_vt(SoC_sc,Vt,Isc,Psc)
C1 = 58; % Capacitância do sc.
Vscmax1 = 16; % Tensão máxima na célula do sc.
R1 = 0.022; % Resistência interna do sc.
ns = 25;
nsc=8;

% =====
% Os PARÂMETROS DE ENTRADA SÃO ATUALIZADOS CONSIDERANDO-SE CONEXÃO EM SÉRIE
% DOS SUPERCAPACITORES.
C = (C1/ns).*nsc; % Capacitância atual.
Vscmax = Vscmax1*nsc; % Tensão terminal atual.
R = (R1*ns)./nsc; % Resistência atual
% =====
Vsc = (SoC_sc^0.5)*Vscmax; % Tensão inicial na célula do sc.
Esc = 0.5*C*(Vsc^2); % Energia inicial na célula do sc.

if Psc > 0
    Vt = real(Vsc + (Vsc^2 - 4*Psc*R)^0.5)/2; % Tensão nos terminais do sc.
    Isc = Psc/Vt; % Corrente no sc.
    DEsc = Vsc*Isc; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc - DEsc; % Energia atual do sc.

elseif Psc == 0
    DEsc = 0; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc - DEsc; % Energia atual do sc.

elseif Psc < 0
    Psc = -1 * Psc;
    Vt = real(Vsc + (Vsc^2 + 4*Psc*R)^0.5)/2; % Tensão nos terminais do sc.
    Isc = Psc/Vt; % Corrente no sc.
    DEsc = Vsc*Isc; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc + DEsc; % Energia atual do sc.

end
Vsc1 = real((2*Esc)/C)^0.5; % Tensão atual na célula do sc.
SoC_sc = real((Vsc1/Vscmax)^2); % Estado de carga atual do sc.

Vt1 = Vt;

```

```
SoC_sc1 = SoC_sc;  
Isc1 = Isc;
```

```
return
```



**Anexo H: Rotina da curva de Ragone do SC de 58 F**





## ROTINA PRINCIPAL DO GRÁFICO DE RAGONE DO SC DE 58 F

```
clc;
clear all;

%Ragone
%Um módulo BMOD0058-15V

global Dt
global n

massa = 0.63; % massa em kg do SC.
n = 1;
Dt = 0.01; % passo de simulação em sec.
De_potencia_sc = 10:10:2500; % Densidade de potencia.
Potencia = De_potencia_sc*massa*n; % Potencia de descarga.

global Psc2

for i=1:(length(Potencia))
    Tmin(i)=tempo(Potencia(i));

end

tempo=Tmin*Dt;

% Energia disponível até Vt=7.5 V.
Energia = (Potencia.*tempo)/3600;

% Densidade de energia.
De_energia_sc = Energia/(massa*n);

% Gráfico de Ragone

loglog(De_energia_sc,De_potencia_sc);

xlim([0.1 100]);
ylim([10 10000]);
```

## ROTINA QUE CALCULA O TEMPO DE DESCARGA DO SC

```
function [Tmin] = tempo(Potencia)

global Psc2
global n

Pcarga = Potencia*ones(1,750000);

SoC(1)=1; % SC inicialmente carregado, ou seja, no instante de tempo inicial
ainda nao foi solicitado carga à este.

Vt = real(16*n + ((16*n)^2 - 4*Pcarga(1)*(0.019*n))^0.5)/2; % Tensão terminal
inicial atualizada.

Vt(1)=Vt;

Vsc = 16;

I(1)=Pcarga(1)/Vt(1);

Psc(1)=Vsc*I(1);

i=1;

while (Vt(i) >= (Vt/2))

[SoC(i+1),Vt(i+1),Psc(i+1)] = capacitor(Pcarga(i),SoC(i),Psc(i));

i=i+1;

end

Tmin=i;
Psc2=Psc;

% subplot(2,1,1)
% plot(SoC);
%
% subplot(2,1,2)
% plot(Vt);

return
```

## ROTINA DO SC DE 58 F

```
function [SoC1,Vt1,Psc] = capacitor(Psc,SoC1,Vt)

% Hipóteses: DVsc (variação da energia do sc)e Dt (discretização do tempo)são
pequenos;
%           R (resistência do sc)é constante;
%           Pcarga (potência demandada do sc) e Dt são constantes.
% =====
% PARÂMETROS DE ENTRADA DE UM MÓDULO BMOD0058-15V
global Dt
global n

C1 = 58; % Capacitância do sc.
Vscmax1 = 16; % Tensão máxima na célula do sc.
R1 = 0.022; % Resistência interna do sc.

% =====
% Os PARÂMETROS DE ENTRADA SÃO ATUALIZADOS CONSIDERANDO-SE CONEXÃO EM SÉRIE
% DOS SUPERCAPACITORES.

C = C1./n; % Capacitância atual.
Vscmax = Vscmax1.*n; % Tensão terminal atual.
R = R1.*n; % Resistência atual
% =====

Vsc = (SoC1^0.5)*Vscmax; % Tensão inicial na célula do sc.
Esc = 0.5*C*(Vsc^2); % Energia inicial na célula do sc.

if Psc > 0
    Vt = real(Vsc + (Vsc^2 - 4*Psc*R)^0.5)/2; % Tensão nos terminais do sc.
    I = Psc/Vt; % Corrente no sc.
    DEsc = Vsc*I*Dt; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc - DEsc; % Energia atual do sc.

elseif Psc == 0
    DEsc = 0; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc - DEsc; % Energia atual do sc.

elseif Psc < 0
    Psc = -1 * Psc;
    Vt = real(Vsc + (Vsc^2 + 4*Psc*R)^0.5)/2; % Tensão nos terminais do sc.
    I = Psc/Vt; % Corrente no sc.
    DEsc = Vsc*I*Dt; % Variação na energia do sc.
    Esc = Esc + DEsc; % Energia atual do sc.

end

Vsc1 = real((2*Esc)/C)^0.5; % Tensão atual na célula do sc.
SoC1 = real((Vsc1/Vscmax)^2); % Estado de carga atual do sc.
Vt1 = Vt;
SoC1 = SoC1;

return
```

