

SISTEMA DE TRAÇÃO DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO COM PILHAS A
COMBUSTÍVEL E BATERIAS

Alexandre de Mattos Pereira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Antonio Carneiro de Mesquita Filho, Dr. d'État.

Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda, D.Sc.

Prof. Jorge Lopes de Souza Leão, Dr.Ing.

José Vicente Calvano, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2007

PEREIRA, ALEXANDRE DE MATTOS
Sistema de Tração de um Ônibus
Elétrico Híbrido com Pilhas a Combustível
e Baterias [Rio de Janeiro] 2007
XI, 107 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2007)
Dissertação - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE
1. Ônibus Elétrico Híbrido
I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*Dedico este trabalho à Leila,
pois sem o seu amor não seria possível concluí-lo*

*e aos meus queridos pais Dilson e Cecília,
que sempre lutaram pela minha educação.*

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Antonio Carneiro de Mesquita Filho, pelo apoio e orientação;
- Ao professor Paulo Emílio Valadão de Miranda, pelo apoio, orientação e incentivo; também por ter sido um exemplo para minha vida profissional, com quem aprendi muito desde quando foi meu chefe no Laboratório de Hidrogênio;
- Ao amigo Edvaldo, que sempre me ajudou no desenvolvimento deste trabalho;
- Ao supervisor e amigo Paulo Dias, pelo apoio e pelas liberações para eu poder me dedicar a este trabalho;
- Ao Tribunal Regional Federal da 2ª Região, por me conceder horário especial para cursar as disciplinas deste curso;
- Aos colegas do Laboratório de Hidrogênio, pela ajuda que recebi sempre que precisei.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SISTEMA DE TRACÇÃO DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO COM PILHAS A
COMBUSTÍVEL E BATERIAS

Alexandre de Mattos Pereira

Junho/2007

Orientadores: Antonio Carneiro de Mesquita Filho

Paulo Emílio Valadão de Miranda

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta um estudo sobre o sistema elétrico de tração de um ônibus elétrico híbrido com propulsão por pilha a combustível, alimentada com hidrogênio, e baterias, que é objeto de um projeto de desenvolvimento da COPPE/UFRJ. Este ônibus está sendo desenvolvido para operar na cidade do Rio de Janeiro. Este trabalho possibilita o dimensionamento dos equipamentos elétricos do sistema de tração, como a potência da pilha a combustível, a capacidade do banco de baterias e potência do motor elétrico.

Para a obtenção dos resultados foi realizado um levantamento do ciclo de rodagem do ônibus, em situação real de operação; modelagem do veículo, considerando as forças atuantes, e simulações do sistema de tração no programa MATLAB/SIMULINK. As simulações levaram em conta as curvas de velocidade levantadas e curvas padronizadas.

Estas simulações possibilitam a obtenção de curvas de potência consumida e regenerada pelo motor elétrico, consumo de hidrogênio pela pilha a combustível, autonomia, carga e descarga das baterias, que são dados essenciais ao projeto de um ônibus elétrico híbrido.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FUEL CELL HYBRID ELECTRIC BUS POWERTRAIN

Alexandre de Mattos Pereira

June/2007

Advisors: Antonio Carneiro de Mesquita Filho

Paulo Emílio Valadão de Miranda

Department: Electrical Engineering

This work presents a study on the powertrain of a hybrid electric bus powered with fuel cell, fed with hydrogen, and batteries, which is the subject of a project being developed at COPPE/UFRJ, that will be rank in circulation in the city of Rio de Janeiro. The result of this work is the dimensioning of the electric equipment of the powertrain system, as the power of the stack the fuel, the capacity of the bank of batteries and power of the electric engine.

For the attainment of the results a survey of the operation cycle of a bus was carried through, in real situation of operation; modeling of the vehicle, considering the operating forces, and simulations of the powertrain system in program MATLAB/SIMULINK, these simulations had taken in account the curves of speed raised and standardized curves.

These simulations made possible the attainment of curves of power consumed and regenerated for the electric engine, hydrogen consumption for the stack the fuel, autonomy, load and discharge of the batteries, that are given essential to the design of a hybrid electric bus.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	3
2	ESTADO DA ARTE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	4
2.1	POLUIÇÃO DE ORIGEM VEICULAR	4
2.1.1	Poluição por Veículos Pesados.....	6
2.2	TECNOLOGIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	8
2.3	VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS	9
2.3.1	Topologia Série	9
2.3.2	Topologia Paralela.....	10
2.3.3	Topologia Série-Paralela	12
2.3.4	Veículo Híbrido com Pilha a Combustível - VHPaC.....	13
3	ÔNIBUS ELÉTRICOS	15
3.1	ÔNIBUS ELÉTRICO A BATERIAS	16
3.2	ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO.....	22
3.3	ÔNIBUS ELÉTRICOS COM PILHAS A COMBUSTÍVEL	29
3.4	EXEMPLOS DE PROJETOS IMPLANTADOS.....	33
4	SISTEMA DE TRACÇÃO	38
4.1	PILHA A COMBUSTÍVEL	38
4.1.1	Estrutura Básica de uma Pilha Unitária.....	39
4.1.2	Módulos de Pilhas a Combustível	40
4.1.2.1	Planar-Bipolar.....	41
4.1.2.2	Tubulares	41
4.1.3	Balanco de Planta	42
4.1.4	Tipos de Pilhas a Combustível	43
4.2	BATERIAS	44
4.2.1	Características de Baterias.....	46
4.2.1.1	Tensão Nominal.....	46
4.2.1.2	Capacidade de Carga	47
4.2.1.3	Energia Armazenada.....	48
4.2.1.4	Energia Específica	49
4.2.1.5	Densidade de Energia	49
4.2.1.6	Potência Específica.....	49
4.2.2	Tipos de Baterias	50
4.2.2.1	Baterias Chumbo-ácidas.....	50
4.2.2.2	Bateria de Níquel-cádmio.....	50
4.2.2.3	Baterias de Níquel-metal hidreto.....	50
4.2.2.4	Bateria de Sódio-Enxofre	51
4.2.2.5	Bateria de Sódio-metal cloreto (Zebra)	51
4.2.2.6	Bateria de Lítio polímero.....	52
4.2.2.7	Bateria de Íon-lítio.....	52
4.2.2.8	Bateria de Alumínio-ar	52
4.2.2.9	Bateria de Zinco-ar	53
4.2.2.10	Comparação entre os Tipos de Baterias	53
4.3	MOTOR ELÉTRICO DE TRACÇÃO	54
4.3.1	Motor de Corrente Contínua com Escovas.....	55

4.3.1.1	Motor CC com Excitação Independente.....	57
4.3.1.2	Motor CC em Derivação (<i>shunt</i>).....	57
4.3.1.3	Motor CC Série.....	58
4.3.1.4	Motor CC Composto	58
4.3.2	Motor de Indução	59
4.3.3	Motor de Relutância Variável	62
4.3.4	Motor CC com Ímã Permanente sem Escovas	64
4.3.5	Comparação entre os Diferentes Tipos de Motores Elétricos	66
5	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS.....	67
6	MODELAGEM PROPOSTA PARA O ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO COM PILHA A COMBUSTÍVEL E BATERIAS.....	70
6.1	FORÇA DE TRAÇÃO.....	71
6.1.1	Força de Atrito.....	71
6.1.2	Força de Arrasto Aerodinâmico	72
6.1.3	Força de Inclinação.....	73
6.1.4	Força de Aceleração	73
6.1.5	Força Resultante de Tração	73
6.2	MODELO DA PILHA A COMBUSTÍVEL	75
6.3	MODELO DAS BATERIAS	77
6.4	SIMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA NO BARRAMENTO CC.....	78
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
7.1	INTRODUÇÃO.....	80
7.2	CICLO FUDS	80
7.3	TRAJETO NITERÓI - RIO DE JANEIRO.....	89
7.4	TRAJETO GALEÃO – BARRA – GALEÃO	95
8	CONCLUSÕES.....	104
9	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1 - TOPOLOGIA SÉRIE PARA UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO, ADAPTADO DE [6].	9
FIGURA 2-2 - TOPOLOGIA PARALELA PARA UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO, ADAPTADO DE [6].	11
FIGURA 2-3 - TOPOLOGIA SÉRIE-PARALELA PARA VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO, ADAPTADO DE [7].	12
FIGURA 2-4 - TOPOLOGIA COM PILHA A COMBUSTÍVEL PARA VEÍCULO HÍBRIDO, ADAPTADO DE [7].	14
FIGURA 3-1 - ESQUEMA BÁSICO DE UM ÔNIBUS ELÉTRICO A BATERIAS.....	17
FIGURA 3-2 - ÔNIBUS DO PROJETO CUTE, IMPLANTADO EM VÁRIAS CIDADES EUROPÉIAS.	34
FIGURA 3-3 - TEMPO DE FUNCIONAMENTO E QUILOMETROS PERCORRIDOS PELOS ÔNIBUS DO PROJETO CUTE, (SAXE E STRÖMBERG, 2005).....	35
FIGURA 3-4 - RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE MÉDIA, O NÚMERO DE PARADAS E O CONSUMO DE COMBUSTÍVEL, POR CIDADE, NOS ÔNIBUS PERTENCENTES AO PROJETO CUTE, (SAXE E STRÖMBERG, 2005) [9].	37
FIGURA 4-1 - ESQUEMA BÁSICO DE UMA PILHA UNITÁRIA, ADAPTADO DE [10].	39
FIGURA 4-2 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA BATERIA.....	47
FIGURA 4-3 - CAPACIDADE DE CARGA <i>VERSUS</i> TEMPO DE DESCARGA, ADAPTADO DE [5].	48
FIGURA 4-4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA MÁQUINA CC, ADAPTADO DE [14]	56
FIGURA 4-5 - A) MOTOR CC COM EXCITAÇÃO INDEPENDENTE, B) MOTOR CC EM DERIVAÇÃO (<i>SHUNT</i>), C) CURVA TORQUE X VELOCIDADE PARA OS MOTORES <i>SHUNT</i> E EXCITAÇÃO INDEPENDENTE, D) MOTOR CC SÉRIE E SUA CURVA TORQUE X VELOCIDADE, E) MOTOR CC COMPOSTO E SUA CURVA TORQUE X VELOCIDADE [14].	58
FIGURA 4-6 - CURVA TORQUE X VELOCIDADE DA MÁQUINA DE INDUÇÃO, ADAPTADO DE [15].	59
FIGURA 4-7 - CARACTERÍSTICAS DO MOTOR DE INDUÇÃO [16].	60
FIGURA 4-8 - CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TIPO GAIOLA DE ESQUILO, [17].	61
FIGURA 4-9 - ESTATOR E ROTOR DE UM MOTOR DE INDUÇÃO DE 26 kW, 2020 RPM E 120 NM [18].	61
FIGURA 4-10 - ESTATOR E ROTOR DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE 10/8 PÓLOS [19].	63
FIGURA 4-11 - CURVA TORQUE X VELOCIDADE PARA UM MOTOR CC DE ÍMÃ PERMANENTE SEM ESCOVAS, ADAPTADO DE [16].	65
FIGURA 5-1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO TRAJETO GALEÃO – BARRA - GALEÃO.....	67
FIGURA 5-2 - CURVA DE VELOCIDADE LEVANTADA COM O GPS NÃO AJUSTADA.....	68
FIGURA 5-3 - CURVA DE VELOCIDADE LEVANTADA COM O GPS AJUSTADA.....	68
FIGURA 6-1 - FORÇAS ATUANTES NO ÔNIBUS.....	72
FIGURA 6-2 – MODELO DO ÔNIBUS SIMULADO NO MATLAB/SIMULINK.....	74
FIGURA 6-3 - CURVA DE POLARIZAÇÃO DA PILHA A COMBUSTÍVEL.....	75
FIGURA 6-4 – CIRCUITO EQUIVALENTE DA PILHA A COMBUSTÍVEL.....	76
FIGURA 6-5 – CURVA DE DESCARGA DA BATERIA TS-LFP160AHA, DA EVERSPRING [20]	77
FIGURA 6-6 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO BANCO DE BATERIAS.....	78
FIGURA 6-7 - ESQUEMA ELÉTRICO DO SISTEMA DE TRAÇÃO SIMULADO NO MATLAB/SIMULINK.....	79

FIGURA 7-1 - CICLO DE RODAGEM FUDS	81
FIGURA 7-2 - POTÊNCIA DO MOTOR DE TRACÇÃO PARA O CICLO FUDS	81
FIGURA 7-3 - CURVAS DE POTÊNCIA E VELOCIDADE DO ÔNIBUS NO CICLO FUDS	82
FIGURA 7-4 - ENERGIA CONSUMIDA PELO ÔNIBUS, NO CICLO FUDS	83
FIGURA 7-5 - ENERGIA REGENERADA, NO CICLO FUDS	83
FIGURA 7-6 - DESLOCAMENTO DO ÔNIBUS NOS 28000 S	84
FIGURA 7-7 - CONSUMO DE HIDROGÊNIO EM KG	85
FIGURA 7-8 - TENSÃO NOS TERMINAIS DA PILHA A COMBUSTÍVEL	86
FIGURA 7-9 - CORRENTE NO MÓDULO 1 DA PILHA A COMBUSTÍVEL	86
FIGURA 7-10 - CORRENTE NO MÓDULO 2 DA PILHA A COMBUSTÍVEL	87
FIGURA 7-11 - TENSÃO NOS TERMINAIS DO BANCO DE BATERIAS.....	87
FIGURA 7-12 - CORRENTE NO BANCO DE BATERIAS	88
FIGURA 7-13 - POTÊNCIA DA PILHA A COMBUSTÍVEL NO CICLO FUDS	89
FIGURA 7-14 - VELOCIDADE MEDIDA NO TRAJETO NITERÓI-RIO	90
FIGURA 7-15 - ACELERAÇÃO DO ÔNIBUS NO TRAJETO NITERÓI-RIO.....	90
FIGURA 7-16 - ORIENTAÇÃO DO ÔNIBUS, EM RELAÇÃO AO NORTE.....	91
FIGURA 7-17 - INCLINAÇÃO PERCENTUAL, MEDIDA NO TRAJETO NITERÓI-RIO.....	91
FIGURA 7-18 - POTÊNCIA NO TRAJETO NITERÓI-RIO	92
FIGURA 7-19 - POTÊNCIA E VELOCIDADE, EM DETALHE, NO TRAJETO NITERÓI-RIO	92
FIGURA 7-20 - ENERGIA LÍQUIDA	93
FIGURA 7-21 - TENSÃO TERMINAL NAS BATERIAS	94
FIGURA 7-22 - CORRENTE NAS BATERIAS	94
FIGURA 7-23 - CURVA DE VELOCIDADE NO TRAJETO GALEÃO-BARRA-GALEÃO	95
FIGURA 7-24 - ACELERAÇÃO NO TRAJETO GALEÃO-BARRA	96
FIGURA 7-25 - POTÊNCIA DO MOTOR DE TRACÇÃO NO TRAJETO GALEÃO-BARRA.....	96
FIGURA 7-26 - ENERGIA LÍQUIDA NO TRAJETO GALEÃO-BARRA	97
FIGURA 7-27 - ENERGIA REGENERADA NO TRAJETO GALEÃO-BARRA	97
FIGURA 7-28 - TENSÃO TERMINAL PACS	98
FIGURA 7-29 - CORRENTE NO MÓDULO 1 DA PILHA A COMBUSTÍVEL.....	98
FIGURA 7-30 - CORRENTE NO MÓDULO 2 DA PILHA A COMBUSTÍVEL.....	99
FIGURA 7-31 - TENSÃO TERMINAL NAS BATERIAS	99
FIGURA 7-32 - CORRENTE NAS BATERIAS	100
FIGURA 7-33 - POTÊNCIA, VELOCIDADE E ACELERAÇÃO NO TRAJETO GALEÃO-BARRA	100
FIGURA 7-34 - ÔNIBUS ELÉTRICOS HÍBRIDOS COM PILHAS A COMBUSTÍVEL, DESENVOLVIDOS NA CHINA [21].....	102

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2-1 - ESTIMATIVA DE EMISSÃO DAS FONTES DE POLUIÇÃO DO AR NA RMSP EM 2006, ADAPTADO DE [4].	5
TABELA 2-2 – CONTRIBUIÇÃO RELATIVA DAS FONTES DE POLUIÇÃO DO AR NA RMSP EM 2006, ADAPTADO DE [4].	6
TABELA 3-1 - ÔNIBUS ELÉTRICOS A BATERIAS EM ATIVIDADE NOS EUA (2005), ADAPTADO DE[8]	22
TABELA 3-2 - CARACTERÍSTICAS DA ROTAS PERCORRIDAS PELOS ÔNIBUS DO PROJETO CUTE POR CIDADE, (SAXE E STRÖMBERG, 2005), ADAPTADO DE [9].	36
TABELA 4-1 - TIPOS DE PILHAS A COMBUSTÍVEL, ADAPTADO DE [11].....	44
TABELA 4-2 - CARACTERÍSTICAS DAS BATERIAS	54
TABELA 4-3 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MOTORES PARA VEH, ADAPTADO DE [16].....	66
TABELA 7-1 - SOLICITAÇÕES CRÍTICAS DE POTÊNCIA	80
TABELA 7-2 – TABELA-RESUMO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS	101
TABELA 7-3 - COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE ÔNIBUS COM PILHAS A COMBUSTÍVEL	103

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se desenvolver veículos menos poluentes, mais eficientes e que utilizem fonte de energia renovável se torna cada vez maior. Esta nova realidade é uma consequência de mudanças climáticas provocadas pela emissão dos gases causadores do efeito estufa e à diminuição da disponibilidade de petróleo [1].

Para compreender melhor essas mudanças, foi observado o índice de crescimento da quantidade de veículos nas estradas. Em 1950, havia cerca de 70 milhões de carros de passeio, caminhões e ônibus circulando em todo o mundo. Em 2005, este número cresceu para 700 milhões. Atualmente são produzidas 55 milhões de unidades por ano, o que projetará para 2025 mais de 1 bilhão de veículos em circulação.

Os veículos convencionais, com combustíveis derivados do petróleo, são responsáveis por grande parte das emissões de poluentes. Nos Estados Unidos [1], por exemplo, 77% das emissões de monóxido de carbono, 56% das emissões de óxido de nitrogênio, 47% das emissões de hidrocarbonetos e 28% das emissões de material particulado são oriundas desse tipo de veículo [2]. Preocupados com o nível crescente das emissões de poluentes em todo o mundo, sobretudo nas megacidades, cientistas alertam que, mantendo-se o aumento da concentração dos gases estufa, a temperatura média global poderá aumentar de 0,6 a 2,5 °C nos próximos cinco anos e de 1,4 a 5,8 °C até o próximo século. Para evitar essa transformação no clima mundial, com consequências imprevisíveis de danos ao meio ambiente e ao homem, as emissões dos gases poluentes precisam ser reduzidas [2].

Neste sentido, vários países estão impondo normas e regras para tentar controlar essas emissões e minimizar os seus efeitos. No campo dos transportes, a alternativa é a produção de veículos híbridos, que trabalham com duas fontes de energia, podendo

estas ser gasolina / baterias, grupo gerador a diesel / baterias ou pilhas a combustível / baterias, sendo adotada esta última configuração neste trabalho.

Boa parte da poluição dos grandes centros urbanos é provocada pela frota veicular com destaque para os movidos a diesel. Além da redução da poluição gasosa, os veículos com pilhas a combustível também diminuem a poluição sonora proporcionando, desta forma, maior conforto aos motoristas e passageiros [1].

Pilhas a combustível (PaC) são dispositivos que convertem a energia química de um combustível diretamente em energia elétrica, de forma limpa e mais eficiente que as máquinas térmicas. Porém, elas ainda são muito caras atualmente e, para o atendimento da demanda de pico dos veículos, possuem custo proibitivo. Por exemplo, um ônibus europeu com pilha a combustível de 240 kW da Ballard, tem um custo de € 3.700.000,00 [1].

Neste trabalho será apresentado o sistema de tração de um ônibus híbrido com pilhas a combustível e predominância de baterias. Este sistema faz com que a potência da pilha a combustível seja bem reduzida, o que melhora consideravelmente o custo do ônibus, projetado para realizar um trajeto urbano, predominantemente plano, com rampas de pouca inclinação. Durante as paradas para entrada e saída de passageiros, as baterias tracionárias podem ser recarregadas pelas pilhas a combustível. O trajeto considerado foi da cidade do Rio de Janeiro.

O sistema de tração é composto pelo motor elétrico de tração com seu controle de velocidade e torque, pelo banco de baterias e pela pilha a combustível. Um controle central irá determinar, em cada situação, quem fornece e quem recebe energia (manejo de energia), podendo também conectar as baterias tracionárias à rede elétrica para serem recarregadas, quando o ônibus estiver fora de operação. Adicionalmente, têm-se os chamados sistemas auxiliares, responsáveis pelo fornecimento de ar comprimido,

sistema hidráulico de direção, recarga das baterias auxiliares (que fornecem energia para luz interna, farol, lanternas e demais cargas da carroceria) e sistema de condicionamento de ar.

1.1 Objetivo

Este trabalho é parte integrante de um projeto de desenvolvimento de um ônibus híbrido com pilha a combustível e baterias, realizado pela COPPE/UFRJ, com cofinanciamento da Finep/MCT e da Petrobras (Cenpes).

Nele serão dimensionados os principais componentes do sistema de tração do ônibus e serão determinados o manejo da energia do veículo, objetivando aproveitá-la eficientemente, de forma que o elemento mais caro do ônibus, a pilha a combustível, tenha a mínima potência nominal e esteja sempre operando nas condições mais ideais possíveis, considerando-se vida útil e consumo de combustível, que são governadas por uma relação de compromisso.

2 ESTADO DA ARTE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

2.1 Poluição de Origem Veicular

O setor de transportes contribui fortemente para o crescimento acelerado da poluição, isto fica evidenciado nos grandes centros urbanos, onde há predominância de rodovias, grande parte do transporte de bens é feita por caminhões, e o de pessoas, por ônibus e automóveis.

As cidades de São Paulo e Rio de Janeiro estão enfrentando, cada vez mais intensamente, os grandes congestionamentos, que ocasionam o aumento da poluição atmosférica, perda de tempo, queda da produtividade, estresse e aumento do consumo de combustíveis. Muitas vezes as pessoas optam pelo transporte particular (táxi, automóvel), por não ser satisfatório, em muitos casos, o transporte coletivo, o que provoca o aumento do número de veículos em circulação.

O acréscimo de novos veículos, ainda que alguns sejam modelos mais eficientes em termos de consumo de combustível, aumenta o volume total das emissões. Cabe acrescentar que o comportamento do proprietário do veículo pode exercer grande influência nos níveis de emissão, como, por exemplo, a distância percorrida pelo veículo durante a sua vida-útil (que é correlacionada, aproximadamente, com a idade do veículo), o tipo e a frequência de manutenção. O tipo de veículo utilizado e outras características tecnológicas, como a presença de catalisadores e suas condições de manutenção, vão também afetar a qualidade e quantidade dos poluentes emitidos ao longo da vida útil do veículo.

Os principais poluentes emitidos diretamente pelos veículos automotores são: o monóxido de carbono - CO, os hidrocarbonetos - HC, os óxidos de nitrogênio - NO_x, os óxidos de enxofre – SO_x, o material particulado – MP (partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis e partículas inaláveis finas) e aldeídos [3].

A emissão desses poluentes pelos veículos representa parte importante das emissões totais em grandes centros urbanos, sendo que, muitas vezes, são os maiores responsáveis pela poluição atmosférica. Na Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, por exemplo, as emissões de origem veicular respondem por quase 100% das emissões de CO, HC e NO_x, conforme pode ser observado nas Tabelas 2-1 e 2-2, que apontam as principais fontes e emissões de poluentes atmosféricos na RMSP em 2006 [4].

Tabela 2-1 - Estimativa de emissão das fontes de poluição do ar na RMSP em 2006, adaptado de [4].

Fonte de Emissão			Emissão (1000 t/ano)				
			CO	HC	NO _x	SO _x	MP
Móveis	Tubo de Escapamento de Veículos	Gasolina C	659,8	68,1	45,4	5,1	4,9
		Álcool + Flex (Álcool+Gasolina)	191,0	21,3	13,0	-	-
		Diesel	372,2	58,3	268,3	3,6	14,0
		Táxi	1,8	1,0	2,1	-	-
		Motocicleta e Similares	254,0	33,7	2,1	0,4	0,9
	Cárter e Evaporativa	Gasolina C	-	121,8	-	-	-
		Álcool	-	16,1	-	-	-
		Motocicleta e Similares	-	24,3	-	-	-
	Pneus	Todos os Tipos	-	-	-	-	9,1
	Operações de Transferência de Combustível	Gasolina C	-	12,3	-	-	-
		Álcool	-	1,2	-	-	-
Fixa	Operação de Processo Industrial (Número de Indústrias Inventariadas)		38,6 (750)	12,0 (800)	14,0 (740)	17,1 (245)	31,6 (308)
Total			1517,4	370,1	344,9	26,2	60,5

Tabela 2-2 – Contribuição relativa das fontes de poluição do ar na RMSP em 2006, adaptado de [4].

Fonte de Emissão		Poluentes (%)				
		CO	HC	NO _x	SO _x	MP
Tubo de Escapamento de Veículos	Gasolina C	43,8	18,40	13,6	19,47	9,90
	Álcool	12,59	5,76	3,77	-	-
	Diesel	24,53	15,75	77,79	13,74	28,28
	Táxi	0,12	0,27	0,61	-	-
	Motocicleta e Similares	16,74	9,11	0,61	1,53	1,82
Cárter e Evaporativa	Gasolina C	-	32,91	-	-	-
	Álcool	-	4,35	-	-	-
	Motocicleta e Similares	-	6,57	-	-	-
Operações de Transferência de Combustível	Gasolina C	-	3,32	-	-	-
	Álcool	-	0,32	-	-	-
Operação de Processo Industrial		2,54	3,24	4,06	65,27	10,00
Ressuspensão de Partículas		-	-	-	-	25,00
Aerossóis Secundários		-	-	-	-	25,00
Total		100	100	100	100	100

A seguir são apresentados separadamente aspectos relativos às emissões de veículos pesados, incluindo aspectos tecnológicos e de combustíveis.

2.1.1 Poluição por Veículos Pesados

O óleo diesel é o principal combustível utilizado em veículos pesados (ônibus e caminhões), basicamente o transporte de carga é feito em grandes caminhões e de passageiros, em ônibus. Dessa forma, desempenha um papel importante no setor de transportes de bens e materiais, sendo um elemento fundamental na economia. O óleo diesel, porém, é um combustível bastante poluente; os principais poluentes emitidos pelos motores a diesel são os materiais particulados e os óxidos de nitrogênio (Tabelas 2-1 e 2-2).

Filtros podem reduzir grande parte do material particulado emitido pelos veículos a diesel e catalisadores podem também diminuir as emissões de NO_x. Entretanto a instalação das tecnologias de controle de emissões nos veículos a diesel necessita da disponibilidade de diesel com baixo teor de enxofre (de um modo geral

menor que 50 ppm) devido ao fato deste poluente danificar os sistemas de controle, reduzindo a eficiência dos filtros e catalisadores.

Diversos países, como os EUA e países da Europa, estão reduzindo os teores de enxofre do óleo diesel. Na Europa, até dezembro de 2004, o teor máximo de enxofre era de 350 ppm, depois sofreu uma redução para 50 ppm em 2005 e há previsão de queda para 10 ppm em 2010. Nos EUA o teor máximo de enxofre até 2010 se reduzirá para 15 ppm.

No Brasil, a legislação está evoluindo e seguindo tendências internacionais. Entretanto, existe claramente uma defasagem desta legislação quando comparada às existentes em países desenvolvidos. O teor de enxofre do diesel brasileiro ainda é alto, impedindo o uso de sistemas de controle de emissões mais sofisticados. Assim, a redução dos teores de SO_x é condição importante para a redução da emissão de outros poluentes pela frota a diesel.

O equacionamento desta questão não é trivial, pois a adoção de um diesel com baixo teor de enxofre em todo o país pode envolver elevados custos, em função da necessidade de instalar e/ou ampliar as unidades de dessulfurização de diesel nas refinarias nacionais e dos preços elevados do petróleo e do diesel de baixo teor de enxofre no mercado internacional. Assim, o diesel brasileiro veicular é dividido em dois tipos: o diesel metropolitano, que é comercializado nas capitais e regiões metropolitanas (áreas com grande concentração de veículos e maior índice de poluição atmosférica) e possui um teor mais baixo de enxofre, e o diesel interior, que é comercializado nas regiões distantes das capitais, com circulação mais dispersa de ônibus e caminhões.

Como as restrições à poluição veicular estão aumentando cada vez mais, deve-se utilizar veículos menos poluentes que os convencionais, para atender às normas ambientais. Neste trabalho é apresentada uma excelente alternativa, um ônibus elétrico

híbrido, com hidrogênio como combustível e emissão zero de gases poluentes. Neste capítulo serão apresentados os veículos elétricos e no próximo, os ônibus elétricos.

2.2 Tecnologias de Veículos Elétricos

As idéias desenvolvidas nos séculos XIX e XX estão sendo agora utilizadas para produzir novos tipos de veículos elétricos, que atualmente estão ganhando grande importância.

Abaixo são listados seis tipos básicos de veículos elétricos, que podem ser classificados conforme se segue:

- Veículos elétricos a baterias, que usualmente vêm à mente quando se pensa em veículos elétricos;
- Veículo elétrico híbrido/motor a combustão interna, que combina baterias com motor de combustão interna. É bem provável que se torne o veículo mais comum em alguns anos;
- Veículos a pilhas a combustível, que podem utilizar combustível renovável como fonte de energia. Podem ter como propulsão somente pilhas a combustível ou ter uma configuração híbrida, combinando as PaCs e baterias;
- Veículos alimentados por linhas elétricas;
- Veículos elétricos que utilizam energia diretamente da radiação solar;
- Veículos que armazenam energia por meios alternativos, como *flywheels* (que é um armazenador cinético de energia, constituído de um conjunto motor/gerador acoplado a uma massa, disco ou cilindro geralmente, para aumento da inércia da parte girante) ou supercapacitores, sendo também híbridos e tendo outra fonte de potência para fornecer a energia líquida [5].

2.3 Veículos Elétricos Híbridos

Um veículo elétrico híbrido (VEH) é aquele que utiliza duas fontes de potência para a tração do veículo: a) um motor a combustão interna (MCI) ou uma pilha a combustível (PaC), e b) um banco de baterias. A primeira entrega ao motor elétrico a potência média (regime permanente) e a segunda fornece a potência de pico (regime dinâmico).

Quanto à topologia, um veículo elétrico híbrido pode ter 4 (quatro) classificações, descritas a seguir [6, 7]:

2.3.1 Topologia Série

Os veículos com esta topologia são construídos com um motor de combustão interna (MCI), com potência menor que aquele do veículo convencional, o qual propulsiona um gerador elétrico CA (alternador), formando um conjunto motor/gerador. Aos terminais deste gerador é ligado um retificador, que converte a corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) e, na saída deste retificador, é conectado um conversor do tipo CC/CC (para adequar a tensão para o banco de baterias) e o controlador do motor de tração, como mostrado esquematicamente na Figura 2-1.

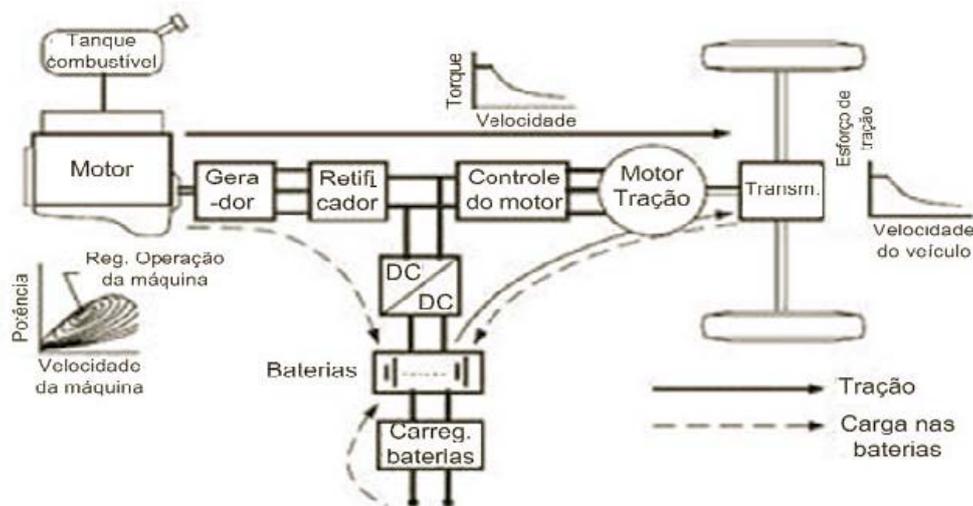


Figura 2-1 - Topologia série para um veículo elétrico híbrido, adaptado de [6].

As vantagens desta topologia são [6]:

1. Desacoplamento do motor de combustão interna dos eixos, permitindo que o MCI trabalhe num ponto de operação ótimo;
2. Única fonte de torque ligada ao eixo (motor elétrico);
3. Característica de torque-velocidade próxima do ideal;
4. Estrutura simples (Gerador, retificador, conversor, controlador, baterias e motor elétrico de tração, conectados somente por cabos elétricos).

As desvantagens desta topologia são [6]:

1. Dupla conversão eletromecânica de energia, o que provoca mais perdas de energia;
2. Duas máquinas elétricas são necessárias;
3. Grande motor elétrico de tração, por ser a única fonte de torque ligada ao eixo.

Esta topologia se aplica usualmente em veículos pesados: ônibus, veículos militares, locomotivas etc.

2.3.2 Topologia Paralela

Na topologia paralela, o motor de combustão interna e o motor elétrico podem suprir diretamente ao eixo o torque demandado, através de um acoplamento mecânico, como mostrado na Figura 2-2.

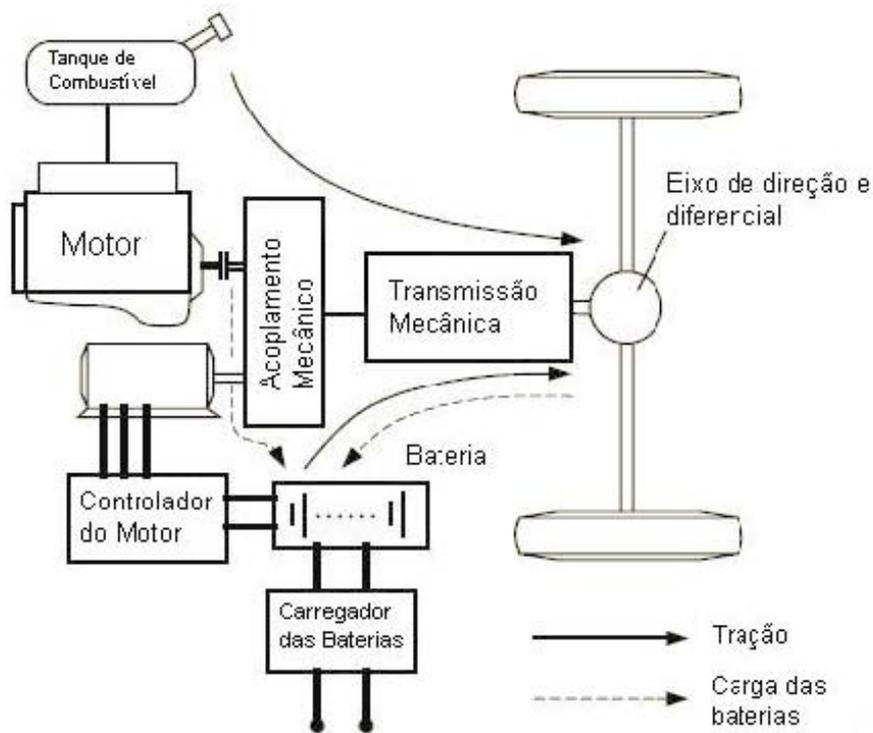


Figura 2-2 - Topologia paralela para um veículo elétrico híbrido, adaptado de [6].

As vantagens desta topologia são [6]:

1. O MCI e o motor elétrico fornecem torque ao eixo, não havendo duas conversões de energia, causando menos perdas de energia;
2. Mais compacto e leve em virtude de não haver o gerador e do motor elétrico ser pequeno.

A desvantagem desta topologia é o acoplamento do MCI ao eixo, o que não permite sua operação no ponto ótimo.

A topologia paralela é aplicada aos pequenos veículos, como os carros de passeio.

Nesta topologia há várias maneiras de utilização do MCI e do motor elétrico de tração, mas a estratégia mais usada é o uso do motor elétrico nas velocidades baixas e do MCI nas altas, onde este é mais eficiente [7].

2.3.3 Topologia Série-Paralela

A topologia Série-Paralela é uma combinação das topologias série e paralela, como o próprio nome diz, esta topologia é mostrada na Figura 2-3. Nesta configuração, comparativamente à topologia série, há um acoplamento mecânico adicional entre o gerador e o motor elétrico, e, em comparação à topologia paralela, há um gerador adicional.

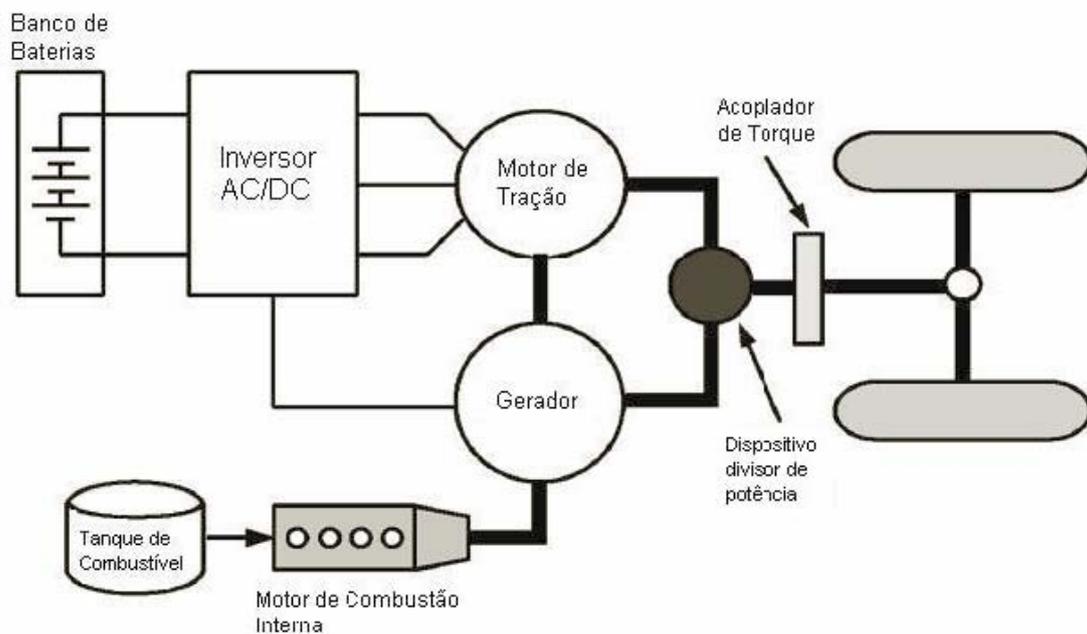


Figura 2-3 - Topologia série-paralela para veículo elétrico híbrido, adaptado de [7].

Com esta construção é possível combinar as vantagens das duas topologias anteriores, mas deve-se salientar que a topologia série-paralela exige um controle mais complexo e é mais cara [7].

Quanto ao regime de operação, existem muitas combinações entre o MCI e o motor elétrico. As mais usuais são chamadas de MCI-intensivo e elétrico-intensivo, na primeira o MCI é mais ativo e na segunda o motor elétrico é mais ativo. Uma característica de operação desta topologia é a utilização do motor elétrico na partida, com o MCI desligado.

2.3.4 Veículo Híbrido com Pilha a Combustível - VHPaC

Este veículo tem uma topologia bem parecida com a Série, com a substituição do conjunto motor/gerador e retificador por uma Pilha a Combustível (PaC), conforme mostrado esquematicamente na Figura 2-4, sendo esta a responsável pelo fornecimento da potência de regime permanente, além de fornecer energia para o seu balanço de planta e serviços auxiliares do veículo.

O combustível desta pilha pode ser um hidrocarboneto, que precisa ser previamente reformado (processo químico onde é feita a separação do hidrogênio dos outros componentes) para obter o hidrogênio ou pode-se armazenar o hidrogênio puro em cilindros pressurizados.

Esta topologia pode ser composta, por exemplo, de pilha a combustível, conversor de corrente contínua (CC), baterias, supercapacitor, controle de tração, inversor e motor elétrico de tração. Esta configuração com a utilização do supercapacitor e de um banco de baterias tracionárias permite o uso de uma PaC do tipo estacionária operando sempre próximo do ponto de maior eficiência. Com isso, é possível evitar o uso das pilhas a combustível chamadas “seguidoras de carga”, que são muito mais caras que as estacionárias, têm vida útil menor, embarcam maior peso, e não respondem rapidamente às variações de carga (transitórios elétricos) exigidas pela dinâmica de um veículo [7].

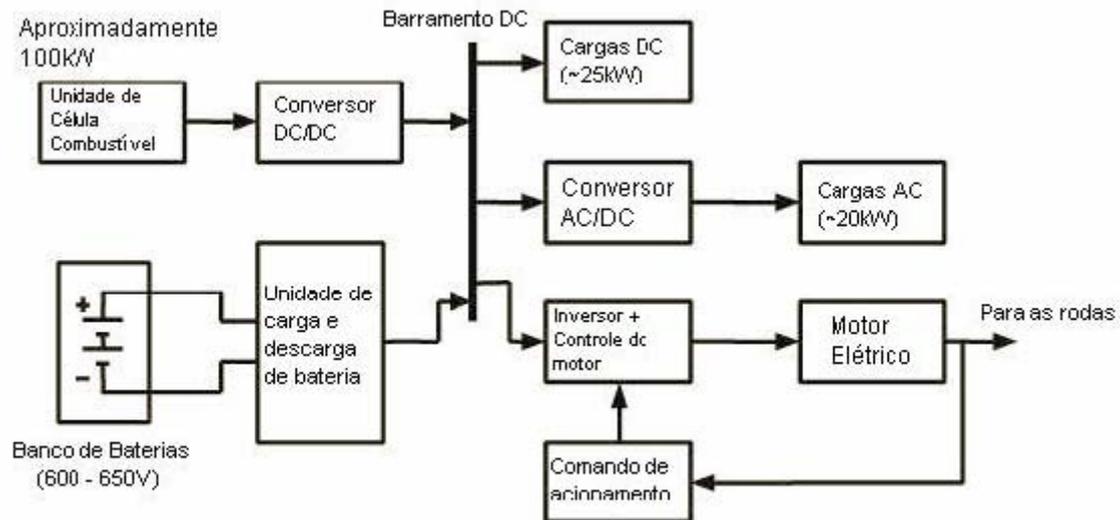


Figura 2-4 - Topologia com pilha a combustível para veículo híbrido, adaptado de [7].

A tensão gerada pela pilha a combustível é contínua e usualmente mais baixa que a tensão nominal da máquina, nestes casos necessitando de um conversor CC-CC elevador para adequar a tensão gerada ao barramento do sistema. Esta tensão então é entregue ao controlador do motor e ao banco de baterias. O controle do sistema é que define o fluxo de potência, que poderá ser:

1. PaC alimentando somente o motor;
2. PaC alimentando o motor e carregando as baterias;
3. PaC e as baterias alimentando o motor;
4. Motor carregando as baterias (regeneração de energia) e a PaC em estado de espera.

3 ÔNIBUS ELÉTRICOS

As agências de trânsito utilizam ônibus elétricos desde o fim do século XIX, com a introdução dos Trólebus, mas os ônibus elétricos autônomos só começaram a ser viáveis a partir da última década. De certo modo, os ônibus elétricos trilharam o mesmo caminho dos carros elétricos, que passaram a ganhar atenção no início dos anos 1990. Durante aquela década, as atividades se focalizaram na produção de ônibus elétricos puramente a baterias, assim como aconteceu com os automóveis. No final da última década, começou-se a dar atenção aos sistemas híbridos, para os veículos leves e pesados [8].

Esta mudança deveu-se principalmente às limitações das tecnologias de baterias disponíveis. As baterias impactam nos dois fatores principais, tecnológico e de custo, os quais direcionam o desenvolvimento da propulsão elétrica. A busca por uma tecnologia de baterias que tenha uma autonomia na faixa de 500 km, para aplicações típicas de trânsito urbano, com dimensões e peso razoáveis e que tenha um custo comercialmente viável tem traçado os rumos dos ônibus elétricos.

No final dos anos 1990, os sistemas híbridos que usavam motores a diesel ou gasolina, combinados com um motor elétrico começaram a ser vistos como solução para as limitações de autonomia e desempenho das tecnologias comercialmente viáveis de baterias. Os ônibus híbridos a diesel, a gasolina e a gás natural produzidos atualmente possibilitam a obtenção de benefícios da tração elétrica (alta eficiência, baixas emissões e redução de ruídos) mantendo-se o padrão de desempenho e a utilização da mesma infra-estrutura de reabastecimento existente para os ônibus a diesel convencionais [8].

Há um grande esforço, por parte dos integradores de sistemas híbridos, para se desenvolver melhores opções de armazenadores de energia. O supercapacitor, que

armazena energia eletrostaticamente pela polarização de uma solução eletrolítica, é uma tecnologia emergente que está sendo utilizada em dezenas de ônibus híbridos em serviço atualmente [8]. No campo das baterias também buscam-se novas alternativas às tradicionais chumbo-ácidas, como: níquel-metal hidreto, íon-lítio, lítio polímero metálico, sódio cloreto metálico, níquel zinco. As baterias de íon-lítio oferecem características superiores em termos de densidade de potência e energia, sendo bem aceitas em aplicações onde o peso, volume e desempenho são críticos [7]. Existem outros meios de armazenamento de energia, como os *flywheels*, que armazenam a energia cinética, entre outros.

3.1 Ônibus Elétrico a Baterias

Estes também são chamados de ônibus puramente elétricos, pois o sistema de tração é alimentado exclusivamente pela energia elétrica armazenada nas baterias. O banco de baterias é recarregado diariamente ou trocado por outro que esteja carregado quando as baterias estão esgotadas. Sistemas elétricos de tração foram utilizados inicialmente em microônibus, como aqueles usados em curtos trajetos urbanos e outros de baixas velocidades. Isto se deve às limitações de autonomia e potência impostas pela tecnologia das baterias comerciais.

Os potenciais benefícios trazidos pelos chamados “ônibus de emissão zero” motivaram muitos projetos de pesquisa e desenvolvimento dedicados à melhoria das tecnologias das baterias durante a última década [8]. Apesar disso, os ônibus elétricos a baterias não foram capazes de conseguir a autonomia suficiente a um custo comercialmente competitivo. Conseqüentemente, hoje não há muitos fabricantes que oferecem ônibus elétricos a bateria, os poucos se concentram no mercado dos microônibus e para pequenos trajetos. Atualmente há cerca de 90 a 120 ônibus elétricos a baterias em operação [8]. Este nível da distribuição é realmente baixo, refletindo a

queda no interesse dos operadores de trânsito devido à indústria não ter conseguido uma bateria que atendesse aos requisitos de desempenho e autonomia para este tipo de veículo.

Antes de discutir o estado da arte e as barreiras comerciais a uma distribuição comercial adicional para os ônibus elétricos a baterias, é importante ter uma compreensão básica da tecnologia e como funciona. A tecnologia dos ônibus elétricos a baterias, naturalmente, será também aplicável para uma compreensão de como os sistemas híbridos elétricos e de pilhas a combustível operam, por terem a mesma natureza.

O sistema de movimentação para um ônibus elétrico a baterias consiste em um motor elétrico, em um banco de baterias para armazenar a energia, e em um sistema de controle que governe a operação do veículo, Figura 3-1.

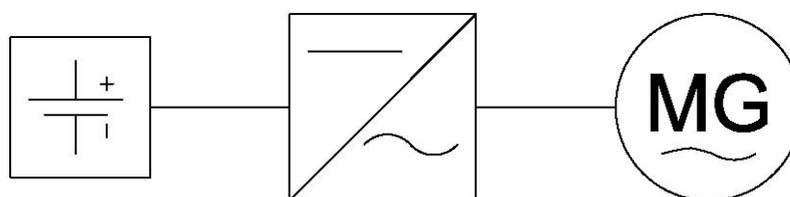


Figura 3-1 - Esquema básico de um ônibus elétrico a baterias

Os motores elétricos oferecem uma eficiência maior e menos ruído sonoro do que os motores de combustão interna (MCI). Fornecem torque mais elevado em velocidades baixas, o que resulta em melhor aceleração na saída do repouso. Aumentam também a eficiência energética através do freio regenerativo (que faz com que o motor funcione como gerador quando o veículo desacelera, de modo que possa recarregar o banco de baterias durante as frenagens). Em um sistema de tração convencional com motor de combustão interna, a energia cinética é totalmente desperdiçada na forma de calor durante a frenagem, porque não há nenhum mecanismo para recuperá-la.

Nos ônibus elétricos a baterias, estas devem ser recarregadas diariamente - ou ter o banco de baterias trocado por um novo, uma solução improvável para a maioria de operações do trânsito, de modo que as empresas de ônibus devem comprar o carregador, que é um equipamento caro, para recarregar uma frota. O tempo de recarga varia, dependendo do tipo de bateria utilizada, da capacidade, tensão e corrente de saída do carregador.

A maioria dos ônibus elétricos a baterias leva seis horas para carregar completamente o banco de baterias, embora os sistemas de carga rápida possam reduzir este tempo para aproximadamente duas a três horas, em determinados tipos de bateria. Porém, os sistemas de carga rápida têm um custo mais elevado. Uma estratégia para melhorar o problema de autonomia insuficiente é a instalação de carregadores ao longo da rota, em pontos estratégicos, onde uma frota recarrega as baterias durante seu serviço diário nas paradas. Isto adiciona custos significativos de infra-estrutura, inviáveis atualmente.

Como com todos os veículos de propulsão elétrica, é necessário treinamento para os profissionais condutores, a fim de que tenham conhecimento dos requisitos básicos de segurança em eletricidade. O mesmo ocorre com o pessoal envolvido na manutenção. Isto é de interesse das empresas de ônibus que consideram a possibilidade de adotar tecnologias de ônibus elétricos. As empresas que operam sistemas de trilho já estão um pouco familiarizadas com as exigências de operação e manutenção de sistemas de propulsão elétrica de alta tensão.

A maioria dos ônibus elétricos a baterias atuais, são equipados com baterias do tipo chumbo-ácida ou de níquel-cádmio, as quais são as tecnologias de baterias tracionárias comerciais atualmente. No entanto, nenhum destes tipos de baterias tem densidade de energia suficiente (energia por peso) tal que um veículo de transporte de

passageiros possa desenvolver uma autonomia de 500 km, se for alimentado exclusivamente por baterias. Conseqüentemente, um ônibus de 12 m requereria um banco de baterias inaceitavelmente grande e pesado, bem como demasiadamente caro, não sendo um ônibus deste tipo comercialmente competitivo.

As baterias chumbo-ácidas requerem recarga mais longa, cerca de seis horas, enquanto que as baterias de níquel-cádmio apresentam recarga mais rápida. As baterias de níquel-cádmio têm um custo inicial mais elevado do que as chumbo-ácidas, mas são menores e mais leves, e também melhores nos quesitos de manutenção e operação no serviço diário do trânsito.

Nos trabalhos realizados com o intuito de serem desenvolvidas melhores baterias, diversos tipos de baterias tracionárias têm sido desenvolvidas para aplicação em veículos elétricos. Nenhuma destas tecnologias provou ser viável para os ônibus elétricos a baterias, por serem ou demasiadamente caras ou ainda não avaliadas em operações de longo prazo no trânsito.

Os supercapacitores, que são uma outra tecnologia para o armazenamento de energia elétrica, não podem ser usados como o único dispositivo de armazenamento da energia em um ônibus elétrico puro, devido a sua baixa densidade de energia. Eles são usados somente em configurações híbridas.

A principal vantagem do ônibus elétrico a baterias é a total ausência de emissões de gases poluentes e particulados. O impacto das emissões na região onde opera o veículo é dependente do processo de geração de energia naquela região. Recarregar os veículos fora do horário de pico elimina a necessidade de aumento da capacidade de geração de energia elétrica. Têm sido feitos vários estudos que comparam as emissões, desde a produção da energia elétrica ou do combustível, para os veículos a baterias ou convencionais, respectivamente, até o consumo pelos veículos, chamado “do poço à

roda” (*well to wheel*). Claramente, o principal fator é: quão limpa é a fonte da eletricidade da região. Em todo o caso, é o fato destes veículos terem emissão zero que motiva a sua utilização em áreas sensíveis com certo apelo ambiental, como zonas urbanas com grande concentração de pedestres e parques nacionais.

Outra grande vantagem é a diminuição significativa do ruído, devido à ausência de um motor de combustão interna e de um sistema mecânico de transmissão. Para determinados ambientes altamente sensíveis em que é importante ter veículos silenciosos, outra vez a operação do veículo de baixo impacto sonoro terá um apelo, contanto que estas áreas do trânsito tenham trajetos curtos e não exigentes.

Um benefício dos ônibus elétricos a baterias é a reação positiva dos passageiros e dos motoristas. Os ônibus elétricos a baterias ainda são uma novidade, e tiveram boa receptividade nas comunidades onde foram aplicados por suas viagens tranqüilas, silenciosas e sem descarga de poluentes no ambiente. Por exemplo, no “Santa Barbara Metropolitan Transit District (MTD)”, os motoristas preferiram os ônibus a baterias aos ônibus a diesel [8].

Os custos de fabricação para ônibus elétricos a baterias são significativamente mais elevados, devido ao custo elevado das baterias e à falta de economia de escala para sua produção. Atualmente, os ônibus elétricos a baterias se apresentam como uma opção muito restrita, com um número baixíssimo de pedidos de fabricação.

A reposição das baterias é um outro custo importante associado a esta tecnologia, que pode adicionar diversos milhares de dólares ao custo da operação ao longo da vida útil do ônibus. As empresas devem comprar o equipamento carregador para recarregar a frota, um custo operacional adicional que desloca algumas das economias potenciais resultantes da eliminação do consumo do diesel ou da gasolina. Os custos abastecimento de todas as frotas de ônibus elétricos a baterias dependerão das

tarifas de energia elétrica da região. Os custos de manutenção e operação podem também ser reduzidos tendo em vista que os sistemas de movimentação elétricos têm menor quantidade de dispositivos do que um sistema com motor de combustão interna.

No cômputo geral, apesar de algumas histórias do sucesso, os ônibus elétricos a baterias perderam mercado, com poucas compras novas sendo feitas atualmente. As principais aquisições deste tipo de ônibus foram no início dos anos 1990 e os ônibus elétricos a baterias mais velhos têm de ser tirados de serviço, mas não estão sendo substituídos por novas compras e também não apresentam atratividade para revenda [2]. Os dois fatores principais que impediram que esta tecnologia de ônibus aumentasse seu mercado foram as limitações tecnológicas e o custo. Também, porque os ônibus elétricos a baterias são veículos construídos para um nicho de mercado, há poucas companhias neste negócio, e uma das maiores companhias de ônibus elétricos dos anos 1990, Advanced Vehicle Systems Inc., abandonou este mercado. Isto limita as opções para as frotas interessadas nestes ônibus.

Atualmente, a *Electric Fuel Corporation* está desenvolvendo um ônibus puramente elétrico, de 12 metros, que utilizará uma bateria com tecnologia dita pré-comercial [8]. Ele será propelido pela energia de baterias do tipo zinco-ar e por um banco de supercapacitores. Apesar de ser descrito freqüentemente como uma bateria, este dispositivo converte o zinco em óxido de zinco em um processo que fornece energia elétrica ao sistema de tração. Este dispositivo não é recarregado por uma fonte elétrica como as baterias tracionárias. Os cartuchos de óxido de zinco são trocados por outros novos, e sua denominação por “pilha” parece mais adequada do que bateria. Este ônibus apresentou uma autonomia de 160 km nos testes realizados em Las Vegas, Nevada. Entretanto, esta tecnologia encontra-se em fase de desenvolvimento e diversos

obstáculos devem ser superados antes que possa ser adotada para o uso da frota no trânsito, incluindo infra-estrutura de reabastecimento.

Na opinião de muitos dos representantes da indústria [8], a tecnologia das baterias ainda não avançou a ponto de os ônibus elétricos a baterias, ou puramente elétricos, serem viáveis para a maioria das operações de trânsito. Em um futuro próximo, exceto se for descoberta uma tecnologia de baterias que mude esse cenário, estes ônibus ocuparão um nicho de mercado, viáveis para operações em determinados ambientes onde as condições de emissão zero ou mínimo ruído são essenciais, e onde as circunstâncias de rodagem e a carga do veículo não excedam a capacidade de propulsão das baterias. Nestas circunstâncias, os ônibus elétricos a baterias podem ser uma escolha desejável, porque agradam aos motoristas e proporcionam uma boa imagem das empresas de ônibus quanto à preocupação com o bem-estar coletivo. A tabela 3-1 mostra os ônibus com esta tecnologia existentes nos EUA.

Tabela 3-1 - Ônibus elétricos a baterias em atividade nos EUA (2005), adaptado de[8]

Localidade	Nº	Comprimento	Empresa
Anaheim, CA	10	22'	Ebus
Atlanta, GA	5	22'	Ebus
Chattanooga, TN	12	22'	Advanced Vehicle Systems (AVS)
Colorado Springs, CO	5	22'	Ebus
Hamptom, VA	8	22'	AVS
Los Angeles, CA	18	22'	Ebus
Miami Beach	10	22'	AVS
Mobile, AL	4	22'	Ebus
New Haven, CT	4	22'	Ebus
Santa Barbara, CA	20		
	1	22'	APS
	3	22'	BMI
	10	22'	Ebus
	6	22'	Specialty Vehicle Manufacturing Corp.

3.2 Ônibus Elétrico Híbrido

Um veículo elétrico híbrido, como já visto no capítulo anterior, combina um sistema de propulsão elétrica com uma outra fonte de energia, tal como um motor de

combustão interna convencional (diesel, gasolina, propano ou gás natural), uma turbina, ou uma pilha a combustível. No caso do ônibus elétrico híbrido, a maioria em serviço atualmente utiliza um motor a diesel ou gasolina com um motor elétrico acoplado ao seu eixo e baterias, enquanto que um número menor de ônibus híbridos utiliza um supercapacitor para armazenamento da energia. Esta combinação de um MCI, de um motor elétrico e de um dispositivo de armazenamento da energia dá ao operador do trânsito os benefícios de um sistema de tração elétrica - melhor aceleração na partida, operação mais silenciosa, maior eficiência energética - sem as desvantagens de um ônibus elétrico puramente a baterias, como a autonomia e a propulsão em rampas (ativas) reduzidas(os). Além disso, os ônibus elétricos híbridos atuais não requerem recarga após o serviço: as baterias são recarregadas continuamente durante o trajeto, como ocorre com os carros de passeio híbridos comerciais, como Toyota Prius e o híbrido Honda Civic [8] (embora haja alguns esforços em desenvolver um ônibus híbrido que possa ser conectado à rede, sendo este predominantemente a baterias). Assim, enquanto os operadores do trânsito não recebem os veículos de emissão zero, como os puramente a baterias, os ônibus híbridos reduzirão as emissões e consumo de combustível, mantendo o tipo do desempenho que as operações do trânsito requerem. Por causa destes benefícios e da utilidade do veículo, as vendas dos ônibus híbridos na América do Norte em 2005 aumentaram bastante em relação aos três anos anteriores. Em 2005 havia aproximadamente 700 em serviço e 400 previstos para serem entregues naquele ano e em 2006, já em atraso, com pedidos ativos e propostas para algumas centenas a mais.

Os ônibus elétricos híbridos combinam duas fontes de energia, uma sendo um dispositivo de armazenamento eletroquímico ou eletrostático e a outra uma fonte de energia à combustão interna. A fonte de energia principal geralmente é o dispositivo

que converte o combustível químico em energia mecânica, sendo mais freqüentemente utilizado um motor a diesel, gasolina ou gás natural, o que permite que estes veículos utilizem a mesma infra-estrutura de abastecimento já instalada, parte da manutenção e sistema de armazenamento embarcado que os ônibus convencionais com MCI. Assim, os ônibus elétricos híbridos atuais combinam elementos de ônibus elétricos a baterias, descritos anteriormente - o motor elétrico, controlador, banco de baterias - com um MCI, que tipicamente é um motor a diesel, e menos freqüentemente um motor a gasolina, acoplado a um gerador elétrico. Além disso, alguns ônibus elétricos híbridos em serviço atualmente substituem as baterias por supercapacitores, que são uma opção mais recente para armazenamento da energia elétrica veicular, ou até mesmo utilizam os dois.

O sistema híbrido permite que o motor a combustão trabalhe em sua faixa de operação mais eficiente, “compartilhando” a potência requisitada pelo motor elétrico de tração entre as baterias e grupo motor-gerador (GMG) embarcado. As baterias podem fornecer ao motor de tração a potência necessária aos picos de demanda, como nas acelerações e subidas. Isto permite que o GMG opere em um regime mais estacionário, aumentando a eficiência do motor. O armazenamento da energia oriunda do motor elétrico de tração durante a frenagem em baterias permite, também, a recuperação de parte da energia cinética, não desperdiçando-a na forma de calor pelos freios hidráulicos atuais.

A possibilidade de recuperar esta energia é um dos benefícios-chave dos sistemas híbridos de tração elétrica, aliada à alta eficiência global dos sistemas elétricos. O sistema eletro-eletrônico de controle dos sistemas híbridos de tração elétrica é bastante complexo. No entanto, atualmente é lugar-comum que os veículos convencionais tenham algum nível de sistemas elétricos e de controles complexos,

assim este já não é mais um elemento completamente estranho para os operadores do trânsito.

A eficiência total de um sistema veicular elétrico híbrido depende da escolha adequada de cada elemento do sistema e da estratégia do controle eletrônico (pois estes vários sistemas estão integrados).

Os ônibus híbridos comerciais de hoje geram toda a energia que necessitam através do gerador embarcado e não necessitam serem conectados à rede elétrica para se recarregarem. O banco de baterias é recarregado simplesmente durante o serviço normal, isto permite que este tipo de ônibus evite os custos adicionais de infra-estrutura de carregadores elétricos de baterias exigidos pelos ônibus alimentados somente com baterias.

É possível que um ônibus híbrido seja projetado para que a carga de seu sistema de armazenamento embarcado se esgote, o que significaria que as baterias do veículo (ou o dispositivo de armazenamento de energia) necessitariam ser recarregadas após operação. A autonomia de um veículo elétrico híbrido que possa ser conectado à rede elétrica seria mais longa do que aquela de um que não tenha esta possibilidade, mas o ônibus funcionaria também com o MCI, dando-lhe uma autonomia melhor do que o ônibus somente com baterias. A maior parte das empresas de ônibus quer usar sua infra-estrutura diesel ou gasolina de reabastecimento existente, com isso ainda não está se explorando o híbrido que se conecta à rede. A expectativa é que o sistema híbrido conectável seja aplicável aos pequenos trajetos realizados por vans. Para as empresas que desejam uma autonomia significativa, o híbrido conectável à rede que se mostrar comercialmente viável, terá uma boa aceitação [8].

Como discutidas na seção precedente, a maioria dos ônibus elétricos híbridos em uso hoje, são equipados com baterias chumbo-ácidas ou níquel-metal hidreto, e estas

continuarão provavelmente a ser as opções para ônibus elétricos híbridos comerciais para os próximos anos. Isto porque ambas têm conseguido bons resultados em aplicações reais de serviço pelo mundo, nas duas maiores frotas de híbridos, a saber: os 225 ônibus no trânsito de Nova Iorque são equipados com baterias chumbo-ácido, enquanto que a frota de 214 ônibus de Seattle usa baterias de níquel-metal hidreto [8]. Entretanto, estas baterias têm ainda algumas limitações de confiabilidade, durabilidade, peso e custo, que estão fazendo com que os colaboradores do sistema híbrido invistam em pesquisa e desenvolvimento em outras opções de armazenamento da energia. A opção a mais desenvolvida atualmente é o supercapacitor, que está sendo usado em mais de 80 ônibus integrado pela ISE Corporation [8]. O supercapacitor oferece a promessa de alta potência, menor peso e maior vida útil com um custo razoável, mas os supercapacitores apresentam problemas na propulsão em subidas (densidade energética), limitando sua aplicabilidade para agências do trânsito com rotas íngremes em sua área de abrangência.

Os ônibus elétricos híbridos, ainda que não sejam tão silenciosos como os ônibus elétricos a baterias, são mais silenciosos do que os ônibus convencionais a diesel, tendo em vista que usam tipicamente um motor a diesel menor e operam o motor em um regime mais estacionário, reduzindo o ruído associado com a aceleração dos motores a diesel típicos de veículos pesados. Dependendo da configuração do sistema híbrido, e da estratégia de controle, alguns ônibus podem operar somente com baterias em baixas velocidades. Ônibus elétricos híbridos podem também utilizar acessórios acionados eletricamente, promovendo desse modo o aumento da eficiência total do ônibus.

Um outro benefício significativo desse tipo de ônibus é o fato das empresas usarem a mesma infra-estrutura de reabastecimento diesel ou gasolina existente. Isto reduz o custo para implantação destes ônibus, por parte das empresas do transporte, e

elimina o que poderia ser um obstáculo para que as empresas interessadas em explorar uma tecnologia mais limpa: o comprometimento financeiro, como foi o requerido ao se adotar os ônibus a gás natural. Para incentivar a compra destes ônibus, muitas operadoras de transporte nos EUA podiam adquirir até cinco ônibus elétricos híbridos para avaliá-los em suas operações, antes de decidir pela adesão à tecnologia.

Com relação a custos de implantação, operação e manutenção dos ônibus elétricos híbridos verifica-se que, atualmente, estes têm um preço significativamente mais elevado que os ônibus a diesel convencionais. É difícil prever o diferencial de preço visto que os preços dos ônibus elétricos híbridos variarão de uma obtenção à seguinte, dependendo do número de pedidos e das especificações técnicas, que podem variar. O que aumenta ainda mais a dificuldade de comparação dos custos é o fato de que, os ônibus a diesel convencionais têm uma tecnologia bem madura e com custos bem definidos, no entanto, seus preços estão se modificando atualmente, devido às imposições feitas pelos agentes normativos quanto às emissões, cada vez mais restritivas. Estas restrições aumentarão ainda mais quando as novas normas entrarem em vigor, entre 2007 e 2010. Os fabricantes de motores e as companhias de ônibus terão que empregar sistemas de controle do motor e dispositivos de tratamento da descarga mais avançados, o que provavelmente aumentará o preço dos ônibus a diesel. Em 2006, um ônibus a diesel de 12 metros custava aproximadamente entre US\$280.000 a US\$300.000. Um ônibus elétrico híbrido de 12 metros, em 2005, custava tipicamente entre US\$450.000 e US\$530.000. Os ônibus híbridos médios, em 2005, eram aproximadamente 60% a 80% mais caros do que um ônibus a diesel comparável.

Um outro custo importante associado aos ônibus elétricos híbridos é substituição das baterias, porque não se espera mais do que 12 anos de uso de um ônibus. Os tipos de bateria em uso hoje são a chumbo-ácido e a de níquel-metal hidreto. Em termos de

peso, custo, desempenho e durabilidade; a chumbo-ácido é uma tecnologia mais madura e pode ser comprada na prateleira, são mais baratas do que as de níquel-metal hidreto, mas têm vida útil estimada mais curta, de aproximadamente três anos e requerem recondicionamento periódico das baterias; já as baterias de níquel-metal hidreto (Ni-MH) não, elas são mais leves do que as chumbo-ácido, têm custo inicial mais alto, mas duram mais tempo: de cinco a sete anos.

Uma outra expectativa de diminuição de custo associada aos ônibus elétricos híbridos é a redução do consumo de combustível comparado aos ônibus a diesel convencionais. Dados divulgados pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) em 2005, indicaram redução no consumo de combustível entre 38% e 48%. Este diferencial pode tornar-se ainda mais pronunciado quando os ônibus convencionais a diesel incorporarem sistemas de controle de emissões mais avançados, que podem aumentar o consumo de combustível dos ônibus a diesel.

O departamento de trânsito da cidade de Nova Iorque testou dez ônibus elétricos híbridos: em 2005 havia aproximadamente 700 em serviço regular na América do Norte, com outras 400 entregas para 2006. Mais de 40 agências de trânsito na América do Norte têm ônibus elétricos híbridos em serviço, e as agências do trânsito demonstraram intenção de comprar mais. Para as agências de trânsito de Nova Iorque e de Chicago as aquisições de ônibus elétricos híbridos são parte de uma estratégia para trocar os ônibus a gás natural por híbridos na substituição dos ônibus a diesel convencionais por opções mais limpas. Ambas as agências enfrentam a pressão da comunidade para “limpar” as suas frotas, e têm ônibus a gás natural em serviço, mas decidiram comprar ônibus elétricos híbridos a fim de evitar custos de infra-estrutura de gás natural.

A maior parte dos ônibus elétricos híbridos entregue e sendo comprada é de 12 metros, mas há também alguns de porte médio e ônibus articulados de 18 metros. A maioria tem motor de combustão interna a diesel, com alguns a gasolina.

As maiores frotas de ônibus elétricos híbridos são: a de Nova Iorque, com mais de 300 e da *King County*, em Seattle, que possui mais de 200 em serviço [8]. Grande parte das outras frotas são razoavelmente pequenas, muitas inferiores a dez. Muitas destas agências de trânsito estão avaliando a tecnologia em suas frotas antes de fazer compras maiores de ônibus elétricos híbridos. Algumas destas agências de trânsito estão observando as frotas grandes como Seattle e Nova Iorque para se beneficiar de melhorias que os fabricantes venham a fazer nos ônibus, comprando assim um produto mais testado.

Os três principais fabricantes de ônibus híbridos de 12 metros são: GM *Allison Transmission*, *British Aerospace Engineering (BAE) Systems*, e *ISE Corporation*. Os produtos destas três companhias compreendem a maioria dos ônibus elétricos híbridos de 12 metros na estrada atualmente, e todos estão oferecendo ônibus elétricos híbridos como produtos comerciais, não como veículos de demonstração. Um outro grande fornecedor de ônibus elétricos híbridos, *Ebus*, produz ônibus de 6,7 metros [8].

3.3 Ônibus Elétricos com Pilhas a Combustível

As pilhas a combustível para aplicações comerciais de transporte despertaram grande atenção nos últimos anos, porque oferecem um sistema de transporte limpo, eficiente e não muito dependente do petróleo. Elas combinam o hidrogênio com o oxigênio em um processo eletroquímico, tendo como subprodutos da geração de eletricidade, água e calor, considerando-se o uso de hidrogênio puro. A produção do hidrogênio pode gerar emissões quando oriunda de combustíveis fósseis (hidrocarbonetos), mas é também possível produzir o hidrogênio de fontes limpas como

a energia eólica e a energia solar. A energia gerada pela pilha a combustível é atrativa porque possibilita a redução da poluição do ar, das emissões dos “gases de efeito estufa”, e do uso da energia baseada no petróleo. Entretanto, as pilhas a combustível veiculares ainda estão muito longe de competir com as tecnologias atuais do transporte, devido ao custo, robustez e durabilidade, bem como a questão do armazenamento de combustível. Além disso, a falta de uma infra-estrutura de hidrogênio impede que a tecnologia dos veículos a pilhas a combustível seja difundida, uma vez que a produção do hidrogênio atualmente ainda é cara e apresenta potenciais emissões (reforma a vapor do gás natural). Não obstante, há um grande interesse em tornar as pilhas a combustível uma tecnologia comercial de transporte, com os compromissos principais que estão sendo feitos por governos em todo o mundo para investimento na pesquisa, no desenvolvimento e na demonstração das tecnologias da pilha a combustível e da logística do hidrogênio como vetor energético. No que diz respeito aos ônibus, a *CARB's Public Transit Fleet Rule* requisitou grandes frotas para começar a difundir os ônibus de zero emissão de 2008 a 2010, e os ônibus com pilha a combustível estão sendo vistos como uma provável solução [8].

Os ônibus com pilhas a combustível requererão uma nova infra-estrutura substancial, com algumas similaridades àquela usada para ônibus a gás natural. O veículo com tração elétrica por pilhas a combustível é muito diferente do ônibus a diesel padrão. A infra-estrutura, o suporte e as exigências de treinamento dependerão de que tipo de combustível é usado para as pilhas a combustível. A maior parte das demonstrações e dos ônibus disponíveis usa o gás hidrogênio puro, comprimido em alta pressão, existindo alguns projetos que utilizam reformadores embarcados, para uso de combustíveis fósseis, evitando-se o uso do hidrogênio gasoso. De qualquer forma, será requerida infra-estrutura para o armazenamento ou para a produção embarcada do

hidrogênio. É necessário considerar também a manutenção da infra-estrutura de abastecimento. Da mesma forma que com sistemas de gás natural, a manutenção e o armazenamento no veículo necessitarão ser revistos para mitigação de vazamentos de hidrogênio dentro dos veículos. Isto significa, no mínimo, uma ventilação apropriada do ar e detectores de vazamento que controlem o equipamento de emergência dentro dos veículos, bem como dispositivos e cabeamentos à prova de explosão. O hidrogênio tem alguns requisitos de segurança além do gás natural, incluindo a característica de ser mais provável sua explosão do que combustão. Podem também causar fragilização em metais, o que deve ser levado em conta.

Devido ao fato do hidrogênio ter propriedades diferentes do diesel, muitas modificações precisarão ser feitas à infra-estrutura, e os trabalhadores do sistema de transporte necessitarão ser treinados para trabalhar com este combustível. As empresas do setor de transporte terão que saber as propriedades gerais do combustível, os perigos, como trabalhar com o combustível (no abastecimento, na manutenção, nas emergências, etc.), e todo o equipamento de proteção individual (EPI) necessário.

As pilhas a combustível oferecem um número de benefícios potenciais que as tornam atrativas para o uso no transporte, como a maior eficiência, a operação silenciosa e a ausência das vibrações mecânicas do MCI, e, se o hidrogênio puro for usado no ônibus, emissões zero na operação.

Esta tecnologia ainda está em estágio de desenvolvimento, com as pilhas a combustível tendo grande potencial como uma fonte de energia limpa e eficiente. Como mais uma vantagem, o sistema com pilhas a combustível oferecerá os mesmos benefícios de todo o sistema de propulsão elétrica a baterias para o transporte: aceleração mais rápida, operação silenciosa, embora haja um ruído associado com o sistema auxiliar da pilha a combustível, denominado de “balanço de planta”.

Atualmente, as pilhas a combustível veiculares não são um produto comercial: os ônibus com propulsão a pilhas a combustível existentes são protótipos, fabricados em número razoavelmente pequeno para demonstrações específicas, contando com cerca de 100 unidades em todo o mundo. Os ônibus com pilhas a combustível hoje podem custar de US\$1 a US\$3 milhões (ou mais), pois são protótipos que utilizam uma tecnologia pré-comercial. Ainda não está claro qual será a vida útil destes ônibus. Por causa do sistema de tração elétrica, os custos de manutenção podem ser reduzidos, mas é muito cedo para se afirmar. Das demonstrações em andamento na Europa, nos Estados Unidos, no Canadá, no Japão, na Austrália e na China espera-se render alguns dados de custos operacionais dos ônibus com pilhas a combustível, mas porque estas são ainda tecnologias de ônibus de primeira geração, os dados serão úteis, primeiramente, como um indicador geral de como as agências do trânsito experimentaram esta nova tecnologia.

Atualmente, são três os principais fabricantes norte-americanos de pilhas a combustível que as produzem para aplicações em veículos pesados (ônibus e caminhões): Ballard Power Systems e Hydrogenics, ambos do Canadá, e United Technologies Corporation (UTC) Fuel Cells, baseadas em Connecticut. Além destas, a Toyota produziu seu próprio sistema com pilhas a combustível para veículos pesados em Tokyo [8].

Alguns profissionais da área de transportes vêem os ônibus com pilha a combustível como os veículos de baixa emissão do futuro e a longo prazo, enquanto outros expressaram ceticismo sobre uma potencial viabilidade comercial de pilhas a combustível para o mercado dos transportes. Porque as pilhas a combustível oferecem a grande promessa de reduzir a dependência no petróleo e abaixar emissões do veículo, continuam a ser o assunto de grande investimento do setor privado e público.

Recentemente, os Estados Unidos investiram milhões de dólares em pesquisa e desenvolvimento na área de pilhas a combustível e hidrogênio e em projetos de demonstração. As demonstrações de ônibus com pilhas a combustível continuarão a ajudar no avanço da tecnologia, a reduzir custos e a aumentar a durabilidade, e irão ajudar na implantação da infra-estrutura. Parece improvável que os ônibus sozinhos garantam a comercialização das pilhas a combustível, pois o mercado de ônibus é pequeno demais para amortizar o tremendo investimento feito pelos fabricantes deste tipo de equipamento.

Os sistemas elétricos híbridos são vistos como uma etapa no trajeto para os ônibus com pilhas a combustível, porque estes sistemas necessitarão ser hibridizados para alcançar a eficiência almejada. Além disso, uma maior distribuição de ônibus elétricos híbridos ajudará no avanço das tecnologias de tração elétrica, e reduzirá seus custos – o que irá beneficiar os futuros veículos com pilhas a combustível.

3.4 Exemplos de Projetos Implantados

Um dos maiores projetos envolvendo ônibus híbrido movido à pilha a combustível e hidrogênio é o projeto CUTE (Clean Urban Transport for Europe). Esse projeto tem como participantes nove cidades européias (Amsterdã, Barcelona, Estocolmo, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madri, Porto e Stuttgart) e uma cidade não européia localizada na Austrália (Perth).

Todos os ônibus do projeto CUTE são iguais tecnicamente (Figura 3-2). Possuem carroceria da Mercedes Citaro, piso baixo e também estrutura, equipamentos e distribuição de componentes idênticos. Basicamente toda a aparelhagem se encontra sobre o teto interno do ônibus. O ônibus conta com uma “caixa” no teto que aloca todos os componentes [9].

Projetos CUTE (União Européia)

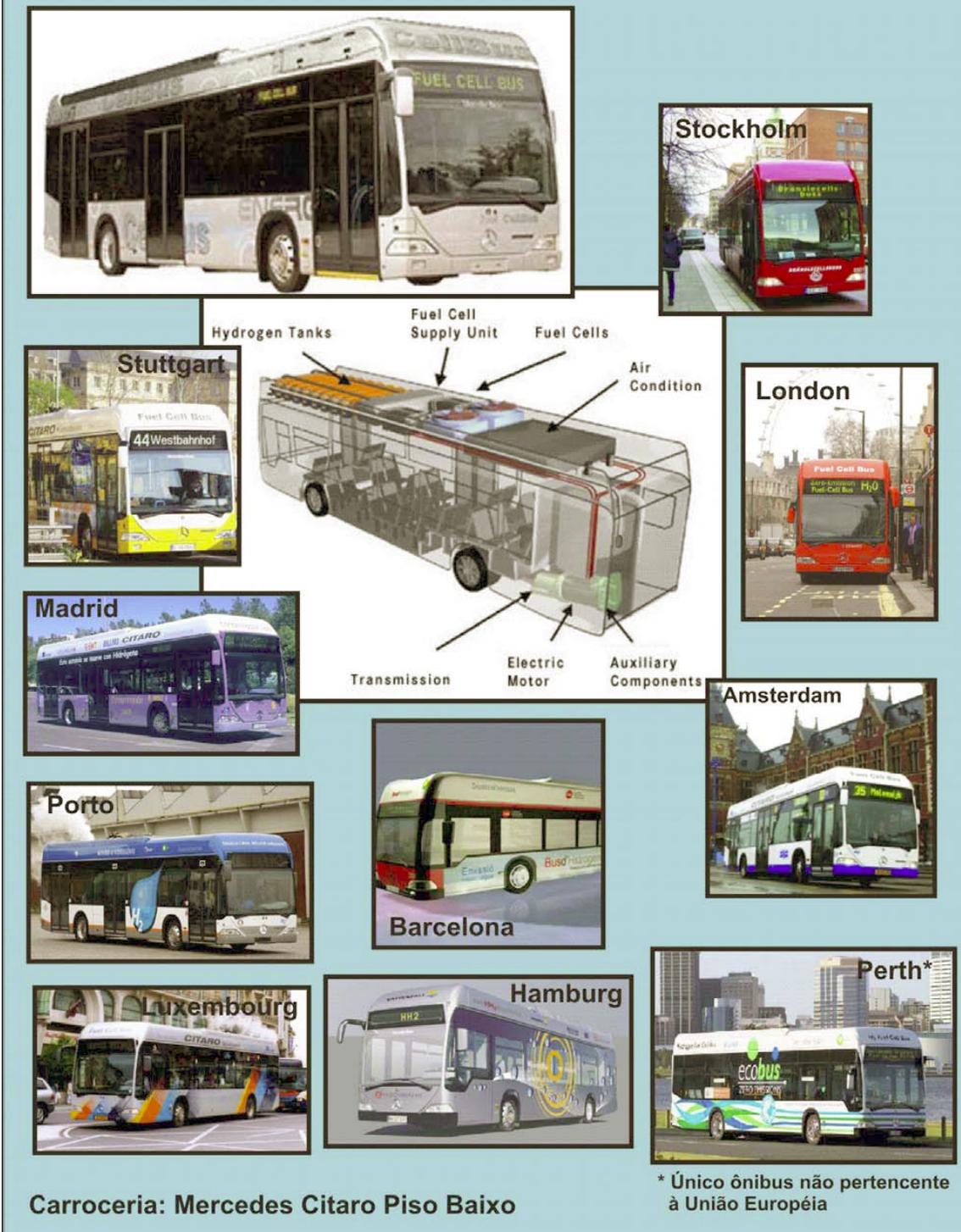


Figura 3-2 - Ônibus do Projeto CUTE, implantado em várias cidades européias.

Todas as cidades mencionadas têm ônibus circulando diariamente já incluídos em suas redes de transporte. Em média, os ônibus do projeto CUTE já rodaram 7000

horas, percorrendo diferentes quilometragens. Gráficos da quantidade de horas de funcionamento e a quantidade de quilômetros rodados por cidade são apresentados na Figura 3-3.

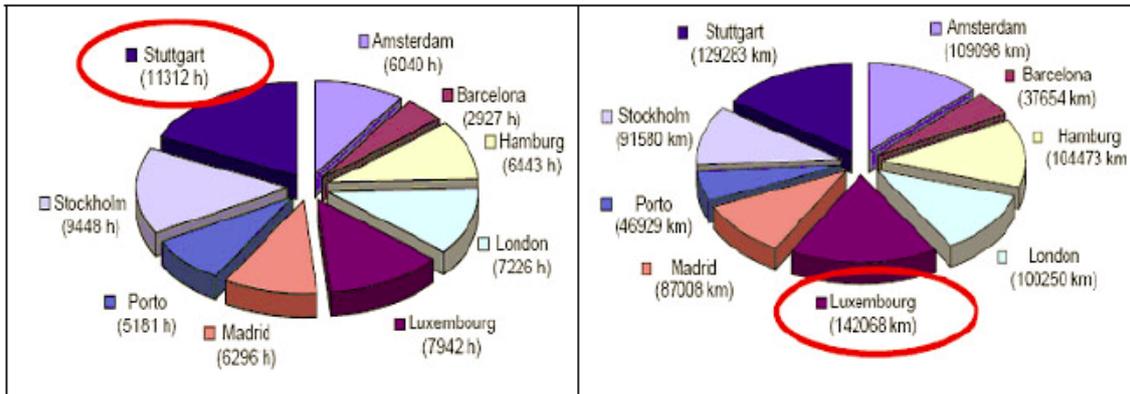


Figura 3-3 - Tempo de funcionamento e quilômetros percorridos pelos ônibus do projeto CUTE, (Saxe e Strömberg, 2005).

Vários testes e análises foram realizados nos ônibus do projeto CUTE. Na Tabela 3-2 estão listados os resultados de um estudo das condições climáticas, número de rotas percorridas pelo veículo, comprimento da rota, número de paradas por rota, velocidade média, consumo de H₂ (kg/100 km) e consumo equivalente em diesel (l/100 km).

Tabela 3-2 - Características da rotas percorridas pelos ônibus do projeto CUTE por cidade, (Saxe e Strömberg, 2005), adaptado de [9].

Cidade	Condições climáticas	Comprimento da rota (km)	Paradas por rota	Velocidade média (km/h)	Consumo de H₂ (kg H₂/100 km)	Consumo equivalente em diesel (L/100 km)
Amsterdan	Tráfego bom	10,3	23	18,1	21,6	71,8
Barcelona	Quente	10,0	34	12,9	27,4	91,0
Hamburg	Plano	8,0	21	16,2	20,4	67,8
London	Tráfego pesado	6,5	18	13,9	24,0	79,7
Luxembourg	Tráfego leve	22,2	48	17,9	20,9	69,4
Madrid	Tráfego pesado	7,0	25	13,8	28,8	95,7
Porto	Quente/montanhoso	8,0	25	8,9	30,0	99,7
Stockholm	Frio	7,5	27	9,7	26,6	88,4
Stuttgart	Montanhoso	9,8	25	11,4	22,1	73,4

A forma que a velocidade média e o número de paradas influencia no consumo de combustível pode ser melhor visualizada através da Figura 3-4.

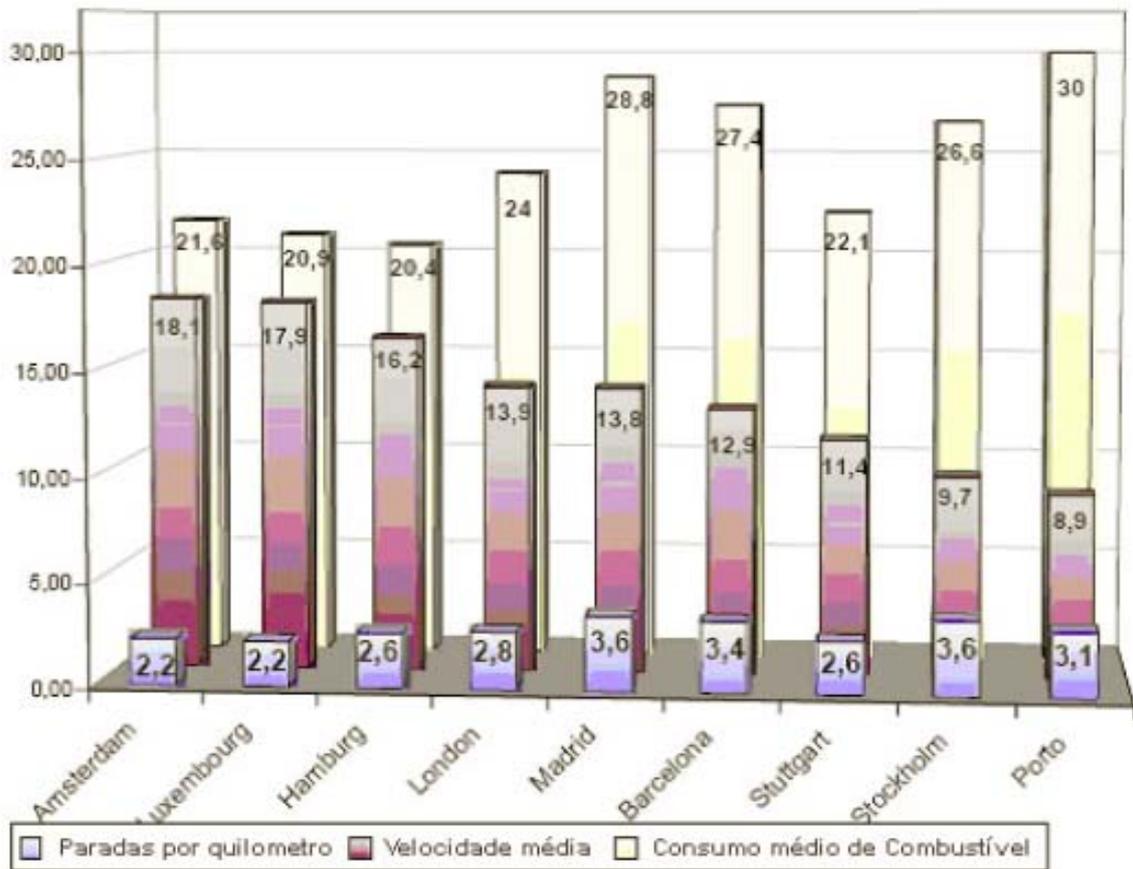


Figura 3-4 - Relação entre a velocidade média, o número de paradas e o consumo de combustível, por cidade, nos ônibus pertencentes ao projeto CUTE, (Saxe e Strömberg, 2005) [9].

4 SISTEMA DE TRAÇÃO

Neste capítulo será feita uma descrição dos principais componentes de um sistema de tração de um veículo híbrido com pilhas a combustível.

4.1 Pilha a Combustível

As pilhas a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química de combustíveis diretamente em energia elétrica, tendo eficiência elevada na geração de energia e baixo impacto ambiental. Devido às etapas intermediárias de produção de calor e o trabalho mecânico, típicos da maioria os métodos convencionais da geração de energia, serem evitadas, as pilhas a combustível não apresentam as limitações termodinâmicas dos motores de calor, tais como a eficiência de Carnot. Além do que, como a combustão é evitada, as pilhas a combustível geram energia com poluição mínima. Entretanto, diferentemente das baterias, nas pilhas a combustível os reagentes devem ser continuamente fornecidos para que a mesma possa gerar energia [10].

Embora as células combustíveis pudessem, em princípio, processar uma variedade larga dos combustíveis e oxidantes, as que despertam maior interesse hoje são as pilhas a combustível que usam combustíveis comuns (ou seus derivados) ou hidrogênio como redutor, e o ar do ambiente como o oxidante.

A maioria dos sistemas de pilhas a combustível compreende um número de componentes:

- Pilhas unitárias, onde ocorrem as reações eletroquímicas;
- Módulos de pilhas, em que as pilhas individuais são combinadas para terem maior capacidade de geração de energia;
- Balanço de planta, que compreende o sistema de controle de admissão de

gases, circulação de água, umidificação, vazão, temperatura, pressão.

4.1.1 Estrutura Básica de uma Pilha Unitária

As pilhas unitárias constituem o núcleo de uma pilha a combustível. Estes dispositivos convertem a energia química contida em um combustível eletroquimicamente diretamente em energia elétrica. A estrutura física básica de uma pilha a combustível consiste em uma camada central, que é o eletrólito, em contato com um ânodo e um cátodo, um de cada lado. Na Figura 4-1, é mostrado um esquema básico de uma pilha unitária com os gases reagentes/produto e o sentido do fluxo da condução do íon através da pilha [10].

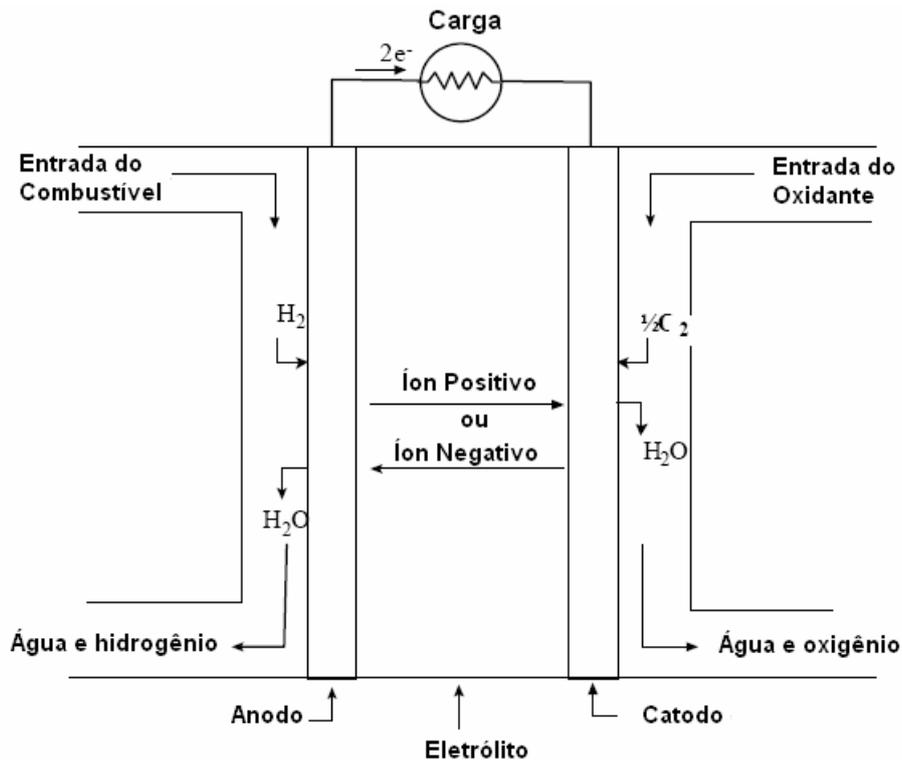


Figura 4-1 - Esquema Básico de uma pilha unitária, adaptado de [10]

Em uma pilha a combustível, o combustível é alimentado continuamente ao ânodo (eletrodo negativo) e um oxidante (frequentemente o oxigênio do ar) é alimentado continuamente ao cátodo (eletrodo positivo). As reações eletroquímicas ocorrem nos eletrodos para produzir uma corrente iônica através do eletrólito, enquanto uma corrente elétrica completa o circuito, realizando trabalho na carga. Embora uma

pilha a combustível seja similar a uma bateria típica em muitos aspectos, difere em diversos outros. A bateria é um dispositivo de armazenamento da energia em que toda a energia disponível é armazenada dentro da bateria própria (pelo menos o redutor). A bateria deixará de produzir a energia elétrica quando os reagentes químicos são consumidos. Uma pilha a combustível, por sua vez, é um dispositivo de conversão da energia em que o combustível e o oxidante são fornecidos continuamente. Em princípio, a célula combustível produz energia enquanto o combustível estiver sendo fornecido.

As pilhas a combustível são classificadas de acordo com a escolha do eletrólito e do combustível, que determinam por sua vez as reações do eletrodo e o tipo de íons que carregam a corrente através do eletrólito. Appleby e Foulkes notaram [10] que, na teoria, alguma substância capaz da oxidação química que pode ser fornecida continuamente, como um fluido, pode ser queimado galvanicamente como o combustível no ânodo de uma pilha a combustível. Similarmente, o oxidante pode ser qualquer fluido que puder ser reduzido em uma taxa suficiente. Embora seja desejável o uso direto de combustíveis convencionais em pilhas a combustível, a maioria das pilhas a combustível em desenvolvimento atualmente usa o hidrogênio gasoso, ou um gás rico em hidrogênio, como um combustível. O hidrogênio tem uma reatividade elevada para reações do ânodo, e pode ser produzido quimicamente de uma grande variedade de combustíveis fósseis e renováveis, assim como através de eletrólise. Por razões práticas, o oxidante mais comum é o oxigênio gasoso, que está prontamente disponível do ar.

4.1.2 Módulos de Pilhas a Combustível

Para a maior parte das aplicações práticas da pilha a combustível, as pilhas unitárias devem ser empilhadas para conseguir a tensão e a potência requerida para uma determinada aplicação. Geralmente, o empilhamento consiste em múltiplas conexões

em série de pilhas unitárias através de condutor elétrico. Serão mostradas a seguir duas possibilidades de arranjo para um módulo de PaC [10].

4.1.2.1 Planar-Bipolar

O projeto mais comum de um módulo de pilha a combustível é o arranjo chamado planar-bipolar. As pilhas unitárias são conectadas eletricamente pelos interconectores. Por causa da configuração lisa da placa de uma pilha, os interconectores tornam-se placas separadoras, com duas funções:

- Fornecer uma conexão elétrica em série entre pilhas adjacentes, especificamente para pilhas com placas lisas;
- Fornecer uma barreira que separe o combustível e o oxidante de pilhas adjacentes.

4.1.2.2 Tubulares

Especialmente para pilhas a combustível de alta temperatura, os módulos com pilhas tubulares foram desenvolvidos. As pilhas tubulares têm vantagens significativas no envelopamento e na integridade estrutural das pilhas. Entretanto, representam um desafio geométrico especial ao projetista da pilha quando vem a conseguir elevadas densidades de potência e curtos caminhos de corrente. Em um dos primeiros projetos a corrente é conduzida tangencialmente em torno do tubo. A interconexão entre os tubos é usada para dar forma a disposições retangulares dos tubos. Alternativamente, a corrente pode ser conduzida ao longo da linha central do tubo; neste caso a interconexão é feita na extremidade dos tubos. Para minimizar o comprimento de trajetos da condução eletrônica para pilhas individuais, as pilhas conectadas em série seqüencialmente estão sendo desenvolvidas. As pilhas podem ser conectadas em série ou em paralelo.

4.1.3 Balanço de Planta

Os sistemas de geração de energia elétrica com pilhas a combustível requerem diversos outros subsistemas e componentes; o chamado balanço da planta (BdP). Junto com a pilha, o BdP dá forma ao sistema da pilha a combustível. O arranjo preciso do BdP depende fortemente do tipo da célula combustível, da escolha do combustível e da aplicação. As condições específicas de operação e os projetos das pilhas unitárias e dos módulos determinam as características do BdP. A maioria dos sistemas de pilha a combustível contém:

- Preparação do combustível. A não ser que combustíveis puros (tais como o hidrogênio puro) sejam usados, alguma preparação do combustível é requerida, envolvendo geralmente a remoção das impurezas e condicionamento térmico. Além do que, muitas PaCs que não usam o hidrogênio puro requerem algum processador do combustível, como reformador, em que o combustível é reagido com algum oxidante (geralmente vapor ou ar) para dar forma a uma mistura rica em hidrogênio para a alimentação do ânodo.
- Suprimento de ar. Na maioria de sistemas práticos de pilhas a combustível, é composto de compressores ou ventiladores de ar, bem como de filtros de ar.
- Controle de temperatura. Todos os sistemas de pilhas a combustível devem possuir um controle bem ajustado da temperatura do módulo.
- Circulação de água. Para refrigerar o módulo e, em algumas pilhas, para umidificar o combustível antes da alimentação.
- Condicionador de potência elétrica. Devido ao fato de as pilhas a combustível não possuírem boa regulação de tensão, em alguns casos aplica-se um conversor/regulador de tensão na saída.

O balanço de planta representa, na maioria dos casos, uma fração significativa do peso, volume e custo dos sistemas de pilhas a combustível.

4.1.4 Tipos de Pilhas a Combustível

Deixando de lado aspectos práticos e custos de materiais, os dois principais problemas com pilhas a combustível são:

- A reação lenta conduz a corrente e potência baixas;
- O hidrogênio puro não está disponível na natureza.

Para contornar esses problemas, muitos tipos de pilhas a combustível têm sido feitas. Os diferentes tipos de PaCs se distinguem pelo eletrólito usado, embora existam outras diferenças importantes também. Seis tipos de pilhas a combustível emergiram como sistemas viáveis para o presente e o futuro próximo [11]. A informação básica sobre estes sistemas é dada na Tabela 4-1.

A pilha a combustível de membrana de troca de prótons (PEM) leva vantagem essencialmente na simplicidade. O eletrólito é um polímero sólido em que os prótons são móveis. Com um eletrólito sólido e imóvel, este tipo de pilha a combustível é relativamente muito simples. Estas são as pilhas a combustível mais usadas em aplicações veiculares. As pilhas a combustível, para serem usadas como fonte de energia principal de um veículo elétrico híbrido, devem ser dimensionadas para a potência média durante todo o ciclo de rodagem, ou seja, a relação entre a energia total consumida, já descontada a regeneração, e o tempo em que esta energia foi consumida.

$$P_{PaC} = \frac{E_{Consumida}}{t} \quad (4-1)$$

Funcionam em temperaturas baixas e o problema das lentas taxas de reação é resolvido usando catalisadores e eletrodos sofisticados. A platina é o catalisador, o que encareceria muito, mas os novos desenvolvimentos permitiram que pequenas

quantidades sejam usadas e, desta maneira, o custo da platina é uma pequena parte do preço total de uma pilha a combustível do tipo PEM. Uma PaC do tipo PEM deve ser alimentada com hidrogênio puro.

Tabela 4-1 - Tipos de Pilhas a Combustível, adaptado de [11]

Tipo	Íon móvel	Temperatura	Aplicações
Alcalina (AFC)	OH^-	50 - 200°C	Veículos espaciais
Membrana de troca de prótons (PEMFC)	H^+	30-100°C	Veículos e aplicações móveis e pequenos sistemas de geração
Metanol direto	H^+	20-90°C	Adequada para sistemas eletrônicos portáteis de baixa potência, de operação longa
Ácido fosfórico	H^+	~220°C	Sistemas de geração de mais de 200 kW
Carbonato fundido	CO_3^{2-}	~650°C	Adequada para sistemas de geração de médio ou grande porte, até MW
Óxido sólido	O^{2-}	500-1000°C	Adequada para toda faixa sistemas de geração, de 2 kW a muitos MW

4.2 Baterias

Uma bateria consiste em duas ou mais pilhas unitárias, que por sua vez são constituídas de cinco componentes principais:

- a) eletrodos (anodo e catodo);
- b) separadores;
- c) terminais;
- d) eletrólito;
- e) invólucro.

As pilhas unitárias são agrupadas em um único compartimento, e este conjunto é chamado de bateria. No caso de baterias secundárias ou recarregáveis, a reação química pode ser revertida invertendo-se a corrente, fazendo com que a bateria se recarregue. Para se chegar à tensão nominal da carga, as baterias são eletricamente conectadas, formando um conjunto chamado banco de baterias [12].

As baterias chumbo-ácidas são as recarregáveis mais bem conhecidas, mas há outras que serão apresentadas. O primeiro veículo elétrico que usou baterias recarregáveis precedeu a invenção da bateria chumbo-ácidas por 25 anos e há um número muito grande de materiais e eletrólitos que podem ser combinados para formar uma bateria. Entretanto, somente um número relativamente pequeno de combinações tem sido desenvolvido como baterias recarregáveis comerciais apropriadas para o uso nos veículos elétricos. Estas baterias são: chumbo-ácidas, níquel-ferro, níquel-cádmio, níquel-metal hidreto, lítio-polímero e lítio-ferro, sódio-enxofre e sódio-metal cloreto. Há também uns desenvolvimentos mais recentes de baterias que podem ser reabastecidas mecanicamente; as principais são alumínio-ar e zinco-ar. Apesar de todas as tentativas, e aproximadamente 150 anos de desenvolvimento, ainda não foi desenvolvida uma bateria que permitisse o uso difundido dos veículos elétricos. Entretanto, tem havido recentemente alguns desenvolvimentos importantes na tecnologia de baterias que dão grande esperança para o futuro. Desde que o seu desempenho seja entendido e modelado adequadamente, é possível se projetar veículos elétricos muito úteis que utilizam as baterias como únicos ou principais dispositivos armazenadores de energia [5].

Para um veículo elétrico híbrido, as baterias devem ser dimensionadas de modo que armazenem a energia suficiente e forneçam a potência de pico adequada para que o veículo possa desempenhar a aceleração especificada, bem como ter autonomia suficiente no ciclo de rodagem para o qual foi projetado. Em um veículo elétrico com propulsão a bateria, esta é projetada para ter a autonomia especificada do veículo. O peso e o volume da bateria podem facilmente ser calculados do consumo de energia (Wh/km) do veículo e a densidade da energia (Wh/kg, Wh/L) observando-se o estado de carga da bateria no ciclo de rodagem em questão [13]. Já para os veículos híbridos,

como o ônibus deste trabalho, deve-se descontar a energia fornecida pela fonte principal, a pilha a combustível. Para um veículo elétrico atender ao requisito de potência máxima o projetista deve considerar para o dimensionamento das baterias os fatores principais que determinam a potência demandada: aceleração, inclinação e velocidade máximas. Nos veículos elétricos, as baterias operam com cargas e descargas profundas, por isso deve-se atentar para este fato na especificação das mesmas, que devem ser apropriadas para tal situação (tracionárias).

O dimensionamento de um banco de baterias para um veículo híbrido conectável à rede elétrica é mais complexo do que para um somente a baterias ou um híbrido sem conexão à rede. Isto se deve ao fato de ter-se necessidade de conhecer o ciclo diário de rodagem e o consumo do veículo ao longo do dia, para que se saiba qual é o melhor momento para ser acionada a fonte principal, no caso deste trabalho a pilha a combustível, para que se possa otimizar o consumo de hidrogênio.

4.2.1 Características de Baterias

Serão listadas a seguir as principais características de baterias tracionárias.

4.2.1.1 Tensão Nominal

Todas as pilhas elétricas têm tensões nominais que dão a tensão aproximada quando a pilha está entregando potência elétrica. As pilhas podem ser conectadas em série para dar a tensão total requerida. Esta tensão, na prática, se altera. Quando a bateria está fornecendo energia, a tensão cai; quando a bateria está sendo carregada, a tensão se eleva. Isto é melhor expressado em termos da resistência interna e do circuito equivalente de uma bateria, que é mostrado na Figura 4-2. A bateria é representada como tendo uma tensão interna E , mas a tensão nos terminais é uma tensão diferente V_t , por causa da queda de tensão na resistência interna R . Nota-se que, quando não há corrente circulando, a tensão terminal é igual à tensão interna, chamada tensão de

circuito aberto, que varia conforme o estado de carga da bateria; em veículos elétricos a resistência interna das baterias é bem baixa.

$$V_t = E - IR \quad (4-2)$$

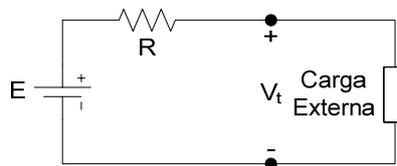


Figura 4-2 - Circuito equivalente de uma bateria

4.2.1.2 Capacidade de Carga

A carga elétrica que uma bateria pode fornecer é claramente um parâmetro muito importante. A unidade do SI para esta é o Coulomb, a carga quando um Ampère flui em um segundo. Entretanto, esta unidade é muito pequena. Normalmente, para baterias é usado o Ampère-hora (Ah): um Ampère que flui em uma hora. A capacidade de uma bateria pode ser por exemplo 10 Ah. Isto significa que pode fornecer 1 A por 10 h, ou 2 A por 5 h, ou na teoria 10 A por 1 h. Entretanto, na prática, isto não acontece para a maioria de baterias. Geralmente quando uma bateria pode fornecer 1 A por 10 h, se 10 A forem extraídos dela, a carga não durará 1 h. É importante compreender isto. A capacidade das baterias de potência usadas em veículos elétricos (baterias da tração) é fabricada geralmente para uma descarga de 5 horas. A Figura 4-3 mostra como a capacidade é afetada se a descarga é mais rápida, ou mais lenta. O diagrama é para uma bateria chumbo-ácida com capacidade nominal de 42 Ah. Observa-se que se a carga for removida em uma hora, a capacidade cai muito consideravelmente a aproximadamente 33 Ah. Enquanto que, se a descarga for mais lenta, por exemplo em 20 h, a capacidade sobe para aproximadamente 46 Ah. A notação usual para a corrente nominal de baterias é a letra C, ou seja, se a bateria é de 50 Ah, então 1C = 50A, 2C = 100A e assim por

diante. Um refinamento adicional é utilizar um subscrito após o C, de modo que ele representa o tempo da descarga, ou seja, para a mesma bateria de 50 Ah uma descarga de 30 A durante 2 h, ficaria $0,6C_2$.

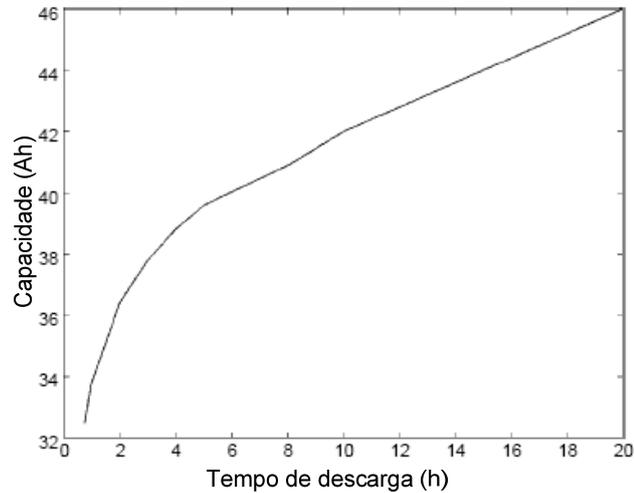


Figura 4-3 - Capacidade de carga *versus* tempo de descarga, adaptado de [5]

4.2.1.3 Energia Armazenada

A finalidade da bateria é armazenar a energia. A energia armazenada em uma bateria depende de sua tensão, e da carga armazenada. A unidade do SI é o joule, mas esta é uma unidade muito pequena, sendo usado em seu lugar o Watt-hora (Wh). Esta é a energia equivalente ao trabalho de uma potência de 1 watt em 1 hora. O Wh é equivalente a 3600 joules. O Wh é compatível com o Ah para a carga, porque rende a fórmula simples:

$$E \text{ (energia em Wh)} = V \text{ (tensão em V)} \times C \text{ (capacidade em Ah)}$$

Entretanto, esta equação deve ser usada com muito cuidado. Nota-se que a tensão da bateria, e a sua capacidade em Ah, variam consideravelmente dependendo de como a bateria é usada. A energia armazenada é assim uma quantidade bastante variável, e reduz-se se a energia for liberada rapidamente. É especificada do mesmo modo que a capacidade em Ah, isto é, se a capacidade da carga for dada para uma

descarga de cinco horas, então a energia deve logicamente ser dada para esta taxa da descarga.

4.2.1.4 Energia Específica

A energia específica é a quantidade de energia elétrica armazenada para cada quilograma da massa da bateria. Tem unidades de Wh/kg. A capacidade da energia da bateria necessitada em um veículo é sabida uma vez que (Wh) pode ser dividido pela energia específica (Wh/kg) para dar uma primeira aproximação da massa da bateria.

4.2.1.5 Densidade de Energia

É a relação da quantidade de energia elétrica armazenada pelo volume da bateria. Tem normalmente unidades de Wh/m³. É também um parâmetro importante porque a capacidade da energia da bateria (Wh) pode ser dividida pela densidade da energia da bateria (Wh/m³) para mostrar o volume da bateria requerido. Alternativamente se um volume sabido estiver disponível para baterias, o volume (m³) pode ser multiplicado pela densidade da energia das baterias (Wh/m³) para dar uma primeira aproximação da quantidade de energia disponível. O volume da bateria pode ter um impacto considerável no projeto de veículo.

4.2.1.6 Potência Específica

A potência específica é a quantidade de potência obtida por quilograma da bateria. É bem variável e uma quantidade bastante anômala, tendo em vista que a potência fornecida pela bateria depende mais da carga conectada do que da própria bateria. Embora as baterias tenham uma potência máxima, não é conveniente operá-las próximo a esta potência máxima por mais do que alguns segundos, porque não durariam por muito tempo e se operariam muito ineficientemente. As unidades normais são W/kg. Algumas baterias têm uma energia específica muito boa, mas têm a potência

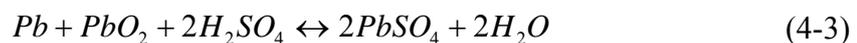
específica baixa, estas armazenam muita energia, mas podem somente liberá-la lentamente. Em termos do veículo elétrico, estes podem operar muito lentamente por grande distância. O poder específico elevado resulta, normalmente, em uma energia específica mais baixa para a bateria.

4.2.2 Tipos de Baterias

São apresentados a seguir alguns tipos de baterias, com comparação das principais características:

4.2.2.1 Baterias Chumbo-ácidas

Esta é a bateria mais conhecida e mais usada para veículos elétricos até o presente. Estas baterias são usadas extensamente em veículos com MCI porque o conhecimento do seu desempenho é pleno. Entretanto, para veículos elétricos, as baterias chumbo-ácidas mais robustas que suportam ciclos de carga e descarga profundos usam um gel que é melhor que o eletrólito líquido normalmente usado. Estas baterias têm um custo mais alto. A reação total é:



4.2.2.2 Bateria de Níquel-cádmio

A bateria de níquel-cádmio foi considerada uma das principais concorrentes à bateria chumbo-ácida para o uso em veículos elétricos, pois a primeira tem quase duas vezes a energia específica da segunda. A energia elétrica é obtida da seguinte reação:



4.2.2.3 Baterias de Níquel-metal hidreto

Esta bateria (Ni-MH) foi introduzida comercialmente na última década do século XX. Tem um desempenho similar à bateria de níquel-cádmio; a diferença principal é

que na bateria de Ni-MH o eletrodo negativo usa o hidrogênio, absorvido em um hidreto metálico, que a deixa livre do cádmio, uma vantagem considerável. Uma característica interessante deste tipo da bateria é que o eletrodo negativo se comporta exatamente como uma pilha a combustível. Os metais usados para armazenar o hidrogênio são ligas, cuja formulação é geralmente proprietária. O princípio de sua operação é exatamente o mesmo que no armazenamento do hidrogênio em hidretos metálicos. O princípio básico é uma reação reversível em que o hidrogênio é adsorvido ao metal, formando hidretos e liberado então como o hidrogênio livre quando requerido. A reação química total para a bateria de Ni-MH é:



4.2.2.4 Bateria de Sódio-Enxofre

As pilhas básicas de sódio-enxofre têm uma energia específica elevada, seis vezes a das pilhas chumbo-ácido, mas em baterias experimentais a massa do invólucro tipicamente reduz à metade esta melhoria em potencial. No projeto do recipiente deve-se tomar cuidado, pois a massa da bateria pode dobrar. A fórmula química básica para a reação é:



4.2.2.5 Bateria de Sódio-metal cloreto (Zebra)

As baterias de sódio-metal cloreto são, em muitos aspectos, similares às de sódio-enxofre e tem muitas vantagens destas baterias. Entretanto, com este sistema mais seguro a preocupação associada com a bateria de sódio-enxofre tem sido superada. A principal razão para a maior segurança das pilhas da zebra é o uso do eletrólito positivo sólido que é separado do sódio fundido pelos eletrólitos sólido e líquido. Espera-se que

esta bateria possa tornar-se comercial. A reação química total que ocorre na bateria de sódio-metal cloreto é:



4.2.2.6 Bateria de Lítio polímero

A bateria de lítio polímero usa o metal do lítio para o eletrodo negativo e um óxido do metal de transição de intercalação para o positivo. Na reação química resultante o lítio combina com o óxido de metal para formar um óxido de lítio e para liberar a energia. Quando a bateria é recarregada a reação química é invertida. O lítio é um reagente, um íon móvel através do eletrólito. A reação química total é:



4.2.2.7 Bateria de Íon-lítio

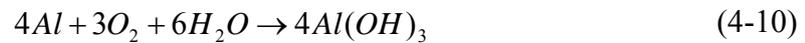
A bateria de íon-lítio começou a ser produzida no início dos anos 1990. O eletrólito é uma solução orgânica líquida ou um polímero sólido. A energia elétrica é obtida da combinação da liga lítio carbono e do óxido metálico para dar forma ao carbono e ao óxido lítio metal. Este tipo de bateria tem uma vantagem considerável de peso sobre outros sistemas de bateria, e isto a faz uma candidata altamente atrativa para o veículo elétrico no futuro. A energia específica, por exemplo, é aproximadamente três vezes a de baterias chumbo-ácidas e esta poderia dar a um carro uma autonomia razoável. A reação química total para esta bateria é:



4.2.2.8 Bateria de Alumínio-ar

A reação química básica da bateria de alumínio-ar é essencialmente simples. O alumínio é combinado com o oxigênio do ar e da água para dar forma ao hidróxido de

alumínio, liberando a energia elétrica no processo. A reação é irreversível. A reação química total é:



4.2.2.9 Bateria de Zinco-ar

A bateria de zinco-ar é similar em muitos aspectos à bateria de alumínio-ar, mas tem um desempenho total muito melhor, particularmente no que diz respeito à potência específica que é quase dez vezes a da bateria de alumínio-ar, sendo apropriada para o uso em veículos de estrada. A estrutura é similar, com um eletrodo positivo poroso em que o oxigênio reage com o eletrólito. O eletrólito é uma solução alcalina líquida. O eletrodo negativo é zinco sólido. A energia da bateria é obtida combinando o zinco com o oxigênio do ar e dando forma ao óxido de zinco. Alternativamente, dependendo do estado dos eletrodos e do eletrólito, o hidróxido de zinco pode ser formado, como nas baterias de alumínio-ar. O processo é normalmente irreversível. A recarga deste tipo de bateria, assim como da bateria de alumínio-ar, é feita trocando-se o combustível.

4.2.2.10 Comparação entre os Tipos de Baterias

Na Tabela 5 são listadas, para fins de comparação, as características principais das baterias descritas anteriormente.

Para o ônibus elétrico híbrido com pilhas a combustível, tema deste trabalho, serão utilizadas baterias de íons-lítio, em função de sua característica de alta potência específica e de alta densidade de energia. Deste modo o ônibus terá menor peso embarcado e também terá menor volume ocupado pelo banco de baterias, para uma mesma potência e capacidade de carga.

Tabela 4-2 - Características das baterias

Tipo	Wh/kg	Wh/m ³	W/kg	V _{Pilha} (V)	Eficiência Ah	R _{in} (Ω)	Disponibilidade comercial	T(°C)	Auto-descarga	Ciclos	Recarga
Chumbo-ácida	20-35	54-95	~250	2	~80%	~0,022	Plenamente disponível, com vários fabricantes	Ambiente	~2% por dia	Até 800	8 h
Níquel-cádmio	40-55	70-90	~125	1,2	Boa	~0,06	Boa para pequeno porte, difícil em grandes baterias	-40 a +80	0,5% por dia	1200	1 h
Níquel hidreto metálico	~65	~150	200	1,2	Muito boa	~0,06	Boa para pequenas baterias, difícil de se obter tracionárias	Ambiente	Acima de 5% por dia	~1000	1 h
Sódio-enxofre	100	150	200	2	Muito boa	Similar à NiCd	Nenhuma	300-350	Baixa	~1000	8 h
Zebra	100	150	150	~2	Muito alta	Muito baixa	Muito poucos fabricantes	300-350	10% por dia	>1000	8 h
Íons de lítio	90	153	300	3,5	Muito boa	Muito baixa	Normalmente para pequenas pilhas.	Ambiente	Muito baixa ~10% por mês	>1000	2-3 h
Alumínio-ar	225	195	10	1,4	-	Alta	Para sistemas estacionários	Ambiente	Muito alta >10% por dia	>1000	10 min
Zinco-ar	230	270	105	1,2	-	Média	Muito poucos fabricantes	Ambiente	Alta	>2000	10 min

4.3 Motor Elétrico de Tração

O motor elétrico é um componente fundamental do sistema de tração, pois é ele que faz a conversão da energia elétrica em mecânica, que é entregue ao eixo para movimentar o veículo. Em princípio qualquer motor elétrico pode ser utilizado para este fim, desde que se faça um controle do torque e velocidade que será entregue ao eixo.

Para um veículo elétrico, são requisitos do motor:

- Alta densidade de torque e de potência;
- Elevado torque de partida, em baixas velocidades e em subidas, com elevadas potências nas altas velocidades do veículo;
- Extensa faixa de velocidade, operando com potência constante até por volta de 3 a 4 vezes a velocidade nominal;

- Alta eficiência por uma grande faixa de torque e velocidade, incluindo operação com torque baixo;
- Capacidade de sobrecarga intermitente, tipicamente o dobro do torque nominal, com curta duração;
- Altas robustez e confiabilidade, apropriadas ao ambiente do veículo;
- Custo aceitável.

No início eram utilizados motores de corrente contínua tradicionais, pois têm controle de velocidade mais fácil e a eletrônica de potência ainda não havia avançado o suficiente para controlar os outros motores adequadamente, como o motor de indução, que será utilizado neste trabalho, o motor de relutância variável e o motor CC de ímã permanente.

Neste subitem será feita uma descrição dos principais tipos de motor que são utilizados em veículos elétricos, apontando suas vantagens e desvantagens.

4.3.1 Motor de Corrente Contínua com Escovas

Este é o tipo de motor mais largamente utilizado, quando se deseja o controle de velocidade, que se consegue variando-se a tensão fornecida aos terminais, então com uma eletrônica muito simples é possível controlá-lo muito bem. Mas, com o avanço da eletrônica de potência este panorama já está sendo mudado, sendo estes motores substituídos por outros que, apesar de necessitarem de um controle mais refinado, apresentam características melhores, principalmente, de peso e manutenção.

Uma máquina convencional de corrente contínua é constituída basicamente por um circuito magnético fixo, com enrolamentos de excitação (circuito indutor), formando o estator, e por uma parte móvel, chamada rotor ou armadura, com núcleo magnético de seção circular em cuja periferia existem ranhuras longitudinais contendo condutores (circuito induzido) ligados a um coletor. Este, por intermédio de escovas

fixas no estator, permite a ligação ao exterior e a combinação do sentido das forças eletromotrizes nos condutores do induzido de forma a sempre produzir um valor resultante com o mesmo sentido [14]. A Figura 4-4 mostra uma representação esquemática de uma máquina de corrente contínua.

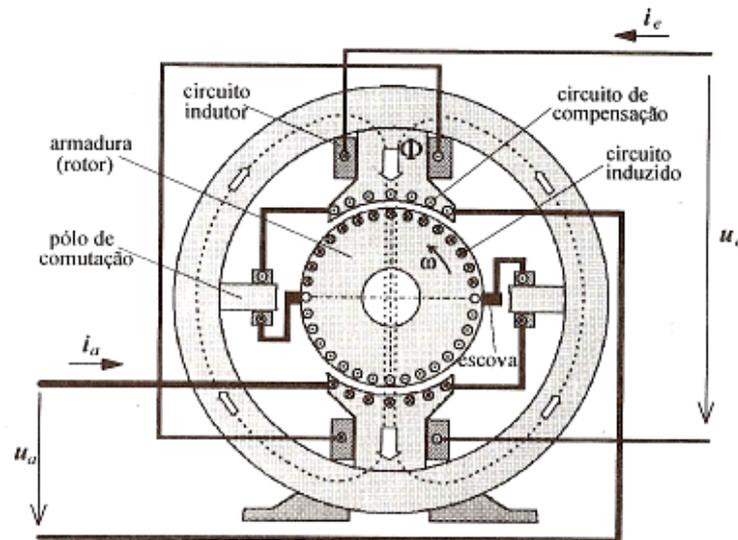


Figura 4-4 - Representação esquemática de uma máquina CC, adaptado de [14]

O campo magnético criado pelo indutor é distribuído ao longo do entreferro pelas peças polares e atravessa os dentes do induzido perpendicularmente ao entreferro. A passagem de corrente nos condutores do induzido origina uma outra componente de campo magnético perpendicular ao primeiro; os dois campos tendem a saturar uma região dos pólos onde se sobrepõem com o mesmo sentido, fenômeno conhecido como reação magnética do induzido, para atenuar este efeito acrescentam-se os enrolamentos de compensação na periferia das peças polares; quando atravessados pela corrente de armadura criam um campo perpendicular ao indutor, calculado de forma a neutralizar aquele que é causado pelo induzido. A introdução dos enrolamentos de compensação faz aumentar ligeiramente a resistência do induzido (maiores perdas). Mas, por outro lado, ao reduzir o campo criado pelo circuito da armadura, torna menor a auto-indução

do induzido. Do conjunto destes efeitos resulta menor constante de tempo elétrica do que na ausência de compensação.

Os pólos de comutação, alinhados com as escovas (linha neutra) e atravessados pela corrente de armadura, destinam-se a induzir, nas seções em comutação, forças eletromotrizes convenientes para minorar a ocorrência de arco entre as escovas e as lâminas adjacentes, que é tanto mais intensa quanto maior for a velocidade.

Existem diversas possibilidades de estabelecer o fluxo de excitação, com correntes comuns ao induzido, ou provenientes de fonte independente, ou combinando ambas. Em sistemas de velocidade variável a excitação independente é a mais usual e a excitação série também aparece, esta última quase só em aplicações de tração.

Os motores de corrente contínua podem se apresentar, conforme a ligação dos enrolamentos de campo e de armadura, em quatro configurações diferentes. São elas:

4.3.1.1 Motor CC com Excitação Independente

Esta configuração exige que se disponha de duas fontes de corrente contínua, uma para o campo e outra para a armadura. Permite um controle fino da velocidade do motor, uma vez que esta depende da tensão induzida na armadura (força contra-eletromotriz) e do fluxo no enrolamento de campo; com esta configuração pode-se controlar esses dois parâmetros separadamente.

4.3.1.2 Motor CC em Derivação (*shunt*)

Apresenta os enrolamentos de campo e de armadura com ligação em paralelo, tem curva de velocidade parecida com o motor CC com excitação independente, é utilizado em aplicações que exijam bom controle de velocidade, necessita somente de uma fonte CC.

4.3.1.3 Motor CC Série

Os enrolamentos de armadura e de campo são ligados em série, o que faz com que ambos compartilhem a mesma corrente elétrica, seu torque é proporcional ao quadrado da corrente e sua velocidade tem uma curva inversamente proporcional à corrente.

4.3.1.4 Motor CC Composto

Neste motor o enrolamento de campo é dividido e uma parte é ligada em série e a outra em paralelo com a armadura; este motor combina características dos motores série e em derivação, podendo ter duas configurações, quanto ao fluxo do enrolamento de campo, cumulativo ou diferencial. Dos motores de corrente contínua com escovas, este é o mais apropriado para aplicação em veículos elétricos, pois alia o torque elevado do motor série com o controle de velocidade do motor *shunt*.

A Figura 4-5 mostra os diagramas das quatro configurações de motores de corrente contínua, com suas características torque x velocidade.

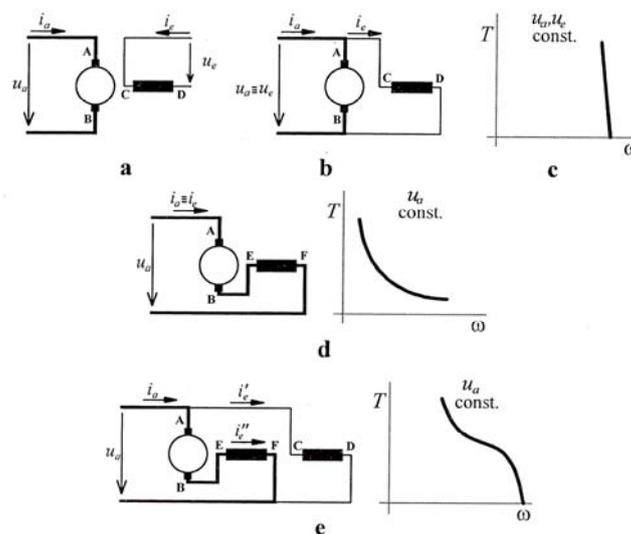


Figura 4-5 - a) Motor CC com excitação independente, b) Motor CC em derivação (*shunt*), c) Curva Torque x velocidade para os motores *shunt* e excitação independente, d) Motor CC série e sua curva torque x velocidade, e) Motor CC composto e sua curva torque x velocidade [14].

4.3.2 Motor de Indução

De todos os tipos, o motor de indução, particularmente o com rotor em gaiola de esquilo, é o mais usado na indústria. Essas máquinas são bastante econômicas, robustas, confiáveis e disponíveis no mercado em uma vasta faixa de potências, desde frações de HP até alguns MW. As máquinas de baixa potência, frações de HP, são monofásicas, mas para aplicações de velocidade variável, as trifásicas são mais comumente usadas. A Figura 4-6 mostra a característica torque x velocidade de uma máquina de indução.

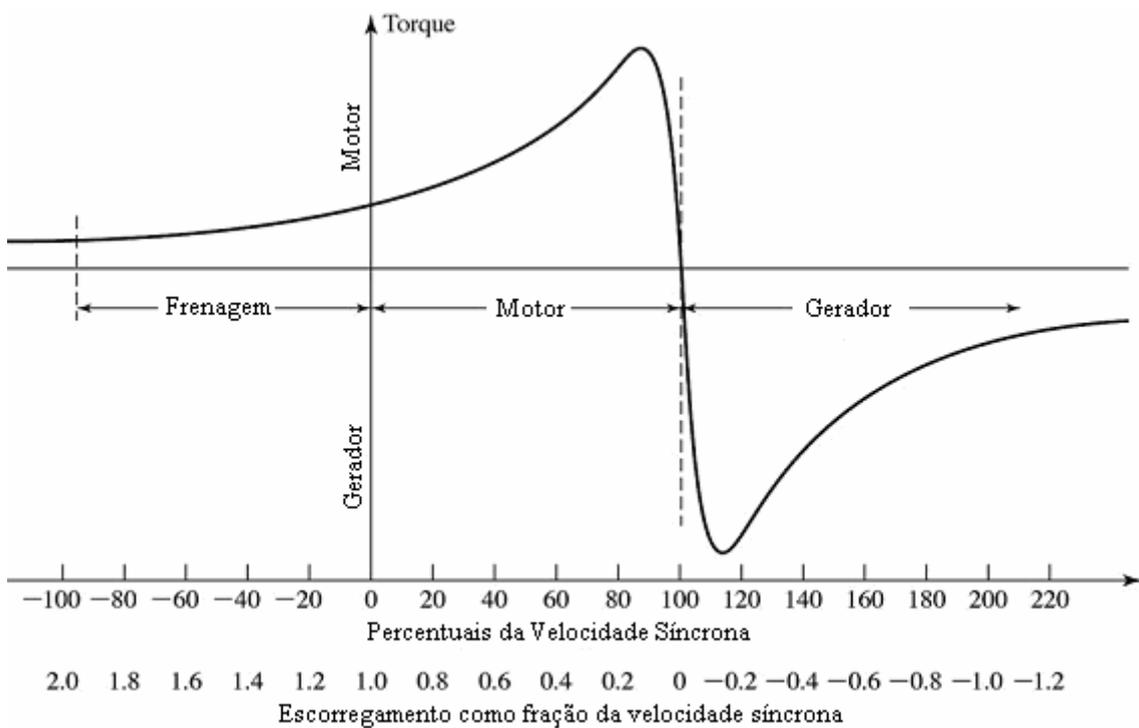


Figura 4-6 - Curva torque x velocidade da máquina de indução, adaptado de [15].

A máquina de indução assíncrona é constituída de um estator, que contém o enrolamento da armadura, que são bobinas distribuídas uniformemente de acordo com o número de pólos e de fases; e de um rotor, que pode ser de dois tipos: gaiola de esquilo ou rotor bobinado.

No rotor em gaiola de esquilo, os condutores do rotor estão curto-circuitados em cada terminal por anéis terminais contínuos; daí o nome de “gaiola de esquilo”, pela

semelhança. Nos rotores maiores os anéis terminais são soldados aos condutores, em vez de serem moldados na construção do rotor. As barras do rotor tipo gaiola de esquilo nem sempre são paralelas ao eixo do rotor, mas podem ser colocadas segundo um pequeno ângulo em relação a ele, para produzir um torque mais uniforme e para reduzir o “zumbido” magnético durante a operação do motor.

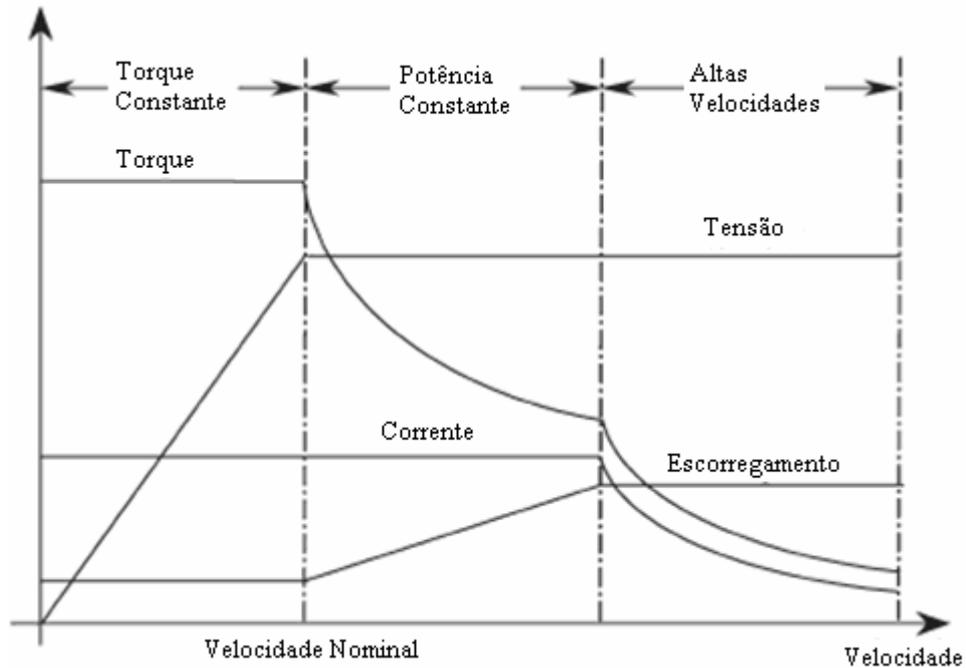


Figura 4-7 - Características do Motor de Indução [16]

Motores de rotor bobinado são aqueles nos quais os condutores de cobre são colocados nas diversas ranhuras, usualmente isolados do núcleo de ferro e são ligados em delta nas máquinas de indução trifásicas. Cada terminal do enrolamento é levado a anéis coletores que são isolados do eixo do rotor. A Figura 4-8 mostra um esquema da construção de um motor de indução e a Figura 4-9 mostra uma foto de um motor de indução com potência de 26 kW e torque de 120 Nm.

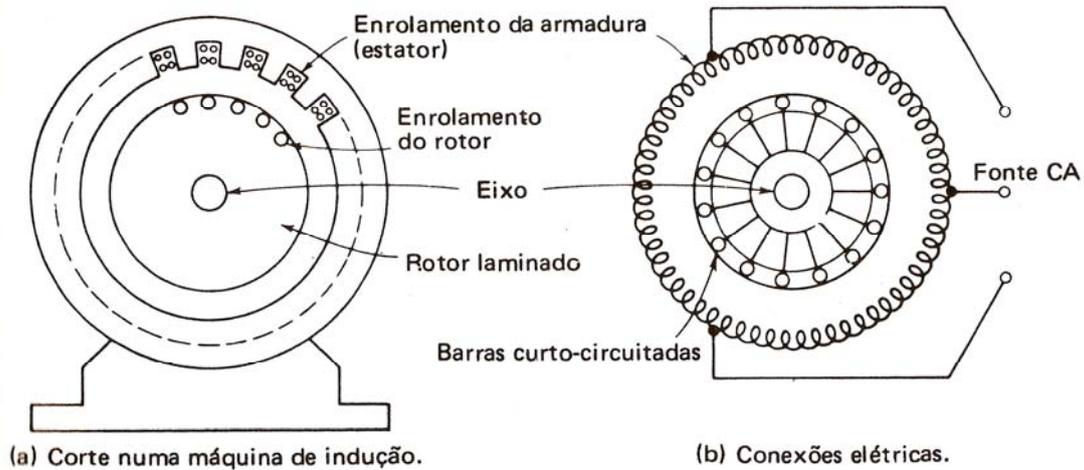


Figura 4-8 - Construção de um motor de indução tipo gaiola de esquilo, [17]



Figura 4-9 - Estator e rotor de um motor de indução de 26 kW, 2020 rpm e 120 Nm [18]

Bom desempenho dinâmico pode ser conseguido se forem aplicados o controle vetorial ou controle de torque direto. Para os motores de indução convencionais, a faixa de potência constante se estende tipicamente até 2 a 3 vezes a velocidade nominal. Entretanto, para máquinas da tração, isto pode ser estendido até 4 a 5 vezes a velocidade nominal.

Além das exigências gerais citadas para máquinas da tração, são parâmetros de projeto essenciais para os motores de indução: o número dos pólos, número de ranhuras

do estator e do rotor, a forma das ranhuras do estator e do rotor, e a disposição do enrolamento. O projeto envolve geralmente três estágios:

- escolhas apropriadas para o número de pólos e número de ranhuras do estator/rotor;
- cálculo das dimensões da máquina e projeto do enrolamento do estator de forma a conseguir uma potência especificada para uma velocidade e um volume especificados;
- simulação do desempenho da máquina operando em toda a faixa de velocidades.

Com um inversor alimentando a máquina, alto torque e baixa corrente de partida podem ser conseguidos, desde que a tensão e a frequência da fonte sejam variadas. Assim, comparado com as máquinas projetadas para alimentação com frequência constante, determinadas limitações de operação são removidas, tais como a necessidade de uma forma específica de ranhura do rotor conseguir o torque de partida requerido. Pela escolha apropriada da tensão e frequência da fonte, o torque de partida pode ser quase tão elevado quanto o torque máximo, enquanto que uma elevada eficiência pode ser conseguida pelo controle do escorregamento.

4.3.3 Motor de Relutância Variável

Os motores de relutância variável (MRV) são talvez o mais simples dos motores. Consistem em um estator com enrolamentos de excitação e um rotor magnético. Não é necessário ter enrolamentos no rotor, pois o torque é produzido pela tendência do rotor se alinhar com a onda de fluxo produzida pelo estator, de modo a maximizar os fluxos concatenados que resultam da aplicação de uma dada corrente no estator.



Figura 4-10 - Estator e rotor de um motor de relutância variável de 10/8 pólos [19]

Embora sua construção seja simples, este tipo de motor não pode ser simplesmente alimentado com a tensão da rede; é necessário o controle dos pulsos aplicados, em função da posição do rotor, pois somente há produção de torque na região onde há variação de relutância. Estes motores são projetados para que as indutâncias variem com a posição do rotor. Na Figura 4-10 é mostrada uma foto de um conjunto estator-rotor de um MRV, o torque produzido tem a seguinte expressão:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (4-11)$$

Onde i é a corrente aplicada ao enrolamento do estator, L é a indutância do enrolamento do estator e θ é a posição angular do rotor.

Os MRV funcionam com um controlador eletrônico que através de sensores de posição determina em qual instante deverá ser aplicado o pulso de corrente de modo que produza o torque necessário à movimentação do rotor.

Sistemas de acionamentos dos MRVs são projetados para atender a critérios tais como:

- Baixo custo;
- Torque constante;
- Faixa de velocidade desejada;
- Alto rendimento;
- Alta densidade de torque.

4.3.4 Motor CC com Ímã Permanente sem Escovas

Os motores CC com ímã permanente sem escovas, para a propulsão elétrica de veículos elétricos híbridos, são os mais capazes de competir com os motores de indução. Estes motores têm algumas vantagens, incluindo: a) o peso e o volume totais são reduzidos significativamente para uma dada potência de saída (densidade de potência elevada); b) têm uma eficiência mais elevada; c) o calor é dissipado eficientemente para o exterior.

Entretanto, estes motores inerentemente têm uma região curta de potência constante devido à sua característica limitada de enfraquecimento do campo, resultando do fato de o campo magnético ser produzido por um ímã permanente (o valor fixo do fluxo magnético limita o prolongamento da faixa de velocidade). A fim de aumentar a faixa da velocidade e melhorar a eficiência destes motores, o ângulo de condução do conversor de potência pode ser controlado acima da velocidade nominal. A Figura 4-11 mostra a curva característica de torque x velocidade de um motor CC com ímã permanente sem escovas com um controle do ângulo de condução. A faixa de velocidade pode ser estendida até três a quatro vezes a velocidade nominal.

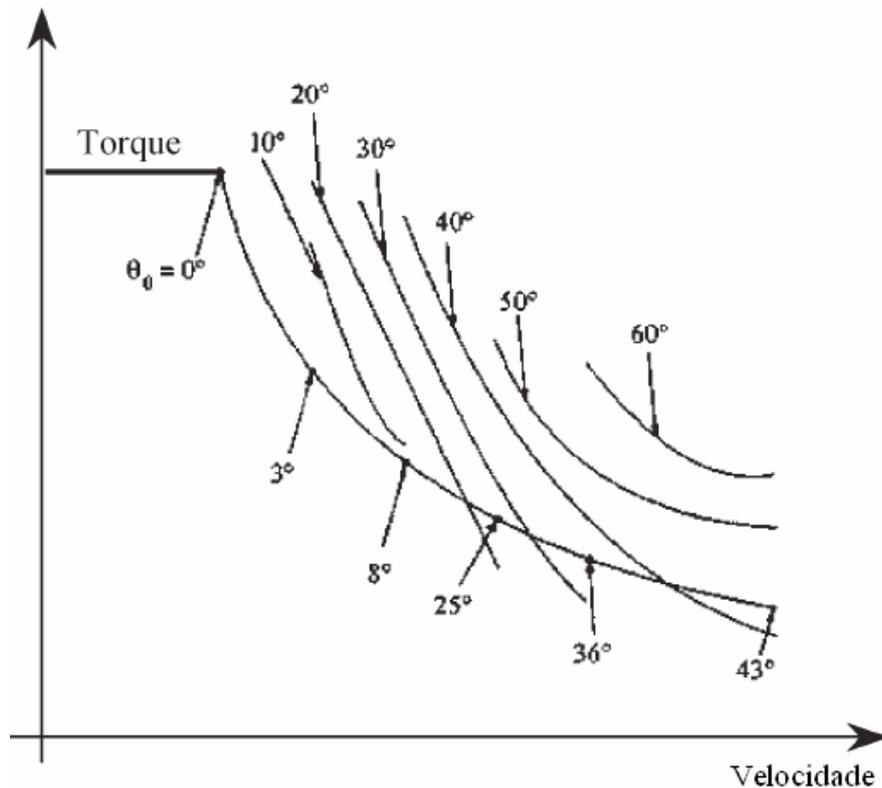


Figura 4-11 - Curva torque x velocidade para um motor CC de ímã permanente sem escovas, adaptado de [16].

Nestes motores, um enrolamento de campo adicional pode ser usado de tal maneira que o campo do entreferro pode ser enfraquecido durante a operação em altas velocidades com potência constante controlando o sentido e valor da corrente do campo CC, estes são chamados de híbridos. Entretanto, em uma faixa de velocidades muito altas, a eficiência pode cair por causa do risco de desmagnetização dos ímãs.

Há várias configurações dos motores CC com ímãs permanentes sem escovas. Dependendo do arranjo do ímã, basicamente, eles podem ser classificados como: a) ímã na superfície do rotor ou b) ímã embutido no rotor, com o último sendo o mais robusto. Os projetos com ímãs na superfície podem usar poucos ímãs, enquanto os projetos com ímãs embutidos podem conseguir uma densidade mais elevada do fluxo do entreferro. Uma outra configuração é o motor híbrido de ímã permanente, onde o campo magnético

do entreferro é obtido com a combinação do ímã permanente com o enrolamento de campo.

4.3.5 Comparação entre os Diferentes Tipos de Motores Elétricos

O motor de indução é o candidato o mais adaptado para propulsão elétrica de veículos elétricos urbanos. Esta solução é consensual, como ilustrado pela Tabela 4-3, e baseado nas características principais da propulsão elétrica de veículos elétricos; cada uma delas é classificada de um a cinco pontos.

Tabela 4-3 - Comparação entre os motores para VEH, adaptado de [16]

Característica\Propulsão	Motor CC	Motor de Indução	Motor CC com ímã Permanente	Motor de Relutância Variável
Densidade de Potência	2,5	3,5	5	3,5
Eficiência	2,5	3,5	5	3,5
Controlabilidade	5	5	4	3
Confiabilidade	3	5	4	5
Maturidade tecnológica	5	5	4	4
Custo	4	5	3	4
Total	22	27	25	23

As curvas obtidas com o GPS são inseridas em um modelo para simulação do sistema de tração, no MATLAB/SIMULINK, que faz o processamento matemático para gerar as curvas de potência, tensão, corrente, consumo entre outras, em função do tempo; bem como gera uma representação esquemática do sistema modelado a ser simulado, com vistas a facilitar o entendimento. Foi utilizada a versão R2006a do MATLAB, para as simulações deste trabalho.

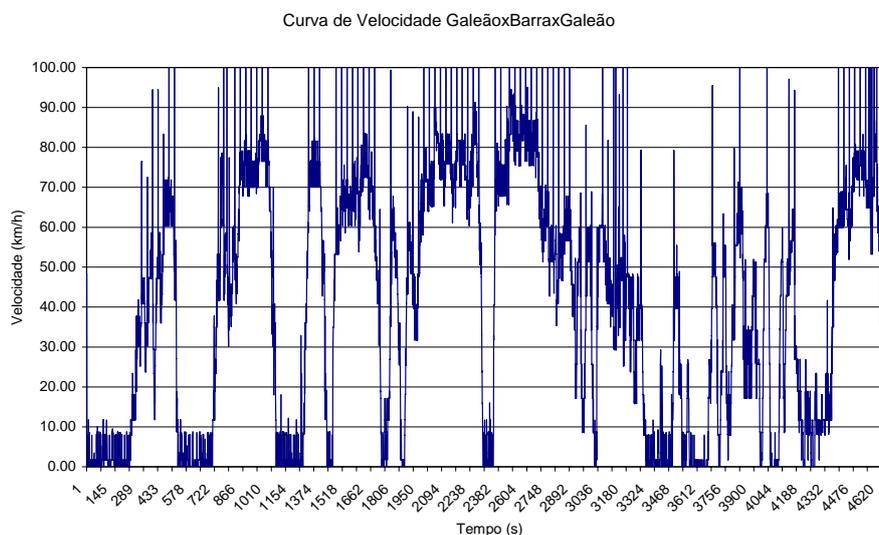


Figura 5-2 - Curva de Velocidade Levantada com o GPS não ajustada

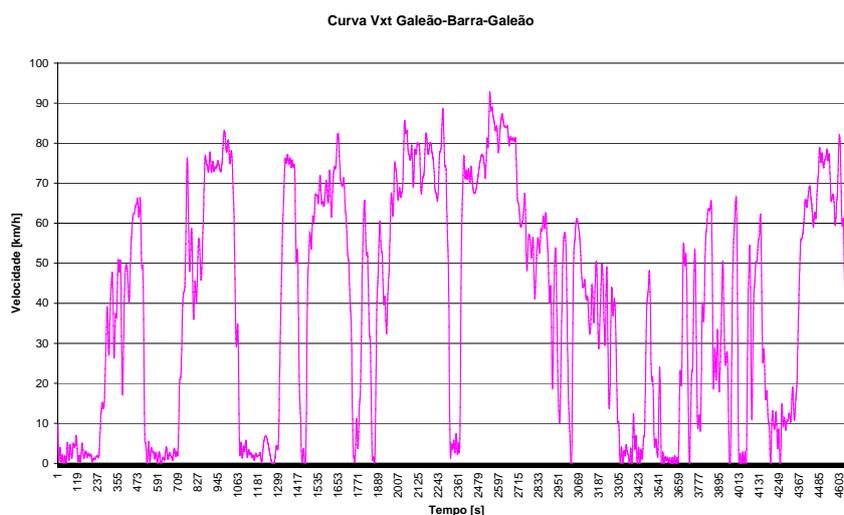


Figura 5-3 - Curva de Velocidade Levantada com o GPS ajustada

As curvas geradas pelo GPS contêm muitos erros de aquisição do posicionamento, sendo necessária a “limpeza” da curva para o MATLAB poder realizar os cálculos, gerando resultados razoáveis e evitando que o simulador trave no momento de processar os cálculos. Para efetuar o ajuste das curvas coletadas com o GPS, foi utilizado o software Table Curve 2D, com a aplicação do recurso *spline*. Com isso as curvas podem ser inseridas na simulação do MATLAB/SIMULINK.

O efeito da limpeza da curva gerada pelo GPS, com o Table Curve 2D, é mostrado nas Figuras 5-2 e 5-3, onde são mostradas as curvas de velocidade levantada, antes e depois do ajuste.

6 MODELAGEM PROPOSTA PARA O ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO COM PILHA A COMBUSTÍVEL E BATERIAS

A predição do desempenho e da autonomia de um veículo é de grande importância para determinar os parâmetros de equipamentos/dispositivos do mesmo, como potência do motor, tipo e tamanho das baterias, entre outros. Podemos chegar a esses dados com a modelagem matemática do veículo e posterior simulação computacional.

O primeiro parâmetro que será modelado é o desempenho do veículo. O desempenho é dado pela aceleração e velocidade máximas, fatores nos quais os veículos elétricos têm tradição de ser muito pobres.

Uma outra característica muito importante de veículos elétricos que deve ser prevista é sua autonomia. Isto também pode ser matematicamente modelado, e os programas de computador facilmente o fazem. A matemática que será desenvolvida permitirá que se verifiquem os efeitos de mudar coisas como a capacidade da bateria, bem como todos os outros fatores de projeto. Esta é uma ferramenta essencial para o projetista do veículo.

O ônibus tem 12 metros de comprimento com 16 toneladas vazio e 22 lotado, lotação de 100 passageiros, velocidade máxima de 60 km/h, aceleração máxima de $1,3 \text{ m/s}^2$, inclinação máxima da rampa de 12 %, com aceleração máxima de $0,3 \text{ m/s}^2$ e velocidade máxima de 25 km/h, para esta condição, cilindros de hidrogênio com capacidade total de 28 m^3 . Tomando como base estes valores, podemos calcular a potência requerida pelo ônibus para cada situação limite.

Serão apresentados neste item os parâmetros necessários para a aplicação do modelo de força resultante de tração do veículo, para que possa encontrar resultados

como: potência, tensão, corrente, estado de carga das baterias, consumo de H₂, autonomia, entre outros.

6.1 Força de Tração

A primeira etapa para modelar o desempenho do veículo é produzir uma equação para o esforço de tração. Esta é a força que propõe o veículo, transmitida à terra através das rodas.

Considerar um veículo da massa m , prosseguindo em uma velocidade v , acima de uma inclinação com ângulo α , como na figura 6-1. A força que propõe o veículo, o esforço de tração, tem que realizar o seguinte:

- Vencer o atrito dos pneus com o solo;
- Vencer o arrasto aerodinâmico;
- Fornecer a força necessária para superar a componente de peso do veículo que o empurra para baixo em uma rampa;
- Acelerar o veículo, se a velocidade não for constante.

Serão vistos cada um destes itens separadamente:

6.1.1 Força de Atrito

O atrito é devido, principalmente, à fricção do pneu do veículo na estrada. A fricção nos rolamentos e o sistema de engrenagem têm também sua participação. O atrito é aproximadamente constante e dificilmente depende da velocidade do veículo. É proporcional ao peso do veículo. A equação é:

$$F_{at} = \mu \cdot m \cdot g \quad (6-1)$$

Onde o μ é o coeficiente de atrito. Os fatores principais que controlam o μ são o tipo de pneu e a pressão do pneu. Todo ciclista sabe muito bem disso; o desempenho de uma bicicleta é muito melhor se os pneus estiverem cheios.

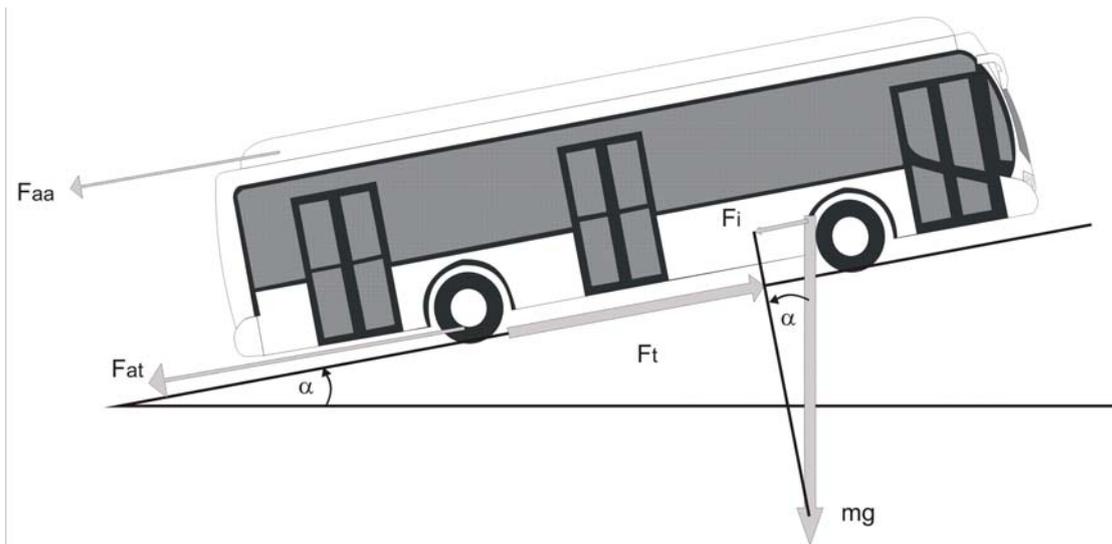


Figura 6-1 - Forças atuantes no ônibus

6.1.2 Força de Arrasto Aerodinâmico

Esta parte da força é devido à fricção do corpo do veículo que se move através do ar. É uma função da área frontal, forma, saliências tais como espelhos laterais, dutos e passagens de ar, *spoilers*, e muitos outros fatores. A fórmula para este componente é:

$$F_{aa} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (6-2)$$

Onde o ρ é a densidade do ar, A é a área frontal, e v a velocidade. O C_d é uma constante chamada coeficiente de arrasto. O C_d do coeficiente de arrasto pode ser reduzido por um bom projeto de veículo. Um valor típico para um automóvel é 0,3, mas alguns projetos de veículo elétricos conseguiram os valores tão baixos quanto 0,19. Alguns veículos, tais como motocicletas e ônibus, terão inevitavelmente valores de C_d muito maiores. No ônibus elétrico híbrido deste trabalho o C_d é igual a 0,6.

A densidade do ar naturalmente varia com temperatura, altura e umidade. Entretanto um valor de $1,225 \text{ kg/m}^3$ é um valor razoável a usar-se na maioria dos casos. Sendo usadas unidades do SI (m^2 para A , m/s para v) então o valor do F_{aa} é dado em newton.

6.1.3 Força de Inclinação

A força necessária para tracionar o veículo em uma pista com inclinação é a encontrada de modo direto. É simplesmente a componente de peso do veículo que age ao longo da inclinação. Pela definição simples das forças verifica-se que:

$$F_i = mg \sin \alpha \quad (6-3)$$

6.1.4 Força de Aceleração

Se a velocidade do veículo estiver mudando, uma força deverá ser aplicada além às forças mostradas na Figura 6-1. Esta é a força requerida para a aceleração linear do veículo e é dada pela equação derivada da segunda lei de Newton:

$$F_{ac} = ma \quad (6-4)$$

6.1.5 Força Resultante de Tração

É o somatório das forças de tração descritas nos itens 6.1.1 a 6.1.5 e tem a seguinte fórmula:

$$F_t = F_{at} + F_{aa} + F_i + F_{ac} \quad (6-5)$$

O modelo de força de tração simulado no MATLAB/SIMULINK é mostrado na Figura 6-2.

6.2 Modelo da Pilha a Combustível

A pilha a combustível que será utilizada no ônibus elétrico híbrido deste trabalho é constituída de dois módulos com tensão nominal de 650 V e corrente nominal de 38 A, totalizando 50 kW e possui uma curva de polarização V x I fornecida pelo fabricante (Novocell), mostrada na Figura 6-3, que mostra o comportamento da sua tensão conforme a variação da corrente de carga. Esta pilha possui as seguintes especificações:

- Faixa de tensão: 624 a 676 V, com tensão nominal de 650 V;
- Faixa de corrente de carga (por módulo): 30 a 41 A, com corrente nominal de 38 A;
- Número de ciclos de funcionamento (liga-desliga): 1000 ciclos.

Para otimizar a vida útil da pilha a combustível deste trabalho, esta somente será ligada uma vez durante o serviço diário, não podendo também ser chaveada, pois é outra situação que reduz sua vida útil. Foi escolhida esta faixa de tensão para a pilha a combustível, pois está contida na faixa de tensões do banco de baterias e quando entrar em operação fará com que a carga das baterias seja mantida em um determinado valor, sendo considerada uma determinada condição de operação.

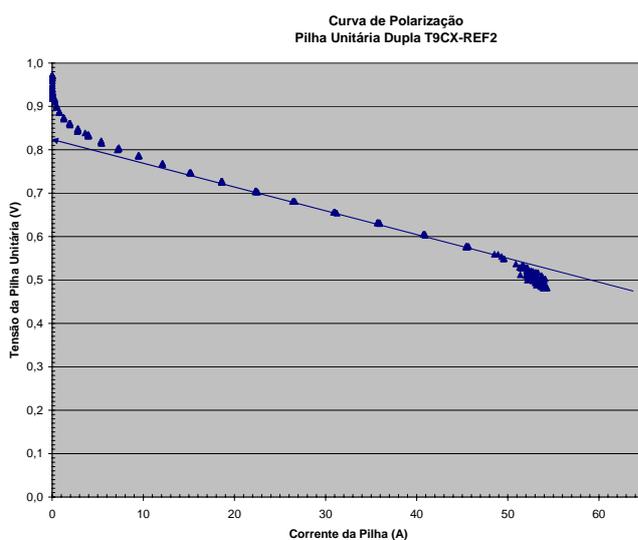


Figura 6-3 - Curva de polarização da pilha a combustível

A curva de polarização apresentada é para uma pilha unitária, sendo o módulo da pilha a combustível composto por 13 conjuntos de 80 pilhas unitárias, portanto para a tensão total dos módulos de pilhas a combustível deve-se multiplicar o valor da tensão da curva por 1040, que é o número total de pilhas unitária ligadas em série para se chegar à tensão nominal de 650 V.

Para a simulação no MATLAB, será usado um modelo simplificado de circuito para a pilha a combustível com uma fonte ideal de tensão contínua em série com a resistência interna, que representa a reta aproximada do trecho linear da curva de polarização, pois não foram fornecidos pelo fabricante mais dados que pudessem gerar um modelo mais completo e para o objetivo deste trabalho o modelo utilizado dá uma boa aproximação da situação real. A tensão interna da fonte ideal e a resistência interna são calculadas a partir dos dados da curva de polarização e têm os seguintes valores:

$$E_{PaC} = V_{PaC} + R_{iPaC} I_{PaC} \quad (6-6)$$

$$\begin{cases} 676 = E - 30R \\ 650 = E - 38R \end{cases}$$

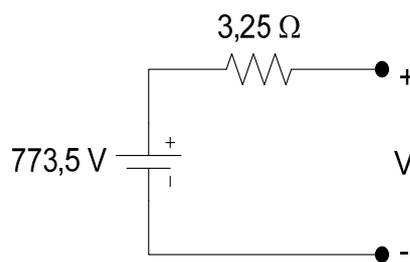


Figura 6-4 – Circuito Equivalente da Pilha a Combustível

6.3 Modelo das baterias

O banco de baterias será constituído de 188 baterias de íon-lítio da Everspring [20], modelo TS-LFP160AHA, que possui as seguintes especificações técnicas:

Modelo	TS-LFP160AHA
Tensão de operação	2 a 4,2 V
Tensão nominal	3,2 V
Capacidade nominal	160 Ah @ 48 A
Máxima corrente de descarga (contínua)	480 A
Máxima corrente de descarga (pulso)	800 A
Corrente de carga	48 A
Ciclo de vida (80%)	1000 cargas/descargas
Ciclo de vida (70%)	1500 cargas/descargas
Temperatura de operação (carga)	-18 a 75°C
Temperatura de operação (descarga)	-30 a 75°C
Dimensões	285x182x71 mm
Massa	5,6 kg
Densidade de energia	230 a 380 Wh/l
Potência específica	600 a 1000 W/kg
Autodescarga	3% por mês

Estas baterias apresentam a curva de descarga apresentada a seguir:

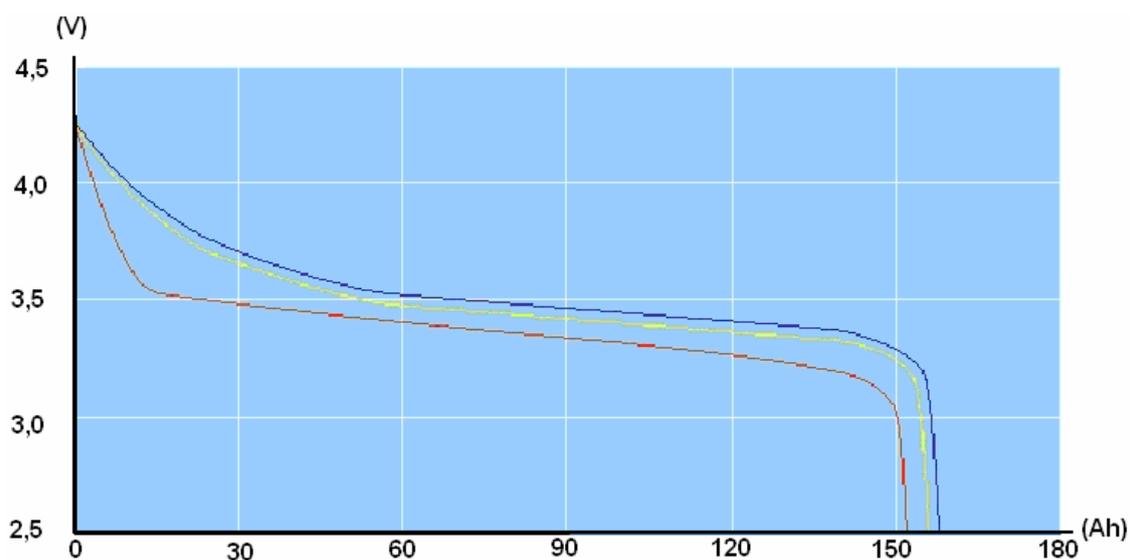


Figura 6-5 – Curva de descarga da bateria TS-LFP160AHA, da Everspring [20]

O modelo usado para o banco de baterias, considerando as 188 baterias de 3,2 V ligadas em série, é constituído de uma fonte de tensão controlada pelo estado de carga das baterias, podendo variar desde 375 V, quando as baterias estão completamente

descarregadas, até 790 V quando estão completamente carregadas, com uma resistência interna de 100 mΩ, como mostrado na Figura 18:

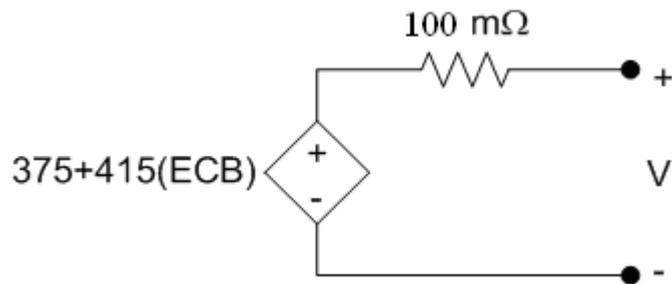


Figura 6-6 – Circuito Equivalente do Banco de Baterias

6.4 Simulação do Fluxo de Potência no Barramento CC

O motor de tração a ser utilizado no ônibus será um motor de indução acionado por um inversor, com controle de torque direto (DTC), que será fornecido pela WEG e todo o seu controle será definido por aquele fabricante. Para maior simplicidade, o motor será representado por uma fonte de corrente controlada, que terá seu valor de corrente calculado em função da potência requerida pelo ônibus ou regenerada, dividida pela tensão do barramento CC.

As cargas auxiliares, que também serão representadas por uma fonte de corrente, que terá a potência fixa de 21 kW, sendo a corrente determinada pela tensão do barramento.

A pilha a combustível será acionada quando o estado de carga das baterias chegar a 66%, o que corresponde a uma tensão de circuito aberto de 650 V, e será desligada quando esta tensão sair da faixa de 624 a 676 V.

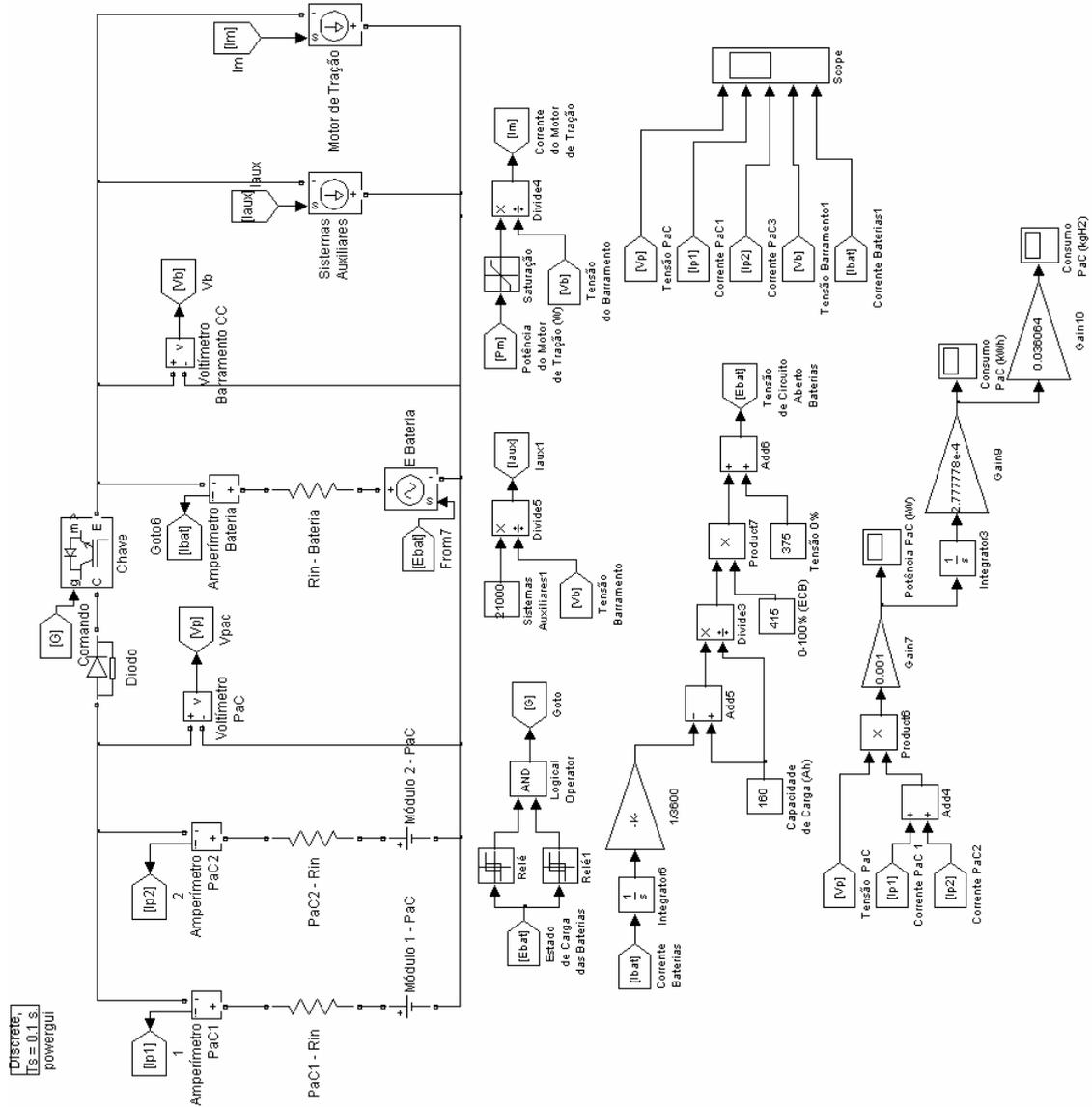


Figura 6-7 - Esquema elétrico do sistema de tração simulado no MATLAB/SIMULINK

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas para o modelo do ônibus elétrico híbrido, mostradas no capítulo anterior; em seguida será feita a análise e interpretação dos mesmos.

Para determinar as potências máximas que o motor de tração deverá entregar ao eixo, foi calculado para cada situação limite a potência solicitada pelo ônibus. Considerando os limites do ônibus, verifica-se que, em curtos períodos de tempo, que pode chegar até 10 s, a potência pode chegar a 400 kW.

Tabela 7-1 - Solicitações Críticas de Potência

Massa (kg)	Aceleração (m/s ²)	Inclinação (sen α)	Velocidade (km/h)	Força resultante (kN)	Potência (kW)
22000	0.3	0.12	25	35.51	246.61
22000	0	0.05	60	14.07	234.53
22000	0.5	0	60	14.84	247.36
22000	0	0.12	30	28.64	238.63
20000	1	0	60	24.06	400.94

7.2 Ciclo FUDS

O modelo do ônibus montado no SIMULINK foi simulado para um tempo de 28000s, o que corresponde a 7h46min, para verificar o comportamento do ônibus em uma jornada diária de 8h. A curva de velocidade de um ciclo de rodagem padronizado, o *Federal Urban Drive. Cycle* (FUDS), é mostrado na figura 7-1, para esta simulação ele foi repetido até o tempo de 28000s.

Entrando com esta curva na simulação do modelo do ônibus, a potência no eixo do ônibus apresentou a curva que é mostrada na Figura 7-2.

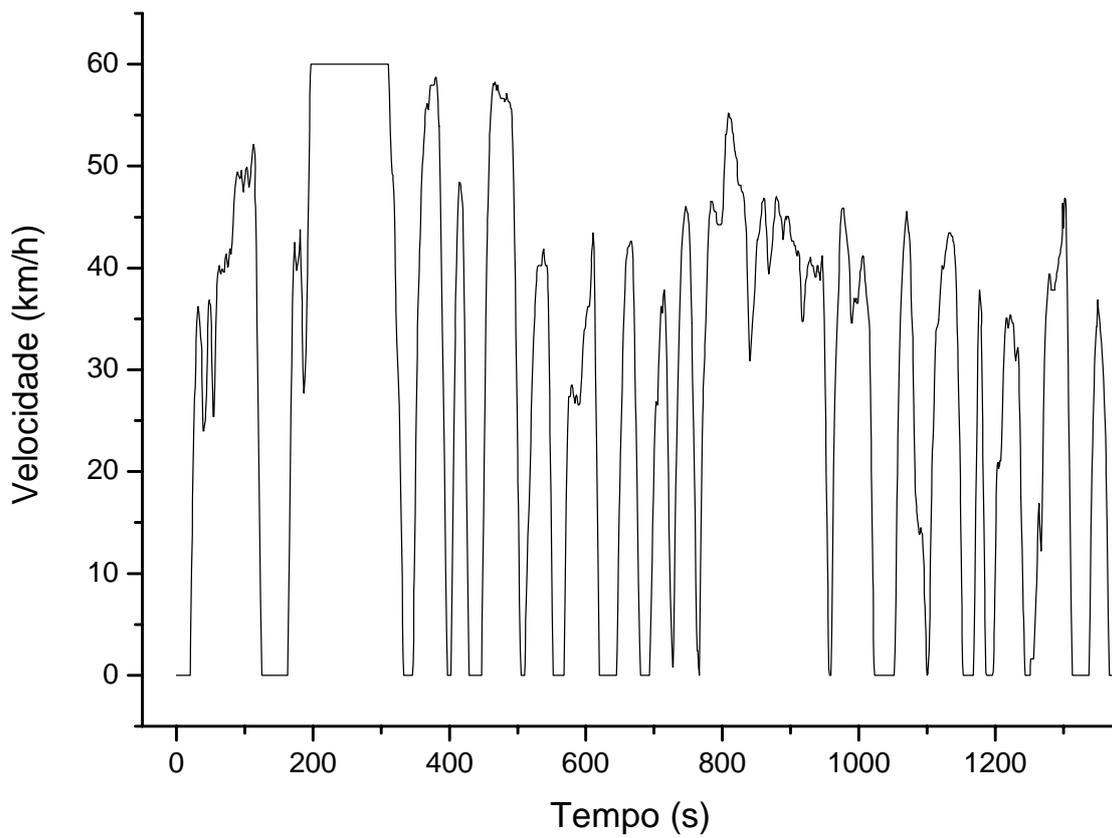


Figura 7-1 - Ciclo de Rodagem FUDS

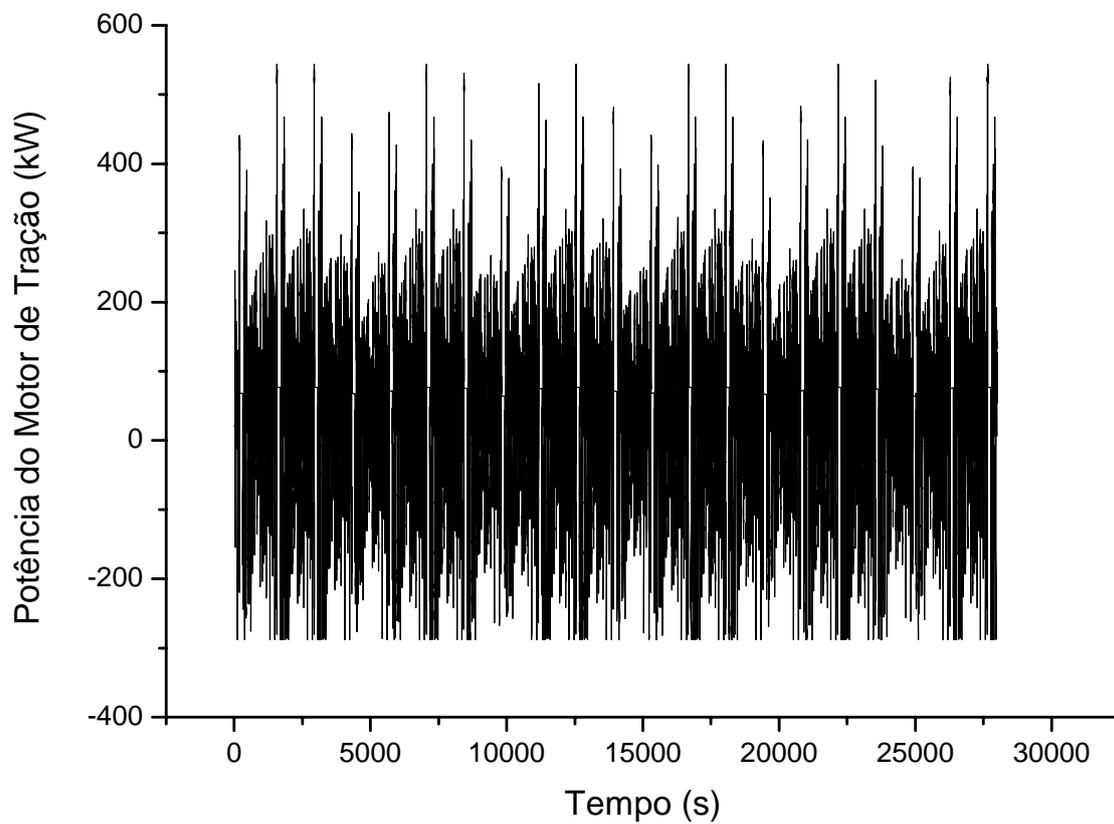


Figura 7-2 - Potência do Motor de Tração para o ciclo FUDS

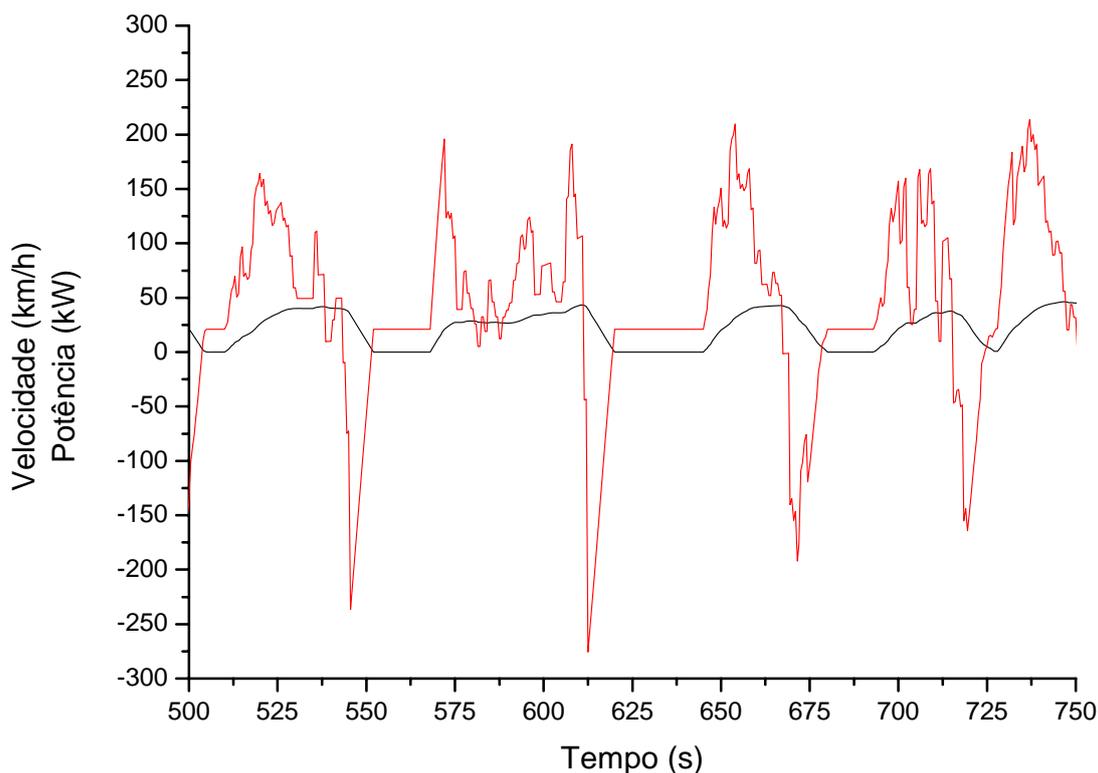


Figura 7-3 - Curvas de Potência e Velocidade do Ônibus no Ciclo FUDS

Observa-se na Figura 7-2 que, no ciclo de rodagem FUDS, a potência do motor de tração apresenta valores positivos e negativos, sendo os positivos a potência quando o mesmo está operando como motor e os negativos, como gerador e que as potências envolvidas para este ciclo são bem altas, acima de 500 kW, no entanto duram 10 s, no máximo.

A Figura 7-3 mostra como varia a potência do motor conforme a movimentação do veículo, pode-se observar que os picos de potência ocorrem quando a velocidade está aumentando, ou seja, na aceleração do ônibus e é proporcional à velocidade, pois a potência é o produto da força pela velocidade; também observa-se que a potência de regeneração (negativa) ocorre quando a velocidade diminui, ou seja, na frenagem e também é proporcional à velocidade.

A energia total (líquida) consumida pelo ônibus no serviço diário é mostrada na figura 7-4:

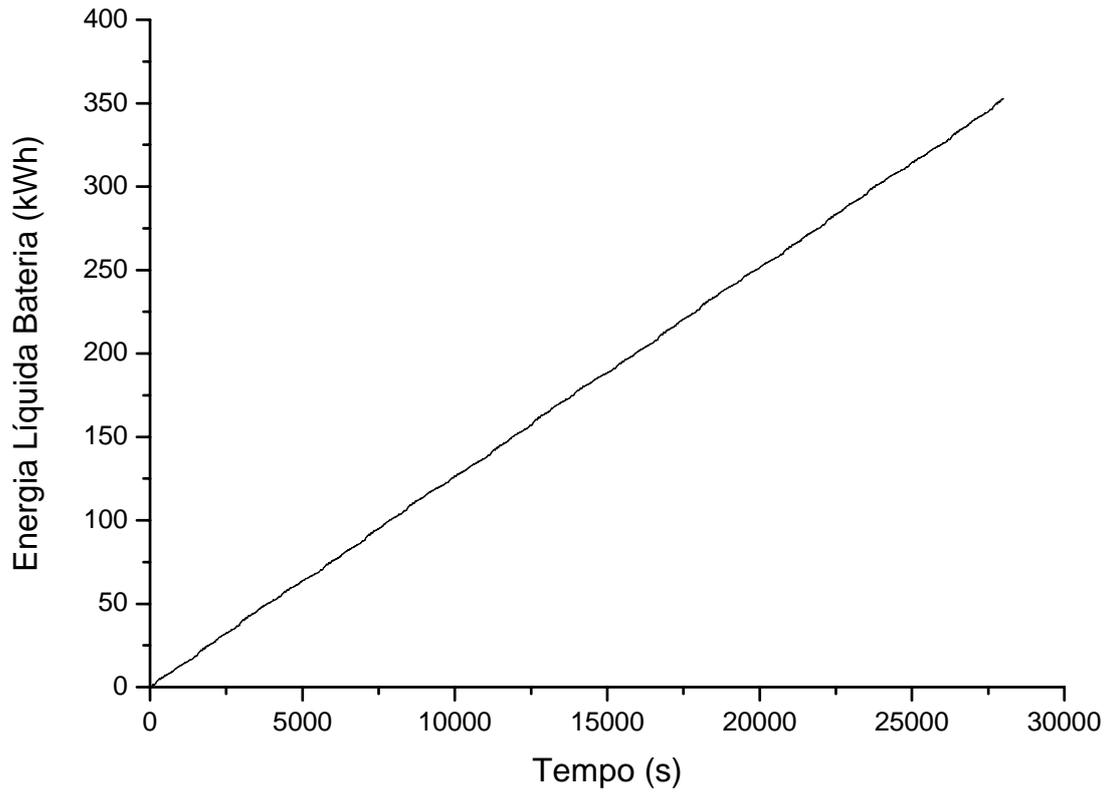


Figura 7-4 - Energia Consumida pelo Ônibus, no ciclo FUDS

E a energia regenerada é mostrada na próxima Figura 7-5.

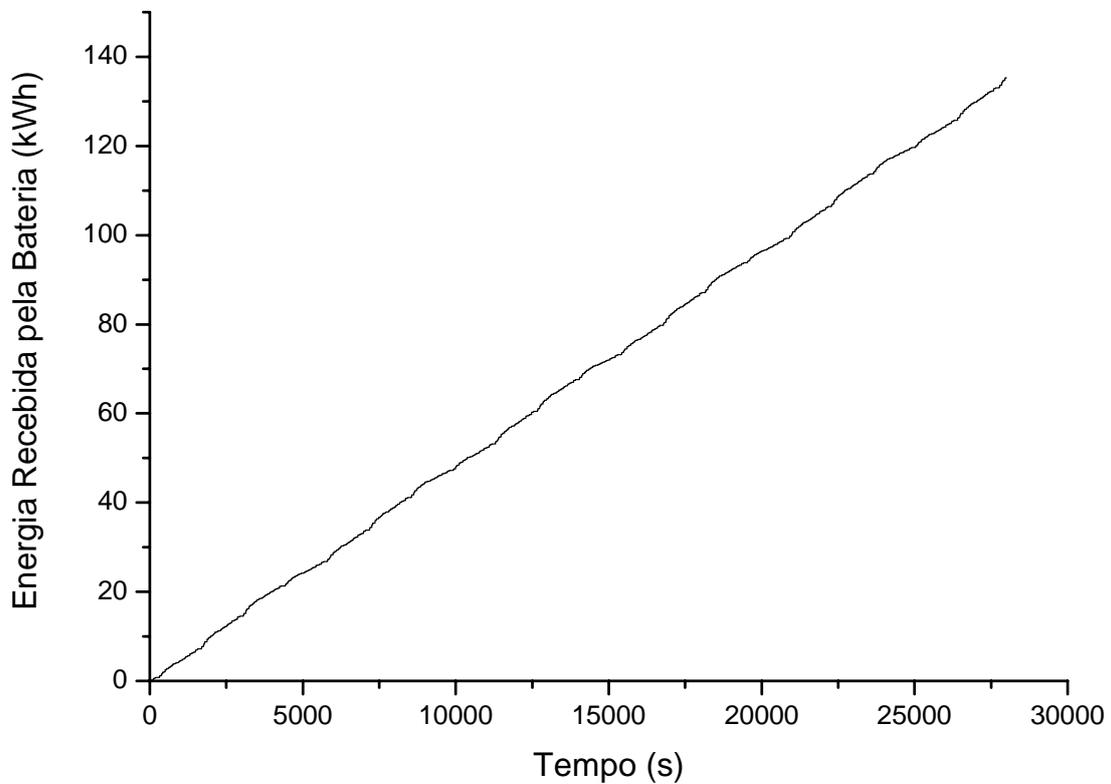


Figura 7-5 - Energia Regenerada, no ciclo FUDS

Verifica-se que nos 28000s, foi consumida uma energia líquida de 352,7 kWh, com regeneração de 135,3 kWh, neste caso houve regeneração de 27,7% da energia consumida.

A distância percorrida pelo ônibus, durante este período é mostrado na Figura 7-6, durante os 28000 s da simulação, a distância total percorrida pelo ônibus foi de 230 km.

A Figura 7-7 mostra o consumo de hidrogênio em kg, que é de vital importância para o projeto, pois determina a autonomia do veículo, tendo sido o consumo de hidrogênio, para o ciclo FUDS, de 12,2 kg.

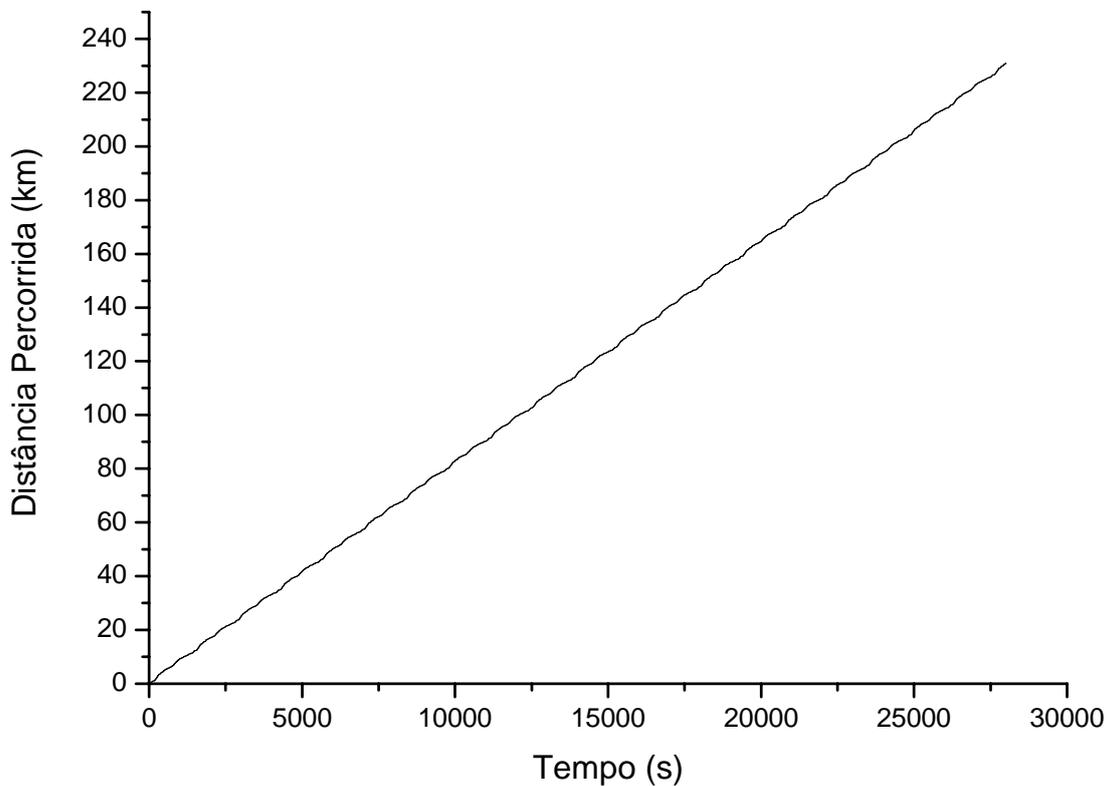


Figura 7-6 - Deslocamento do Ônibus nos 28000 s

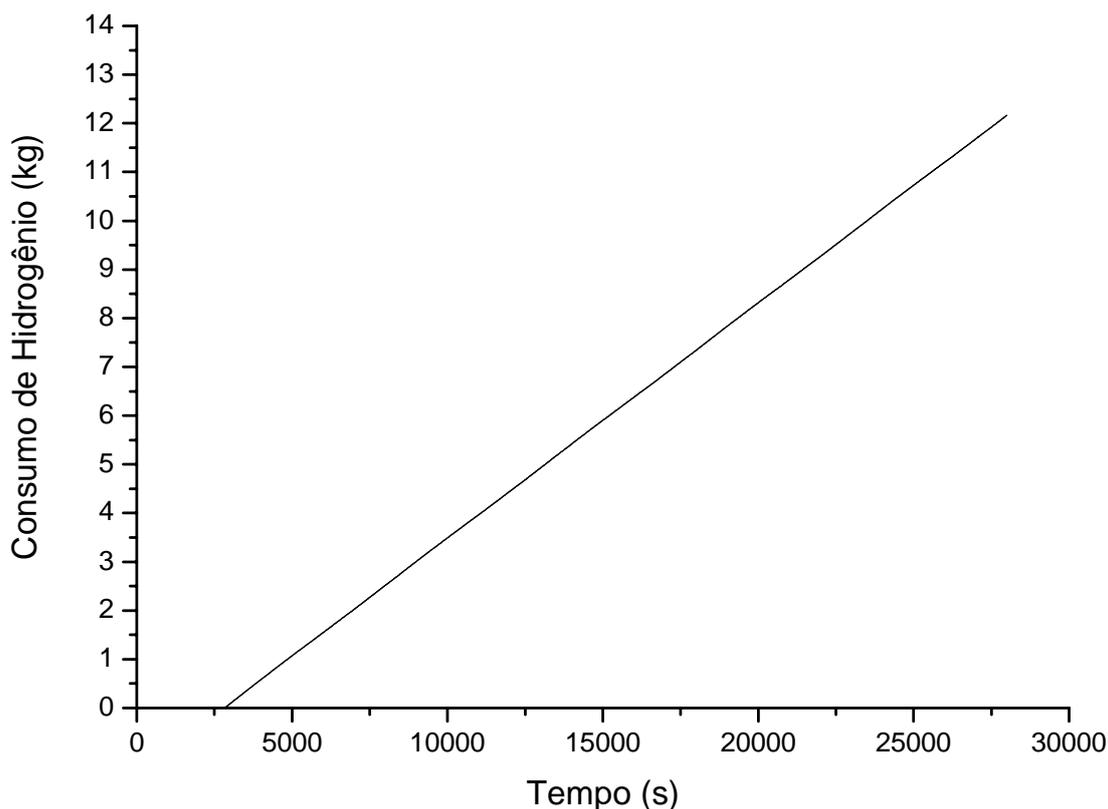


Figura 7-7 - Consumo de Hidrogênio em kg

Com estes resultados, verifica-se que, sendo a energia líquida diária consumida de 352,7 kWh e o tempo de 28000s, a potência média consumida no dia é de 45 kW. Para o consumo de hidrogênio será considerado o percurso de 100 km, como foi consumido 12,2 kg de H₂ em 230 km rodados, a taxa de consumo foi de 5,2 kg/100km.

São apresentadas nas figuras 7-8 a 7-12, as curvas de tensão e corrente nas PaCs e Baterias. Verifica-se que as baterias começam a operar com tensão de 790 V, sendo descarregadas conforme o consumo de energia pelo ônibus até que, quando seu estado de carga é tal que a tensão de circuito aberto chega a 650 V, as pilhas a combustível são acionadas e mantêm a tensão nesse patamar, que corresponde a uma carga de 66 % das baterias, ficando as PaCs em operação até o fim do serviço diário, otimizando sua vida útil. Verifica-se também que a corrente elétrica fornecida pelas PaCs fica normalmente em torno de 40 A, para cada módulo, o que está dentro de sua faixa de operação.

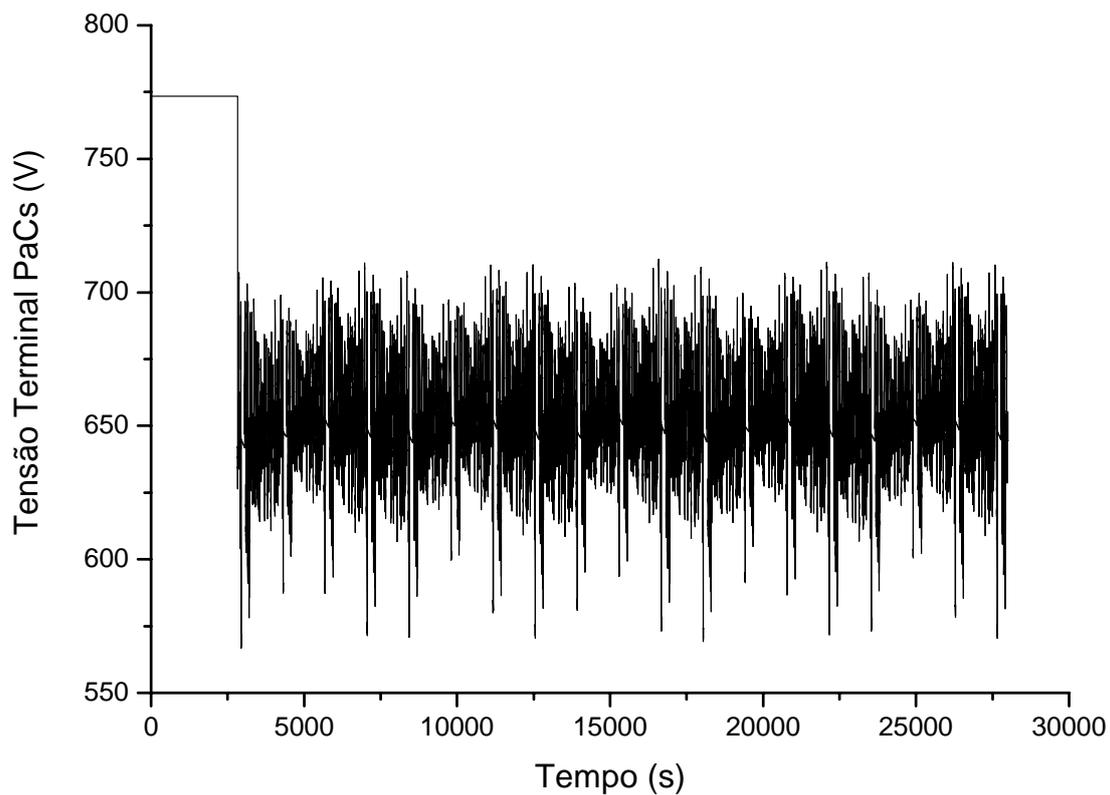


Figura 7-8 - Tensão nos Terminais da Pilha a Combustível

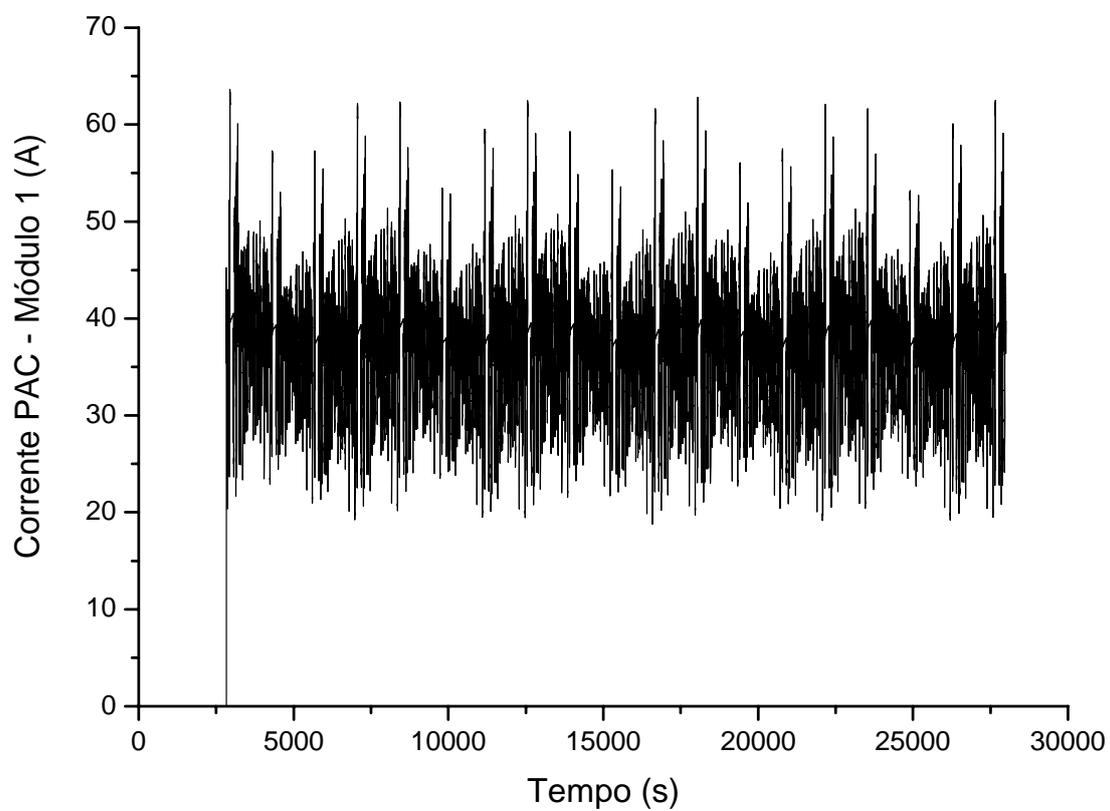


Figura 7-9 - Corrente no Módulo 1 da Pilha a Combustível

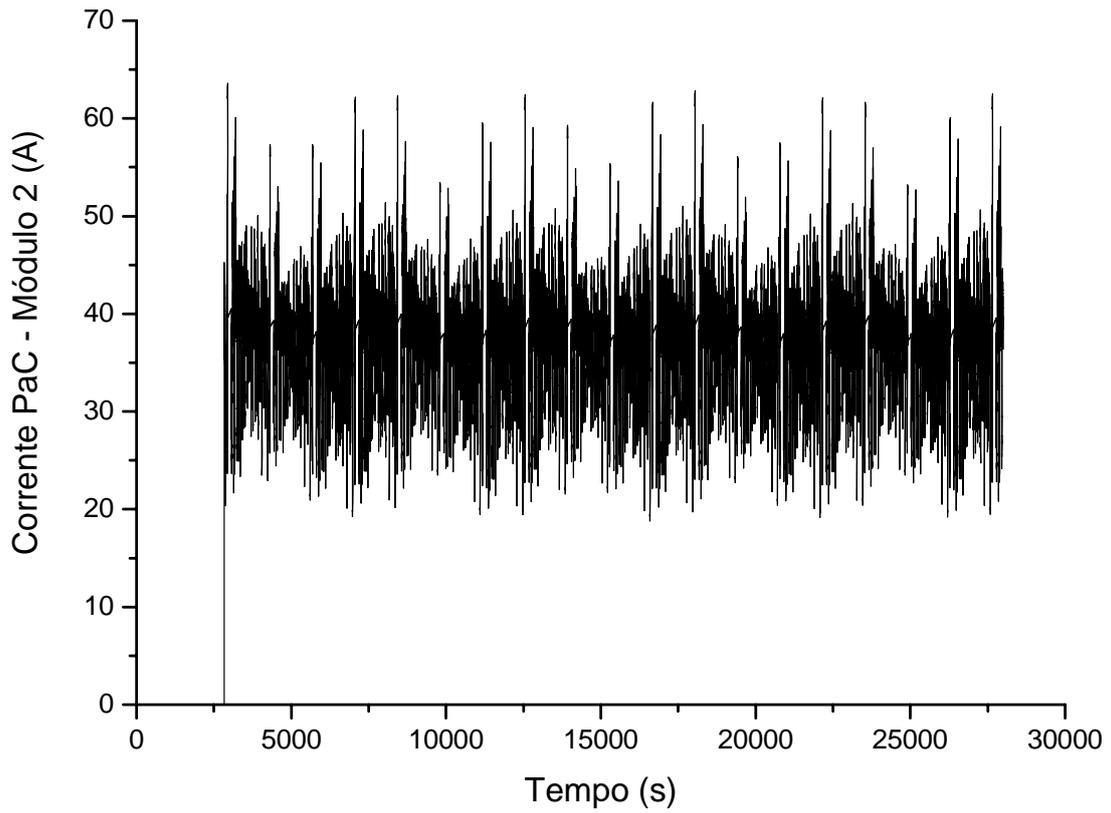


Figura 7-10 - Corrente no Módulo 2 da Pilha a Combustível

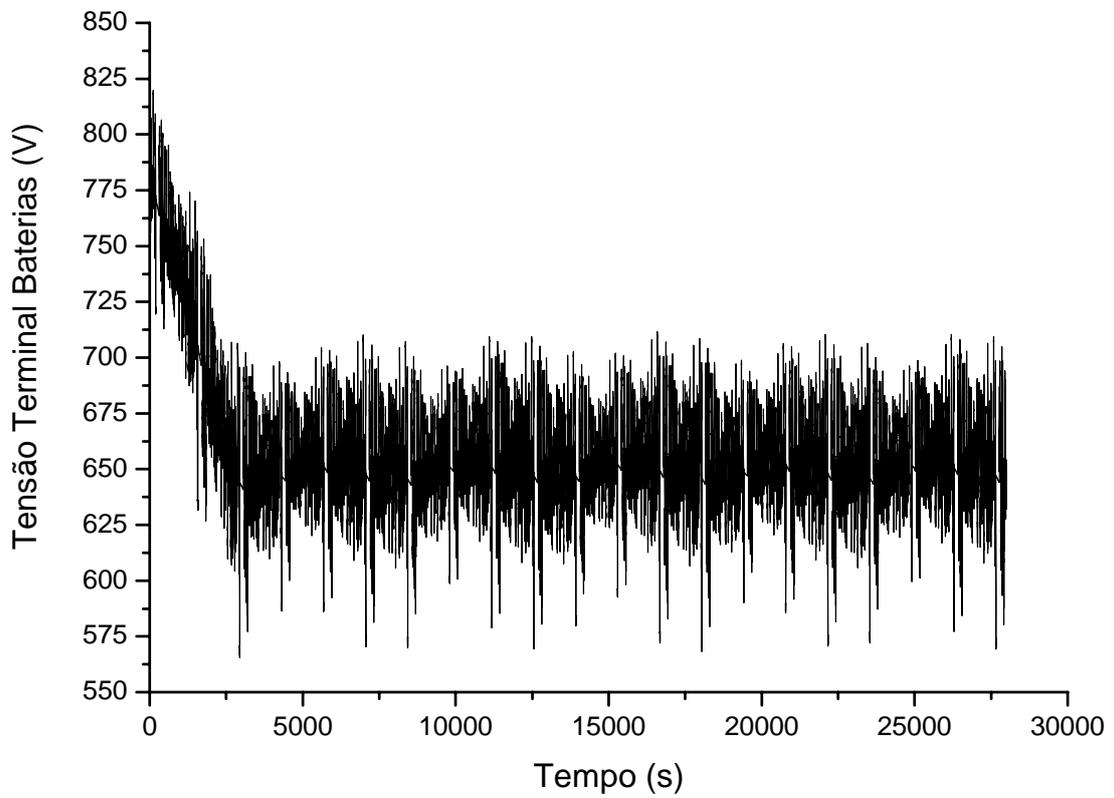


Figura 7-11 - Tensão nos Terminais do Banco de Baterias

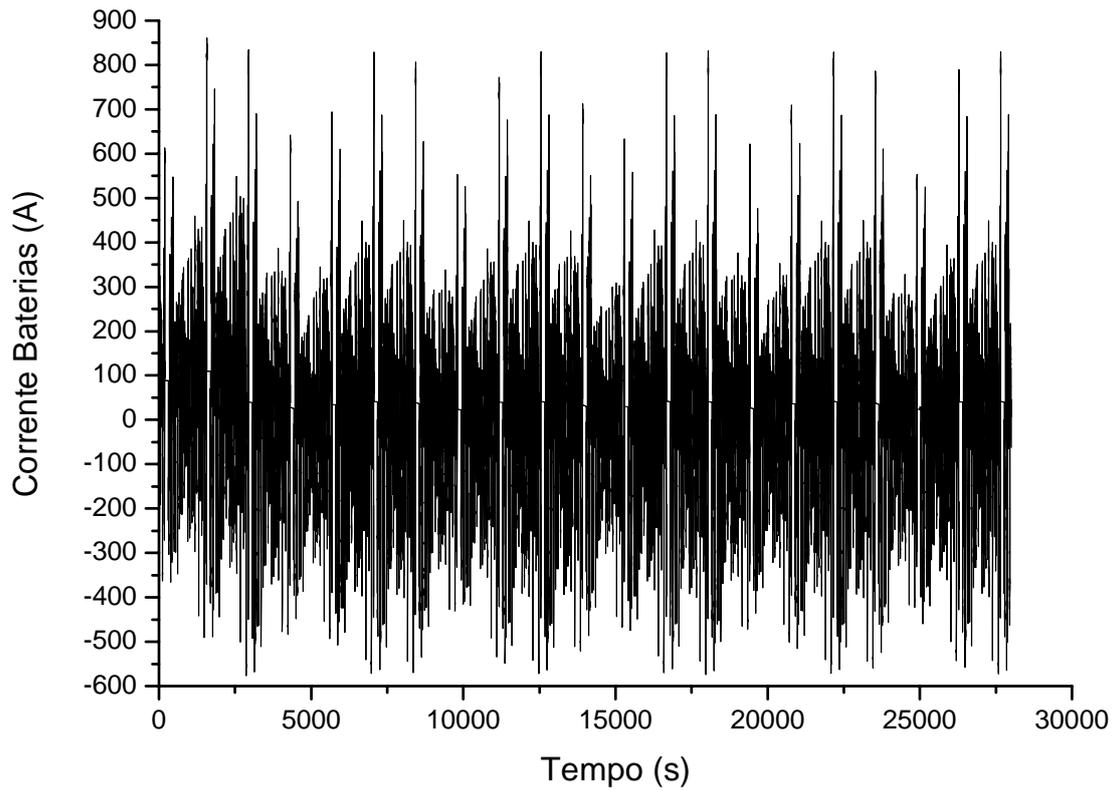


Figura 7-12 - Corrente no Banco de Baterias

A seguir é mostrado, na Figura 7-13 o gráfico da potência nas PaCs, sendo observado que a potência média é de 50 kW, coincidindo com a potência nominal dos módulos.

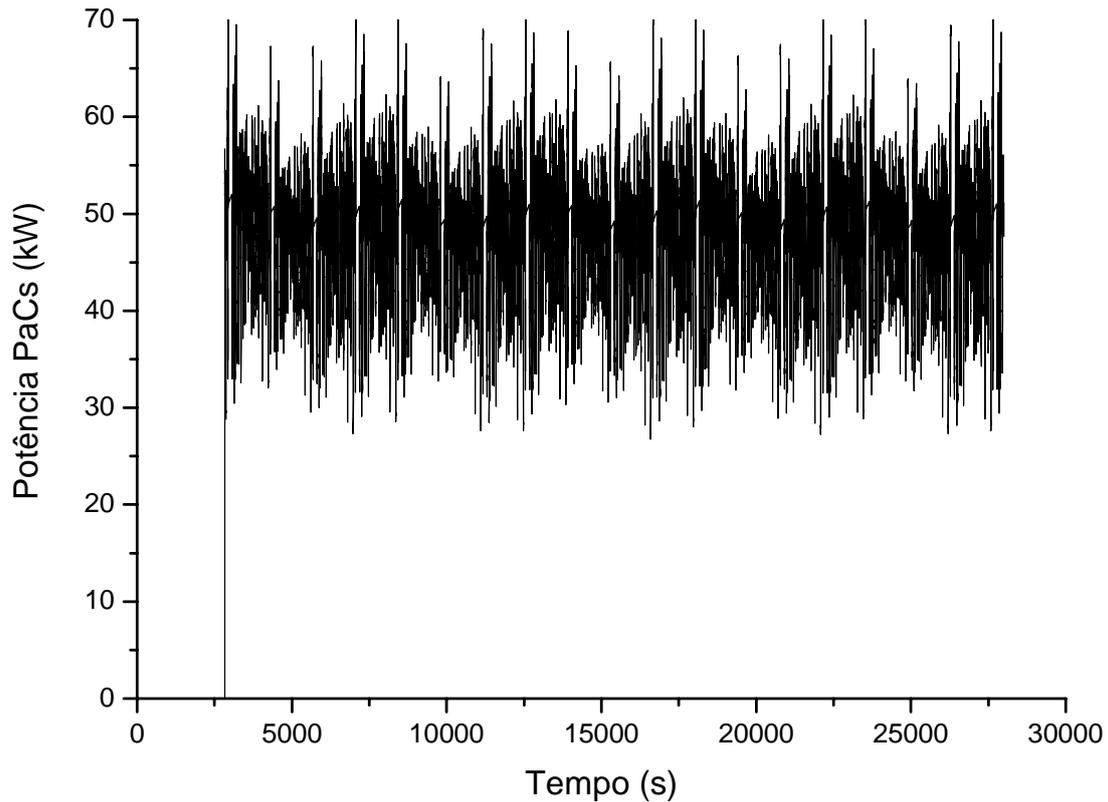


Figura 7-13 - Potência da Pilha a Combustível no ciclo FUDS

7.3 Trajeto Niterói - Rio de Janeiro

Foi realizado um levantamento com o GPS, de curvas de deslocamento de um ônibus da linha 998 Niterói-Galeão e o trecho da viagem corresponde à ponte Rio-Niterói. Esta simulação apresenta dados de velocidade resultante, aceleração, ângulo de curvatura e inclinação da pista.

Nas Figuras 7-14 a 7-17 são apresentados gráficos contendo estes resultados, estando a velocidade em km/h, a aceleração em m/s^2 , a curvatura em $^\circ$ e a inclinação em valores percentuais, ou seja, $100\text{sen}\alpha$.

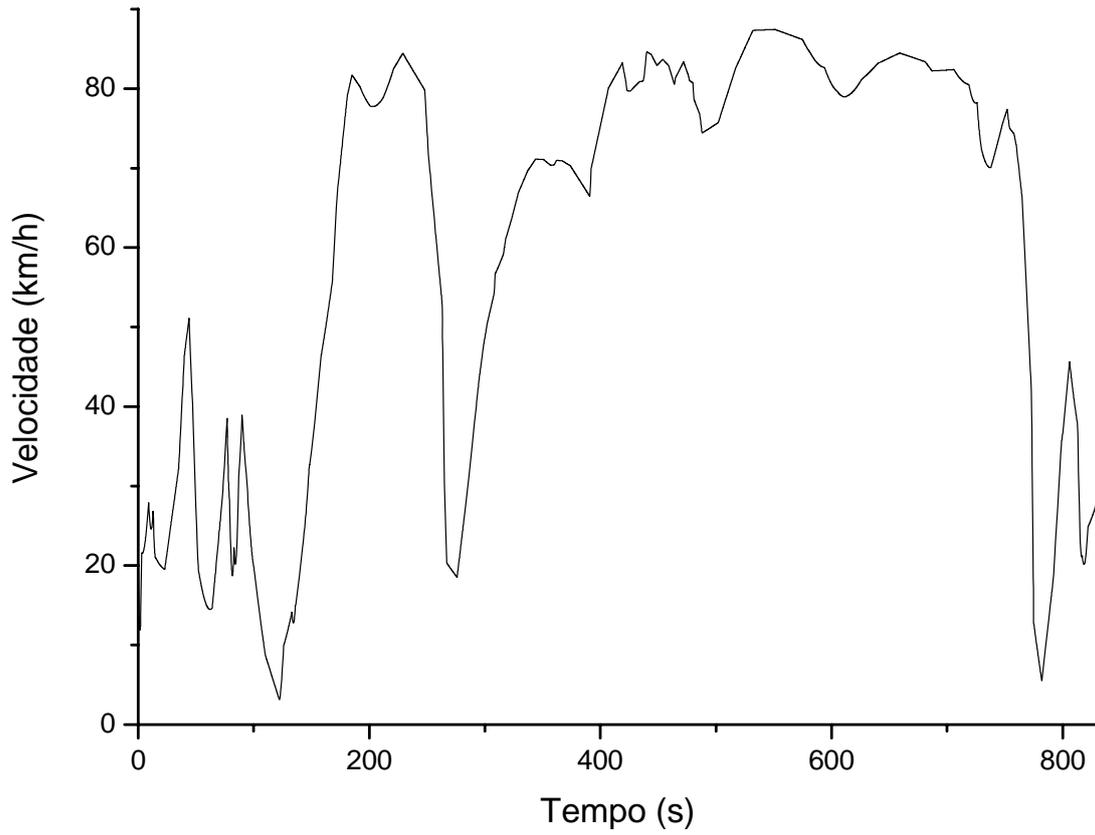


Figura 7-14 - Velocidade medida no trajeto Niterói-Rio

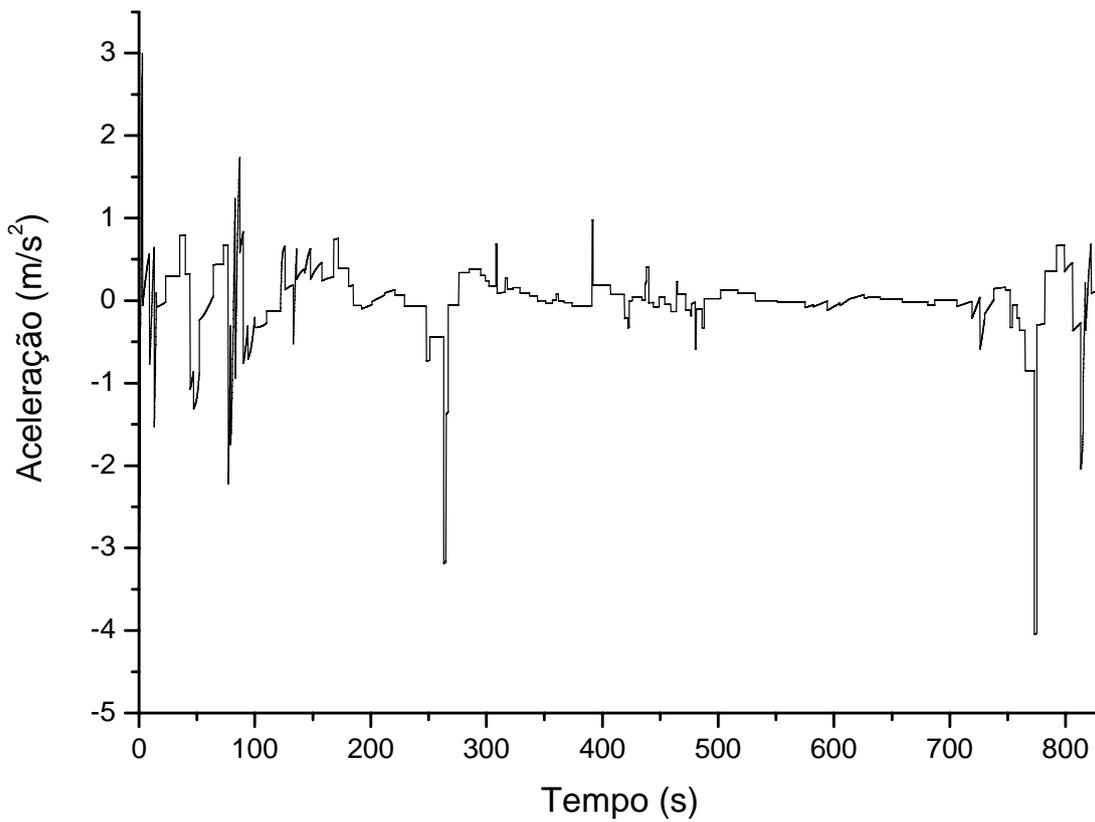


Figura 7-15 - Aceleração do ônibus no trajeto Niterói-Rio

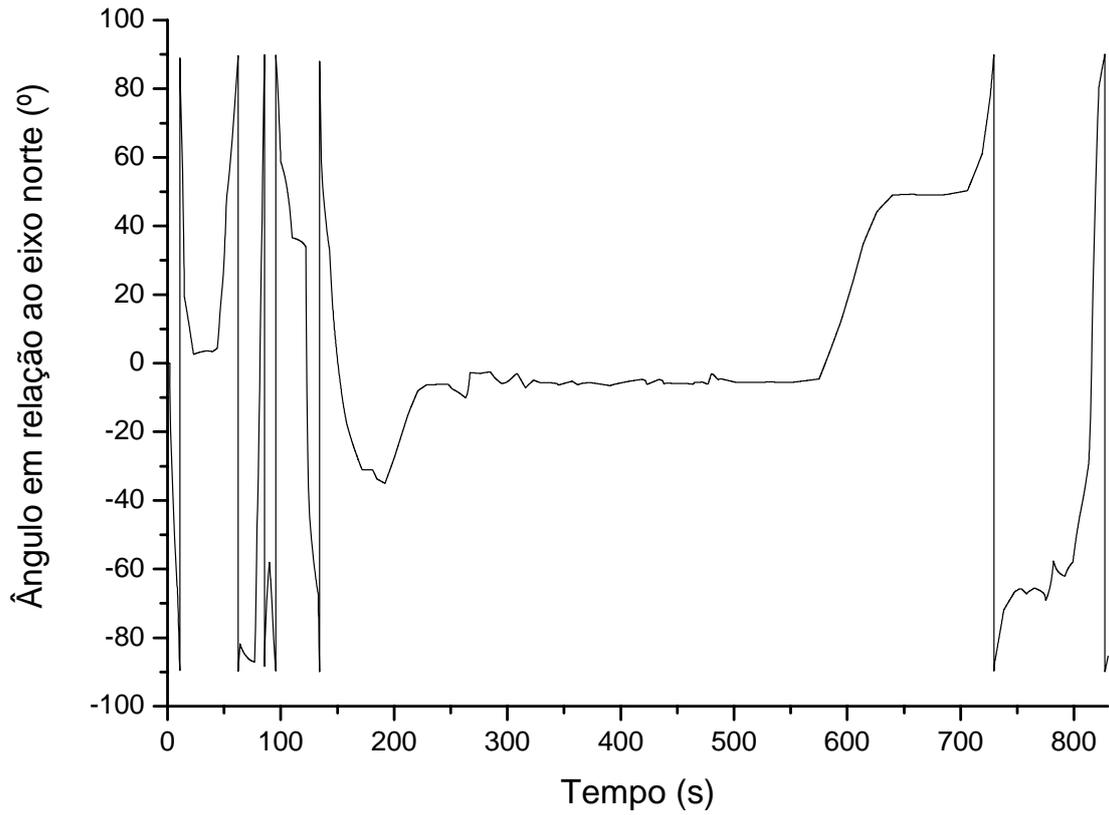


Figura 7-16 - Orientação do ônibus, em relação ao norte

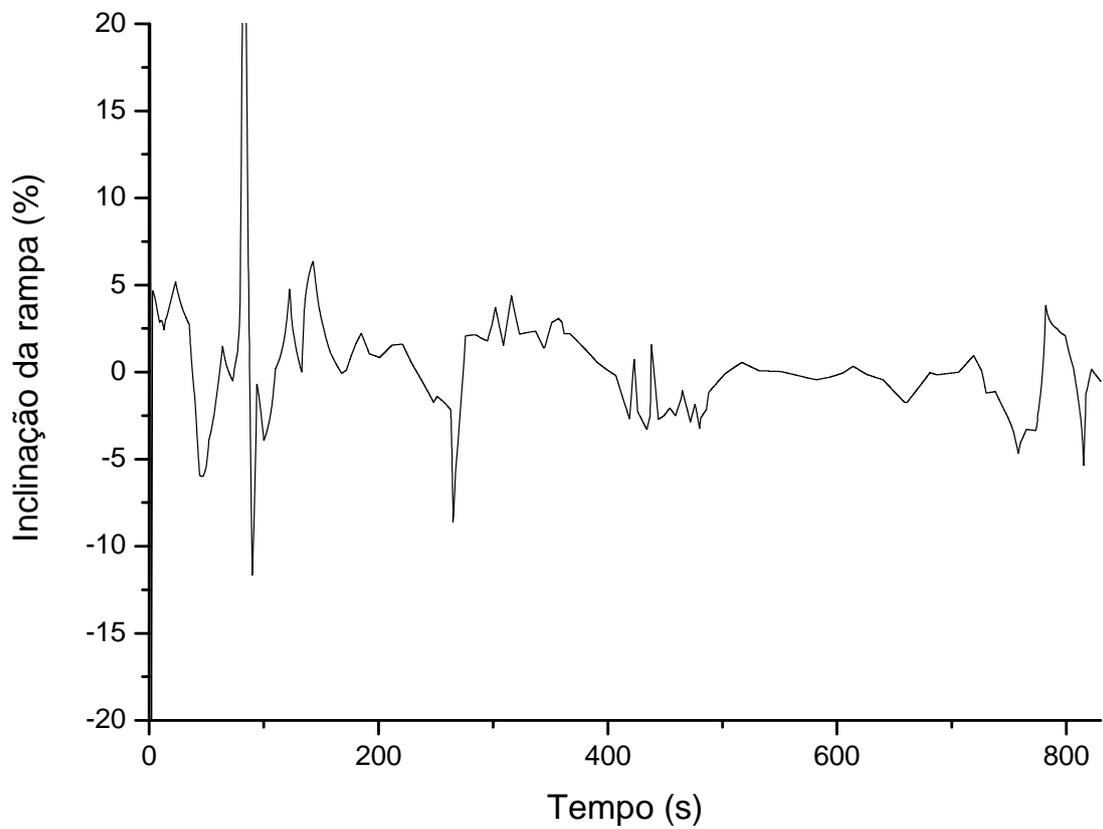


Figura 7-17 - Inclinação percentual, medida no trajeto Niterói-Rio

A potência desenvolvida pelo motor de tração, neste trajeto levantado, é mostrada na Figura 7-18.

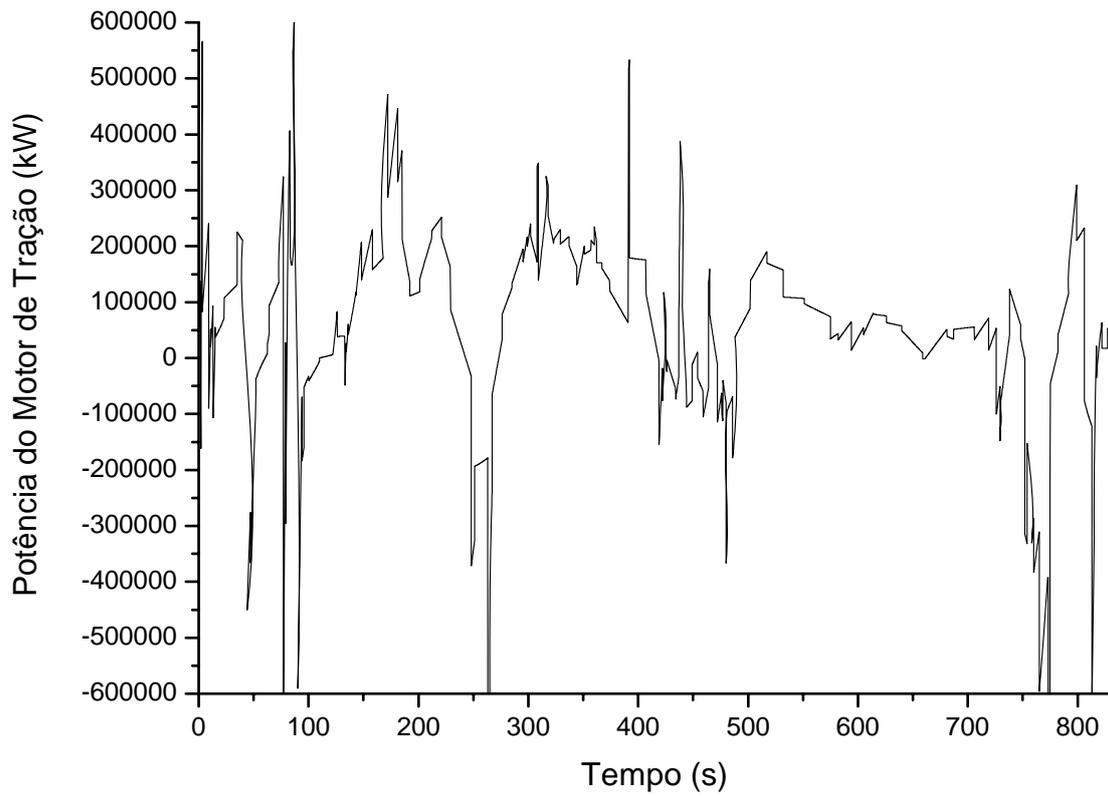


Figura 7-18 - Potência no trajeto Niterói-Rio

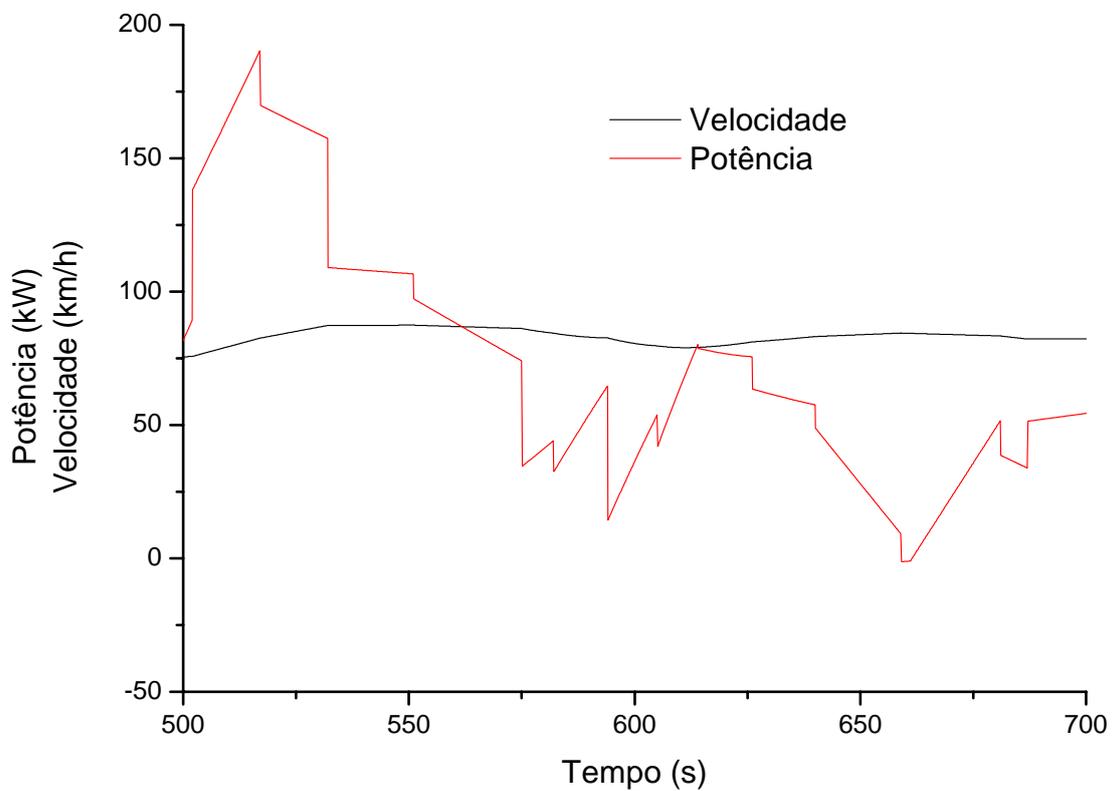


Figura 7-19 - Potência e Velocidade, em detalhe, no trajeto Niterói-Rio

Para avaliar o comportamento da potência em relação aos outros parâmetros, são mostradas na Figura 7-19 as curvas de potência e velocidade em detalhe, neste gráfico também é possível notar que os picos de potência ocorrem nos trechos em que o veículo acelera, mas também há a influência da inclinação da pista, quando observada a curva da figura 7-17 no trecho de 500 a 700 s.

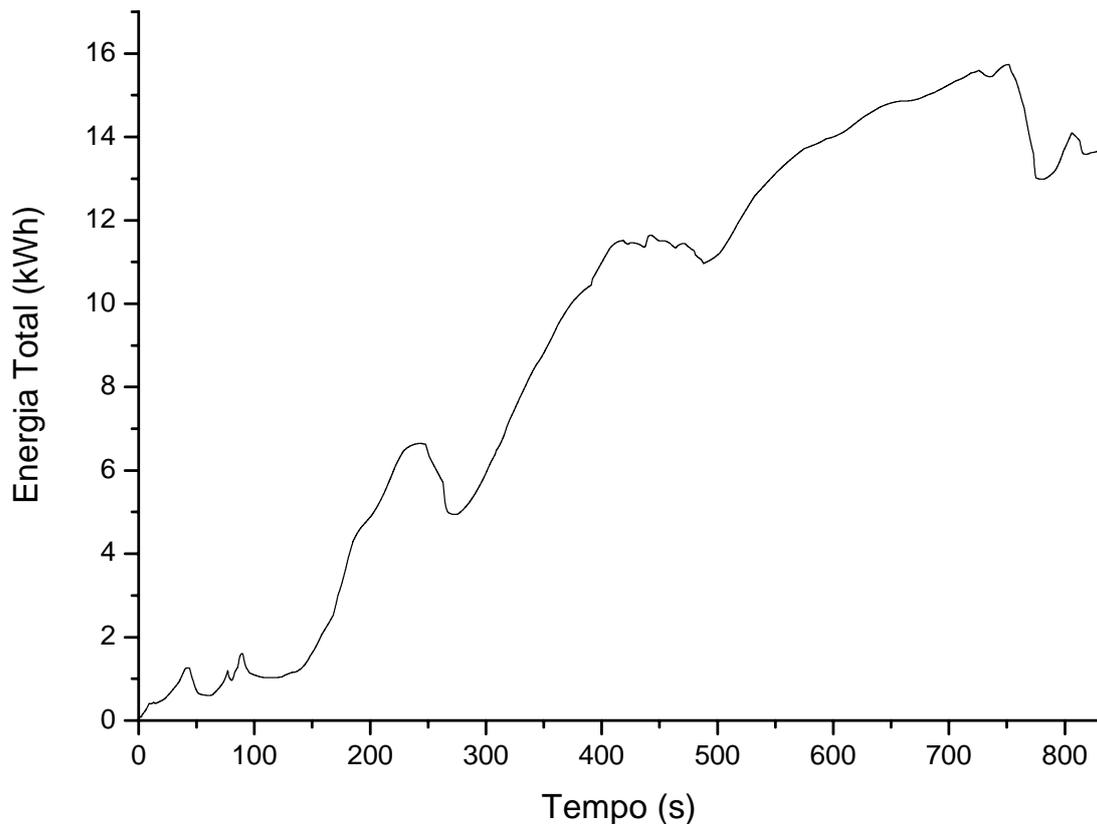


Figura 7-20 - Energia líquida

Na figura 7-20 é apresentada a energia consumida pelo motor, já considerando a regeneração.

Como o tempo de simulação foi baixo, não houve acionamento da pilha a combustível, pois a tensão nas baterias não caiu até o valor de acionamento das PaCs, os valores encontrados para tensão e corrente nas baterias são mostrados, respectivamente nas Figuras 7-21 e 7-22.

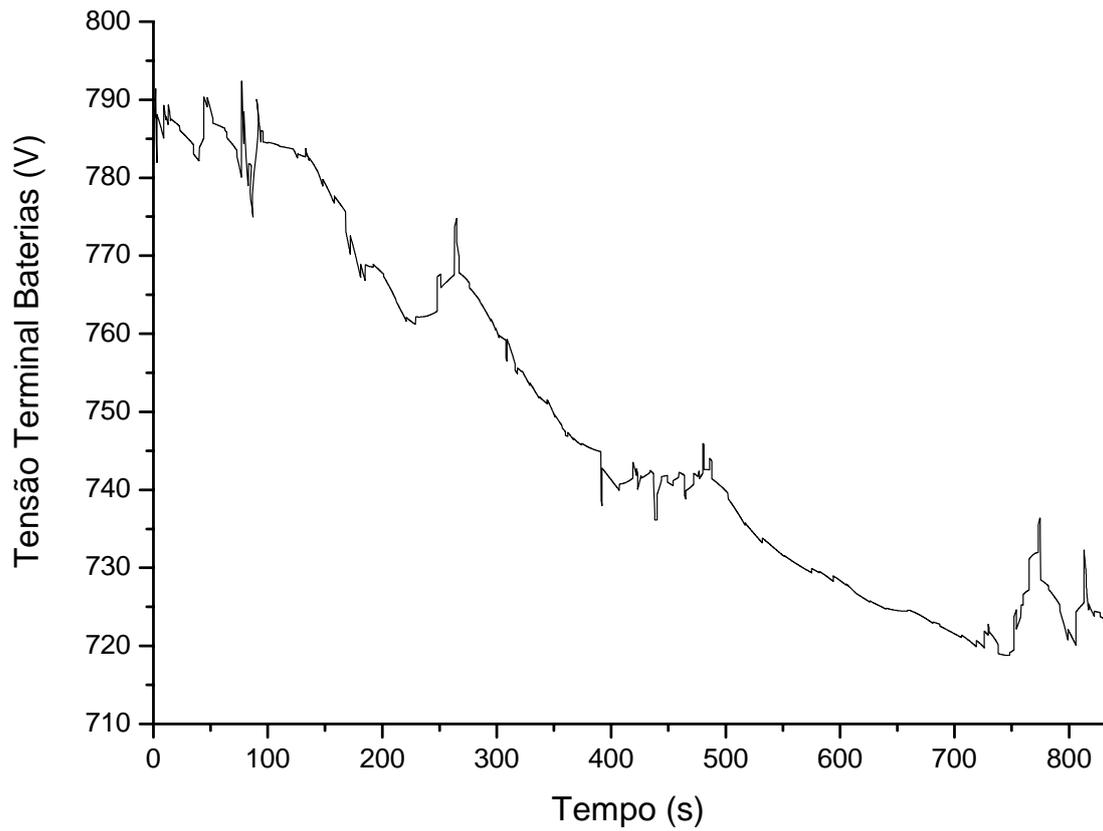


Figura 7-21 - Tensão terminal nas baterias

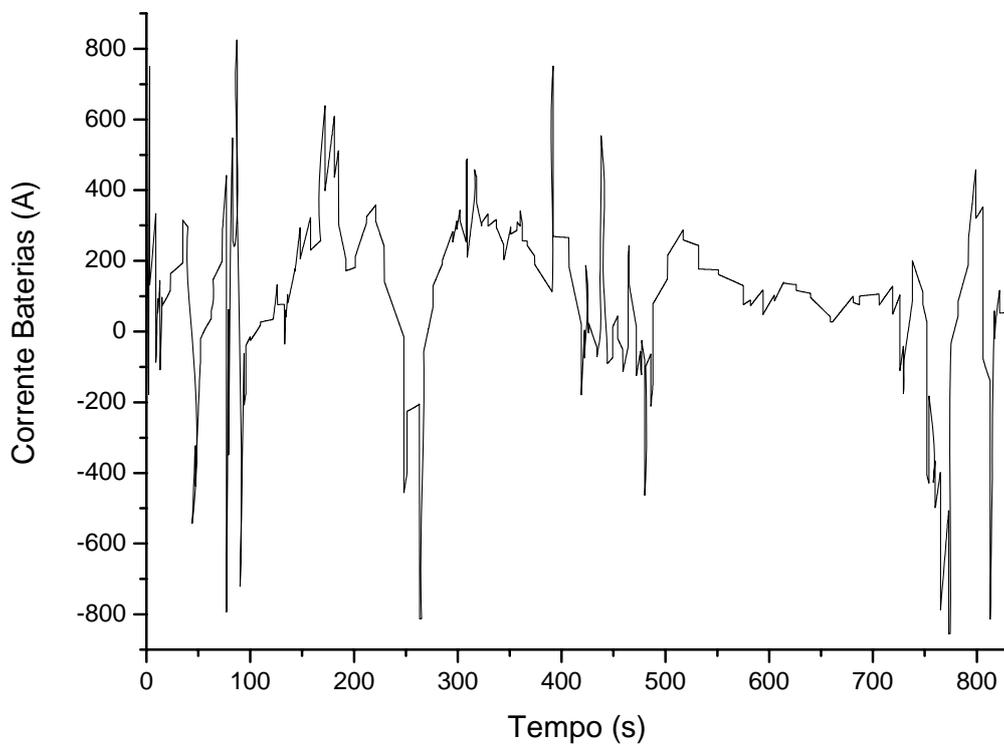


Figura 7-22 - Corrente nas baterias

7.4 Trajeto Galeão – Barra – Galeão

Um outro levantamento foi feito com o GPS, em um trajeto que vai do aeroporto do Galeão até a Barra da Tijuca, com retorno ao Galeão. Esta curva foi repetida até 28000 s para simular o funcionamento diário de um ônibus elétrico híbrido.

Nas Figuras 7-23 a 7-32, são mostrados os resultados das simulações realizadas para este percurso, que foi levantado em campo.

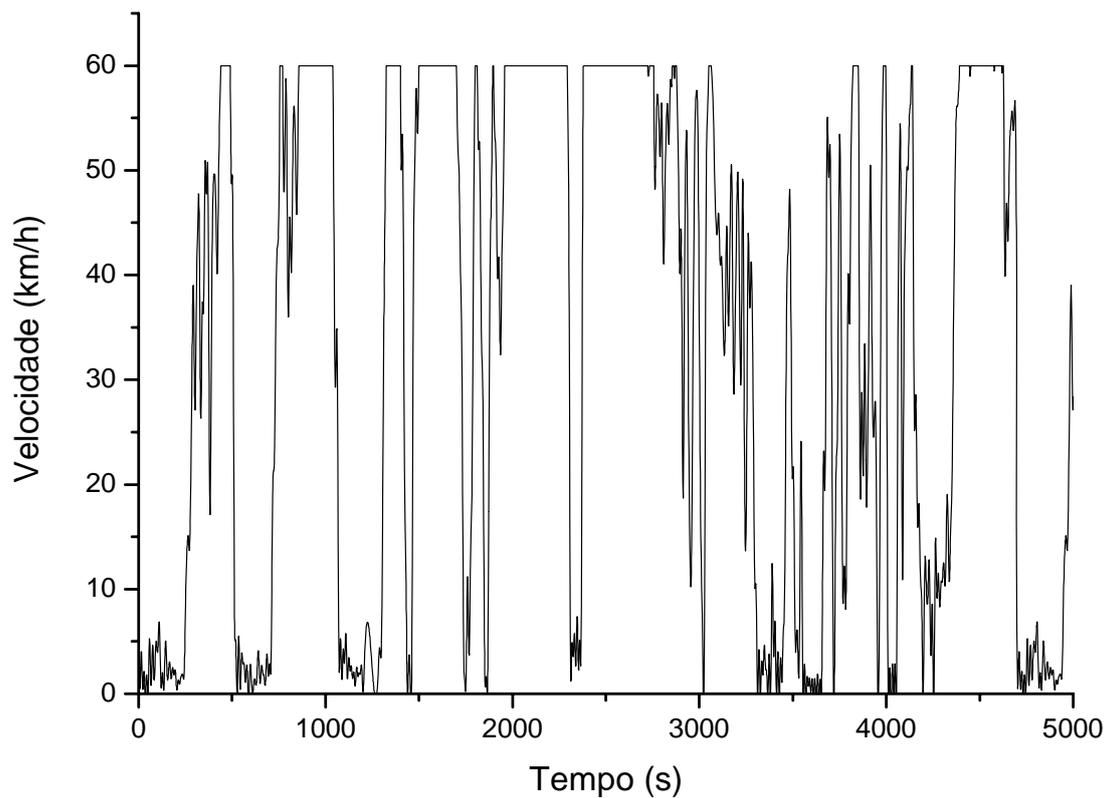


Figura 7-23 - Curva de Velocidade no trajeto Galeão-Barra-Galeão

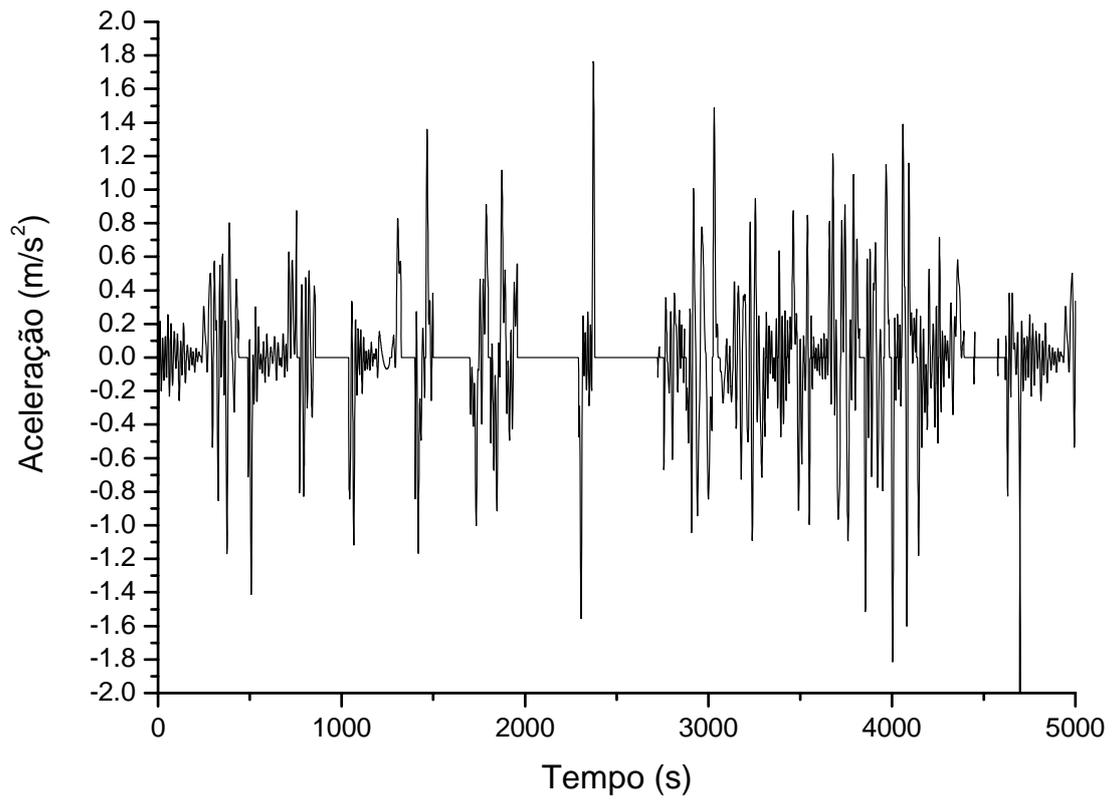


Figura 7-24 – Aceleração no trajeto Galeão-Barra

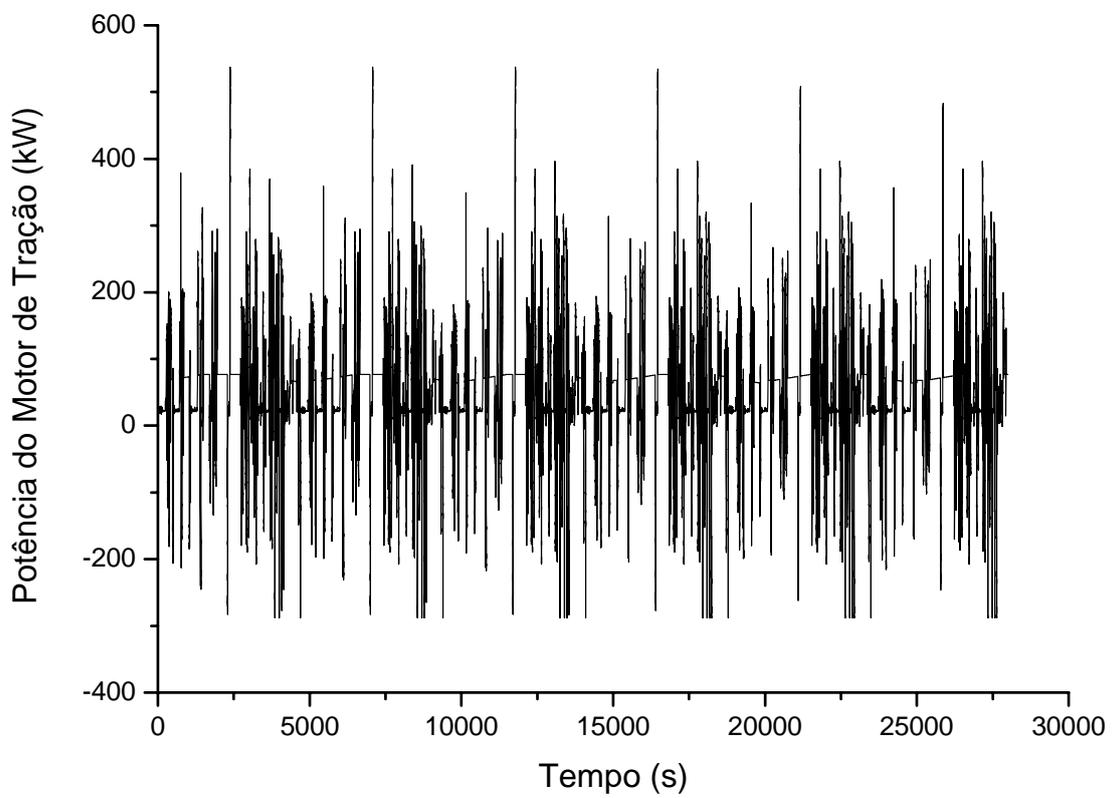


Figura 7-25 - Potência do Motor de Tração no trajeto Galeão-Barra

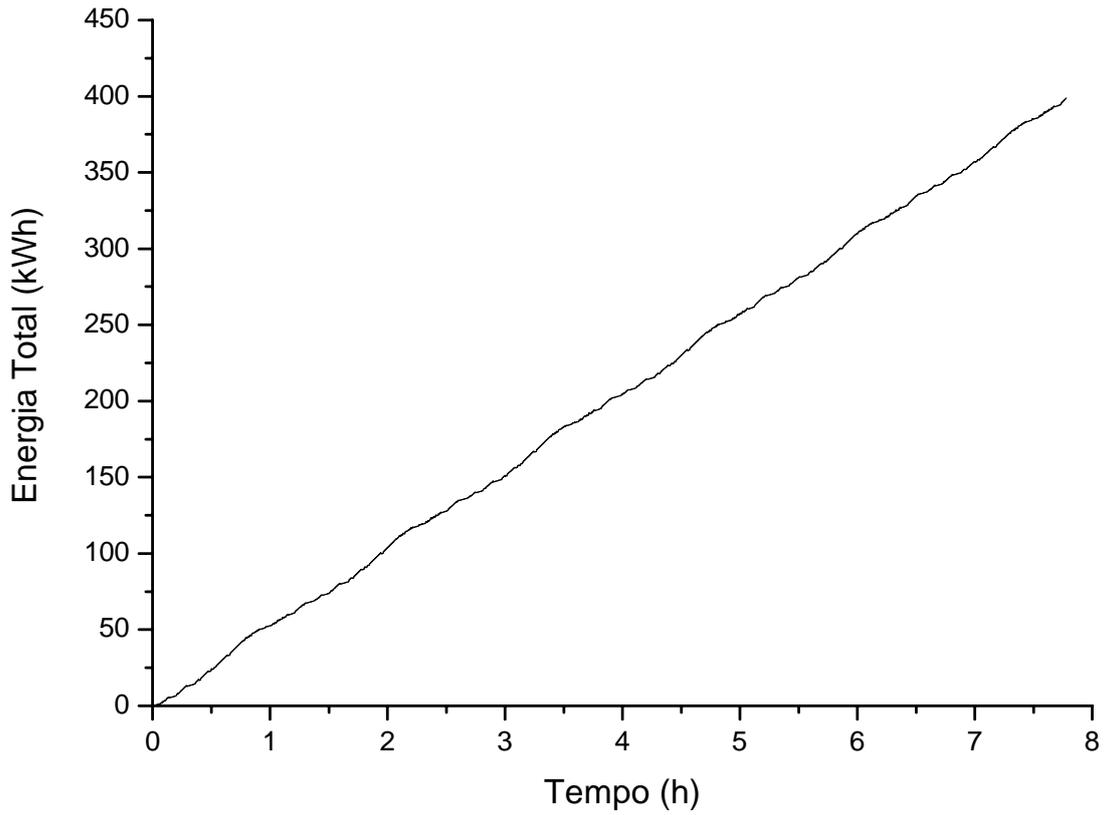


Figura 7-26 - Energia líquida no trajeto Galeão-Barra

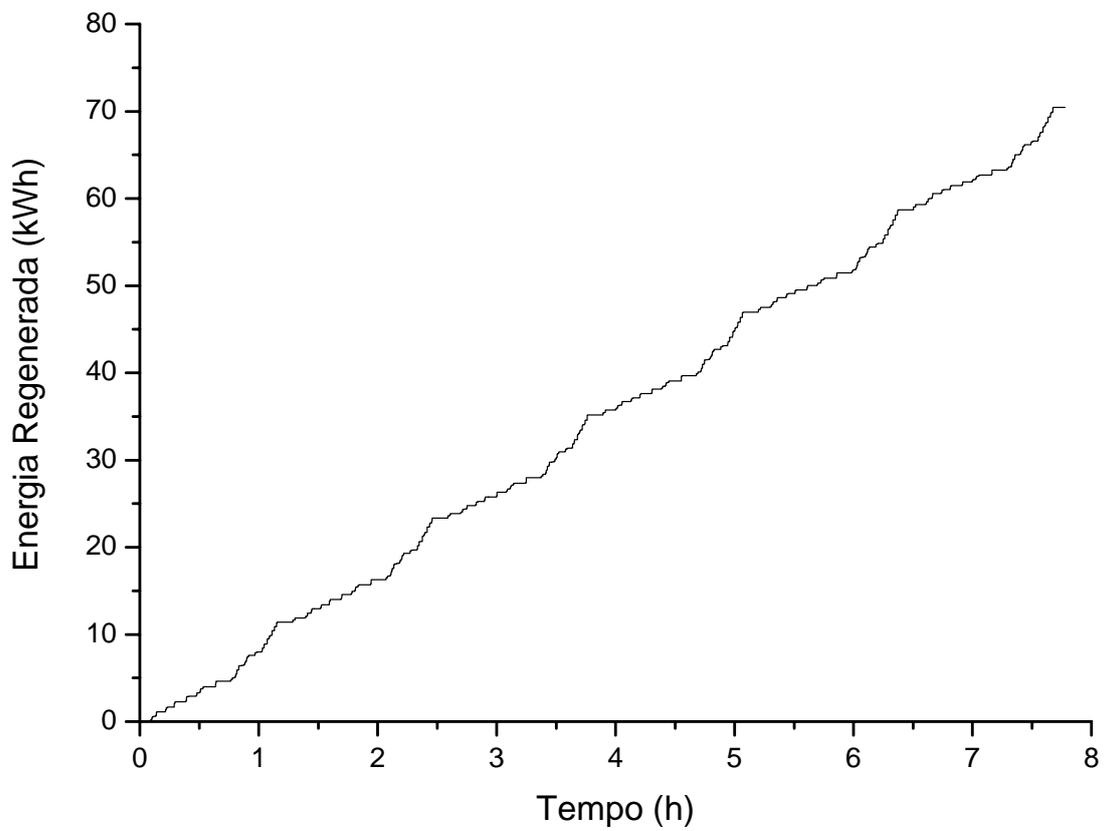


Figura 7-27 - Energia regenerada no trajeto Galeão-Barra

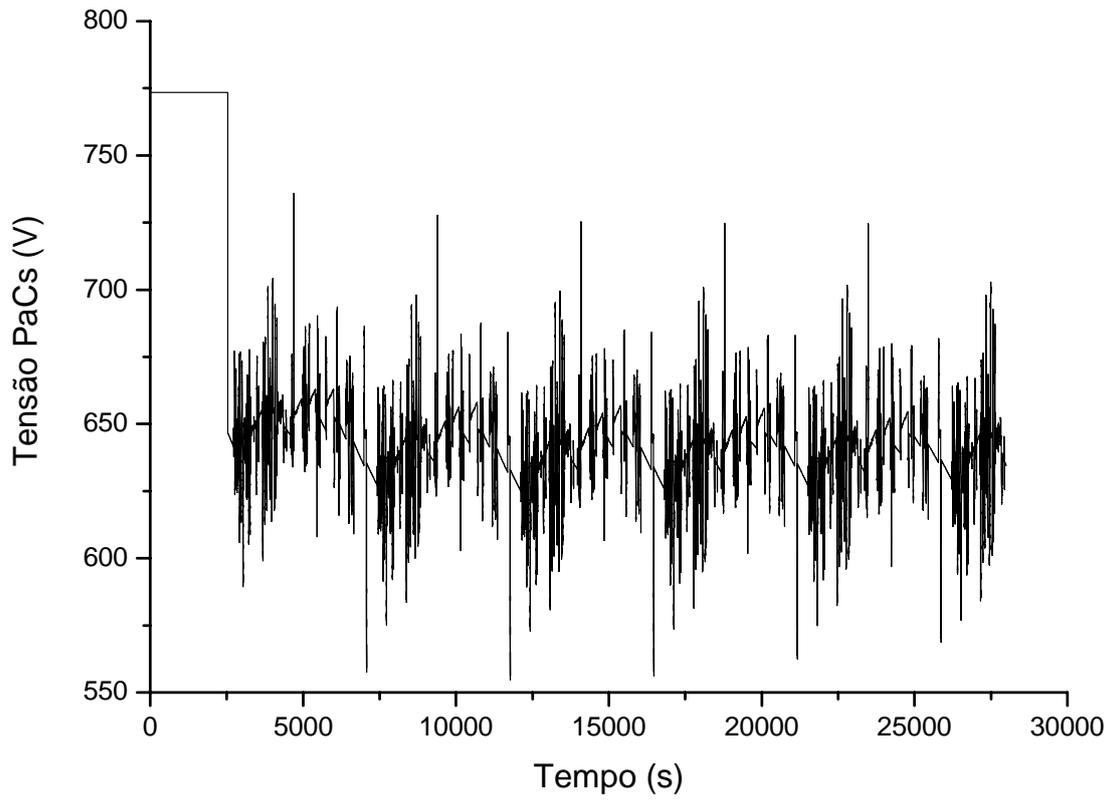


Figura 7-28 - Tensão terminal PaCs

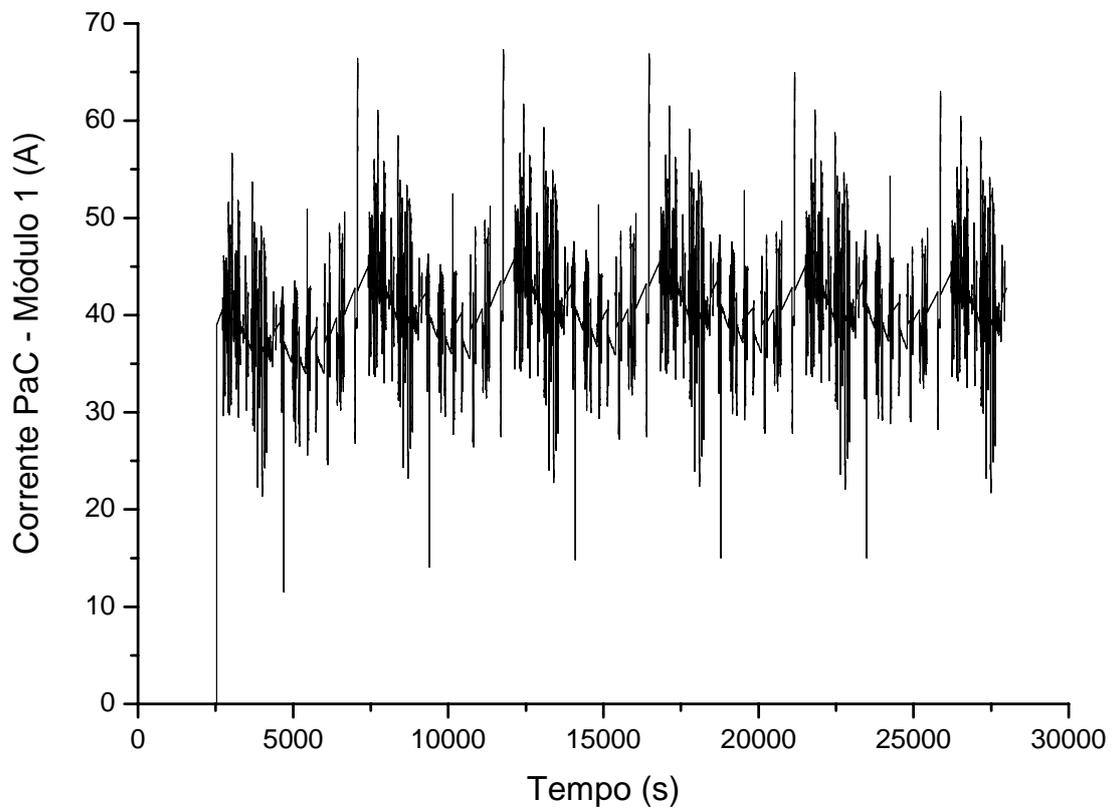


Figura 7-29 - Corrente no módulo 1 da pilha a combustível

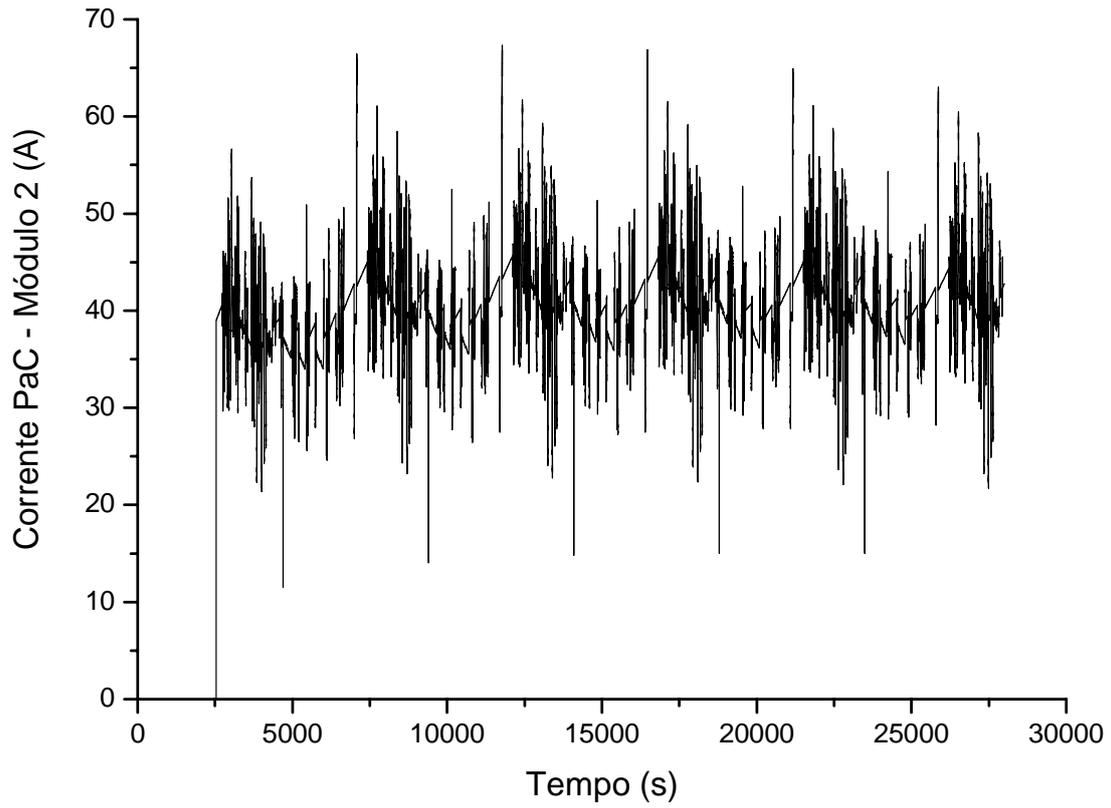


Figura 7-30 - Corrente no módulo 2 da pilha a combustível

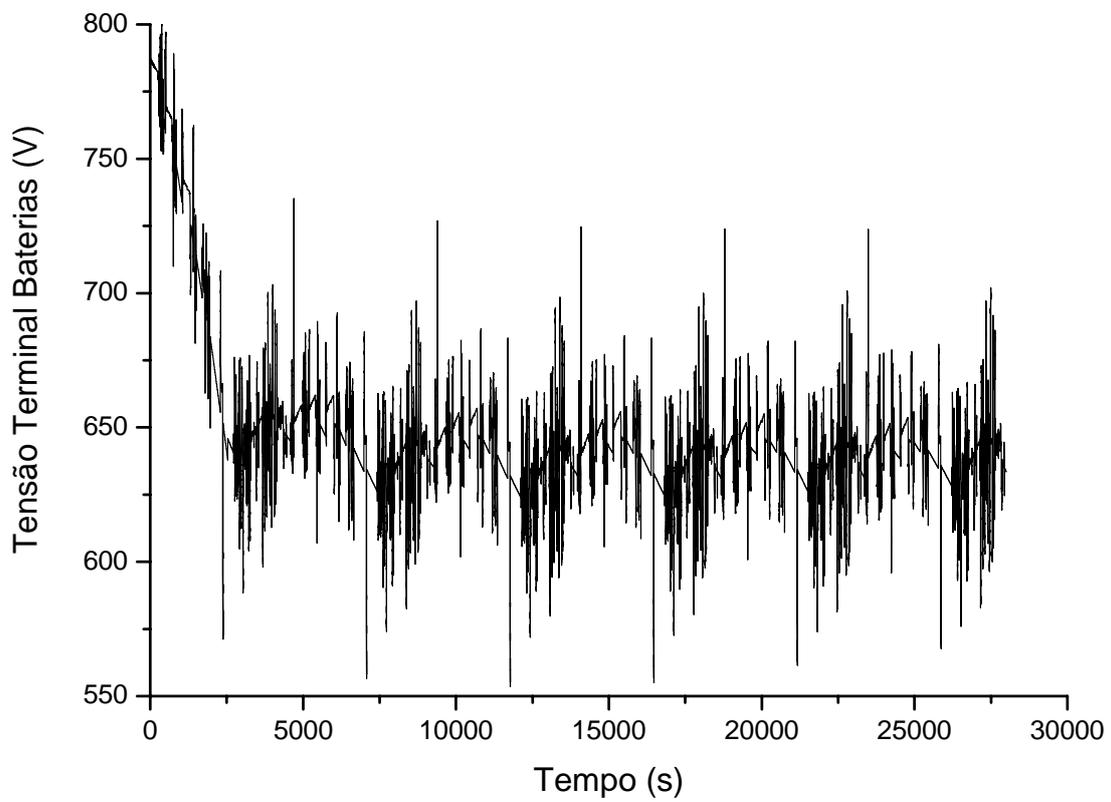


Figura 7-31 - Tensão terminal nas baterias

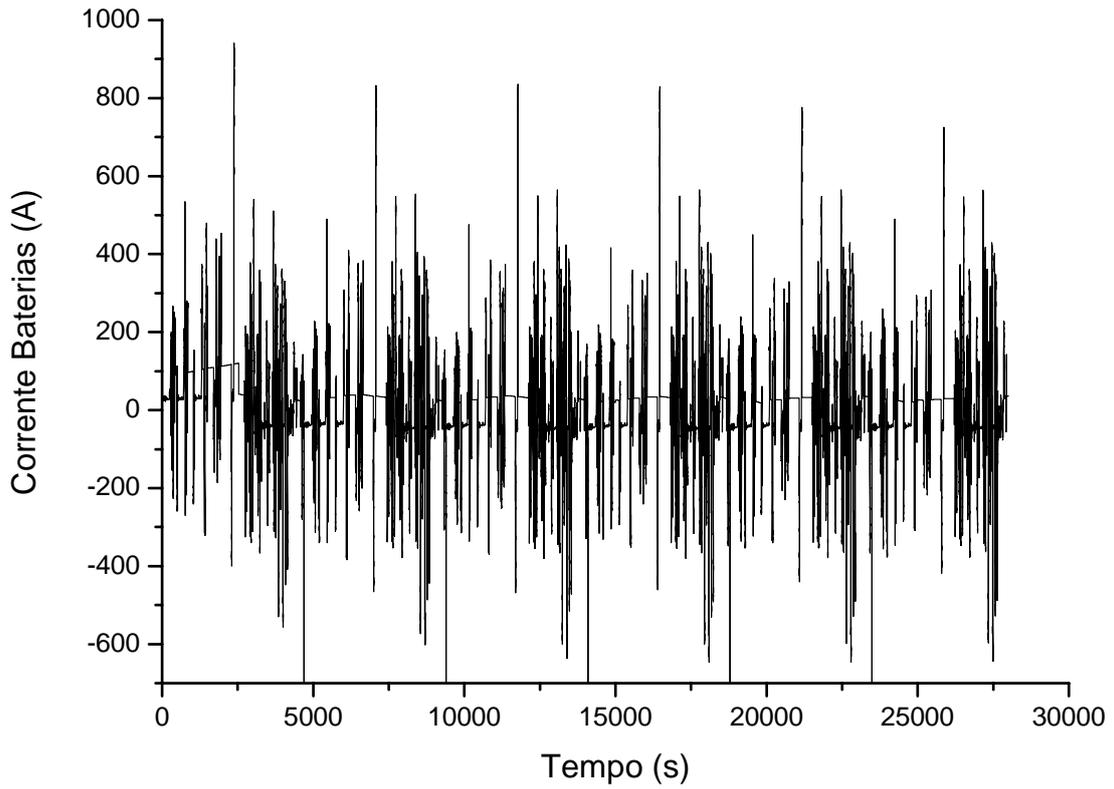


Figura 7-32 - Corrente nas baterias

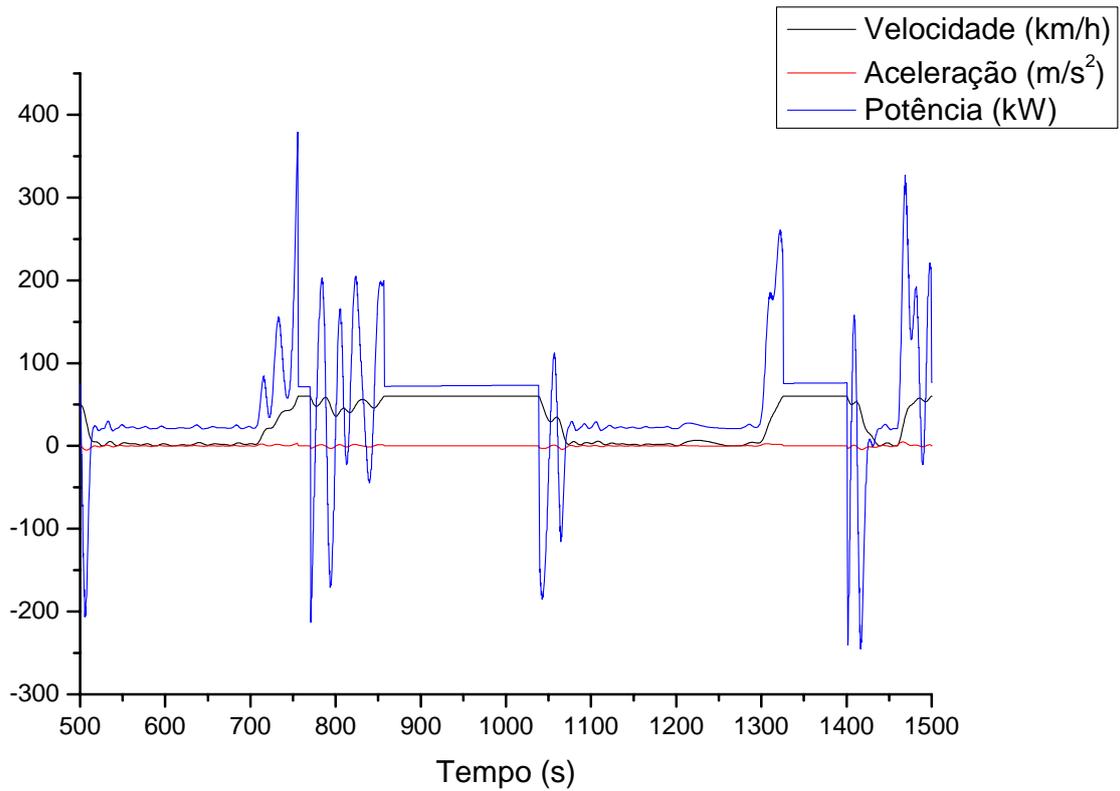


Figura 7-33 - Potência, Velocidade e Aceleração no trajeto Galeão-Barra

Com os resultados apresentados para esta simulação, foi verificado que a energia bruta consumida é de 469,3 kWh, com regeneração de 70,5 kWh, o que significa uma regeneração de 15 %, que é bem abaixo da apresentada para o ciclo FUDS. Isto se deve ao fato de que, neste trajeto, há um trecho em que o ônibus trafega pela Linha Amarela, não fazendo muitas paradas e, conseqüentemente, não pode regenerar energia naquele trecho.

É observado no gráfico de tensões e correntes do sistema de tração que a PaC entra em operação quando o ônibus já operou por 2535 s e, após o seu acionamento, ela mantém a tensão do barramento na faixa de operação da pilha a combustível, entre 624 e 676, fornecendo uma corrente média de, aproximadamente, 40 A.

Na Figura 7-33 são mostradas as curvas de potência do motor, velocidade e aceleração do ônibus e, novamente, verifica-se a influência destes dois parâmetros na potência desenvolvida.

Na tabela 7-2 são reunidos resultados que caracterizam o funcionamento do ônibus deste trabalho. Verifica-se que o consumo de hidrogênio está em torno de 5 kg por 100 km rodados e que, se o trajeto tiver paradas há recarga das baterias pela pilha a combustível, como ocorrido no FUDS. A potência média consumida pelo sistema é, aproximadamente, a potência fornecida pelas pilhas a combustível.

Tabela 7-2 – Tabela-resumo das simulações realizadas

Parâmetro \ Trajeto	FUDS	Niterói-Rio	Galeão-Barra
Velocidade média (km/h)	29,7	60,9	35,5
Potência média (kW)	46,45	59,40	51,55
Energia fornecida pelas PaCs (kWh)	337,4	-	368,1
Pot. média PaCs, enquanto ligadas (kW)	48,26	-	52,04
Consumo de Hidrogênio (kg/100 km)	5,27	-	4,81
Corrente média PaCs (A)	74,1	-	81,3
ECB no final do trajeto (%)	67,3	83,9	62,3
Distância percorrida (km)	230,95	14,14	275,95
Tempo (s)	28000	835	28000

Para avaliar os resultados encontrados neste trabalho, será feita uma comparação com projetos já realizados e em demonstração encontrados em publicações.



Figura 7-34 - Ônibus elétricos híbridos com pilhas a combustível, desenvolvidos na China [21]

A Figura 7-34 mostra três ônibus desenvolvidos pelo Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Alta Tecnologia da China na Universidade de Tsinghua [21], topologia elétrico híbrido com pilhas a combustível e baterias, cujas características são mostradas na Tabela 7-3, juntamente com o protótipo deste trabalho e outros ônibus com PaCs.

Verifica-se que os resultados encontrados neste trabalho para o protótipo da COPPE/UFRJ, quando comparados com outros projetos/protótipos são amplamente satisfatórios no que se refere a consumo de H₂, que ficou em torno de 5 kg por 100 km.

É importante ressaltar que o ônibus deste trabalho está sendo desenvolvido para um trajeto urbano com paradas e rampas de baixa inclinação, com vistas a viabilizar uma pilha a combustível de baixa potência, se comparado aos outros ônibus o que caracteriza a predominância de baterias, recarregado-as após o serviço diário.

Tabela 7-3 - Comparação de Características de Ônibus com Pilhas a Combustível

Projeto	Topologia	Peso (ton)	Velocidade média (km/h)	Consumo H2 (kg/100 km)
Coppe (FUDS)	VEHPaC	16	29,7	5,27
Coppe (Galeão-Barra)	VEHPaC	16	35,5	4,81
China	VEHPaC	12	26,1	8,5
CUTE - Amsterdam	VEPaC	12	18,1	21,6
CUTE - Barcelona	VEPaC	12	12,9	27,4
CUTE - Hamburgo	VEPaC	12	16,2	20,4
CUTE - Londres	VEPaC	12	13,9	24,0
CUTE - Luxemburgo	VEPaC	12	17,9	20,9
CUTE - Madrid	VEPaC	12	13,8	28,8
CUTE - Porto	VEPaC	12	8,9	30,0
CUTE - Estocolmo	VEPaC	12	9,7	26,6
CUTE - Stuttgart	VEPaC	12	11,4	22,1

8 CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados para este trabalho, conclui-se que os ônibus com pilhas a combustível ainda não são viáveis comercialmente, necessitando que as tecnologias de pilhas a combustível avancem ao ponto de estes veículos, que são muito melhores do ponto de vista ecológico para redução da poluição, se tornarem comerciais.

Neste trabalho foi considerada uma pilha a combustível que tem uma faixa de tensão e corrente operação muito estreita e não permite que esta seja chaveada, não podendo ser ligada, por exemplo, a conversores eletrônicos de potência que trabalham desta forma. Uma outra limitação, que é comum em pilhas a combustível, é o número de ciclos de operação, que para esta é de 1000 ciclos.

As simulações realizadas mostraram que a topologia utilizada permite o uso adequado da pilha a combustível conforme recomendado pelo fabricante.

De acordo com o dimensionamento de todo o sistema de tração, atingiu-se uma autonomia teórica de 500 km e um consumo de 5 kg de hidrogênio por 100 km rodados, considerado muito satisfatório em função dos valores reportados na literatura.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, podem ser feitos levantamentos de outros trajetos, visando observar como o ônibus se comporta em outras situações e para se ter mais dados estatísticos de curvas de rodagem.

Uma modelagem mais completa da pilha a combustível, considerando a dinâmica do balanço de planta, deve ser feita, para possibilitar um controle mais refinado do sistema de tração.

Pelo mesmo motivo, o modelo das baterias também poderá ser mais completo, haja vista que este foi simplificado em virtude do fabricante não ter fornecido informações mais detalhadas sobre as mesmas até o presente momento.

Após a fabricação do ônibus, pode ser feito um acompanhamento do desempenho do mesmo, visando melhorias no projeto. Por exemplo, a implementação de um controle adaptativo que registre os trajetos do ônibus, para otimizar o consumo de hidrogênio, tornando o veículo mais econômico.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Relatório Técnico-Científico Parcial nº 2*, In: Ônibus Híbrido com baterias e pilhas a combustível, 2005, Laboratório de Hidrogênio – COPPE/UFRJ.
- [2] *Transportation Fuel Cells: Challenges and Opportunities*. In: Research Reports International, 2006.
- [3] SZWARCFITER, L., 2004, *Opções para o aprimoramento do controle de emissões de poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção e de renovação acelerada da frota*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [4] Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2006 / CETESB. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/relatorios/relatorios.asp>>, acesso em maio/2007.
- [5] LARMINIE, J., LOWRY, J., *Electric Vehicle Technology Explained*, 1 ed., New York: John Wiley and Sons, 2005.
- [6] GAO, Y., EHSANI, M., MILLER, J.M., “Hybrid Electrical Vehicle: Overview and State of the Art”, IEEE ISIE, June 20-23, 2005, Dubrovnik, Croatia.
- [7] EMADI, A., RAJASHEKARA, K., WILLIAMSON, S.S., LUKIC, S.M., “Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 54, nº 3, May 2005.
- [8] *Analysis of Electric Drive Technologies for Transit Applications: Battery-Electric, Hybrid Electric and Fuel Cells*. In: Final Report, August, 2005. U.S. Department of Transportation – Federal Transit Administration.
- [9] *Relatório Técnico-Científico Parcial nº 2*, In: Ônibus Híbrido com baterias e pilhas a combustível, 2005, Laboratório de Hidrogênio – COPPE/UFRJ.
- [10] APPLEBY, A. J., FOULKES, F.R., *Fuel Cell Handbook*, 7 ed., West Virginia: EG&G Technical Services, Inc., 2004.
- [11] LARMINIE, J., DICKS, A., *Fuel Cell Systems Explained*, 2 ed., New York: John Wiley and Sons, 2003.
- [12] DHAMEJA, S., *Electric Vehicle Battery Systems*, 1 ed., London: Newnes, 2002.
- [13] BURKE, A.F., “Battery and ultracapacitors for electric, hybrid and fuel cell vehicles”, Proceedings of the IEEE, vol. 95, nº4, April 2007.

- [14] PALMA, J.C.P., *Accionamentos Electromecânicos de Velocidade Variável* 1ª ed., Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [15] FITZGERALD, A.E., KINGSLEY JR., C., UMANS, S.D., *Electric Machinery* 6 ed., New Jersey: McGraw-Hill, 2003.
- [16] ZERAOULIA, M., BENBOUZID, M.E.H., DIALLO, D., “Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, nº. 6, November 2006.
- [17] KOSOW, I.L., *Máquinas Elétricas e Transformadores* 10ª ed., São Paulo: Globo, 1994.
- [18] ZHU, Z.Q., HOWE, D., “Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, nº4, April 2007.
- [19] BOSE, B.K., *Modern Power Electronics and AC Drives*, New Jersey: Prentice-Hall, 2002.
- [20] Everspring Global Limited, Disponível em <<http://everspring.net/product-battery-LFP160AHA.htm>>, acesso em junho de 2007.
- [21] WANG, J., CHEN, Y., CHEN, Q., “A Fuel Cell City Bus with Three Drivetrain Configurations”, *Journal of Power Sources*, nº159, February 2006.