



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Departamento de Engenharia Mecânica
DEM/POLI/UFRJ



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA PAMVEC PARA MODELAGEM DE CAMINHÕES DE COLETA DE LIXO

Flávio Assumpção de Castro

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc e Silvio Carlos Anibal de Almeida, D.Sc.

Rio de Janeiro
Novembro de 2013.

**UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA PAMVEC PARA MODELAGEM
DE CAMINHÕES DE COLETA DE LIXO**

Flávio Assumpção de Castro

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Silvio Carlos Anibal de Almeida, D.Sc

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, Dr.-Ing.

Prof. Luciano Basto Oliveira, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2013

Castro, Flávio Assumpção.

Utilização da ferramenta PAMVEC para modelagem de caminhões de coleta de lixo/Flávio Assumpção de Castro. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

XIII,101p.:il.; 29,7 cm

Orientadores: Alexandre Salem Szklo e Silvio Carlos Anibal de Almeida.

Projeto de Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 105-108

1. Arquitetura Veicular em Caminhão com Compactador de Lixo. 2. Análise Financeira. 3.Diminuição do Ruído. 4.Consumo de Combustível. I.Szklo, Alexandre Salem. De Almeida, Silvio Carlos Anibal. II.Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica.III. Utilização da ferramenta PAMVEC para modelagem de caminhões de coleta de lixo.

“A parte mais importante do progresso é o desejo de progredir”

Sêneca

AGRADECIMENTOS

Dedico o presente trabalho aos meus pais Luiz e Leila, por toda a educação e o carinho que me deram. Pela luta e dedicação, muitas vezes substituindo momentos de lazer por trabalho, para que tivéssemos uma vida melhor e para que pudéssemos nos dedicar integralmente aos estudos. Tenho muito orgulho de dizer que essa é uma conquista de vocês também.

Dedico às minhas irmãs Flavia e Tatiana por todo o apoio e o exemplo que me deram, não sendo apenas irmãs, mas também amigas e companheiras, tendo papel fundamental também na minha educação e formação. Agradeço as longas conversas, os vários conselhos, além da paciência e da sabedoria para me ajudar nos momentos mais difíceis.

Finalmente, dedico aos meus avós (*in memoriam*) Mário, Ivani, Teixeira e Albertina, que sempre me dizia que o seu sonho era me ver formado. Tenho certeza que eles me acompanham e estão muito felizes por esse momento.

Agradeço aos meus amigos. Fico muito feliz por ter certeza que posso contar com eles. Aos amigos de EPCAr, pelas longas conversas e pela união, que faz parecer que convivemos juntos. Aos amigos de UFRJ, por compartilharem todos os momentos, sejam complicados ou de alegrias e também pela união, que sempre nos fortaleceu. À minha namorada Marise, que antes de tudo, é uma grande amiga.

Agradeço ao meu professor e orientador Silvio Carlos pela ajuda desde o início da monitoria, pela disponibilidade para ajudar e pela confiança investida em mim.

Agradeço também ao professor e orientador Alexandre Szklo, por sua vontade e dedicação de transmitir conhecimento, pela sua atenção e disponibilidade tanto durante o projeto final quanto para tirar outras dúvidas acadêmicas, ampliando a minha visão de Engenharia.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	viii
ÍNDICE DE SÍMBOLOS.....	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Metodologia.....	3
2. SISTEMAS DE PROPULSÃO.....	5
2.1 Conceitos Importantes para a Seleção.....	5
2.1.1 Sistema de Frenagem Regenerativa.....	5
2.1.2 Análise dos Dispositivos de Armazenagem.....	5
2.2 Seleção das Arquiteturas Veiculares.....	6
2.3 Descrição das Arquiteturas Veiculares Seleccionadas.....	8
2.2.1 Veículo com Motor de Combustão Interna.....	9
2.2.2 Veículo Elétrico à Bateria.....	12
2.2.3 Veículo Híbrido em Série.....	16
2.2.4 Veículo <i>Plug-In</i> em Série.....	18
2.2.5 Caminhão de Coleta com MCI e Compactador <i>Plug-In</i>	21
3. PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ETE.....	22
3.1 Processo de Tratamento de Esgoto.....	22
3.2 Produção de Biogás.....	24
3.3 Funções do Biogás.....	26
4. PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO.....	30
4.1 A ferramenta PAMVEC.....	30
4.2 A Interface do PAMVEC e as alterações feitas.....	31
4.2.1 Tela Inicial.....	32
4.2.2 Aba ENTRADAS GERAIS.....	33
4.2.3 Aba ARQUITETURAS VEICULARES.....	35
4.2.4 Aba RESULTADOS PRINCIPAIS.....	41

4.2.5	Aba QUANTIDADE MÁXIMA DE CAMINHÕES.....	43
4.3	Cálculos e Modelagens.....	44
4.3.1	Balanco de Massa.....	44
4.3.2	Potência de Tração.....	47
4.3.3	Frenagem Regenerativa.....	49
4.3.4	Autonomia.....	51
4.3.5	Custo do Combustível.....	51
4.3.6	Volume de Biogás Consumido.....	55
4.3.7	Volume de Biogás Disponibilizado pela ETE.....	55
4.3.8	Número Máximo de Caminhões Atendidos pelo Biogás.....	56
4.3.9	Particularidades <i>Plug-In</i>	56
4.3.10	Particularidades do veículo MCI com Compactador <i>Plug-In</i>	57
4.4	Análise Financeira.....	59
5.	SELEÇÃO DE PARÂMETROS.....	61
5.1	Ciclo de Direção.....	61
5.1.1	Escolha do Ciclo de Direção.....	62
5.1.2	Obtenção dos Principais Dados do Ciclo Resende.....	63
5.2	Número de Compactações.....	68
5.2.1	Valor Ideal de Compactações.....	68
5.2.2	Valor Real de Compactações	69
5.3	Dados Complementares de Arquitetura Veicular.....	69
5.3.1	Características do Veículo Simulado.....	69
5.3.2	Dados de Entrada para Caminhões de Coleta.....	70
5.4	Dados Complementares da Produção de Energia Elétrica em ETE.....	76
6.	ESTUDO DE CASO.....	81
6.1	Valor do Combustível Economizado.....	81
6.2	Capacidade de Fornecimento de Biogás.....	86
6.3	Poluição Sonora.....	87
6.4	Efeitos Ambientais da substituição do MCI Diesel.....	89
7.	CONCLUSÕES.....	90
	BIBLIOGRAFIA.....	92
	ANEXO I.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Ragone	6
Figura 2 – Plataforma para veículos a combustão interna.....	9
Figura 3 – Diagramas do ciclo Otto.....	9
Figura 4 – Diagrama do ciclo Diesel.....	10
Figura 5 – Plataforma para veículos elétricos à bateria.....	13
Figura 6 – Diagrama de Ragone para os principais tipos de Bateria.....	14
Figura 7 – Plataforma Veicular de Híbridos Elétricos em Série.....	17
Figura 8 – Pontos de operação de um MCI em um veículo convencional e em um veículo híbrido completo em condições semelhantes	17
Figura 9 – Funcionamento em CD e em CS do PHEV.....	19
Figura 10 – Plataforma de um veículo elétrico <i>plug-in</i> em série.....	20
Figura 11 – Fluxograma de um sistema de aproveitamento de esgoto.....	24
Figura 12 - Poder calorífico inferior em função do percentual de metano.....	25
Figura 13 - Taxa de calor para motores recíprocos.....	28
Figura 14 – Modelo ilustrativo sobre a metodologia de cálculo do PAMVEC....	31
Figura 15 – Tela inicial do PAMVEC.....	32
Figura 16 – Aba ENTRADAS GERAIS do PAMVEC.....	34
Figura 17 – Tela do PAMVEC para ARQUITETURAS VEICULARES.....	36
Figura 18 – Tela da opção MCI.....	37
Figura 19 – Tela da opção “Ver Todas”.....	39
Figura 20 - Opções acessível na tela “Dados Biogás ETE”	40
Figura 21 – Dados acessíveis na aba RESULTADOS GERAIS.....	42
Figura 22 – Tela da aba QUANTIDADE MÁXIMA DE CAMINHÕES.....	43
Figura 23 – Ciclos de condução para ensaios de ônibus urbano em São Paulo....	63
Figura 24 – Resultado de caminhão de coleta em Ciclo Resende.....	64
Figura 25 – Resultado da análise de dados do ciclo Resende após simplificação	64
Figura 26 – Análise de sensibilidade de custo da eletricidade por custo biogás..	81
Figura 27 - Relação da energia necessária com a arquitetura veicular	82
Figura 28 – Gráfico do custo normalizado por arquitetura veicular com MCI....	84
Figura 29 – Custo normalizado para as outras arquiteturas veiculares.....	84
Figura 30 – Consumo diário de biogás por caminhão de cada estrutura.....	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Sistemas de Propulsão Propostos e Fontes de Energia Avaliadas.....	8
Tabela 2 – Características dos principais tipos de bateria.....	14
Tabela 3 - Sistemas de Propulsão Propostos e Motivo da Seleção.....	25
Tabela 4 – Comparação entre Motor Otto e Microturbina.....	26
Tabela 5 - Dados de custo de capital para equipamentos de geração elétrica que usam biogás como combustível.....	26
Tabela 6 - Faixas de potência e eficiências nos quais podem ser encontrados equipamento de geração elétrica usando biogás	27
Tabela 7 – Comparação entre MCI e Microturbina de 30kW.....	29
Tabela 8 – Fração de regeneração dos freios.....	49
Tabela 9 - Parâmetros de ciclos de direção usados internacionalmente.....	66
Tabela 10 Dados do Caminhão Usimeca Delta 28.....	70
Tabela 11 Dados de massa do caminhão simulados após processo de iteração..	73
Tabela 12 – Dados específicos dos combustíveis.....	79
Tabela 13 – Custo por km das arquiteturas veiculares testadas.....	82
Tabela 14 – TCE para cada estrutura nova.....	85
Tabela 15 – Número máximo de caminhões atendidos.....	87
Tabela 16 –Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos.....	88

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABVE – Associação Brasileira de Veículos Elétricos

ANP – Agência Nacional do Petróleo

CD – *Charge-Depleting*

CS – *Charge-Sustaining*

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

HWFET – *Highway Fuel Economy Test*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

GNV – Gás Natural Veicular

MCI – Motor de Combustão Interna

NEDC – *New European Driving Cycle*

NYCC – *New York City Cycle*

OMS – Organização Mundial da Saúde

PAMVEC – *Parametric Analytical Model of Vehicle Energy Consumption*

PCI – Poder Calorífico Inferior

PHEV – *Plug-In Hybrid Electric Vehicle*

UDDC – *Urban Dynamometer Driving Cycle*

US06 – *United States Federal Test Procedure 06*

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

A - área frontal do veículo [m²];

Aut - autonomia do veículo [km];

C_{biogás} - custo total do biogás [R\$/MWh];

C_{cap nivelado} - custo do capital nivelado pelo CRF [R\$/kW];

C_{comb} - custo do combustível [R\$/MWh].

C_d - coeficiente de arrasto aerodinâmico;

C_{distribuição} - tarifa de distribuição [R\$/MWh].

C_{geração} - custo de produção do biogás [R\$/MWh];

C_{O&M} - custo de manutenção e operação [R\$/kW];

C_{rr} - coeficiente de atrito dinâmico com o solo;

CC - consumo de combustível [Wh/km];

D_{bat} - distância percorrida pelo veículo quando ele está funcionando como um veículo elétrico [km];

D_{comb} - distância percorrida pelo veículo funcionando como um veículo híbrido em série [km];

D_{elétrico} - distância percorrida pelo veículo funcionando como um veículo elétrico à bateria [km].

D_{shev} - distância percorrida pelo veículo quando ele está funcionando como um veículo híbrido em série [km];

DE - densidade de energia [Wh/L];

DE_{Biogás} - densidade energética do biogás [Wh/m³];

E_{AC} - energia consumida pelo compactador que será atendida pelo combustível a partir do término da energia disponível na bateria [Wh];

E_{bat} - energia total consumida pelo veículo quando ele está funcionando como um veículo elétrico [Wh];

E_{bc} - energia armazenada na bateria usada no compactador [Wh];

E_{CB} - quantidade de energia que a bateria tem disponível para ser usada somente no compactador [Wh].

E_{comb} - energia armazenada no combustível [Wh];

E_{km} - energia total consumida por km [Wh/km];

E_{TTPlugIn} - energia total consumida por um veículo Plug-In durante o ciclo [Wh];

E_{shev} - energia total consumida pelo veículo quando ele está funcionando como um veículo híbrido em série [Wh];

EE_{bat} - energia específica da bateria [Wh/kg];

EE_{bc} - energia específica da bateria usada no compactador [Wh/kg];

EE_{comb} - energia específica do combustível [Wh/kg];

En_{bat} - energia armazenada no conjunto de baterias do veículo [Wh];

En_{tanque} - energia armazenada no tanque de combustível do veículo [Wh];

g - aceleração da gravidade [m/s^2];

K - fração do biogás produzido que será disponibilizado pela ETE para servir de combustível nos veículos de coleta;

k_{estrut} - fator de massa, que corresponde a um reforço estrutural para suportar a carga adicional da estrutura do sistema de propulsão;

k_m - fator de inércia do veículo;

k_r - fração de regeneração da frenagem;

m_{bat} - massa do conjunto de baterias [kg];

m_{bc} - massa da bateria usada exclusivamente para o compactador [kg].

m_{carga} - massa da carga total transportada (pessoas, bagagens, etc) [kg];

$m_{carroceria}$ - massa da carroceria do veículo [kg];

m_{comb} - massa do combustível [kg];

$m_{elétrico}$ - massa do motor elétrico [kg];

m_{mci} - massa do motor de combustão interna [kg];

m_{mec} - massa do motor elétrico usado exclusivamente para o compactador [kg];

m_{prop} - massa do sistema de propulsão [kg];

m_{total} - massa total do veículo [kg];

m_{trans} - massa do sistema de transmissão [kg];

P_{aero} - potência consumida devido à força de arrasto aerodinâmico [W];

P_{atrito} - potência dissipada através do atrito dinâmico do pneu com o solo [W];

P_{cin} - potência devido à variação de energia cinética do veículo [W];

P_{comp} - potência real do compactador [kW];

$P_{elétrico}$ - potência do motor elétrico [W];

$P_{inércia}$ - potência de inércia do veículo [W];

P_{pot} - potência devido à variação de energia potencial [W];

P_{mci} - potência do motor de combustão interna [W];

P_{mec} - potência do motor elétrico usado somente no compactador [W];

P_{med} - energia total consumida pelo compactador dividida pelo tempo total de ciclo [kW];

P_{trans} - potência do sistema de transmissão [W];

P_t - potência de tração [W];

PE_{mci} - potência específica do motor de combustão interna [W/kg];

PE_{trans} - potência específica do sistema de transmissão [W/kg];

$PE_{elétrico}$ - potência específica do motor elétrico [W/kg];

PE_{mec} - específica do motor elétrico usado no compactador [W/kg];

Q_c - quantidade máxima de caminhões que podem utilizar o biogás da ETE;

t_{ciclo} - tempo total do ciclo [h];

T - número de horas por dia que a ETE produz biogás [h];

TD - taxa de débito;

TE - taxa de capital próprio;

TT - taxa de tributos;

V - velocidade instantânea do veículo [m/s];

$V_{cub\ med}$ - velocidade cúbica média [m/s];

V_g - volume de biogás consumido por caminhão por dia [m³];

V_{med} - velocidade média [m/s];

vu - vida útil [anos];

$WACC$ - custo médio ponderado do capital;

Z - gradabilidade em relação a um ponto referencial [m];

η - rendimento de 1ª lei do motor Otto que faz a conversão de biogás em energia elétrica;

ρ - densidade do ar .

RESUMO

Este trabalho objetiva estudar a viabilidade de mudança de combustível e do sistema de propulsão em caminhões de coleta de lixo doméstico. O diesel de origem mineral, combustível tradicionalmente usado neste tipo de veículo, foi substituído, total ou parcialmente, por biogás e eletricidade. Adicionalmente, foram simuladas novas arquiteturas veiculares para o sistema propulsor: veículo elétrico à bateria, híbrido elétrico em série, *plug-in* em série e veículos com motor de combustão interna, utilizando um compactador *plug-in*.

A utilização da energia elétrica visa, sobretudo, à diminuição do ruído do caminhão, principalmente no compactador, enquanto o uso do biogás foi proposto com o objetivo de utilizar energia gerada a partir de resíduos.

O biogás disponibilizado para essa substituição seria gerado por uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Calculou-se a relação entre o número de caminhões que podem ser alterados e a percentagem de biogás disponibilizada, levando em conta as particularidades de cada estrutura veicular estudada.

Para analisar o desempenho do veículo, utilizou-se a ferramenta PAMVEC (*Parametric Analytical Model of Vehicle Energy Consumption*), que permite gerar indicadores energéticos, como consumo de energia e combustível, a partir de características do ciclo de direção e das propriedades dos componentes veiculares.

Para análise de viabilidade, foram usados critérios financeiros e ambientais. Avaliaram-se o consumo de combustível e o custo das alterações feitas na ETE para gerar energia elétrica a partir do biogás. Já para os critérios ambientais, foram levadas em consideração a diminuição de emissão de gases poluentes e a redução do ruído causado pelo caminhão de coleta.

ABSTRACT

This work aims to study the feasibility of changing fuel and propulsion system (powertrain) for garbage trucks. The mineral diesel fuel is generally used in this type of vehicle. It was partially or fully replaced by biogas and electricity. Furthermore, new architectures were proposed for the powertrain components. The options selected to be simulated include: electric vehicle battery, series hybrid electric, series plug-in and vehicles with internal combustion engine using a plug-in compactor.

The electric-driven compactor is mainly intended to decrease the noise of the truck, especially in the compactor, while the use of biogas has been proposed to convert waste to electric power.

The biogas generated would derive from a Waste Water Treatment Plant (ETE). The number of trucks to be altered and the percentage of biogas released was calculated. In this case, the particularities of each powertrain were considered.

To analyze the performance of the vehicle, the tool PAMVEC (Parametric Analytical Model of Vehicle Energy Consumption) was used. It allows the estimation of energy indicators based on the driving cycle and the properties of the vehicles' components.

Financial and environmental criteria were used for the feasibility analyses. The fuel consumption and the cost of changes in ETE to generate electricity from biogas were evaluated. While for the environmental criteria, the reduction of greenhouse gas emissions and noise reduction were accounted for.

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

Em 2010, o Brasil produziu 60,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Em média, cada brasileiro gerou 1,04 kg de lixo doméstico por dia. Esse valor tem aumentado com o passar dos anos, suscitando também a necessidade de maior capacidade de coleta desses resíduos. [1]

Segundo o IBGE [2], nesse mesmo ano, foram coletados 97,8% do lixo doméstico urbano no Brasil. Boa parte da coleta desses resíduos é feita através de caminhões de coleta com compactador de lixo. Esses veículos são importantes, pois têm maior capacidade de transporte, devido à diminuição de volume do lixo.

Dois grandes problemas associados a esse tipo de transporte são o elevado índice de ruído e o elevado consumo de combustível, especificamente diesel. O primeiro prejudica em especial os coletores de lixo, podendo gerar, inclusive, danos mais graves a essas pessoas, como perda parcial da audição. Também representa uma poluição sonora relevante em metrópoles brasileiras. Já o gasto com diesel é elevado, o que causa emissões significativas de gases poluentes e maior dependência de derivados de petróleo. [3]

O presente trabalho tem como objetivo atenuar os dois problemas citados acima, através de um estudo de viabilidade de mudanças no sistema de propulsão desses caminhões, mantendo-se inalteradas outras variáveis, tais como a massa de resíduo transportado e a potência de compactação. Propõe-se também a analisar a possibilidade de substituição, total ou parcial, do diesel pela eletricidade (adquirida da rede ou gerada em geradores a biogás) ou por biogás.

Assim, serão comparadas:

1. Diversas configurações veiculares: motor de combustão interna, híbrido ou elétrico;
2. Fontes de energia: diesel, biogás e energia elétrica.

Em relação a esses sistemas de propulsão, pode-se destacar: a tecnologia para um caminhão de coleta ter seu sistema de propulsão híbrido *Plug-In* (veículo que possui motor de combustão interna, motor elétrico e bateria) está disponível no mercado europeu desde 2003 e pesquisas desenvolvidas aumentam sua autonomia e versatilidade. [4] Assim, esse projeto encontra-se fundamentado em tecnologias desenvolvidas ou em desenvolvimento que apresentam grande potencial.

Os estudos sobre aproveitamento energético de biogás normalmente enfatizam seu uso para geração de eletricidade [5,6,7], ainda que alguns estudos também avaliem seu uso veicular [8]. No caso de veículos plug-in ou elétricos, normalmente os estudos enfatizam a análise de veículos leves [9,10,11]. Alguns poucos estudos avaliam o uso de motor elétrico em ônibus [12]. Mas, não foram encontrados na literatura científica estudos relacionados ao uso de energia elétrica e ao aproveitamento do biogás em caminhões de lixo – portanto, estudos que relacionem as três áreas de interesse deste trabalho (biogás, motor elétrico e caminhões de lixo).

Para vincular esses itens, o primeiro capítulo apresenta uma breve introdução e mostra a metodologia aplicada para simular o desempenho de um caminhão de lixo com diversas configurações.

No capítulo 2, o sistema de propulsão tradicional, motor Diesel, é comparado com outros sistemas de propulsão alternativos.

Já no capítulo 3, o funcionamento de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é descrito até a geração do biogás.

O PAMVEC, programa que foi utilizado no estudo de viabilidade, é apresentado em detalhes no capítulo 4, assim como as alterações que foram realizadas para facilitar e expandir o uso dessa ferramenta. Deve-se ressaltar que o programa original foi alterado de maneira significativa de modo a atender os requisitos de análise desse trabalho.

O capítulo 5 apresenta as características de um caminhão de coleta: ciclo de direção, número de compactações, potência média do compactador, distância percorrida, tempo de cada ciclo, entre outros fatores. Nesse capítulo é feita a escolha de um ciclo de direção urbano, tipo “anda-pára”, detalhando suas características. Ainda nesse capítulo, dados do biogás usado na geração de energia são detalhados, completando as informações necessárias.

Finalmente, as simulações são feitas para a cidade do Rio de Janeiro no capítulo 6, seguidas de suas análises. Finalmente as conclusões são descritas no capítulo 7.

1.1 METODOLOGIA

A análise de desempenho e custos para o caminhão de coleta foi realizada utilizando a ferramenta PAMVEC (*Parametric Analytical Model of Vehicle Energy Consumption*). O PAMVEC é uma ferramenta desenvolvida na plataforma Excel, em ambiente Windows, que permite ao usuário comparar várias combinações de sistema de propulsão veicular, combustíveis e arquiteturas veiculares. Essa programação foi desenvolvida em 2005 por Andrew Simpson em sua tese de doutorado para estudo de veículos leves. [13]

Por ser desenvolvida em ambiente de planilha eletrônica, essa ferramenta pode ser facilmente editada, incluindo ou alterando algumas funções, sendo cada relação de fácil rastreamento. O funcionamento básico consiste em variáveis de entradas (*inputs*) e de saída (*outputs*). As entradas derivam de dados que muitas vezes são encontrados na literatura ou podem ser fornecidos pelas montadoras.

Simpson propôs o estudo dos seguintes sistemas de propulsão: motor de combustão interna, veículo híbrido em série, híbrido em paralelo, célula a combustível¹ e veículo elétrico. Para essas, pode ser calculada a potência necessária para o acionamento do veículo, em função da massa total veicular, autonomia, acessórios, eficiências dos sistemas de transmissão, do motor, e também em função do ciclo de direção ao qual o veículo será submetido.

Além da potência, o programa permite obter dados sobre o consumo de combustível, dimensionamento do tanque de combustível ou do banco de baterias. Os cálculos relacionados a essas saídas se encontram no capítulo 3 do presente trabalho.

Como o PAMVEC original focava em veículos leves, houve a necessidade de este estudo propor novos sistemas de propulsão para o presente trabalho, que é focado em caminhões de coleta. Assim, a ferramenta recebeu novas arquiteturas veiculares que são:

- Veículo *plug-in* em série, com todo o caminhão (incluindo o compactador) utilizando uma bateria pré-carregada na rede e um sistema elétrico híbrido. Maiores detalhes dessa arquitetura estão disponíveis no capítulo 2;

¹ Utiliza-se também o termo “pilha a combustível” em língua portuguesa.

- Veículo com motor de combustão interna sendo utilizado para todo o caminhão com exceção do compactador. Enquanto a bateria estiver em um nível adequado para o funcionamento, o compactador utilizará exclusivamente a energia nela armazenada. Quando sair desse nível, irá consumir a energia do combustível, assim como nos caminhões de coleta tradicionais. Essa configuração é exclusiva para caminhões de coleta de lixo e pode ser vista em detalhes no capítulo 2.

Foi feita outra alteração, essa com o objetivo de simplificar ainda mais a interface do PAMVEC. Através de um desenvolvimento na linguagem de programação própria do software Excel, o Visual Basic, foi possível atribuir macros e botões “ComboBox” nas planilhas. Tal mudança permite que o usuário trabalhe apenas nas planilhas de “Entrada” e na planilha da configuração veicular desejada. Há também a possibilidade de comparação instantânea entre os diferentes tipos de combustível.

As entradas, as saídas e as alterações de cada aba serão detalhadas no capítulo 4 do presente trabalho.

Capítulo 2 - SISTEMAS DE PROPULSÃO

Sistema de propulsão é uma tradução do termo em inglês “*powertrain*” que abrange todo o conjunto de órgãos que desenvolvem e transmitem a força motriz, desde o motor até chegar às rodas do veículo. [14]

Esse capítulo mostra os sistemas que foram selecionados para o estudo de caso do caminhão de coleta, assim como suas características, seguindo os critérios descritos nesse capítulo.

2.1 Conceitos Importantes para a Seleção

Para obter maior clareza no desenvolvimento do trabalho, alguns conceitos básicos serão explicados. Os termos citados têm influência direta na escolha de sistemas de propulsão específicos.

2.1.1 Sistema de Frenagem Regenerativa

No sistema convencional de frenagem, a energia cinética do veículo é dissipada por atrito entre a pastilha de freio e o disco. Com o objetivo de aproveitar parte dessa energia, utiliza-se o sistema regenerativo de freio nos veículos que possuem motor elétrico.

Nesse sistema, quando o pedal de freio é acionado, o motor elétrico oferece resistência ao sistema de transmissão, funcionando como um gerador. Assim, a energia cinética do veículo é convertida em energia elétrica, que é armazenada no banco de baterias.

2.1.2 Análise dos Dispositivos de Armazenagem

Para seleção de dispositivos de armazenagem de energia, é importante analisar duas propriedades desses. São elas:

- Densidade de Energia

É a energia armazenada por unidade de peso de um dado acumulador de energia [15]

- Densidade de Potência

É a potência requerida por unidade de peso em um dado acumulador de energia [15].

A figura 1 apresenta o diagrama de Ragone. Esse gráfico relaciona densidade de energia com densidade de potência de alguns dos principais acumuladores de energia.

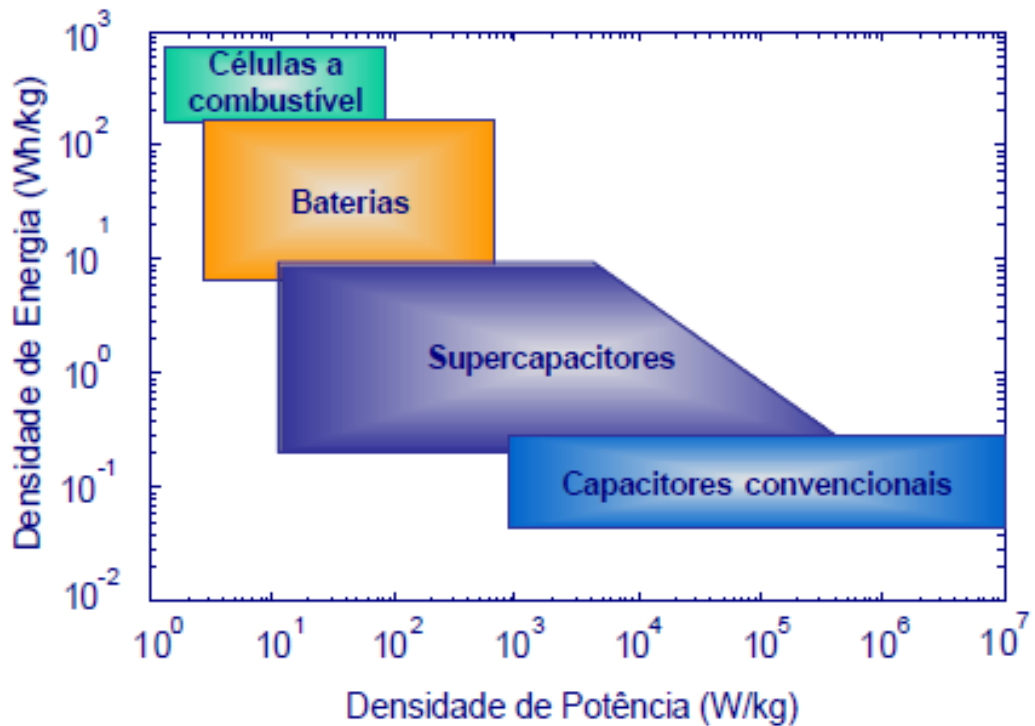


Figura 1 – Diagrama de Ragone [16]

De acordo com o Diagrama de Ragone da figura 1, os capacitores convencionais apresentam maior densidade de potência, sendo mais rápidos para transferir energia, porém não acumulam energia suficiente, em termos de massa e volume, para minimizar o impacto das variações bruscas de potência de um veículo. [15]

Para o presente trabalho, foi selecionado um banco de baterias como acumulador principal para veículos elétricos por apresentar uma relação adequada de densidade de potência e densidade de energia, além de ser uma tecnologia mais desenvolvida e mais barata em relação às Células a Combustível (CaC). [9]

2.2 Arquiteturas selecionadas para serem simuladas

Para propor mudanças, deve-se analisar inicialmente a estrutura original. Por isso, a primeira composição a ser estudada será o caminhão com motor de combustão interna (Ciclo Diesel) tendo diesel como combustível e sem nenhum método de regeneração na frenagem.

Considerando-se o uso de energia obtida através de resíduos, será testada também, essa estrutura de veículo, mas com outro combustível, o biogás, que será gerado a partir de Estações de Tratamento de Esgoto.

Depois, visou-se diminuir a poluição do ar e a sonora, o que é muito relevante já que as coletas são feitas, em sua maioria, no período da noite. Além disso, foi avaliada uma solução para reaproveitar a energia na frenagem, que é dissipada em veículos com motor de combustão interna (MCI). Para isso, foi proposto um veículo totalmente elétrico. O tipo de acumulador energético principal escolhido foi a bateria, como foi discutido no item anterior.

Para os veículos puramente elétricos ou aqueles que usem a energia elétrica como uma de suas fontes, essa poderia ser produzida na própria ETE ou comprada na rede. Esses veículos apresentam maior aproveitamento da energia, devido ao maior rendimento do motor elétrico THOMAS[8].

Além disso, veículos puramente elétricos ou que demandam eletricidade como uma de duas fontes são importantes tecnologias do ponto de vista do consumo de energia. Suas baterias podem ser recarregadas na rede elétrica, utilizando energia fora do pico, aproveitando melhor a energia elétrica disponível, que é subutilizada durante parte do dia. Pode-se também diminuir a dependência por derivados de petróleo.

Por se tratar de um veículo de grande peso, fez-se necessário propor ainda formas de aproveitar a energia elétrica sem deixar de utilizar o diesel ou o próprio biogás. Assim, foram selecionados veículos híbridos e *plug-in* (as características específicas de cada um serão detalhadas no próximo item desse capítulo.)

Para tal seleção, porém, foi necessário definir entre híbridos (ou *plug-in*) em série ou em paralelo. Por se tratar de veículos de grande porte submetidos a ciclo tipicamente urbano, foi selecionado o tipo “em série”, pois esse possui rendimento maior nessas condições, quando comparado com os veículos “em paralelo”. [9]

Essas arquiteturas veiculares também atenuam uma grande desvantagem apresentada pelos veículos puramente elétricos, que é o deficiente armazenamento eletroquímico de energia. Quando comparadas a combustíveis convencionais, suas baterias apresentam baixa energia específica em termos de volume e massa e baixa taxa de reabastecimento por recarga, pois a bateria consome bastante tempo para completar a sua recarga e voltar a ser utilizada. [9] Já os *plug-in* apresentam tanto esse armazenamento eletroquímico quanto podem usar combustíveis convencionais, enquanto o híbrido já não tem essa bateria.

Por fim, foi proposta uma mudança simples em relação à composição original. Trata-se de utilizar o motor Diesel normal do caminhão, tendo como combustível o próprio diesel ou o biogás, enquanto o compactador seria alimentado por um motor elétrico funcionando de forma *plug-in*, ou seja, o motor elétrico poderia ser alimentado por uma bateria ou pelo motor de combustão interna do caminhão. Essa composição economizaria uma quantidade de diesel que seria gasta no compactador, além de o ruído ser diminuído, pois agora o compactador passaria a ser elétrico.

A tabela 1 mostra todos os sistemas de propulsão simulados nesse trabalho, assim como suas fontes de energia. A descrição detalhada de cada sistema de propulsão será feita no item seguinte.

Tabela 1 – Sistemas de Propulsão Propostos e Fontes de Energia Avaliadas

Sistema de Propulsão	Fonte de Energia
Motor de Combustão Interna	Diesel ou Biogás
Veículo Elétrico à Bateria	Energia elétrica da Rede ou Energia elétrica gerada por Biogás
Híbrido Elétrico em Série	Diesel ou Biogás
<i>Plug-in</i> em Série	Diesel ou Biogás (Motor de Combustão), Energia Elétrica da Rede ou do Biogás (Motor Elétrico)
Motor de Combustão Interna, utilizando um compactador <i>Plug-in</i>	Diesel ou Biogás (Motor de Combustão), Energia Elétrica da Rede ou do Biogás (Motor Elétrico exclusivo para o Compactador)

2.3 Descrição das arquiteturas veiculares selecionadas

Esse item tem como finalidade fornecer a descrição detalhada de cada um dos sistemas de propulsão selecionados. São eles: motor de combustão interna, veículo elétrico à bateria, híbrido elétrico em série, *plug-in* em série e veículos com motor de combustão interna, utilizando um compactador *plug-in*.

2.3.1 Veículo com Motor de Combustão Interna

O automóvel com motor de combustão interna (MCI) é composto basicamente de um tanque de combustível, um motor de combustão interna e um sistema de transmissão responsável por acionar as rodas do veículo.

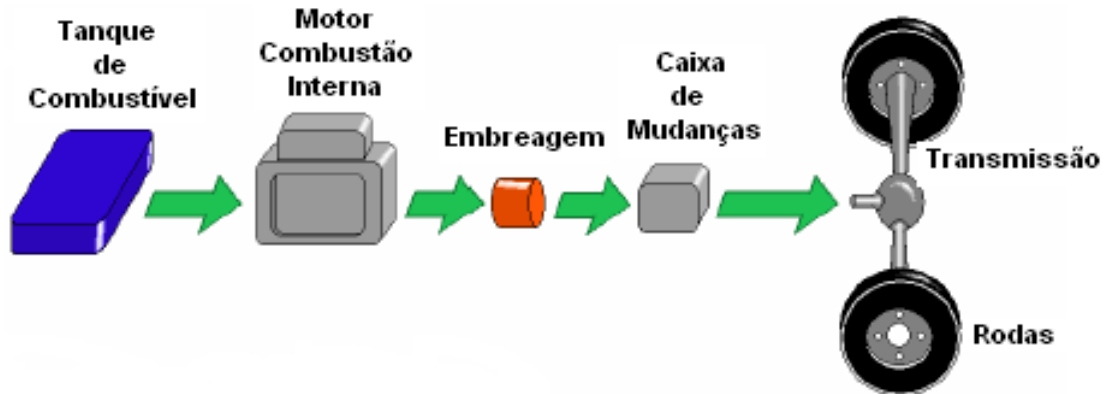


Figura 2 – Plataforma para veículos a combustão interna [17]

Representa o mais tradicional sistema de propulsão. Os principais tipos de MCI são:

2.3.1.1 Motor Otto

O ciclo Otto Ideal consiste em quatro etapas que podem ser observadas na figura 3. São elas: [18]

AB – Compressão adiabática;

BC – Grande elevação da pressão a volume constante (expansão isocórica);

CD – Expansão adiabática;

DA – Grande diminuição de pressão a volume constante (compressão isocórica).

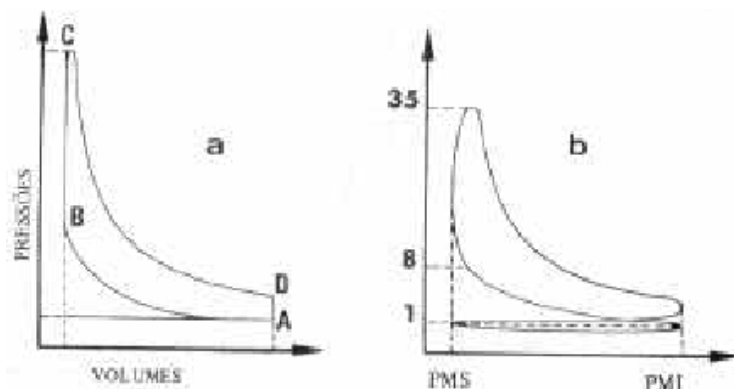


Figura 3 – Diagramas do ciclo Otto (a) Teórico (b) Real [19]

Os motores Otto possuem as seguintes características: [18]

- i) A admissão de combustível é feita por injeção ou carburação;
- ii) Apresentam mistura ar-combustível dentro do pistão;
- iii) Em geral, apresentam ignição por centelha;
- iv) Taxa de compressão de 6 a 9 para gasolina e de 9 a 14 para álcool;
- v) Há desperdício de combustíveis na lavagem dos anéis;
- vi) Utilizam combustíveis com volatilidade adequada, como gasolina, álcool e GNV.

Deve-se destacar também que a taxa de compressão é característica do motor e não do combustível. Porém, existe uma relação entre a taxa de compressão obtida pelo motor e a capacidade de o combustível resistir ao aumento de pressão sem entrar em combustão, que é medida pela sua octanagem. Tendo-se um veículo bicombustível, seu motor será projetado para uma relação de compressão que possa atender ambos, sem grandes perdas de eficiência.

2.3.1.2 Motor Diesel

O ciclo Diesel Ideal é composto pelas seguintes etapas, como pode ser visto na figura 4.a:

- AB – compressão adiabática do ar puro aspirado antes;
- BC – combustão em pressão constante (isobárica);
- CD – expansão adiabática;
- DA – grande queda de pressão (isocórica).

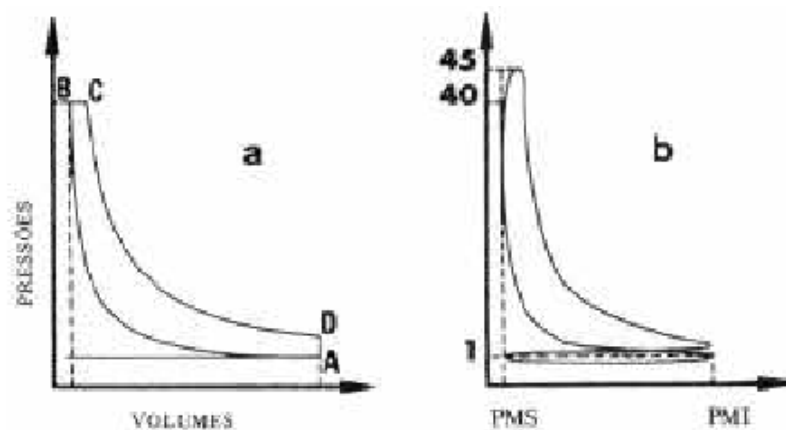


Figura 4 – Diagrama do ciclo Diesel (a) Teórico (b) Real [18]

Os motores Diesel possuem as seguintes características: [19]

- i) Admissão de combustível por injeção;

- ii) Alteração de rotação é feita pela entrada de combustível;
- iii) Ignição por compressão;
- iv) Taxa de compressão entre 14 e 22;
- v) Utilizam, em geral, combustíveis destilados médios como o diesel;
- vi) Podem ser de 2 ou 4 tempos.

A eficiência do motor está muito atrelada à razão de compressão. Os motores Diesel podem operar em uma relação de compressão maior do que um motor Otto, porque, em um motor de ignição por centelha, comprime-se a mistura ar-combustível, e a detonação antecipada se torna um grande problema se for usada elevada razão de compressão. [19] Assim, em geral, o motor Diesel terá um rendimento maior, trabalhando em condições semelhantes de temperatura e pressão máximas.

Além disso, o rendimento do MCI varia de acordo com o tamanho e peso do veículo e com o tipo de utilização desse, representado por seu ciclo de direção. A eficiência encontrada no presente trabalho tende a ser mais baixa do que motores funcionando em rotação constante, por se tratar de um veículo muito pesado com grande número de paradas e fortes acelerações [9].

MCI é o tipo mais utilizado tanto para automóveis leves, geralmente ciclo Otto, enquanto para veículos de grande porte, como caminhões e ônibus, sendo, em sua grande maioria ciclo Diesel.

Veículos pesados podem ser convertidos para usar apenas gás natural, mas, em muitos casos, motores duais são preferidos. Um motor Dual usa um sistema de injeção de diesel e o gás sofre ignição por injeção de pequenas quantidades de diesel. Esses motores requerem menos mudanças, além de manter a dirigibilidade do veículo a diesel. Porém, a emissão de gases poluentes não é tão menor quanto a do veículo movido a metano e a tecnologia do motor deve envolver ignição por centelha e motor diesel. [6]

Várias pesquisas atualmente têm por finalidade viabilizar o uso de álcool e GNV em motor a ciclo Diesel. Por esses serem menos poluentes, seriam alternativas de complementos ou até mesmo de substitutos ao diesel. Alguns desafios dessa alteração são: [20]

- Aumento da corrosão, devido à presença de cloretos, acetatos e água do etanol. A solução são redutores, aumentando os custos;
- Baixa cetanagem (entre 5 e 15 para álcool), o que provoca grandes atrasos na ignição desse tipo de motor. A solução são aditivos promovedores de

cetano e lubrificantes. Os aditivos, porém, podem produzir óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos carcinogênicos.

Para caminhões de coleta típicos, tem-se comumente um veículo que usa diesel como combustível, que é responsável por alimentar também o compactador que, por sua vez, é acionado várias vezes durante o ciclo e é responsável por consumir uma parcela da energia.

Um estudo importante sobre tipos de acumuladores para caminhões de coleta a diesel foi realizado por CHAVES [15]. As conclusões desse estudo são:

- a) O acumulador de energia mais viável na relação custo x benefício para essa configuração é um acumulador hidráulico, a pistão, sendo utilizado em frenagem regenerativa;
- b) A eficiência desse aproveitamento está em torno de 70% da energia da frenagem;
- c) A adição desse acumulador acarreta em redução de até 17% do consumo de diesel;
- d) Houve aumento do ruído, porém.

Essas conclusões são importantes para o presente estudo, pois possibilitam a comparação dos resultados aqui apresentados com o resultado de uma outra alternativa de economia de energia. O ciclo de condução escolhido no presente trabalho é o mesmo em que o caminhão diesel/hidráulico foi testado, e os caminhões são semelhantes, sendo assim, a comparação do ponto de vista energético pode ser feita sem grandes problemas.

É importante ressaltar que um dos objetivos desse trabalho é diminuir a poluição sonora, sendo assim, o aumento do ruído no caso acima é um resultado consideravelmente negativo, o que mostra que essa configuração não é a mais adequada para solucionar esse problema.

2.3.2 Veículo elétrico à bateria

Os veículos elétricos à bateria tem como fonte de energia elétrica a bateria, que por sua vez, é recarregada quando conectada à rede elétrica.

Na figura 5, é apresentado um esquema simplificado da plataforma veicular de um veículo elétrico à bateria.

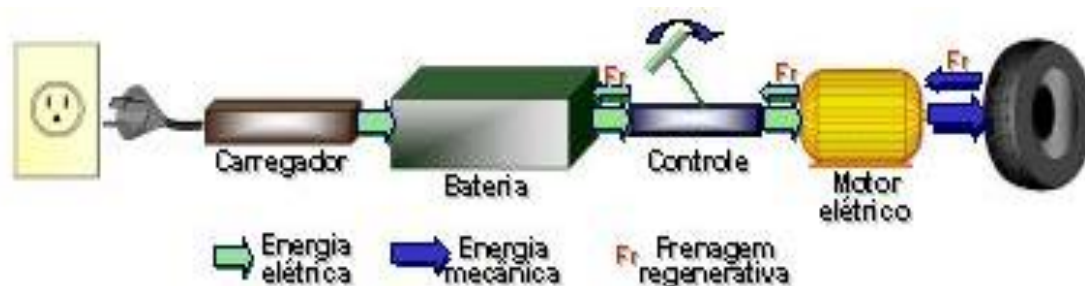


Figura 5 – Plataforma para veículos elétricos à bateria [13]

Conectado ao banco de baterias através de um conversor eletrônico de potência, existe um motor elétrico que também pode atuar como gerador. Sendo assim, em situação de desaceleração, parte da energia que seria dissipada nos freios convencionais em forma de calor, pode ser aproveitada para recarregar o banco de baterias e, com isso, aumentar um pouco sua autonomia.

O desenvolvimento tecnológico das baterias permite que o veículo elétrico tenha um baixo custo por quilômetro rodado, o que pode ser comprovado no estudo de casos do presente trabalho. Porém, a autonomia da bateria é bastante reduzida quando comparada a do veículo utilizando um motor de combustão interna. Como exemplo, tem-se o Fiat Palio Weekend Elétrico que apresenta uma autonomia de 120 km, enquanto a autonomia do Fiat Palio Weekend 1.4 Flex ICV é de 450 km. [14]

Assim, o principal desafio para a tecnologia atual se encontra na fabricação das baterias com energia específica suficiente para equiparar sua autonomia com a dos MCI.

O tipo de bateria influencia muito no funcionamento do veículo elétrico. Por isso, no próximo item desse capítulo serão discutidos os tipos de baterias mais utilizados e algumas de suas características.

2.3.2.1 Seleção do tipo de bateria

A seleção do tipo de bateria é um dos fatores mais importantes para definição da vida útil, densidade de energia e de potência, além da autonomia do veículo elétrico. O Diagrama da figura 6 apresenta a potência específica e a energia específica de alguns tipos de bateria, e compara esses parâmetros com os de um supercapacitor, que é outro tipo de acumulador de energia. A tabela 2 mostra um resumo dos principais tipos de bateria, comparando tópicos importantes.

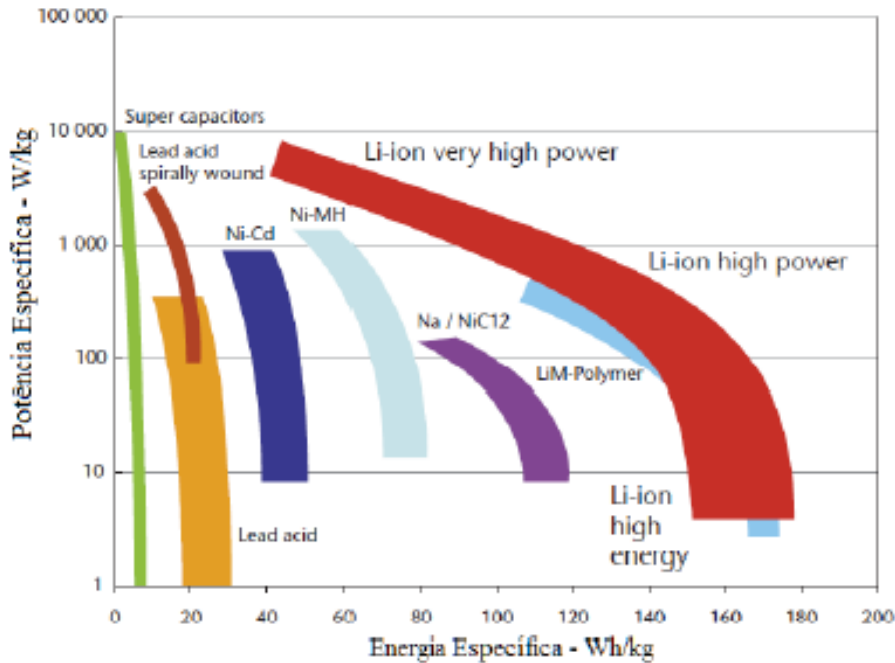


Figura 6 – Diagrama de Ragone para os principais tipos de Bateria [16]

Tabela 2 – Características dos principais tipos de bateria

	Pb	Ni-Cd	Ni - Mh	Li – Ion
Custo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Energia Específica (Wh/kg)	30-50	50-80	40-100	160
Corrente de Carga	Baixa	Muito Baixa	Moderada	Alta
Número de Ciclos	200-500	1000	1000	1200
Autodescarga por mês (% total)	Baixa (5%)	Moderada (20%)	Alta (30%)	Baixa (10%)
Tempo Mínimo de Recarga (h)	8-16	1-1,5	2-4	2-4

Fonte: BORBA [9]

As vantagens e desvantagens de cada bateria são:

a) Baterias de chumbo-ácidas (Pb)

Essas baterias são as mais difundidas, por serem mais baratas e de fácil manutenção. Porém, apresentam menor energia específica e potência específica e são muito poluentes, além de permitir menor autonomia para o veículo. Assim, não são soluções muito recomendadas para um veículo elétrico.

b) Baterias de Níquel-Cádmio (Ni-Cd)

As baterias Ni-Cd apresentam energia e potência específicas superiores às das baterias de chumbo-ácidas, além de a vida útil ser mais elevada. Porém, não são ainda tão satisfatórias para serem usadas em um veículo elétrico. [9]

Outra desvantagem se deve ao fato de o Cádmio ser uma substância potencialmente cancerígena. Assim, a aplicação dessa bateria para alimentação de veículos não é atrativa.

c) Baterias de Hidreto Metálico de Níquel (Ni-Mh)

Para atenuar os problemas da bateria Ni-Cd, o Cádmio foi substituído por uma liga metálica com hidrogênio. Assim, obteve-se uma bateria com densidades de potência e energia superiores à anterior, além de ter uma vida útil muito próxima, em torno de 1000 ciclos.

Esse tipo de bateria tem sido muito utilizado em veículos elétricos por apresentarem melhores características além de ser uma tecnologia mais desenvolvida. [9]

Sua grande desvantagem é o preço. O custo de aquisição desse tipo de bateria é da ordem do dobro do preço da bateria Ni-Cd. [9]

d) Baterias de Íon de Lítio (Li-Ion)

Esse tipo de bateria apresenta maiores densidade de potência, de energia e vida útil do que todos os tipos de bateria citados anteriormente. É considerado o tipo de bateria mais promissor por apresentar, além das características já citadas, uma baixa taxa de auto-descarga, que é a quantidade de carga perdida pela bateria quando esta não está sendo usada, e ausência do efeito de memória, no qual a bateria perde capacidade

ao ser recarregada. Além disso, seus custos de fabricação tendem a se reduzir devido à produção em massa e ao desenvolvimento de materiais nano-estruturados (THOMAS[8], BORBA[9]).

Como desvantagens, as baterias Li-Ion necessitam de um sistema de carga preciso, devido à sua reduzida tolerância a picos de potência, e são ainda relativamente caras.

Para o estudo de caso, foram selecionadas as baterias de Li-Ion por serem as consideradas com maior potencial de desenvolvimento. [9]

2.3.3 Veículo Híbrido em Série (Combustível e Bateria)

Algumas possíveis soluções foram apresentadas para resolver a baixa autonomia dos veículos elétricos à bateria, aproveitando ainda a energia dissipada nas desacelerações através da frenagem regenerativa.

Veículos híbridos, por definição, são aqueles que possuem mais de um motor de propulsão. Para o presente trabalho, foi selecionado o híbrido mais comum que apresenta motor de combustão interna e motor elétrico.

Híbridos em série possuem baixa eficiência em altas rotações, sendo recomendados para veículos de grande porte e não sujeitos a velocidades elevadas. [9] Essa configuração é ideal para ciclos urbanos devido ao uso da parte elétrica em conduções de cidade, enquanto seria necessário o uso da cadeia completa em viagens mais longas, acarretando maiores perdas na transmissão.

Os veículos elétricos híbridos em série apresentam um tanque, que alimenta com combustível um motor de combustão interna tradicional, mas de menor porte. A energia mecânica gerada por esse vai para um gerador, onde se transforma em energia elétrica, essa energia elétrica segue para um motor elétrico onde, novamente, é convertida em energia mecânica, podendo assim, ser transmitida para as rodas.

Assim como os veículos elétricos à bateria, nas frenagens, o motor elétrico serve como conversor, armazenando a energia, que antes era perdida, na bateria.

Na figura 7, pode ser visto um esquema simplificado da plataforma veicular para híbridos elétricos em série.



Figura 7 – Plataforma Veicular de Híbridos Elétricos em Série [13]

O grande diferencial da estrutura híbrida é que o motor elétrico pode funcionar com alto rendimento a baixas rotações, substituindo, com vantagem, o motor de combustão interna na região em que este apresenta baixo rendimento energético. Assim, o MCI pode atuar na região ótima, diminuindo o consumo específico e aumentando a autonomia do veículo. [9]

A figura 8 tem a função de ilustrar esse funcionamento. À esquerda, tem-se a região de operação do MCI, submetido a um ciclo de condução tipicamente urbano para um veículo convencional enquanto à direita, tem-se a região de operação do MCI de um veículo híbrido completo sendo utilizado em situação semelhante ao primeiro.

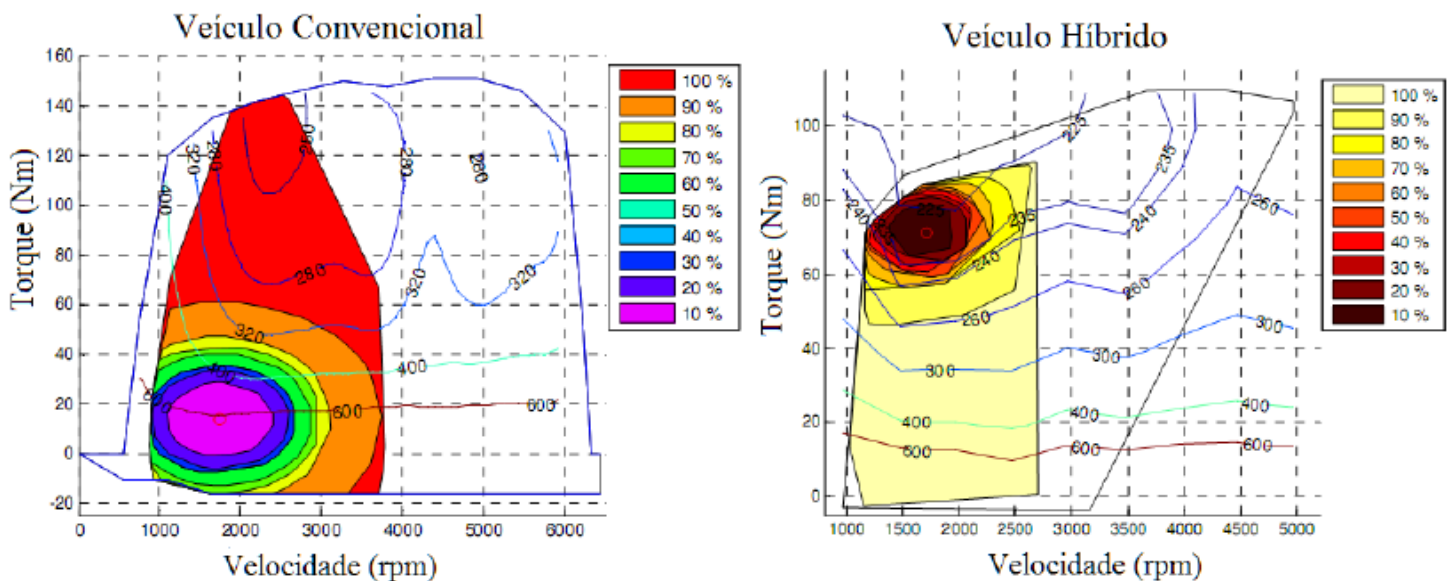


Figura 8 – Pontos de operação de um MCI em um veículo convencional e em um veículo híbrido completo em condições semelhantes [21]

Assim, pode-se perceber que no veículo híbrido o MCI operou muito mais tempo com o torque mais elevado, numa condição de maior eficiência, enquanto o motor de combustão interna do automóvel convencional funcionou a maior parte do tempo em uma zona de baixo rendimento.

Para um veículo híbrido em série completo, pode-se obter uma economia de energia de 30 a 40% em ciclos urbanos, sendo o seu custo de aquisição 30 a 40% maior que os veículos convencionais. [9]

2.3.4 Veículo *Plug-In* em Série

Outra opção para aumentar a autonomia e manter a economia de energia através da frenagem regenerativa é o veículo *plug-in* em série.

Esse veículo apresenta modos de funcionamento diferenciados dependendo do nível de bateria e objetivos do usuário, como maior eficiência ou menor custo. Os principais modos são os seguintes [21]:

- Modo de Sustentação de Carga (*Charge-Sustaining mode – CS*)

Nessa configuração, o estado de bateria é controlado para permanecer dentro de uma faixa de funcionamento. Essa faixa depende do tipo de bateria e de configurações do próprio automóvel, tendo como valores possíveis o intervalo de 30 a 45%. Nele, o estado de carga da bateria não se altera significativamente com o tempo, sendo o MCI o principal alimentador do veículo. Geralmente, mantém-se o nível de bateria no mínimo para evitar danos e redução de número de ciclos de recarga dela.

- Modo de Depleção de Carga (*Charge-Depleting mode – CD*)

Nessa forma, o estado de bateria é controlado para diminuir durante o funcionamento do veículo. Nesse modo, a bateria é a principal fonte de energia. O estado da carga do banco de bateria oscila, chegando até determinado limite inferior. Nesse instante, o banco de baterias precisa do auxílio do motor de combustão interna para atender às solicitações do condutor. Nesse modo, o desgaste da bateria é consideravelmente maior, podendo diminuir a vida útil da bateria.

- Modo Veículo Elétrico

Funcionando dessa forma, o *Plug-In Série* opera como um veículo puramente elétrico, sendo alimentado exclusivamente pela bateria e tendo a conversão de combustível impedida.

- Modo Motor de Combustão Interna

Nesse modo, o *Plug-In Série* opera como um veículo convencional MCI. O sistema de tração elétrica não fornece potência para o funcionamento do veículo.

A figura 9 ilustra a diferença entre os modos CD e CS de funcionamento de um veículo *plug-in*.

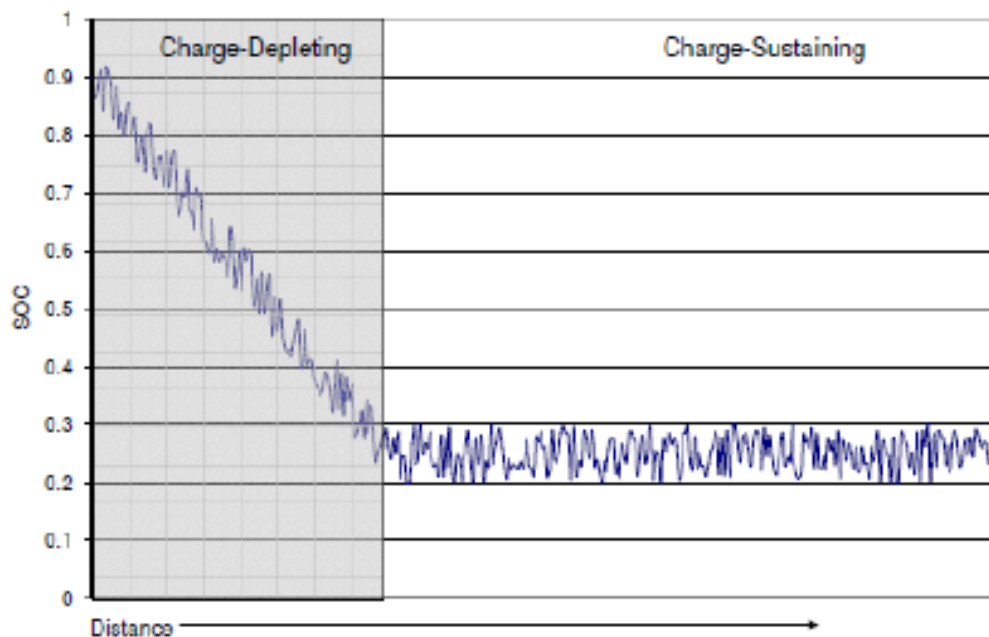


Figura 9 – Funcionamento em CD e em CS do *Plug-In Série* [21]

Enquanto no modo CD, a bateria é controlada para perder carga com o deslocamento, no modo CS, a bateria é controlada para se manter em um determinado nível.

Fazendo uso de uma combinação dos quatro modos de gerenciamento de energia, pode-se obter um funcionamento ideal para cada finalidade, destacando as seguintes combinações:

- Veículo Híbrido Elétrico *Plug-In* (PHEV) Extensor de Autonomia
Sua principal função é diminuir o gasto energético. Para isso, utiliza basicamente o modo de Veículo Elétrico e depois muda para o Modo de Sustentação de Carga, quando a carga da bateria fica reduzida.
- PHEV Zona Verde
Sua função é diminuir as emissões em determinadas regiões. Para isso, opera no Modo de Sustentação de Carga, mas pode ser controlado pelo usuário para funcionar no modo de Veículo Elétrico em determinadas regiões.

Para o estudo de caso do presente trabalho, optou-se por um PHEV Extensor de Autonomia.

Uma notação bastante usada para veículos *plug-in* é a PHEVX, onde “X” representa a distância em quilômetros que o automóvel é capaz de percorrer usando apenas o sistema de baterias, sem utilizar o motor de combustão interna. Para essa medição, considera-se que a bateria estaria completamente carregada no início do percurso, usando um ciclo de teste pré-definido. Para a maioria dos *plug-in*, a autonomia da bateria está entre 30 e 100 km [10]

É válido ressaltar que, para esse tipo de arquitetura, são necessários dois tipos de alimentação: Combustível para o tanque e energia elétrica para a bateria.

Na figura 10, é apresentado um esquema da plataforma de um veículo elétrico *plug-in* em série.



Figura 10 – Plataforma de um veículo elétrico *plug-in* em série [17]

2.3.5 Caminhão de Coleta de Lixo com Motor de Combustão Interna e Compactador *Plug-In*

Essa configuração é exclusiva para caminhões de coleta de lixo, pois apresenta a particularidade de o compactador funcionar como *plug-in*. Assim, o compactador teria um motor elétrico que poderia ser alimentado por uma bateria ou pelo motor de combustão interna do caminhão. Essa alteração do veículo a motor de combustão interna pode ser dividida em duas áreas:

- A primeira diz respeito ao funcionamento do caminhão em si, a propulsão do veículo é feita unicamente pelo MCI, da mesma forma que foi descrita para aquele tipo. Vale lembrar que nesse modelo a energia está sendo dissipada na frenagem, não havendo recuperação de energia;
- Já a segunda é exclusiva para o compactador, que funciona como *plug-in*. Enquanto a bateria estiver em um nível adequado para o funcionamento, o compactador utilizará exclusivamente a energia nela armazenada. Quando sair desse nível, o compactador irá consumir a energia do combustível, assim como nos caminhões de coleta tradicionais.

A tabela 3 apresenta uma síntese da motivação da seleção de cada sistema de propulsão:

Tabela 3 – Sistemas de Propulsão Propostos e Motivo da Seleção

Sistema de Propulsão	Motivo da Seleção
Motor de Combustão Interna	Sistema tradicional - comparação
Veículo Elétrico à Bateria	Diminuição do ruído e das emissões
Híbrido Elétrico em Série	Aumento da autonomia, mantendo relativa diminuição do ruído e das emissões
<i>Plug-in</i> em Série	Aumento da autonomia, mantendo relativa diminuição do ruído e das emissões
Motor de Combustão Interna, utilizando um compactador <i>Plug-in</i>	Aumento da autonomia, diminuição do ruído do compactador e maior número de caminhões atendidos por ETE

Capítulo 3 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO (ETE)

O segundo item a ser estudado é a fonte energética para propulsão do veículo. Serão utilizados energia elétrica, diesel e biogás como opções. Além disso, o biogás pode ser utilizado também na geração de energia elétrica em Estações de Tratamento de Esgoto – e a energia elétrica ser utilizada, então, na propulsão do veículo ou no compactador do lixo.

Será descrito nesse capítulo, o processo de tratamento de esgoto, de produção de biogás e as atividades em que ele pode ser empregado.

3.1 Processo de Tratamento de Esgoto

A água utilizada no dia-a-dia, depois de eliminada, passa a ser chamada de esgoto. A origem do esgoto pode ser doméstica, usada em atividades como tomar banho e lavar louça, pluvial, ou seja, originária da chuva, e industrial, como a água utilizada nos diversos processos nas indústrias. [5]

O esgoto é composto basicamente de 99,9 % de água e 0,1 % de sólidos. Desse material sólido, 70 % de materiais orgânicos, como proteínas, carboidratos e gorduras e 30 % de materiais inorgânicos, como metais, sais e areia. [5]

O tratamento adequado do esgoto é de grande importância. Ele evita a transmissão de uma variedade de doenças causadas pelo contato direto com o esgoto ou pelo contato com animais como ratos e baratas atraídos por ele. Além desses prejuízos à saúde pública, o esgoto, quando jogado sem o devido tratamento em rios ou em fontes, tem uma grande carga poluidora, afetando os recursos hídricos e a vida vegetal e animal. [5]

Os processos de tratamento têm o objetivo de diminuir o potencial poluidor do esgoto antes que ele retorne ao meio ambiente. De um modo geral, consiste em separar as partes líquidas das sólidas, presentes no esgoto, para tratá-las separadamente, reduzindo ao máximo a carga poluidora. O tratamento de esgotos se divide nessas duas fases e como resultado dos dois processos de tratamento têm-se o efluente líquido e o lodo, respectivamente. [5]

O efluente é a parte líquida com redução significativa dos poluentes. Após o tratamento, cerca de 90% das impurezas foram retiradas da água, permitindo, assim, que

o efluente possa ser lançado em corpos d'água sem causar maiores danos ambientais. Lá, o processo de purificação é continuado de forma natural e lenta. [5]

O lodo contém material sólido resultante do processo de tratamento de esgoto. Ele precisa ser tratado para destinação final em aterros sanitários ou na agricultura. O lodo é uma mistura complexa de matéria orgânica e mineral que é removida do esgoto. Sua composição e suas características podem variar bastante, dependendo da origem do resíduo e do processo de tratamento empregado. [5]

Assim, as ETE reproduzem, em menor escala e em intervalo de tempo menor, a capacidade natural que os cursos d'água têm de decompor a matéria orgânica. As bactérias aeróbias ou anaeróbias, que são os principais agentes de tratamento, encontram na ETE condições mais favoráveis e se reproduzem em grande escala, promovendo a degradação da matéria orgânica contida no esgoto. [5]

No entanto, o metano presente no biogás de esgoto é cerca de 23 vezes mais prejudicial para o meio ambiente do que o CO₂, em termos de seus impactos associados ao forçamento radioativo¹ (Mudanças Climáticas Globais), para um período considerado de 100anos [6]. Torna-se, portanto, muito importante o aproveitamento energético desse biogás, conciliando a geração de energia elétrica renovável com a questão do saneamento ambiental, através da redução dos gases de exaustão. [6]

A figura 11 mostra um esquema típico de uma ETE. Nela, os três principais subprodutos são aproveitados. O lodo pode ser usado como adubo, o biogás gerado desse lodo pode ser utilizado na geração de vapor e eletricidade, além do efluente que pode ser utilizado como água de reuso em indústrias ou despejado em leito d'água sem maiores consequências ambientais. Neste estudo, considera-se ainda a possibilidade de purificação e compressão do biometano para uso veicular, o que não está representado na figura.

¹ Forçamento radioativo é a perturbação no balanço entre as radiações solar incidente e infra-vermelho emergente que ocorre devido a mudança na concentração dos gases do efeito estufa

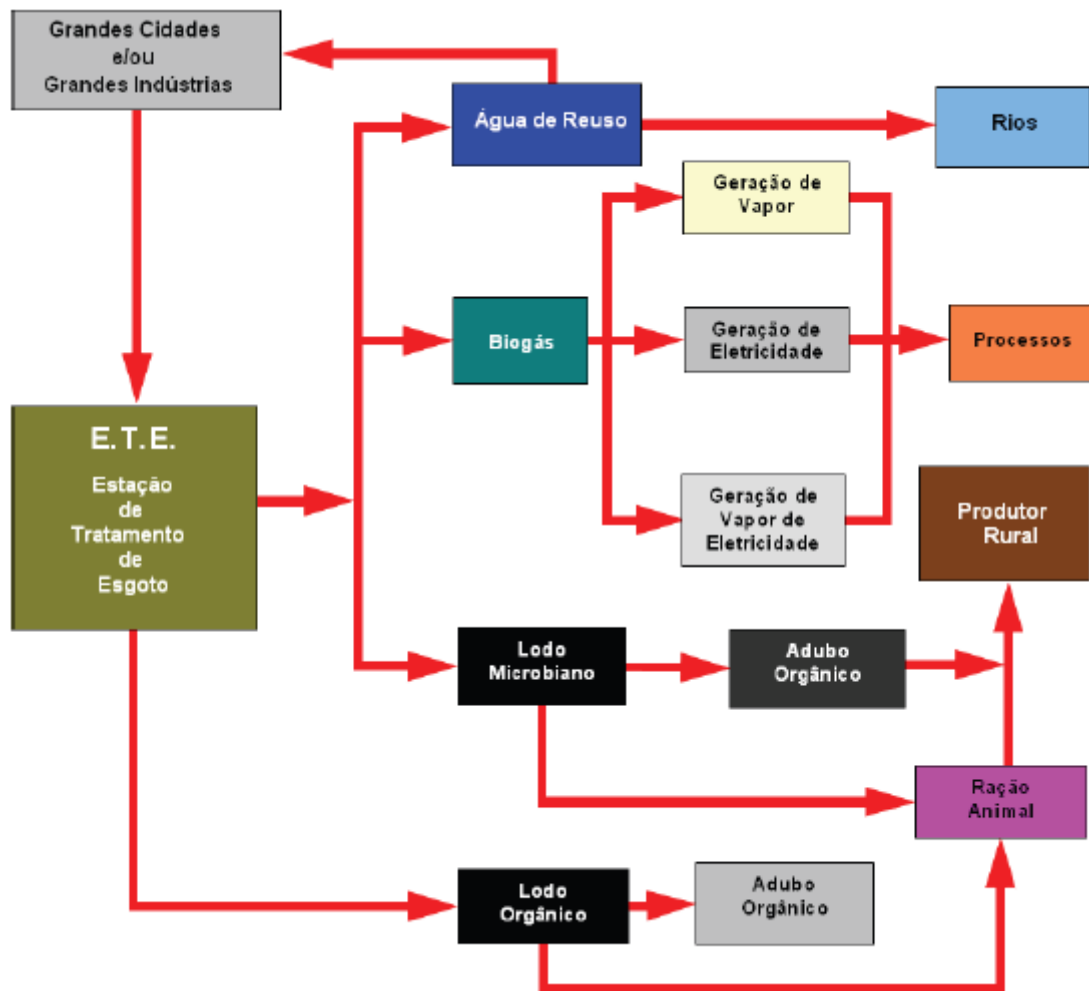


Figura 11 – Fluxograma de um sistema de aproveitamento de esgoto [5]

3.2 Produção do biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível, com maior concentração de metano. Nas estações de tratamentos de esgoto, ele é produzido a partir do lodo através da digestão anaeróbia, que consiste na biodegradação de matéria orgânica através da ação de bactérias na ausência de oxigênio. [6]

A produção de biogás também pode ser realizada através do processo aeróbico. Porém, os gastos energéticos, devido à necessidade de constante aeração, à menor capacidade de geração de biogás, assim como à necessidade de utilização de maior quantidade de lodo, fazem esse processo ser menos viável em relação à biodigestão anaeróbica. [5]

O processo de biodigestão anaeróbica do lodo ocorre em um biodigestor. Ele é um reator onde bactérias anaeróbicas realizam a digestão da matéria orgânica. Essa reação obtém o biogás e diminui a carga orgânica do lodo, permitindo que esse seja usado como fertilizante de forma segura. [6]

O biogás produzido deve passar por um processo de purificação, principalmente se for usado em um sistema de conversão em energia elétrica ou se for usado como combustível para veículos. A concentração de metano deve aumentar dos 50 a 75% obtidos pelo processo comum, para mais de 95%. Esse biogás com maior concentração de metano passa a ser chamado de biometano. [6]

Um parâmetro importante para analisar a capacidade de geração de energia de um combustível é o Poder Calorífico Inferior (PCI). O PCI é a entalpia da combustão, que indica a quantidade de energia líquida liberada na combustão, quando não se é possível recuperar a energia da reação exotérmica que vaporiza água formada na reação. Esse parâmetro é muito usado nos balanços energéticos.

De acordo com LIMA apud TAVARES [5], o poder calorífico do biogás depende da concentração de metano conforme a Figura 12.

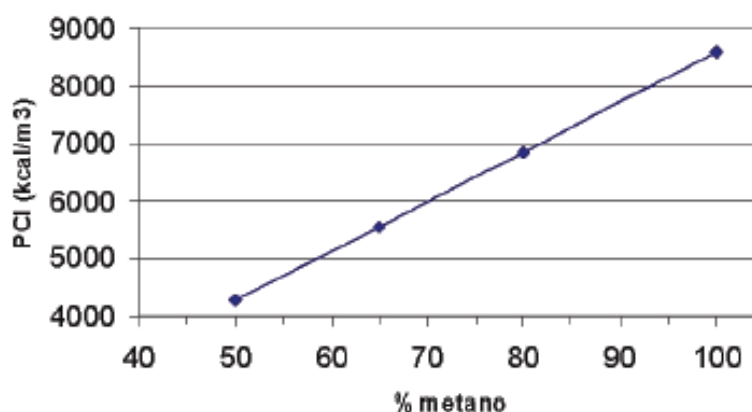


Figura 12- Poder calorífico inferior em função do percentual de metano [5]

O biometano usado no presente trabalho terá a função de gerar energia elétrica e de servir como combustível. Por isso, ele deverá passar por processos de purificação. Foi considerada, então, a concentração de 99% de metano, que apresenta PCI de aproximadamente 8500 kcal/m³.

Para maiores detalhes acerca da produção de biogás, vide [6].

3.3 Funções do biogás

O biogás gerado na ETE pode ser utilizado de três formas principais. Ele pode gerar vapor para o aquecimento do próprio biodigestor, diminuindo a dependência de energia externa da ETE. Pode também ser utilizado como combustível, necessitando de processos de purificação para exercer tal função. Finalmente pode ser queimado para a produção de energia elétrica.

A geração de eletricidade através do biogás pode ser feita em dois tipos principais de equipamentos: microturbinas e motores de combustão interna.

As características gerais desses equipamentos são:

Tabela 4 – Comparação entre Motor Otto e Microturbina [7]

	Potência	Eficiência Térmica	Emissões de NOx
Motores ciclo Otto	4kW – 1,54 MW	30% - 40%	250 ppm – 3000ppm
Microturbinas	30 kW – 1MW	24% - 28%	< 9 ppm

Na tabela 5, os principais tipos de equipamentos para geração de energia elétrica em ETE são relacionados com o custo dessa geração.

Tabela 5 - Dados de custo de capital para equipamentos de geração elétrica que usam biogás como combustível. [7]

Equipamentos	Valor (R\$/kW instalado)
Gerador Otto Nacional	1000
Gerador Diesel Nacional	2000
Gerador a Gás Importado	3000
Micro-Turbina	3500
Turbina a Gás	2500

Como se depreende, os menores custos de geração por kW são obtidos em motores, especialmente o motor Otto com combustível nacional.

Alguns dos fabricantes e modelos de motores projetados especificamente para biogás disponíveis no mercado brasileiro são:

- General Electric, linha Pro2, potências desde 637kW até 2.723kW; [22]
- Branco, modelos B4T-5000 Bio e B4T-10.000 Bioflex, com potências de 3,6kVA e 8 kVA respectivamente [23];

- Caterpillar, diversos modelos com potências de 80, 83, 129, 133, 205, 215, 962, 1287kVA [24] .

Outra alternativa seria adaptar um motor ciclo Otto a gasolina ou a gás natural para trabalhar com 100% de biogás. Este procedimento é muito usado para potências pequenas. As modificações devem ser desenvolvidas basicamente no sistema de alimentação de combustível. Também é importante um projeto apropriado do carburador, cuja geometria permita minimizar as perdas de pressão e manter a relação ar-combustível adequada [21]. Finalmente, também é possível:

1. adaptar um motor ciclo Diesel para trabalhar com 100% de biogás [21];
2. adaptar um motor ciclo Diesel para trabalhar em ciclo *dual fuel*, isto é uma mistura de diesel e biogás. Entre 8 – 10% de diesel é injetado como combustível piloto para a ignição.

Na tabela 6, têm-se as variadas composições de um motor de combustão interna, relacionando isso com o intervalo de potência disponível de cada equipamento e sua eficiência.

Tabela 6 - Faixas de potência e eficiências nos quais podem ser encontrados equipamento de geração elétrica usando biogás [22,23,24]

Tecnologia	Potência de Equipamentos no Mercado (kW)	Eficiência (%)
MCI Otto gasolina adaptado para biogás	0,5-10	20-25
MCI Otto projetado para biogás	4-2700	20-30
MCI Otto GNV adaptado para biogás	20-4800	20-30
MCI Diesel Dual Fuel (biogás e diesel)	300-1000	28-33
MCI Diesel Ottolizado	100-500	28-35

A relação entre energia consumida e energia gerada é um importante parâmetro para analisar a viabilidade de produção de energia em motores. Na figura 13, tem-se um gráfico relacionando essas variáveis. Dele, pode-se concluir que motores de menor potência apresentam maior relação de energia consumida por energia gerada. Assim, motores com potências maiores seriam mais interessantes para o presente trabalho.

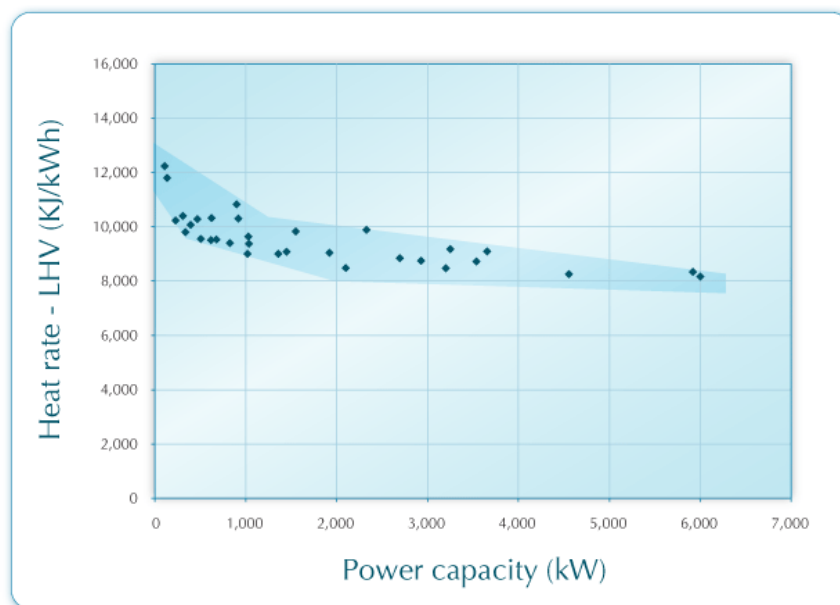


Figura 13 - Taxa de calor para motores – PCI. Potências menores a 6MW. [25]

TAVARES [5] fez um estudo sobre a viabilidade da utilização de microturbinas e motores de combustão interna a ciclo Otto para geração de energia na ETE da Sabesp em Barueri (São Paulo), utilizando tecnologia comercialmente disponível. Ambos os equipamentos com potência de 30 kW. Os resultados podem ser observados na tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre MCI e Microturbina de 30kW [7]

	Motor ciclo Otto 30 kW	Microturbina 30 kW
Energia elétrica média gerada	25 kW	25 kW
Energia elétrica líquida entregue à rede	25 kW	19,5 kW (perdas compressor e secador)
Custo dos Equipamentos	R\$ 68 000,00	R\$151 046,40
Custo O&M para vida útil de 40000h	R\$ 25 816,00	R\$ 96 806,00
Custo por kWh instalado	R\$ 0,10/kWh	R\$ 0,32/kWh

Como vantagens, as microturbinas apresentam:

- Dimensões reduzidas e simplicidade de instalação;
- Baixos níveis de ruído e vibrações;
- Menor índice de emissões.

As microturbinas apresentam as seguintes desvantagens:

- São equipamentos importados, necessitando de um elevado investimento inicial;
- Possuem baixo rendimento (eficiência de 1ª Lei), aproximadamente 27%;
- Necessita de um sistema rígido de limpeza do biogás e remodelação da microturbina para a sua queima, devido ao baixo poder calorífico do biogás.

Para o presente trabalho, foi considerada a utilização de um motor ciclo Otto de 30 kW na geração de energia elétrica a partir do biogás, pois esse apresenta menores custos e outras facilidades que viabilizariam mais a instalação do equipamento por parte da ETE, apesar de ter uma relação de energia consumida por energia produzida maior que os motores de grande porte

Capítulo 4 – PROGRAMA PARA SIMULAÇÃO

Para avaliar as alterações do sistema de propulsão e de combustível propostas no capítulo anterior, serão feitas simulações com essas alterações. Para isso, foi adaptado e utilizado o modelo PAMVEC. Esse capítulo apresenta o programa modificado neste estudo para simulação de diferentes arquiteturas veiculares para caminhões de lixo. Suas características, suas entradas e saídas, assim como as alterações feitas pelo presente trabalho serão apresentadas em detalhes a seguir.

4.1 A FERRAMENTA PAMVEC (*PARAMETRIC ANALYTICAL MODEL OF VEHICLE ENERGY CONSUMPTION*)

O PAMVEC foi desenvolvido por Andrew G. Simpson para sua tese de Doutorado na Universidade de Queensland, Austrália. Essa ferramenta tem se mostrado bastante versátil em análises de veículos convencionais, elétricos e híbridos. [13]

Para o presente trabalho, foram feitas alterações operacionais, facilitando o uso dessa plataforma, além da inclusão de arquiteturas veiculares não contempladas pelo trabalho inicial.

A figura 14 ilustra a metodologia de cálculo do PAMVEC.

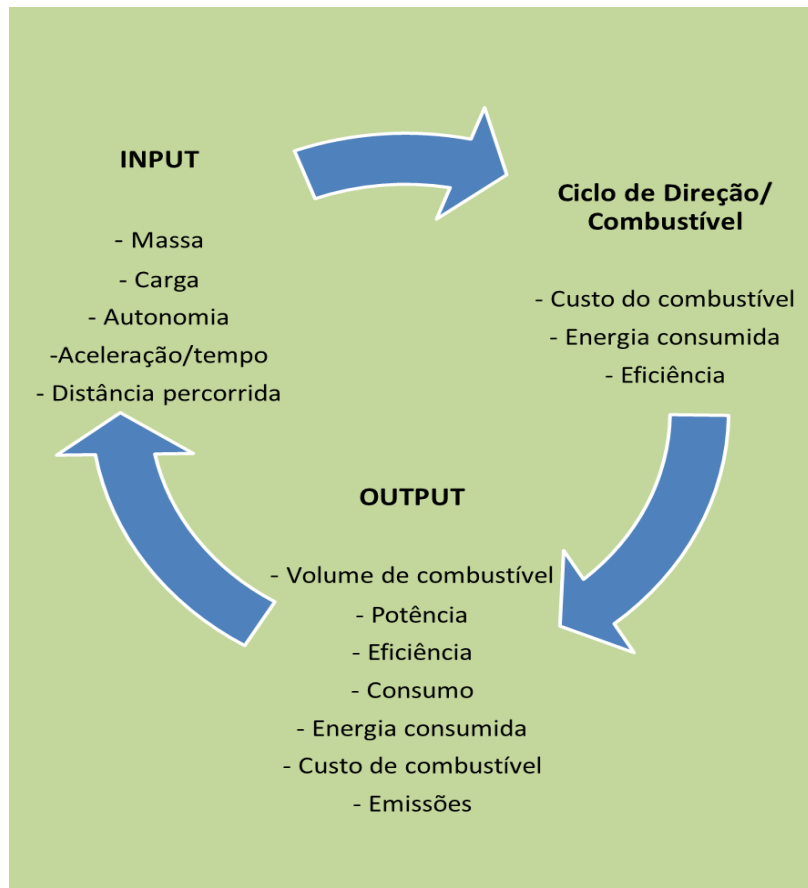


Figura 14 – Modelo ilustrativo da rotina de cálculo do PAMVEC [10]

Para cada arquitetura veicular, são calculados a potência necessária para o acionamento do veículo, a eficiência do sistema de propulsão, o consumo de combustível e a energia total consumida a partir das entradas relacionadas ao próprio veículo e relacionadas ao meio externo em que o veículo fará parte.

As entradas particulares do veículo são sua massa, a energia consumida por seus acessórios, a autonomia desejada, a aceleração que se deseja imprimir por um intervalo de tempo e as eficiências do motor utilizado, do sistema de recarga, entre outros.

Já as entradas relacionadas ao ambiente externo são a distância total percorrida diariamente, o custo dos combustíveis e o ciclo de direção ao qual o veículo está submetido.

4.2 A interface do PAMVEC e as alterações feitas

Para apresentar melhor o PAMVEC, esse item mostra cada aba disponível e as opções nelas acessíveis.

4.2.1 A tela Inicial

A figura 15 apresenta a tela inicial do PAMVEC modificado¹

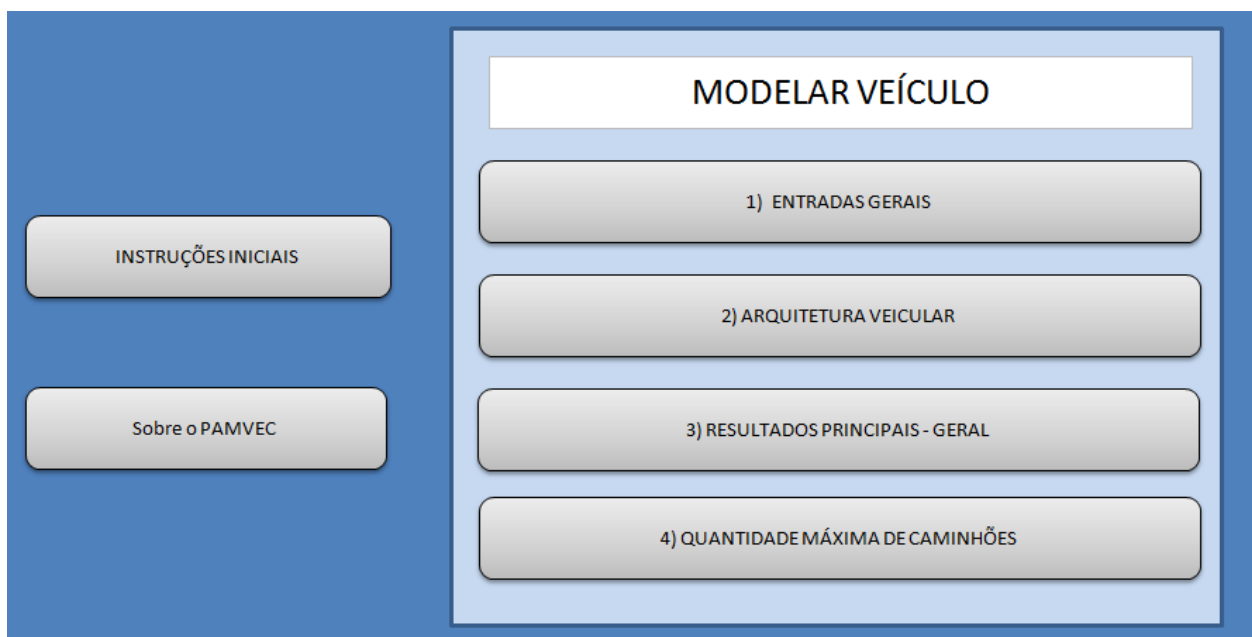


Figura 15 – Tela inicial do PAMVEC modificado

Essa tela foi programada a partir de macros e permite acesso aos itens apenas com um clique. A programação em VBA completa que foi utilizada na alteração do programa se encontra disponível no Anexo I. As opções que podem ser acessadas nela são:

a) INSTRUÇÕES INICIAIS

Nessa opção, são encontradas as primeiras informações para que o usuário iniciante consiga utilizar a ferramenta de forma básica e rápida.

b) Sobre o PAMVEC

Tem-se dados gerais como a descrição da ferramenta e históricos sobre o PAMVEC original, criado por A. Simpson [13].

¹ O termo PAMVEC modificado indica que se trata da plataforma modificada neste estudo, para distinguir da plataforma originalmente desenvolvida.

c) Interface MODELAR VEÍCULO

Nela, tem-se estruturada uma ordem lógica para completar os dados para simulações, permitindo uma fácil comparação entre as opções desejadas de estrutura veicular.

O primeiro botão dessa interface foi denominado ENTRADAS GERAIS e permite acesso às características relacionadas ao ambiente externo e aos dados genéricos, comuns a todos os sistemas de propulsão.

Já o segundo botão é ARQUITETURAS VEICULARES. Nessa opção, tem-se acesso aos diferentes sistemas de propulsão, permitindo também a seleção do combustível a ser utilizado.

RESULTADOS PRINCIPAIS é a terceira opção. Nela, pode-se fazer uma sintética análise comparativa entre os tipos de veículos selecionados.

Finalmente, a quarta opção é a QUANTIDADE MÁXIMA DE CAMINHÕES. Esse botão dá acesso a um estudo voltado para o uso do biogás de uma ETE. Nele, pode-se obter o número máximo de caminhões que poderiam ser alimentados pelo biogás disponibilizado pela ETE, de acordo com as diferentes arquiteturas veiculares, assim como seu custo.

A seguir, cada uma dessas abas serão detalhadas.

4.2.2 A aba ENTRADAS GERAIS

Essa aba pode ser observada na figura 16. Nela, devem ser preenchidas as entradas relacionadas à plataforma veicular, dados que são definidos na seleção do veículo. São eles:

- Massa da carroceria (*glider mass*);
- Fator do momento de inércia do veículo;
- Fator de massa adicional para suportar a estrutura do veículo;
- Coeficiente de arrasto aerodinâmico;
- Coeficiente de atrito com o solo;
- Massa da carga a ser transportada, o que incluiu pessoas, bagagens entre outros;
- Potência média dos acessórios a serem utilizados no veículo.

Plataforma Veicular	
Massa da carroceria ($m_{carroceria}$)	5400 kg
Fator momento de inércia do veículo (k_m)	1,1
Fator estrutural para o sistema de propulsão (k_{struct})	1,1
Coefficiente de arrasto aerodinâmico (C_pA)	5,25 m ²
Coefficiente de atrito com o solo (C_{rk})	0,01
Massa da carga total transportada	5530 kg
Potência dos acessórios	1000 W

Objetivos de Performance	
Aceleração: de 0 a	80 km/h em 25 s
Gradabilidade: Manter	0 km/h inclinação de 0,0%
Velocidade Máxima	100 km/h
Distância percorrida	80 km
Se Plugin, autonomia da bateria	20 km

Ciclo de Condução	
	PF COLETA
Velocidade Média	21,4 km/h
Razão de Velocidades	1,31
Velocidade Cúbica Média	28,20 km/h
Aceleração Característica	0,206 m/s ²

Ciclo que não está entre as opções, digite aqui os dados:	
Velocidade Média	21,4 km/h
Razão de Velocidades	1,31
Velocidade Cúbica Média	28,2 km/h
Aceleração Característica	0,206 m/s ²

Veículo	
Veículo	Usimeca Delta 28
Largura (m)	2,46
Altura (m)	3,560
Cd	0,60

Distância por ciclo	80 km
Distancia anual percorrida	32000 km

Preço - Combustíveis	
Gasolina	RS / L
Gasolina 77%	RS / L
Etanol	RS / L
Diesel	2,34 RS / L
GNV	1,80 RS / L
Biogás	0,45 RS / m ³
Eletricidade	0,23 RS / kWh

INPUTS ANTERIORES
INPUTS (SE NECESSARIOS)
OUTPUTS

VOLTAR

Figura 16 – Aba ENTRADAS GERAIS do PAMVEC modificado

Na parte “Objetivos de Performance”, podem-se projetar parâmetros mínimos a serem alcançados pelo veículo. São eles:

- Aceleração de 0 a X (onde X é uma velocidade definida pelo usuário) em um tempo também definido;
- Gradabilidade (Manutenção da velocidade mesmo em terreno com variação de inclinação);
- Permitir uma definida velocidade máxima;
- Autonomia;

No caso de veículos *Plug-In*, a autonomia é definida de forma distinta e numa célula separada. Essa autonomia em quilômetro corresponde à distância que pode ser percorrida utilizando apenas a energia elétrica armazenada na bateria.

Caso não seja necessário atender algum dos requisitos, seus parâmetros devem ser definidos como zero, para que esses não influenciem no resultado final do dimensionamento dos componentes, como por exemplo, a gradabilidade.

A seção “Ciclo de Condução” permite a seleção rápida de um dos ciclos presentes na lista do PAMVEC, que são os mais utilizados internacionalmente. [13] Os ciclos de condução apresentam características próprias do ambiente ao qual o veículo está

submetido, como tráfego urbano ou em rodovia, horário de trânsito intenso ou leve. Uma descrição detalhada dos ciclos de direção está disponível no capítulo 5.

Para selecionar um ciclo de condução que não esteja entre os listados, basta selecionar a opção “outro” no quadro de seleção do ciclo e depois digitar seus dados no quadro “Ciclo que não está entre as opções”.

A opção VOLTAR permite o acesso à tela inicial, dando continuidade ao processo de modelagem do veículo.

Finalmente, a última seção de entradas, denominada “Preço – Combustíveis”, tem como função indicar o preço do combustível para posterior estudo de custos. Combustíveis não relacionados na lista devem ser indicados na aba do sistema de propulsão selecionado, como será visto no próximo item.

4.2.3 A aba ARQUITETURAS VEICULARES

A figura 17 ilustra essa aba. Nela, deve-se selecionar o sistema de propulsão do veículo, entre as opções definidas.

Para facilitar a utilização em estudos com caminhão de coleta, apenas as opções selecionadas no Capítulo 2 estão disponíveis em forma de botão na tela. Para acessar alguma arquitetura veicular presente no PAMVEC mas não selecionada para o presente trabalho, basta clicar na aba com o nome do sistema de propulsão desejado no canto inferior da tela do Excel.

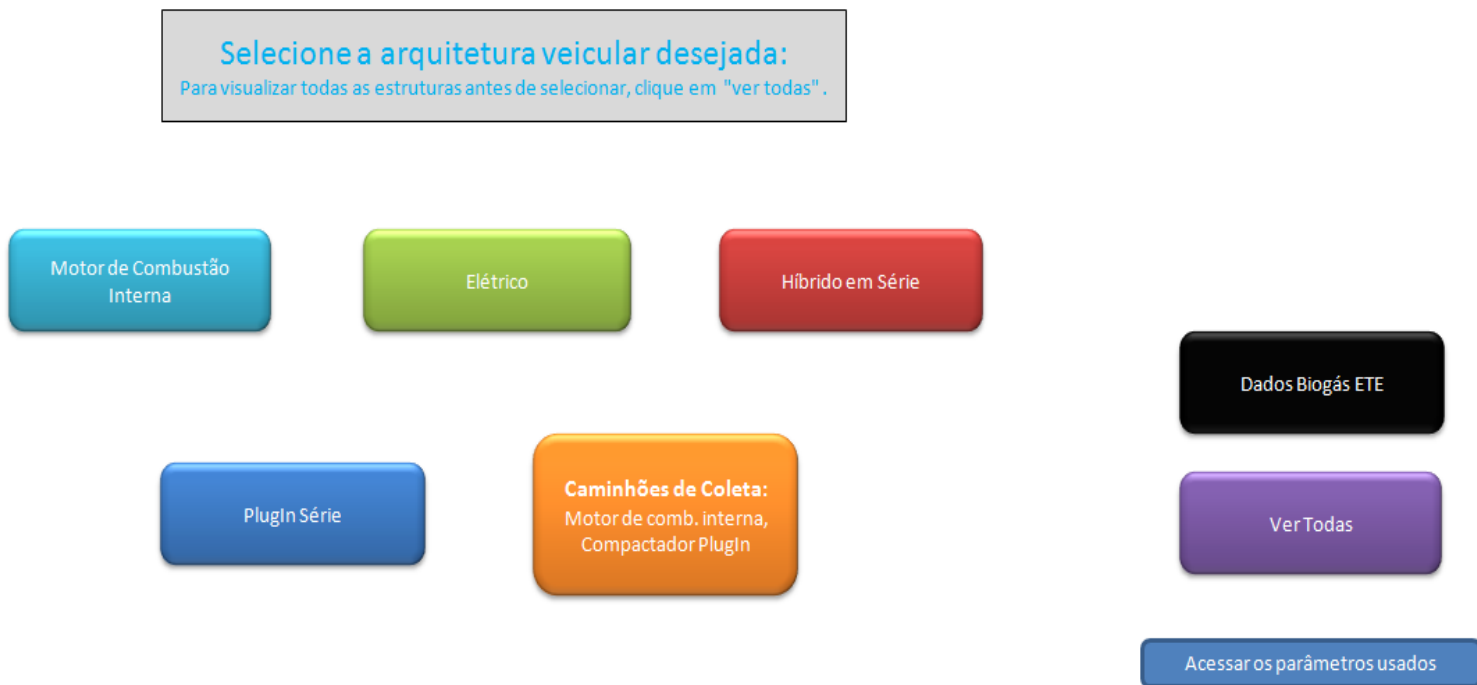


Figura 17 – Tela do PAMVEC modificado para o botão ARQUITETURAS VEICULARES

Nessa tela, há acesso rápido aos seguintes sistemas de propulsão:

- Veículo com motor de combustão interna;
- Veículo totalmente elétrico alimentado por bateria;
- Veículo elétrico híbrido em série com motor de combustão interna;
- Veículo elétrico *Plug-in* com baterias e motor de combustão interna;
- Caminhão de coleta com motor de combustão interna alimentando todo o veículo exceto o compactador que é elétrico *plug-in*.

Na figura 18, tem-se a tela da opção “Motor de Combustão Interna” para exemplificar as entradas (azul) e saídas de dados (laranja). As células amarelas correspondem aos dados de um novo combustível, não contido na entre as opções do item “combustível” e que serão incluídos se forem necessários, como diz a legenda.

Entrada		
Combustível	Bioetanol	
Armazenagem de Combustível		
Energia Específica	13774	Wh/kg
Densidade de Energia	9917	Wh/L
Energia Armazenada	494182	Wh
Massa de Combustível	35,88	kg
Volume de Combustível	49,8	L
Motor		
Potência Específica	642	W/kg
Eficiência	29,0%	
P _{max} /P _{eff}	1,12	
Potência	285566	W
Massa	444,8	kg
Sistema de Propulsão		
Massa	816	kg
Potência	270338	W
Energia	136147	Wh
Potência Específica	331	W/kg
Energia Específica	167	Wh/kg
Se não tiver o combustível, digite abaixo os dados		
Energia Específica	1000	Wh/kg
Densidade de Energia	1000	Wh/L
Custo	2,5	R\$/L

Plataforma Veicular		
M carroceria	10985	kg
Km	1,1	
CdA	5,25	m ²
Crr	0,01	
Kregen	0%	
Kstruct	1,15	
Massa Powertrain*	816	kg
Massa Curb **	11801	kg
Massa Carga	5790	kg
Massa Total	17591	kg

Transmissão		
Potência Específica	1180	W/kg
Eficiência	95%	
Num Engrenagem	5	
Tempo de Troca	0,5	s
N (taxa de sobrevelocidade)	4,74	
Potência Específica	270338	W
Massa	229,1	kg
N por ciclo de Troca	3,79	
Razão Transmissão	1,48	
Num de Trocas	4,00	
Tempo Total de Troca	2	s
N efetivo de direção	5,6	
N efetivo de aceleração	4,52	

Objetivos de Performance			Potência Requerida na Roda	
Velocidade Máxima	100	km/h		98826 W
Aceleração: de 0 a	80	km/h	em	25,0 s
Gradabilidade: Manter	0	km/h	inclinação	0,0%
Distância Percorrida	80	km		0 W

Ciclo de Condução		
Velocidade Média	21,4	km/h
Vel. Cúbica Média	28,20	km/h
Aceleração Característica	0,206	m/s ²
Potência Média na Roda	8203	W
Potência Média Frenagem	15448	W
Pot Média Perdida Direção	1245	W
Potência Acessórios	1000	W
Potência Média Motor	25896	W
Perdas no Motor	63402	W
Total Potência Consumida	89298	W
Consumo de Combustível		46,65 L/100km_eq
		5,0 MPG_eq
Eficiência Sistema Propulsão		9,2%

Custo	0,45	R\$/m ²
Custo por km	0,24	R\$/km

INPUTS ANTERIORES
INPUTS (SE NECESSARIOS)
OUTPUTS

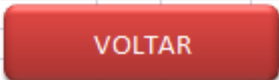


Figura 18 – tela da opção MCI

Nessa figura, podemos destacar os *outputs* de grande interesse para o presente trabalho:

- Massa total do veículo (seção: Plataforma Veicular), que representa a massa do veículo, com todos seus equipamentos, pessoas e bagagens;
- Energia total consumida por km (seção: Ciclo de Condução), que representa a soma de todos os gastos energéticos relacionados ao funcionamento do veículo por quilômetro percorrido;
- Custo por km (seção: Custos), que representa o gasto com o combustível por quilômetro percorrido para se realizar a rota, seguindo o ciclo de direção definido.

Para visualização rápida de cada sistema de propulsão, foi criada a opção “Ver Todas”. Nela, várias arquiteturas veiculares podem ser comparadas de forma simples, através de um esquema para cada uma delas, como pode ser visto na figura 19.

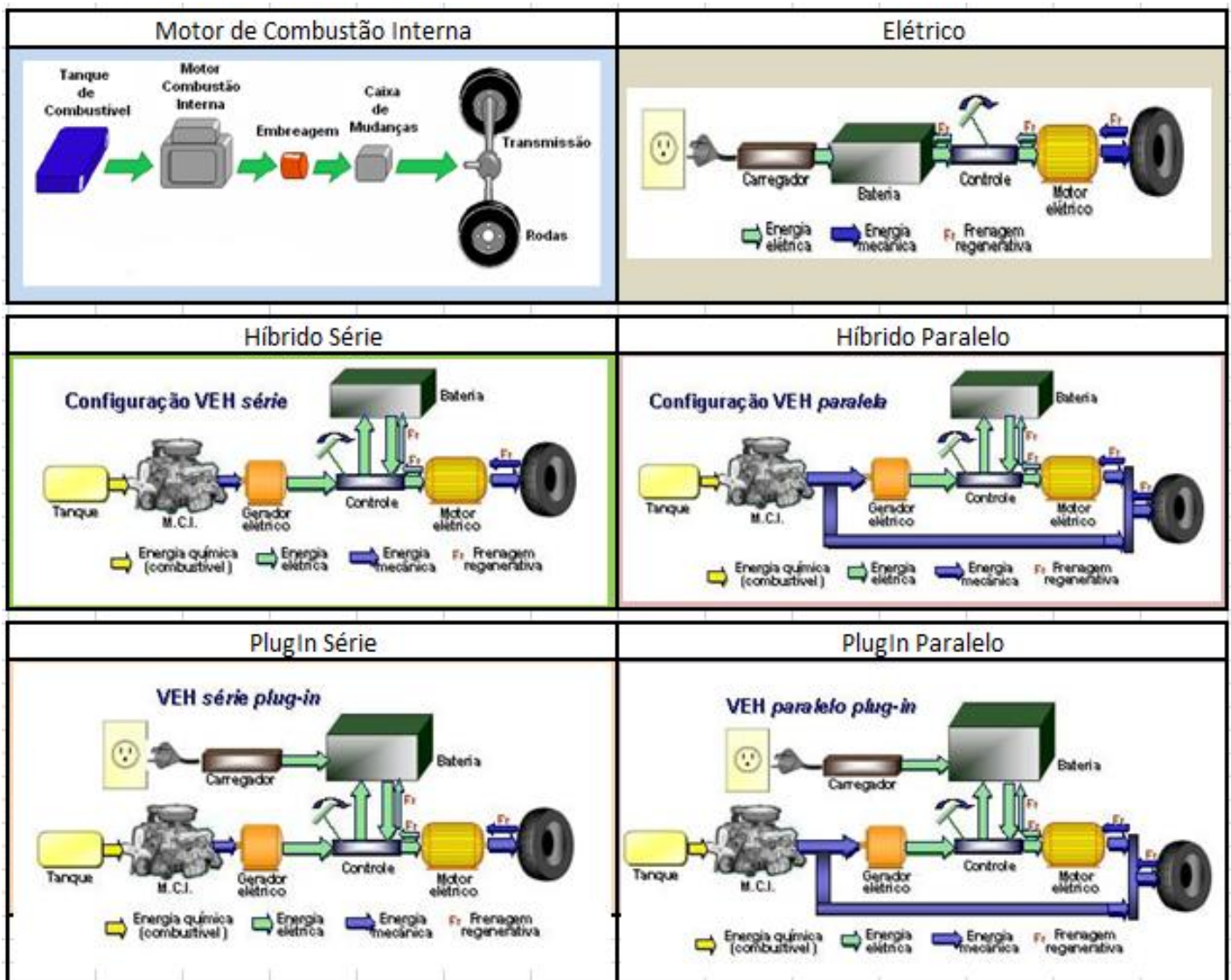


Figura 19 – Tela da opção “Ver Todas”

Para ter um controle mais completo dos parâmetros necessários para a simulação, pode-se clicar na opção “Acessar parâmetros utilizados”. Nesse comando, o usuário terá acesso a vários dados de cada arquitetura veicular necessários na rotina de cálculo do PAMVEC, incluindo seu sistema de propulsão e o combustível a ser usado.

Os dados dos combustíveis disponíveis nessa aba são:

- Energia Específica em kJ/kg e Wh/kg;
- Densidade de Energia em kJ/l e Wh/l para combustíveis líquidos e em kJ/m³ e Wh/m³ para combustíveis gasosos;
- Densidade do combustível em kg/l (líquidos) e kg/m³ (gases).

Já os parâmetros para os sistemas de propulsão são:

- Potência específica do motor de combustão;
- Eficiência do motor de combustão;
- Densidade de potência do motor de combustão;
- Potência específica da bateria;
- Energia específica da bateria;
- Eficiência da bateria;
- Eficiência de recarga da bateria;
- Potência específica da transmissão;
- Eficiência da transmissão;
- Fração de regeneração de frenagem;
- Grau de hibridização.

Finalmente, outro importante recurso acessível na tela ARQUITETURAS VEICULARES é a opção de cálculo financeiro para a aquisição e operação dos equipamentos para a geração de energia elétrica a partir do biogás gerado na ETE.

Esse recurso se encontra disponível quando acessada a opção “Dados Biogás ETE”. A tela encontrada pelo usuário pode ser observada na figura 20.

Essa opção foi desenvolvida exclusivamente para o presente trabalho.

Tributos (TT)	0,37			Custo do Capital	1133	USD/kW
Fração de Débitos (FD)	0,50			Custo O&M ANUAL	430,3	USD/kW
Taxa de Débitos (TD)	0,08			Eficiência Geração Potência	0,31	
Taxa de Capital Próprio (TE)	0,15			Custo do Combustível	13,01	USD/MWh
Custo Médio Ponderado do Capital (WACC)	0,10			Fator de Capacidade	0,63	
				Tempo de Construção	1,5	anos
Vida Útil	7	anos		Custo de Distribuição	8,50	USD/MWh
Fator de Recuperação do Capital (CRF)	0,206					
				Custo de Geração	337,27	R\$/MWh
Cotação do Dólar Americano	2,00	R\$/USD		Tarifa Uso do Sist. Distribuição	17,00	R\$/MWh
				Custo Final Energia Elétrica	354,27	R\$/MWh
Preço do Biogás gerado e purificado na ETE	0,08	R\$/m ³				

Figura 20 - Opções acessível na tela “Dados Biogás ETE”

Os parâmetros financeiros de entrada necessários para realizar a simulação são:

- Tributos - descreve a relação de carga, expressa como uma percentagem, em que uma empresa ou pessoa é tributada;
- Fração de Débitos - percentual do custo total que a empresa não dispõe, é o percentual a ser financiado;
- Taxa de Débitos – taxa de juros do financiamento adquirido;
- Taxa de capital próprio - medidor de viabilidade do projeto, indica a taxa de retorno do capital empregado (a percentagem do capital seria retornado por ano).

Esses parâmetros definirão o Custo Médio Ponderado do Capital (WACC), que é uma das saídas da planilha. WACC é o retorno mínimo que uma empresa deve ganhar em uma base de ativos existente para satisfazer os seus credores e proprietários para tornar o investimento atrativo.

Os outros parâmetros de entrada na planilha são:

- Vida Útil;
- Cotação do dólar americano;
- Custo do Capital;
- Custo de O&M anual;
- Eficiência na geração de potência;
- Fator de capacidade;
- Tempo de construção;
- Tarifa de uso do sistema de distribuição.

Deve-se destacar que a tarifa de uso do sistema de distribuição é nula para auto-consumo do biogás, que é o caso do presente trabalho.

O custo do biogás nessa aba se refere aquele que foi produzido e purificado em uma Estação de Tratamento de Esgoto, não tendo, portanto, relação direta com o custo do biogás apresentado na aba “Entradas Gerais”, que se refere ao valor do biogás vendido comercialmente. A partir dessa entrada, a saída “Custo do Combustível” é calculada.

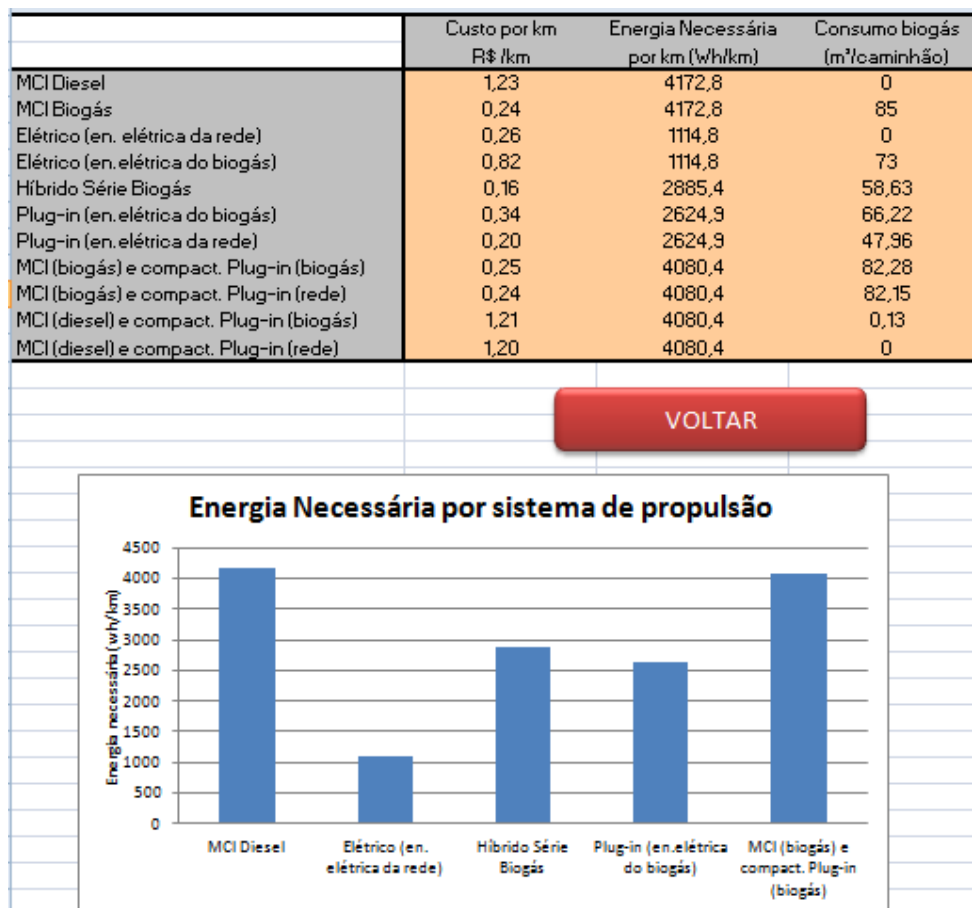
A saída de maior interesse nessa aba é o custo final da energia elétrica, que representa quanto seria gasto em uma ETE para produzir eletricidade a partir do biogás, nela gerado e purificado.

4.2.4 A aba RESULTADOS PRINCIPAIS

A aba apresenta comparações numéricas e gráficas entre os variados sistemas selecionados.

A figura 21 mostra a tela dessa aba. Nela, tem-se uma síntese de dados importantes comparando as diferentes arquiteturas veiculares, são eles:

- Custo R\$/km;
- Energia necessária em kJ/km;
- Consumo de biogás em m³ por caminhão.



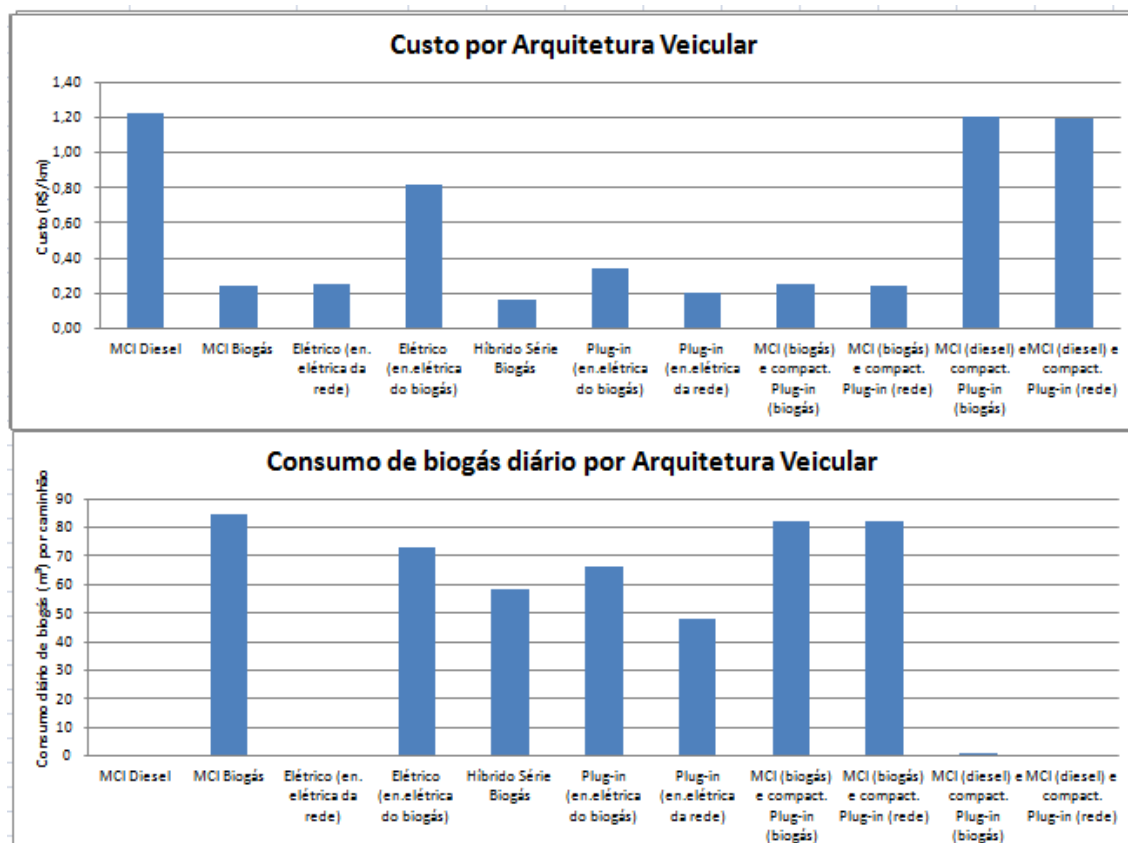


Figura 21 – Dados acessíveis na aba RESULTADOS GERAIS

4.2.5 A aba QUANTIDADE MÁXIMA DE CAMINHÕES

Essa aba foi criada especificamente para o presente trabalho. Ela relaciona o número de caminhões atendidos com o biogás disponibilizado, separando os estudos em 2 casos.

No primeiro caso, tem-se definida a quantidade de biogás que será fornecida pela Estação de Tratamento. Em função dessa, o número de caminhões atendidos é calculado. Essa configuração pode ser observada na parte esquerda da figura 22.

Já no segundo caso, a situação se inverte. O número de caminhões é definido e a quantidade de biogás necessária é calculada em função dele. Essa configuração também é vista na figura 22, do seu lado direito.

Cálculo pelo biogás disponibilizado		Cálculo pelo nº de caminhões	
biogás gerado pela ETE		número de caminhões 10	
Vazão de biogás	75 m³/h	biogás consumido por caminhão	
funcionamento diário	24 h	MCI	84,79 m³
Fração disponibilizada	0,05	Elétrico (en.elétrica do biogás)	73,08 m³
Biogás disponibilizado	90 m³	Híbrido Série	58,63 m³
biogás consumido por caminhão		Plug-in (en.elétrica do biogás)	66,22 m³
MCI	84,79 m³	Plug-in (en.elétrica da rede)	47,96 m³
Elétrico (en.elétrica do biogás)	73,08 m³	MCI (biogás) e compact. Plug-in	82,28 m³
Híbrido Série	58,63 m³	MCI (diesel) e compact. Plug-in	0,13 m³
Plug-in (en.elétrica do biogás)	66,22 m³	total de biogás consumido	
Plug-in (en.elétrica da rede)	47,96 m³	MCI	847,92 m³
MCI (biogás) e compact. Plug-in	82,28 m³	Elétrico (en.elétrica do biogás)	730,76 m³
MCI (diesel) e compact. Plug-in	0,13 m³	Híbrido Série	586,32 m³
número máximo de caminhões		Plug-in (en.elétrica do biogás)	662,17 m³
MCI	1,06	Plug-in (en.elétrica da rede)	479,62 m³
Elétrico (en.elétrica do biogás)	1,23	MCI (biogás) e compact. Plug-in	822,81 m³
Híbrido Série	1,54	MCI (diesel) e compact. Plug-in	1,26 m³
Plug-in (en.elétrica do biogás)	1,28		
Plug-in (en.elétrica da rede)	1,77		
MCI (biogás) e compact. Plug-in	1,03		
MCI (diesel) e compact. Plug-in	526,31		

Figura 22 – Tela da aba QUANTIDADE MÁXIMA DE CAMINHÕES

4.3 Cálculos e Modelagens

Serão abordados a seguir os cálculos das principais saídas do PAMVEC.

4.3.1 Balanço de massa

Um importante dado de saída a ser obtido é a massa total. A análise do PAMVEC é diferenciada para cada plataforma veicular. A massa total do veículo pode ser descrita, de forma geral, pela seguinte somatório:

$$m_{total} = m_{carga} + m_{carroceria} + k_{estrut.} \cdot m_{prop} \quad (1)$$

Onde:

m_{total} é a massa total do veículo [kg];

m_{carga} é a massa da carga total transportada (pessoas, bagagens, etc) [kg];

$m_{carroceria}$ é a massa da carroceria do veículo [kg];

m_{prop} é a massa do sistema de propulsão [kg];

k_{estrut} é o fator de massa, que corresponde a um reforço estrutural para suportar a carga adicional da estrutura do sistema de propulsão.

A massa dos componentes do sistema de propulsão é modelada a partir de seus valores de entrada para energia específica, potência específica e eficiência. Esse cálculo varia de acordo com o funcionamento de cada plataforma e pode ser visto a seguir:

a) Veículos com motor de combustão interna (MCI)

$$m_{prop} = m_{comb} + m_{mci} + m_{trans} \quad (2)$$

$$m_{comb} = \frac{E_{comb}}{EE_{comb}} \quad (3) ; \quad m_{mci} = \frac{P_{mci}}{PE_{mci}} \quad (4) ; \quad m_{trans} = \frac{P_{trans}}{PE_{trans}} \quad (5)$$

Onde:

m_{comb} é a massa do combustível [kg];

m_{mci} é a massa do motor de combustão interna [kg];

m_{trans} é a massa do sistema de transmissão [kg];

E_{comb} é a energia armazenada no combustível [Wh];

EE_{comb} é a energia específica do combustível [Wh/kg];

P_{mci} é a potência do motor de combustão interna [W];

PE_{mci} é a potência específica do motor de combustão interna [W/kg];

P_{trans} é a potência do sistema de transmissão [W];

PE_{trans} é a potência específica do sistema de transmissão [W/kg].

Substituindo (3), (4) e (5) em (2) e (2) em (1), a massa total do veículo MCI a partir dos dados de entrada é dada por:

$$m_{total} = m_{carga} + m_{carroceria} + k_{estrut} \cdot \left(\frac{E_{comb}}{EE_{comb}} + \frac{P_{mci}}{PE_{mci}} + \frac{P_{trans}}{PE_{trans}} \right) \quad (6)$$

b) Veículo elétrico à bateria:

$$m_{prop} = m_{bat} + m_{eletrico} + m_{trans} \quad (7)$$

$$m_{bat} = \frac{E_{bat}}{EE_{bat}} \quad (8); \quad m_{elétrico} = \frac{P_{elétrico}}{PE_{elétrico}} \quad (9); \quad m_{trans} = \frac{P_{trans}}{PE_{trans}} \quad (10)$$

Onde:

m_{bat} é a massa do conjunto de baterias [kg];

$m_{elétrico}$ é a massa do motor elétrico [kg];

E_{bat} é a energia armazenada na bateria [Wh];

EE_{bat} é a energia específica da bateria [Wh/kg];

$P_{elétrico}$ é a potência do motor elétrico [W];

$PE_{elétrico}$ é a potência específica do motor elétrico [W/kg].

Assim, substituindo (8), (9), (10) em (7) e (7) em (1), a formulação final do peso total do veículo elétrico é dada por:

$$m_{total} = m_{carga} + m_{carroceria} + k_{estrut} \cdot \left(\frac{E_{bat}}{EE_{bat}} + \frac{P_{elétrico}}{PE_{elétrico}} + \frac{P_{trans}}{PE_{trans}} \right) \quad (11)$$

c) Veículo elétrico híbrido em série

$$m_{prop} = m_{mci} + m_{eletrico} + m_{trans} \quad (12)$$

Assim, substituindo (4), (9), (10) em (12) e (12) em (1), o resultado da massa total apenas em função das entradas:

$$m_{total} = m_{carga} + m_{carroceria} + k_{estrut} \cdot \left(\frac{P_{mci}}{PE_{mci}} + \frac{P_{elétrico}}{PE_{elétrico}} + \frac{P_{trans}}{PE_{trans}} \right) \quad (13)$$

d) Veículo elétrico *Plug-In*

$$m_{prop} = m_{comb} + m_{mci} + m_{elétrico} + m_{bat} + m_{trans} \quad (14)$$

Assim, substituindo (3), (4), (8), (9), (10) em (14) e (14) em (1), para a massa final:

$$m_{total} = m_{carga} + m_{carroceria} + k_{estrut} \cdot \left(\frac{E_{comb}}{EE_{comb}} + \frac{P_{mci}}{PE_{mci}} + \frac{P_{elétrico}}{PE_{elétrico}} + \frac{E_{bat}}{EE_{bat}} + \frac{P_{trans}}{PE_{trans}} \right) \quad (15)$$

e) Caminhão de coleta com motor de combustão interna e compactador *Plug-In*

$$m_{prop} = m_{comb} + m_{mci} + m_{trans} + m_{mec} + m_{bc} \quad (16)$$

Onde:

m_{mec} é a massa do motor elétrico usado exclusivamente para o compactador [kg];

m_{bc} é a massa da bateria usada exclusivamente para o compactador [kg].

Assim, substituindo (3), (4), (5) em (16) e (16) em (1), a formulação da massa total será:

$$m_{total} = m_{carga} + m_{carroceria} + k_{estrut} \cdot \left(\frac{E_{comb}}{EE_{comb}} + \frac{P_{mci}}{PE_{mci}} + \frac{P_{trans}}{PE_{trans}} + \frac{P_{mec}}{PE_{mec}} + \frac{E_{bc}}{EE_{bc}} \right) \quad (17)$$

Onde:

P_{mec} é a potência do motor elétrico usado somente no compactador [W];

E_{bc} é a energia armazenada na bateria usada no compactador [Wh];

PE_{mec} é a específica do motor elétrico usado no compactador [W/kg];

EE_{bc} é a energia específica da bateria usada no compactador [Wh/kg].

4.3.2 Potência de tração

A potência de tração do veículo é importante para o cálculo do consumo de energia por espaço percorrido. Ela pode ser calculada segundo a fórmula abaixo:

$$P_t = P_{atrito} + P_{aero} + P_{cin} + P_{pot} \quad (18)$$

Onde:

P_t é a potência de tração [W];

P_{atrito} é a potência dissipada através do atrito dinâmico do pneu com o solo [W];

P_{aero} é a potência consumida devido à força de arrasto aerodinâmico [W];

P_{cin} é a potência devido à variação de energia cinética do veículo [W];

P_{pot} é a potência devido à variação de energia potencial [W].

Considerando que o veículo retorne à origem com mesma velocidade, podem ser anulados os termos relativos às energias cinética e potencial. Além disso, têm-se as seguintes relações:

$$P_{aero} = \frac{\rho \cdot C_d \cdot A \cdot V^3}{2} \quad (19) \quad ; \quad P_{atrito} = C_{rr} \cdot m_{total} \cdot g \cdot V \quad (20)$$

Onde:

ρ é a densidade do ar (aproximadamente 1,2 kg/m³);

C_d é o coeficiente de arrasto aerodinâmico;

A é a área frontal do veículo [m²];

V é a velocidade instantânea do veículo [m/s];

C_{rr} é o coeficiente de atrito dinâmico com o solo;

m_{total} é a massa total do veículo [kg];

g é a aceleração da gravidade [m/s²].

Assim, obtém-se:

$$P_t = \frac{\rho \cdot C_d \cdot A \cdot V^3}{2} + C_{rr} \cdot m_{total} \cdot g \cdot V \quad (21)$$

Para obter a potência média de tração para um ciclo de direção, a velocidade instantânea é substituída pela velocidade média e o cubo da velocidade instantânea é substituído pelo cubo da velocidade cúbica média.

$$P_{t\text{ média}} = \frac{r \cdot C_d \cdot A \cdot V_{cub\ med}^3}{2} + C_{rr} \cdot m_{total} \cdot g \cdot V_{med} \quad (22)$$

Onde:

V_{med} é a velocidade média [m/s];

$V_{cub\ med}$ é a velocidade cúbica média [m/s].

Por fim, as velocidades citadas podem ser calculadas pelas seguintes equações:

$$V_{med} = \frac{1}{t_{ciclo}} \int_0^{t_{ciclo}} V \, dT \quad (23)$$

$$V_{cub\ med} = \sqrt[3]{\frac{1}{t_{ciclo}} \int_0^{t_{ciclo}} V^3 \, dT} \quad (24)$$

Onde:

t_{ciclo} é o tempo total do ciclo [s].

4.3.3 Frenagem Regenerativa

A porcentagem de energia regenerada durante a frenagem é um importante dado de entrada. De acordo com Simpson [9], as perdas por frenagem regenerativa dependem do tipo de arquitetura veicular usada. Os valores padrão dessa entrada podem ser vistos na tabela 8 e podem ser alterados pelo usuário através da aba “Acessar Parâmetros Usados” da opção ARQUITETURAS VEICULARES do menu principal.

Tabela 8 – Fração de regeneração dos freios [13]

Sistema de Propulsão	Regeneração da frenagem
MCI	0%
Elétrico à Bateria	40%
Elétrico Híbrido em Série	50%
Elétrico Híbrido em Paralelo	50%
<i>Plug-In</i>	50%
Célula a Combustível	0%

A fração de regeneração dos freios leva em consideração a potência trativa e a potência de inércia, que pode ser descrita pela seguinte equação:

$$P_{inércia} = k_m \cdot m_{total} \cdot a \cdot V + m_{total} \cdot g \cdot Z \cdot V \quad (25)$$

Onde:

$P_{inércia}$ é a potência de inércia do veículo [W];

k_m é o fator de inércia do veículo;

a é a aceleração instantânea do veículo [m/s^2];

V é a velocidade instantânea do veículo [m/s];

g é a aceleração da gravidade [m/s^2];

Z é a gradabilidade em relação a um ponto referencial [m].

Para obter a definição completa dos termos envolvidos na equação, vide [9].

Visando a simplificação dos cálculos, Simpson[9] negligenciou os efeitos da gradabilidade para a parametrização da potência inercial do veículo, apresentando as seguintes justificativas:

- As variações na gradabilidade tendem a se manifestar nas variações de velocidade do veículo. Nas subidas o veículo tende a perder velocidade enquanto nas descidas ele tende a ganhar velocidade;
- As informações sobre gradabilidade raramente estão disponíveis para análises veiculares;

- Considerando as informações de gradabilidade, os resultados comparativos entre tecnologias veiculares diferentes não apresentam grandes variações.

Assim, obtém-se a equação da potência de inércia para valores médios (P_{inmed}), usando a velocidade média (V_{med}) e a aceleração característica (a_c) e negligenciando a gradabilidade:

$$P_{inmed} = k_m \cdot m_{total} \cdot a_c \cdot V_{med} \quad (26)$$

Onde:

$$a_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{|V_{final}^2 - V_{inicial}^2|}{V_{med} \cdot T} \quad (27)$$

Da potência de inércia, pode-se calcular a potência dissipada na frenagem a partir da relação:

$$P_{freio\ médio} = (1 - k_r) \cdot k_m \cdot m_{total} \cdot a_c \cdot V_{med} = (1 - k_r) P_{inmed} \quad (28)$$

Onde:

k_r é a fração de regeneração da frenagem ($k_r \in [0,1]$).

4.3.4 Autonomia

O PAMVEC realiza cálculos de autonomia através das fontes de energia que são a energia elétrica disponível na bateria ou o combustível disponível no tanque. Para veículos que utilizem ambas as fontes, pode-se fazer uma soma das autonomies para obter a autonomia total dele.

a) Tanque de combustível

$$Aut = \frac{En_{tanque} \cdot V_{med}}{P_{comb}} \quad (29)$$

Onde:

Aut é a autonomia do veículo [km];

En_{tanque} é a energia armazenada no tanque de combustível do veículo [Wh];

P_{comb} é a potência liberada pelo consumo médio de combustível [W];

V_{med} é a velocidade média do veículo durante o ciclo de condução [km/h].

b) Bateria

$$Aut = \frac{En_{bat} \cdot V_{med}}{P_{bat}} \quad (30)$$

Onde:

En_{bat} é a energia armazenada no conjunto de baterias do veículo [Wh];

P_{bat} é a potência elétrica média fornecida pela bateria [W].

4.3.5 Custo do combustível

Uma das saídas mais importantes do ponto de vista econômico é o custo do combustível por espaço percorrido, esse dado pode ser obtido na seguinte forma:

$$C_{km} = \frac{E_{km} \cdot C_L}{DE} \quad (31)$$

Onde:

E_{km} é a energia total consumida por km [Wh/km];

C_L é o preço do combustível por litro [R\$/L] ou preço por m³ para o biogás [R\$/m³];

DE é a densidade de energia [Wh/L] ou, para biogás, [Wh/m³].

Para as configurações Plug-In e MCI com compactador Plug-In, foram necessários os seguintes complementos:

a) Veículo de coleta completamente *Plug-In*

Usando um PHEV Extensor de Autonomia, inicialmente o veículo se comporta como um veículo elétrico, sendo os custos com energia elétrica da bateria iguais a:

$$C_{kmel} = \frac{E_{kmet} \cdot C_{EE}}{DE_{EE}} \quad (32)$$

Onde:

E_{kmel} é a energia total consumida por km percorrido usando somente a eletricidade como combustível [Wh/km];

C_{EE} é o preço da energia elétrica [R\$/Wh];

DE_{EE} é a densidade de energia da bateria [Wh/m³].

A equação anterior considera que a energia elétrica tem a rede como origem.

Caso considere o biogás da ETE como fonte, as relações são:

$$EB_{km} = EE_{km} \cdot \eta \quad (33)$$

$$C_{ebg} = \frac{EB_{km} \cdot C_{Biogás}}{DE_{Biogás}} \quad (34)$$

Onde:

C_{ebg} é o custo da energia elétrica gerada pelo biogás da ETE por km [R\$/km];

EE_{km} é o consumo de energia elétrica por km [Wh/km];

η é o rendimento de 1ª lei do motor Otto que faz a conversão de biogás em energia elétrica;

EB_{km} é o consumo de energia do biogás por km [Wh/km];

$DE_{Biogás}$ é a densidade energética do biogás [Wh/m³];

$C_{Biogás}$ é o preço do biogás gerado na ETE [R\$/m³].

Após chegar a certo nível de energia, o veículo passa a funcionar como um veículo híbrido em série. Assim, os custos estarão relacionados ao biogás ou ao diesel e não mais com a energia elétrica. Sendo os custos calculados por:

$$C_{comb} = \frac{E_{kmcomb} \cdot C_L}{DE} \quad (35)$$

Onde:

E_{kmcomb} é a energia total consumida por km rodado com combustível (diesel ou biogás) [Wh/km];

C_L é o preço do combustível por litro [R\$/L];

DE é a densidade de energia do combustível [Wh/L].

O consumo médio pode ser calculado como a média entre os consumos do combustível e da energia elétrica, ponderados pelos respectivos quilômetros percorridos. Assim:

$$C_{m\u00e9dio} = \frac{C_{comb} \cdot D_{comb} + C_{ebg} \cdot D_{eletrico}}{D_{comb} + D_{eletrico}} \quad (36)$$

Onde:

C_{comb} é o custo do combustível por quilômetro rodado como veículo híbrido em série [R\$/km];

D_{comb} é a distância percorrida pelo veículo funcionando como um veículo híbrido em série [km];

$C_{el\u00e9trico}$ é o custo da energia elétrica por quilômetro percorrido como veículo elétrico à bateria [R\$/km];

$D_{el\u00e9trico}$ é a distância percorrida pelo veículo funcionando como um veículo elétrico à bateria [km].

b) Caminhão de coleta MCI com compactador *Plug-In*

Para o caminhão de coleta MCI e compactador *plug-in*, foram calculados separadamente os gastos energéticos do compactador e do restante do caminhão. Esse é análogo ao consumo do caminhão de coleta convencional baseado puramente em MCI, mas retirando-se os gastos de energia com a utilização do compactador.

Já para o compactador, é definida inicialmente a energia que a bateria conterà; depois essa energia será subtraída do total de energia consumida no compactador e, dessa diferença, teremos a energia que o compactador precisa, além da energia contida na bateria, para funcionar. Para suprir essa energia, será usado o combustível.

Assim, os cálculos de consumo são:

$$C_{total} = C_{caminhão} + C_{compactador} \quad (37)$$

$$C_{compactador} = \frac{C_{eletric} \cdot E_{eletric} + C_{comb} \cdot E_{comb}}{E_{eletric} + E_{comb}} \quad (38)$$

$$C_{caminhão} = \frac{E_{km} \cdot C_L}{DE} \quad (39)$$

Onde:

C_{total} é o custo por km com o combustível [R\$/km].

Os custos se alteram em relação à eletricidade se essa for oriunda da rede ou da queima do biogás da ETE através de um motor Otto. Para a primeira opção, o custo da eletricidade será calculado como foi disposto acima. Já no segundo caso, o cálculo do custo da eletricidade será:

$$EB_{km} = EE_{km} \cdot \eta \quad (40)$$

$$C_{Biogás} = \frac{EB_{kmcomp} \cdot C_{Biogás}}{DE_{Biogás}} \quad (41)$$

Onde:

EE_{kmcomp} é o Consumo de energia elétrica por km pelo compactador [Wh/km];

η é o Rendimento de 1ª lei do motor Otto que faz a conversão de biogás em energia elétrica;

EB_{kmcomp} é o Consumo de energia do biogás por km pelo compactador [Wh/km];

$DE_{Biogás}$ é a Densidade energética do biogás [Wh/m³];

$C_{Biogás}$ é o Preço do biogás por m³ [R\$/m³].

4.3.6 Volume de Biogás Consumido

O volume de biogás consumido por caminhão, dependendo do sistema de propulsão, pode ser calculado de forma geral pela seguinte equação:

$$V_g = \frac{CC \cdot D_p}{DE} \quad (42)$$

Onde:

V_g é o volume de biogás consumido por caminhão por dia [m^3];

CC é o consumo de combustível [Wh/km];

D_p é a distância percorrida por cada caminhão por dia [km];

DE é a densidade energética do combustível [Wh/ m^3].

4.3.7 Volume de biogás disponibilizado pela ETE

Para o presente trabalho, o biogás será produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto. O volume de biogás disponibilizado pela ETE (V_{disp}) pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$V_{disp} = V_{hora} \cdot T \cdot K \quad (43)$$

Onde:

V_{hora} é o volume total de biogás produzido na ETE por hora [m^3/h]

T é o número de horas por dia que a ETE produz biogás [h]

K é a fração do biogás produzido que será disponibilizado pela ETE para servir de combustível nos veículos de coleta

4.3.8 Número máximo de caminhões atendidos pelo biogás

$$Q_c = \frac{V_{disp}}{V_g} \quad (44)$$

Onde:

Q_c é a quantidade máxima de caminhões que podem utilizar o biogás da ETE.

4.3.9 Particularidades *PLUG-IN*

A energia total consumida em um veículo *Plug-In* é relacionada tanto com o consumo de energia elétrica armazenada na bateria quanto com consumo de combustível. Assim, a relação da energia total com os parâmetros calculados é:

$$E_{TTPlugIn} = P_{TT} \cdot t_{ciclo} = E_{bat} + E_{shev} = P_{bat} \cdot \frac{D_{bat}}{V_{med}} + P_{shev} \cdot \frac{D_{shev}}{V_{med}} \quad (45)$$

$$D_{shev} = D_{percorrida} - D_{bateria} \quad (46)$$

Onde:

$E_{TTPlugIn}$ é a energia total consumida por um veículo Plug-In durante o ciclo [Wh];

P_{TT} é a potência total média durante o ciclo [W];

t_{ciclo} é o tempo total de percurso [h];

E_{bat} é a energia total consumida pelo veículo quando ele está funcionando como um veículo elétrico [Wh];

D_{bat} é a distância percorrida pelo veículo quando ele está funcionando como um veículo elétrico [km];

E_{shev} é a energia total consumida pelo veículo quando ele está funcionando como um veículo híbrido em série [Wh];

D_{shev} é a distância percorrida pelo veículo quando ele está funcionando como um veículo híbrido em série [km];

$D_{percorrida}$ é a distância total percorrida pelo veículo durante o ciclo [km].

O valor de D_{bat} foi definido na aba “Entradas”, onde foi selecionada a bateria através da sua autonomia em km, considerando as velocidades médias no modo elétrico e no modo híbrido iguais.

4.3.10 Particularidades do veículo MCI com compactador *PLUG-IN*

Algumas entradas e saídas foram calculadas especificamente para o caminhão de coleta MCI com compactador Plug-In. São elas:

- Potência Média

A potência média serve como entrada para o PAMVEC. Para encontrá-la, pode-se colocar o valor diretamente ou usar cálculos para obter um valor e substituir na célula correspondente.

O cálculo é o seguinte:

$$P_{med} = \frac{P_{comp} \cdot t_{comp} \cdot n}{3,6 \cdot t_{ciclo}} \quad (47)$$

Onde:

P_{comp} é a potência real do compactador [kW];

P_{med} é a energia total consumida pelo compactador dividida pelo tempo total de ciclo [kW];

t_{comp} é o tempo gasto em cada compactação [s];

n é o número de compactações;

t_{ciclo} é o tempo total da rota do caminhão, incluindo os deslocamentos aterro-coleta-aterro [h].

O termo t_{ciclo} pode ser calculado seguindo a fórmula:

$$t_{ciclo} = \frac{D_{percorrida}}{V_{med}} \quad (48)$$

Onde:

$D_{\text{percorrida}}$ é a distância total percorrida na rota do caminhão, incluindo os deslocamentos aterro-coleta-aterro [km];

V_{med} é a velocidade média definida pelo ciclo de direção [km/h].

- Energia total consumida pelo compactador E_{TC}

Para encontrar a energia total consumida pelo compactador é necessário a relacionar com a potência média, calculada no item anterior. Assim:

$$E_{TC} = P_{\text{comp}} \cdot t_{\text{comp}} \cdot n = P_{\text{med}} \cdot t_{\text{ciclo}} \quad (49)$$

Uma parte da energia necessária para acionar o compactador é atendida pela bateria enquanto a outra parte é atendida pelo combustível. A relação entre esses parâmetros é a seguinte:

$$E_{AC} = E_{TC} - E_{CB} \quad (50)$$

Onde:

E_{AC} é a energia consumida pelo compactador que será atendida pelo combustível a partir do término da energia disponível na bateria [Wh];

E_{CB} é a quantidade de energia que a bateria tem disponível para ser usada somente no compactador [Wh].

4.4 Análise Financeira

Na versão modificada do PAMVEC realizada para o estudo foi incluída também a análise de viabilidade financeira para a aquisição dos equipamentos necessários à geração de energia a partir do biogás em uma ETE.

Considerando que parte do recurso financeiro utilizado é própria e parte é financiada, para fazer essa análise, foram usadas as seguintes relações:

$$WACC = FD \cdot TD \cdot (1 - TT) + (1 - FD) \cdot TE \quad (51)$$

Onde:

WACC é o custo médio ponderado do capital (sigla em inglês *Weighted Average Cost Of Capital*);

FD é a fração de débito;

TD é a taxa de débito;

TT são os tributos;

TE é a taxa de capital próprio.

A definição de cada termo citado acima se encontra na página 41.

A partir do WACC, calcula-se o fator de recuperação do capital (CRF), que é um importante parâmetro para análise do retorno de investimento, por representar a percentagem da dívida que será paga anualmente.

$$CRF = \frac{(1 + WACC)^{vu} \cdot WACC}{(1 + WACC)^{vu} - 1} \quad (52)$$

Onde:

CRF é o fator de recuperação do capital;

vu é a vida útil [anos].

O custo total para a geração de energia elétrica em uma ETE que não possuía os equipamentos necessários é:

$$C_{geração} = C_{cap\ nivelado} + C_{O\&M} + C_{comb\ real} \quad (53)$$

ou

$$C_{geração} = 1000 \left[C_{cap} \cdot \frac{(1 + WACC)^{tc}}{8760 \cdot fc} \cdot CRF + \frac{(C_{O\&M\ a.a})}{8760 \cdot fc} \right] + \frac{(C_{comb})}{\eta_{Ge}} \quad (54)$$

Onde:

$C_{geração}$ é o custo de produção do biogás [R\$/MWh];

$C_{cap\ nivelado}$ é o custo do capital nivelado pelo CRF [R\$/kW];

$C_{O\&M}$ é o custo de manutenção e operação [R\$/kW];

C_{comb} é o custo do combustível [R\$/MWh];

fc é o fator de capacidade;

tc é o tempo de construção [anos];

η_{Ge} é a eficiência de 1ª lei na geração de energia elétrica pelo motor.

Para a fórmula acima, a taxa de juros durante a construção foi considerada equivalente à taxa durante a operação.

Para uma ETE já com a estrutura instalada, o custo do capital nivelado é considerado nulo. Assim a fórmula anterior fica resumida a:

$$C_{geração} = C_{O\&M} + C_{comb} \quad (55)$$

ou

$$C_{geração} = 1000 \frac{(C_{O\&M \ a.a.})}{8760 \cdot fc} + \frac{(C_{comb})}{\eta_{Ge}} \quad (56)$$

Essa nova fórmula só deve ser utilizada durante a vida útil dos equipamentos. Após esse período, um novo custo de capital nivelado deve ser utilizado, considerando investimentos de reposição ou aumento de vida útil do motor.

Finalmente, para obter o custo da eletricidade gerada por uma ETE, deve-se usar a seguinte relação:

$$C_{biogás} = C_{geração} + C_{distribuição} \quad (57)$$

Onde:

$C_{geração}$ é o custo de produção do biogás [R\$/MWh];

$C_{biogás}$ é o custo total do biogás [R\$/MWh];

$C_{distribuição}$ é a tarifa de distribuição [R\$/MWh].

Deve-se destacar que o custo de distribuição da energia elétrica não foi considerado no custo da produção de biogás, por se tratar de auto-consumo.

Capítulo 5 – SELEÇÃO DE PARÂMETROS

Com os aspectos teóricos e metodológicos já desenvolvidos, inicia-se a abordagem voltada para o estudo de caso. Assim, esse capítulo apresenta os dados a serem usados no o estudo de caso.

Primeiramente, descreve-se a escolha do ciclo de direção voltado para as características de condução de um veículo de coleta. Depois analisa-se o número de compactações de lixo realizadas por caminhão por dia. Por fim, abordam-se os dados complementares relacionados com a arquitetura veicular e com a geração de energia elétrica e do biogás.

5.1 Ciclo de Direção (*Driving Cycles*)

Ciclo de direção consiste em uma relação de velocidade com o tempo, em condições padronizadas de condução veicular. Permite simular situações reais, em condições de tráfego urbano ou de estrada, veículos leves ou pesados, entre outras variações. [13]

Importantes ciclos de condução utilizados internacionalmente foram configurados no PAMVEC original [13]. Exemplos desses ciclos são NYCC e NEDC, para ciclos urbanos e US06 e HWFET para ciclos em estradas. Os dados de cada um desses ciclos encontram-se na tabela 9, no final do presente item.

No entanto, os ciclos que melhor serviriam para o projeto seriam do tipo “anda-para”, característicos em ônibus e caminhões de coletas, apresentando uma quantidade muito maior de paradas do que os ciclos referentes a outros tipos de veículos.

Alguns dos ciclos “anda-pára” mais utilizados são apresentados na figura 23

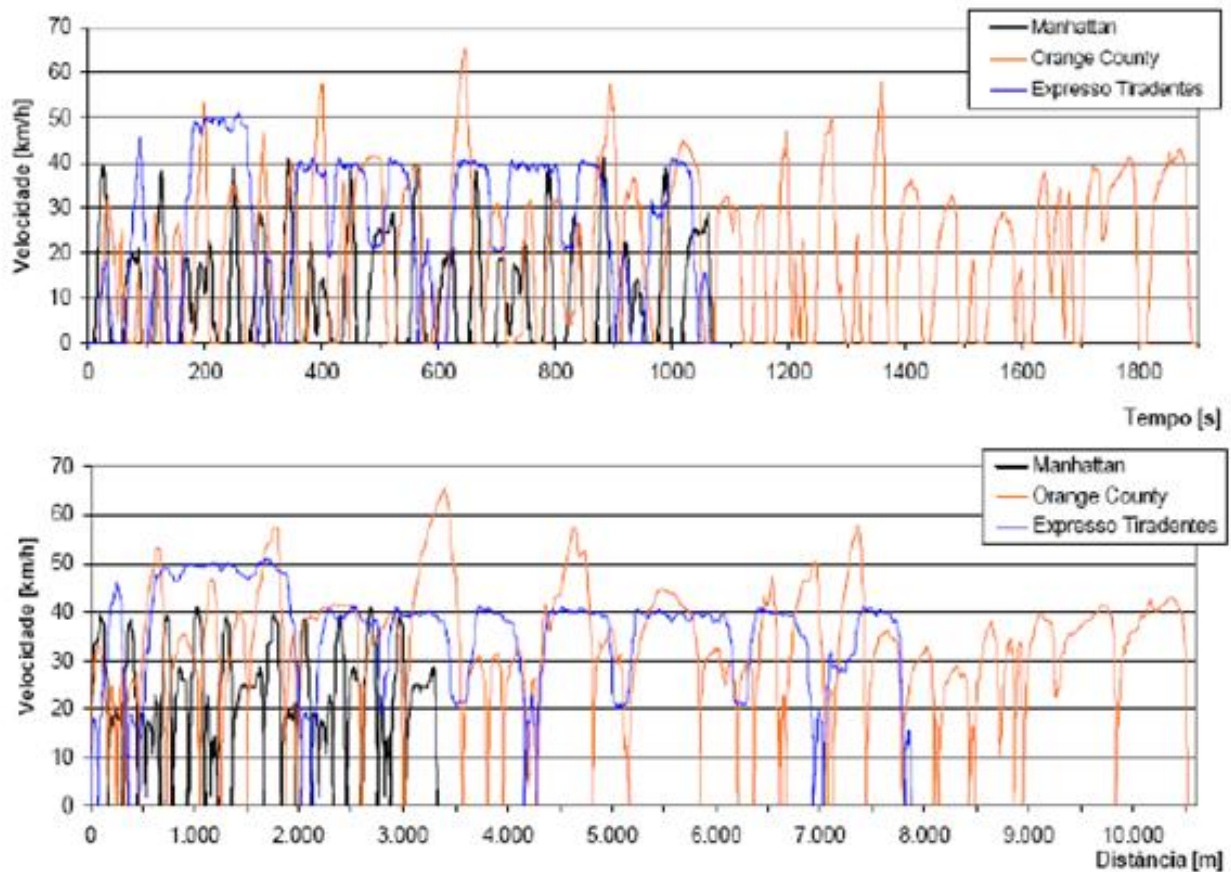


Figura 23 – Ciclos de condução para ensaios de ônibus urbano em São Paulo[21]

O ciclo Manhattan foi produzido em horário de tráfego intenso, já os ciclos Orange County e Expresso Tiradentes foram produzidos em momentos de menor trânsito. Todos os três foram baseados em ônibus urbanos, que podem apresentar características diferentes daquelas dos caminhões de coleta, quanto ao tempo e ao número de paradas. [26]

Já o ciclo de direção utilizado no presente trabalho foi escolhido por apresentar as seguintes características: [11]

- (i) É do tipo “anda-pára” (*stop and go*);
- (ii) É um ciclo tipicamente urbano;
- (iii) Foi testado experimentalmente na cidade de Resende- RJ pela empresa MAN Latin America, utilizando caminhão de coleta em condições de vazio e totalmente carregado.

Para facilitar a compreensão, esse ciclo será denominado nesse trabalho de “Ciclo Resende”.

5.1.2 Obtenção dos principais dados do ciclo Resende

O ciclo Resende apresenta o seguinte gráfico de velocidade por tempo:

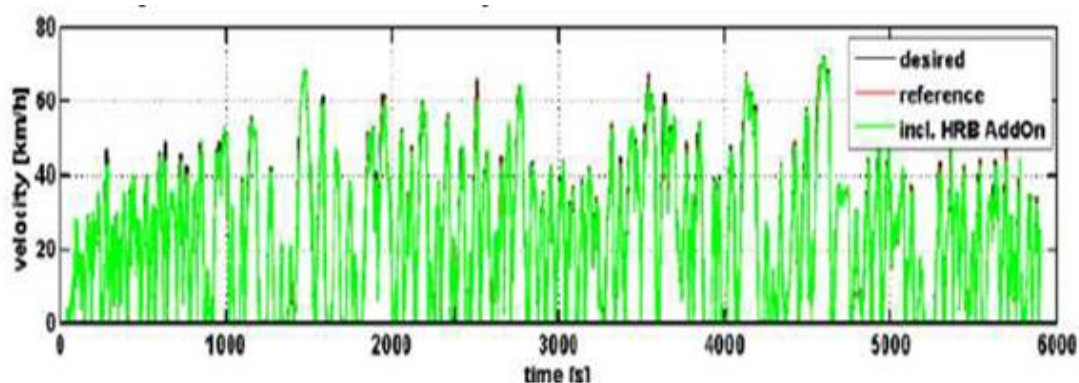


Figura 24 – Resultado de simulação de caminhão de coleta em Ciclo Resende [15]

Como não havia dados complementares ao gráfico para esse ciclo, fez-se necessário o uso do software *Engauge Digitizer*² para obter valores de velocidade em pontos específicos.

No total foram obtidos 260 pontos e foi gerado um novo gráfico, dessa vez, simplificado utilizando o software *Excel*. A figura 25 mostra o gráfico obtido após a simplificação.

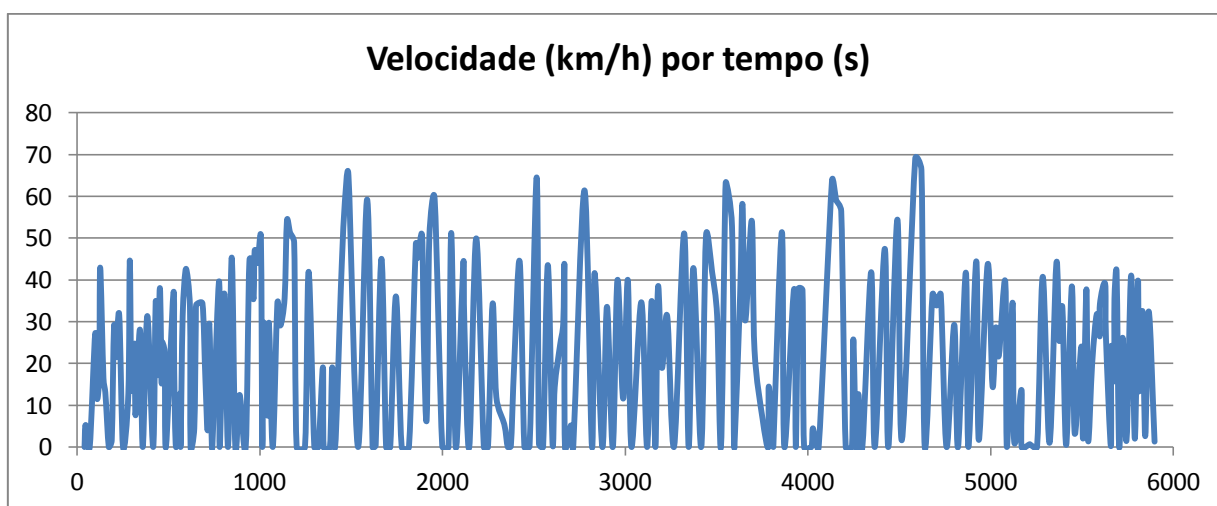


Figura 25 – Resultado da análise de dados do ciclo Resende após simplificação

² *Engauge Digitizer* é um software gratuito, com a função de converter um arquivo de imagem, como gráfico ou mapa, em valores numéricos.

Pode ser obtido por download no site: <http://digitizer.sourceforge.net/>

Para fazer simulações utilizando o PAMVEC, é necessário obter os seguintes parâmetros de condução do ciclo: velocidade média, velocidade média cúbica, razão de velocidades e aceleração característica. [13]

A seguir, têm-se a descrição de cada parâmetro e o método de calcular desses dados para o ciclo Resende.

a) Velocidade Média (*Average Speed*)

A velocidade média é o atributo principal do padrão de direção, define o quão rápido será concluído o percurso e pode ser calculada pela seguinte equação: [9]

$$V_{med} = \frac{\int_0^T v dT}{T} \quad (58)$$

Onde:

v é a velocidade instantânea [km/h];

T é o tempo total de ciclo [s].

Discretizando (58) e levando em consideração que os pontos não têm mesmo espaçamento entre si, obtém-se:

$$V_{med} = \frac{\sum_{n=1}^{259} \left\{ \left(\frac{v_n + v_{n+1}}{2} \right) \cdot (t_{n+1} - t_n) \right\}}{T} \quad (59)$$

Onde:

v_n é a velocidade instantânea no tempo n ;

v_{n+1} é a velocidade instantânea no ponto seguinte.

b) Velocidade Cúbica Média (*Root-mean-cubed speed*)

É a relação cúbica entre as velocidades médias em cada instante. A velocidade média cúbica pode ser calculada segundo a equação: [13]

$$V_{cubmed} = \left(\frac{\int_0^T v^3 dT}{T} \right)^{1/3} \quad (60)$$

Novamente, discretizando (60) para diferentes espaçamentos, obtém a relação:

$$V_{cubmed} = \left(\frac{\sum_{n=1}^{259} \left\{ \left(\frac{v_n + v_{n+1}}{2} \right)^3 \cdot (t_{n+1} - t_n) \right\}}{T} \right)^{1/3} \quad (61)$$

c) Razão de Velocidades (*Velocity Ratio*)

Quantifica a variação de velocidade do veículo durante o ciclo. A razão de velocidades é definida por: [13]

$$R_v = \frac{v_{cubmed}}{v_{med}} \quad (62)$$

d) Aceleração Característica (*Characteristic Acceleration*)

Quantifica a variação de velocidade de um veículo durante um ciclo e pode ser equacionada na forma abaixo: [13]

$$A_c = \frac{\sum (v_{n+1}^2 - v_n^2)}{2 \cdot v_{média} \cdot T} \quad (63)$$

Discretizando (63) para diferentes espaçamentos, obtém:

$$A_c = \frac{\sum_1^{259} \{ (v_{n+1}^2 - v_n^2) \cdot (t_{n+1} - t_n) \}}{2 \cdot v_{média} \cdot T^2 \cdot 3,6} \quad (64)$$

e) Resultados Gerais

Usando essas fórmulas, obtemos os seguintes valores:

$$V_{med} = 21,4 \text{ km/h}$$

$$V_{cubmed} = 28,2 \text{ km/h}$$

$$R_v = 1,31$$

$$A_c = 0,206 \text{ m/s}^2$$

f) Análise qualitativa dos resultados:

Comparando os dados obtidos para o ciclo Resende com os de ciclos de direção tradicionais, mostrados na tabela 9, é feita a seguinte análise qualitativa:

Tabela 9 - Parâmetros de ciclos de direção usados internacionalmente [13]

Ciclo	Velocidade Média (km/h)	Velocidade Média Cúbica (km/h)	Razão de Velocidades	Aceleração Característica (m/s ²)
	V _{média}	V _{med cub}	R _v	A _c
NYCC	11,4	20,6	1,81	0,293
NEDC	33,0	53,6	1,62	0,112
UDDS	31,4	44,5	1,42	0,171
US06	76,9	91,2	1,19	0,190
HWFET	77,2	80,0	1,04	0,069
RESENDE	21,4	28,2	1,31	0,206

NYCC – New York City Cycle

NEDC – New European Driving Cycle

UDDC – Urban Dynamometer Driving Cycle

US 06 – United States Federal Test Procedure 06

HWFET – Highway Fuel Economy Test

Os ciclos HWFET e UDDC foram produzidos nos Estados Unidos e têm como característica a economia de combustível, sendo o primeiro característico para condução em estrada, enquanto o segundo representa um ciclo tipicamente urbano.

O ciclo US 06 representa uma condução em rodovia. Devido aos seus elevados valores de velocidade média e aceleração característica, é considerado um caso extremo.

Já o ciclo NYCC possui baixa velocidade média e elevada aceleração característica. Representa o padrão de direção “anda-para” em situações de trânsito intenso na cidade de Nova Iorque.

Além desses, um importante ciclo é o NEDC. Ele representa o padrão de condução europeu em meio urbano.

Comparado aos ciclos citados, o ciclo Resende apresenta as seguintes características:

- O valor de velocidade média é um dos menores, estando um pouco acima do resultado do ciclo NYCC que é um ciclo medido durante trânsito intenso e, por isso, apresenta a velocidade média mais baixa. O fato de ser uma das menores é bem compatível com o ciclo “anda-pára” ao qual o caminhão de coleta está submetido;
- A aceleração característica é bastante alta, já que, por fazer muitas paradas também é necessário acelerar constantemente. Ao contrário, ciclos associados à condução em estradas, com maiores velocidades, apresentam menor aceleração, pois a velocidade tende a ser mais constante.

Assim, qualitativamente, os valores encontrados para o ciclo Resende são compatíveis com os resultados esperados.

5.2 Número de Compactações

Como uma grande parte da energia do caminhão de coleta é usada na compactador, esse parâmetro é fundamental para analisar a energia consumida pelo veículo.

5.2.1 Valor Ideal de Compactações

Por conservação de massa e supondo que o caminhão fique totalmente lotado de lixo compactado, o número máximo de compactações feitas por um caminhão por rota pode ser calculado da seguinte forma:

$$n \cdot \rho_{lixo} \cdot V_{porta} = \rho_{compactado} \cdot V_{caixa} \quad (65)$$

Onde:

n é o número de compactações por ciclo ;

V_{porta} é o volume da porta (região onde entra o lixo não compactado) [m³];

ρ_{lixo} é a densidade do lixo não compactado, o lixo coletado [t/m³];

$\rho_{compactado}$ é a densidade do lixo após passar pelo compactador [t/m³];

V_{caixa} é o volume da caixa (região onde o lixo já se encontra compactado) [m³].

Utilizando como padrão o caminhão de coleta da Usimeca – Delta28, tem-se os seguintes dados: [27]

$$V_{porta} = 2,2 \text{ m}^3, \quad V_{caixa} = 21,1 \text{ m}^3.$$

Além disso, BARROS [28] determinou que um valor médio para a densidade do lixo compactado é de 0,70 t/m³, enquanto a densidade média do lixo não compactado é de 0,25 t/m³.

Assim:

$$n = \frac{\rho_{compactado} \cdot V_{caixa}}{\rho_{lixo} \cdot V_{porta}} \quad (66)$$

Sendo n um valor inteiro, tem-se, então o valor para n de 27 compactações.

5.2.2 Valor Real de Compactações

A equação anterior (66) deixa de considerar que a porta, na maioria das vezes, não se encontra completamente cheia de lixo quando o compactador é acionado. Sendo assim, faz-se necessária a inclusão de um fator k de correção para a equação.

Sendo assim, a equação anterior passa a ser:

$$n \cdot \rho_{lixo} \cdot V_{porta} \cdot K = \rho_{compactado} \cdot V_{caixa} \quad (67)$$

Onde:

K é a percentagem da porta que está preenchida de lixo ($0 < k < 1$).

Supôs-se que, em média, 70% da porta está cheia no momento da compactação, tem-se $k = 0,70$. Considerando também que a caixa termina completamente cheia, o novo valor para o número de compactações $n=39$.

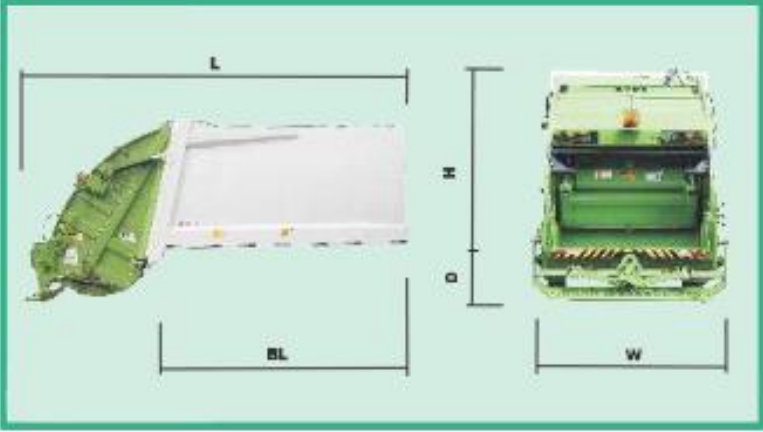
5.3 Dados complementares da arquitetura veicular para a utilização do PAMVEC

Nesse item, serão apresentados os dados do veículo e estudados outros dados de entrada. Serão feitas hipóteses para complementar as informações necessárias ao PAMVEC.

5.3.1 Características do veículo simulado

Para o presente estudo de caso, foi simulado um caminhão de coleta modelo DELTA 28 da empresa USIMECA. Os dados utilizados desse caminhão podem ser observados na tabela 10.[27]

Tabela 10 – Dados do Caminhão Usimeca Delta 28

Delta 28 – Usimeca	
Capacidade em Volume	
Caixa	21,1 m ³
Porta	2,2 m ³
Dimensões	
	
BL	4,93 m
L	6,73 m
H	2,49 m
W	2,46 m
D	536 mm
Peso Bruto Total	23 t
Ciclo de Compressão	18-20 s

Caixa é a parte da caçamba posterior ao compactador, onde fica o lixo já compactado, enquanto Porta é a região inicial da caçamba, onde é posto o lixo não compactado, recolhido pelos coletores.

5.3.2 Dados de entrada para o caminhão de coleta

A seguir serão apresentados alguns cálculos e outros dados para complementar as informações do estudo de caso.

(a) Cálculo da massa da carroceria:

A massa total com a caçamba cheia de lixo compactado para o Delta 28 (Peso Bruto Total) é um dado fornecido pelo catálogo do caminhão. Assim, para obter a

massa da carroceria, que deve ser usada como entrada no PAMVEC, foram usadas as seguintes relações:

$$m_{caminhão} = m_{bt} - m_{lixo\ max} - m_{pessoas} \quad (68)$$

Onde:

$m_{caminhão}$ é a massa apenas do veículo [kg];

m_{bt} é a massa bruta total [kg];

$m_{lixo\ max}$ é a massa total de lixo compactado quando a caçamba do veículo está completamente cheia de lixo [kg];

$m_{pessoas}$ é a massa dos trabalhadores responsáveis pela coleta e de seus equipamentos [kg].

A massa máxima de lixo presente no caminhão é:

$$m_{lixo\ max} = \rho_{lc} \cdot V_{caixa} \quad (69)$$

Onde:

ρ_{lc} é a densidade do lixo compactado [t/m³];

V_{caixa} é o volume da Caixa [m³].

Para o termo $m_{pessoas}$, supôs-se que a equipe de coleta seria composta por um motorista e quatro coletores.

Segundo o IBGE [2], a massa média de um homem adulto é 75 kg. Supondo que esses trabalhadores tenham o peso médio e que seus equipamentos (luvas, botas, roupas, equipamento de proteção) pesem 5 kg para cada coletor. Assim:

$$m_{pessoas} = m_{equipe} + m_{equipamento} = 5 \times 75 + 5 \times 5 = 400 \text{ kg} \quad (70)$$

Onde:

m_{equipe} é a massa total das 5 pessoas [kg];

$m_{equipamento}$ é a massa total dos equipamentos usados pelas 5 pessoas [kg].

Considerando a densidade do lixo compactado como $\rho_{lc} = 0,70 \text{ t/m}^3$ [28] e tendo os dados citados acima: $m_{total} = 23\ 000 \text{ kg}$, $V_{caixa} = 15,4\text{m}^3$, tem-se:

$$m_{caminhão} = 23000 - (700 \cdot 15,4 + 5 \cdot 80) = 11\ 820\text{kg}$$

Finalmente, tem-se a seguinte relação:

$$m_{caminhão} = m_{carroceria} + k_{estrut} \cdot m_{prop} \quad (71)$$

Onde:

$m_{carroceria}$ é a massa da carroceria do veículo (caminhão + caçamba) [kg];

k_{estrut} é o fator de massa, que corresponde a um reforço estrutural para suportar a carga adicional da estrutura do sistema de propulsão.

Para facilitar o uso do PAMVEC, foram consideradas as massas do compactador e da caçamba na massa total da carroceria.

A massa do caminhão é composta pela massa do sistema de propulsão e pela massa da carroceria (incluindo a caçamba). A massa do sistema de propulsão, por sua vez, depende do combustível e da massa da carroceria. Essa última também depende da massa do caminhão. Assim, um processo iterativo é necessário para encontrar a massa da carroceria. Para isso, considerou que o combustível usado seria o diesel, e buscou-se obter um valor de massa do caminhão próximo do valor da massa total obtido no PAMVEC.

O resultado se encontra na tabela 11 e mostra que a diferença entre o valor calculado de massa total e o valor obtido pelo programa é de 5 kg, o que pode ser desprezado comparado com a massa total, apresentando um erro de 0,042%.

Tabela 11 – Dados de massa do caminhão simulados após processo de iteração

Item de Interesse	Valor encontrado
Massa da carroceria	10985 kg
Massa do Sistema de Propulsão	830 kg
$k_{estrutura}$	1,15
Massa do caminhão	11815 kg

(b) Massa da Carga

O PAMVEC precisa de um parâmetro de entrada denominado “massa da carga”. Para isso, precisa calcular a massa total dos itens transportados. O lixo representa uma grande parcela desse valor e o seu volume varia consideravelmente durante o ciclo.

Para determinar esse parâmetro, foi considerada a massa média de lixo, que é metade da caçamba com lixo compactado.

Assim, a massa média de carga pode ser calculada somando 2 parcelas:

$$m_{carga} = m_{pessoas} + m_{lixo\ med} \quad (72)$$

Onde:

m_{carga} é a massa média da carga [kg];

$m_{pessoas}$ é a massa dos trabalhadores responsáveis pela coleta e de seus equipamentos [kg];

$m_{lixo\ med}$ é a massa média de lixo que é transportada em um caminhão de coleta [kg].

Para o termo $m_{lixo\ med}$, foi suposto que o volume médio de lixo compactado que um caminhão de coleta transporta é metade do volume de sua caixa. Assim, tem-se a seguinte relação:

$$m_{lixo\ med} = \frac{m_{lixo\ max}}{2} = 5390\ kg \quad (73)$$

Com isso, tem-se o valor da massa média da carga:

$$m_{carga} = 400 + 5390 = 5790 \text{ kg}$$

(c) Potência dos Acessórios

O acionamento do compactador influencia bastante na potência instantânea dos acessórios do caminhão. Por isso, será considerada uma potência média do compactador. Assim, será obtida a energia total consumida pelo compactador e dividida pelo tempo total de ciclo.

A energia consumida pelo compactador representa o maior gasto energético com acessórios do caminhão. Ela pode ser calculada segundo a equação:

$$E_{compact} = n_c \cdot t_{compact} \cdot Pot_{compact} \quad (74)$$

Onde:

$E_{compact}$ é a energia total consumida pelo compactador [kJ];

n_c é o número de compactações durante o ciclo;

$t_{compact}$ é o tempo de cada compactação [s];

$Pot_{compact}$ é a potência necessária para a utilização do compactador [kW].

Segundo [4], $Pot_{compactador} = 13\text{kW}$. Tem-se também que um valor médio para $t_{compact}$ é de 20s [27] e foi considerado que o número de compactações é 39, tendo como base o item 5.2 do presente trabalho. Assim:

$$E_{compact} = 10,4 \text{ MJ}$$

Tendo a distância percorrida por ciclo já estabelecida em 80 km e sabendo que a velocidade média do veículo durante o ciclo é de 21,4 km/h, têm-se a seguinte relação e o seguinte valor para o tempo total de ciclo:

$$t_{tc} = \frac{D_{ciclo}}{V_{med}} \sim 3,6 \text{ h} = 12960 \text{ s} \quad (75)$$

Onde:

t_{tc} é o tempo total de percurso [h];

D_{ciclo} é a distância total percorrida [km];

V_{med} é a velocidade média do veículo durante o ciclo [km/h].

Finalmente, a potência média do compactador:

$$P_{mc} = \frac{(E_{compact})}{t_{tc}} = 802 \text{ W} \quad (76)$$

Onde:

P_{mc} é a potência média consumida no ciclo [W].

Supondo também que os outros acessórios consumam aproximadamente 200W de potência, em média, o valor a ser utilizado é de 1000W.

(d) Outros dados disponíveis na literatura:

Segundo BARTH *et al.* [29], o fator de inércia para veículos pesados é:

$$K_m = 1,1$$

Para o fator estrutural do sistema de propulsão, DELUCCHI apud SIMPSON[9] propôs o seguinte valor:

$$K_{estrut} = 1,15$$

BARTH *et al.* [29] definiu também o coeficiente de arrasto para caminhões:

$$C_d = 0,60$$

A largura do caminhão foi dada ($W= 2,46\text{m}$) e a altura (A) pode ser obtida fazendo o seguinte cálculo:

$$A = 2 \cdot D + H = 3,56 \text{ m}$$

Onde D e H estão disponíveis na tabela 10.

Segundo SIMPSON[13], o coeficiente de atrito para esse tipo de veículo tem o seguinte valor:

$$C_{rr} = 0,01$$

A distância percorrida por ciclo foi estimada baseado em [3], o valor considerado será:

$$D_{ciclo} = 80 \text{ km}$$

VALENTE[30] confirma essa estimativa e fornece outra informação importante. Cada caminhão executa esse percurso 2 vezes por dia. Supondo que cada caminhão seja utilizado 250 dias ao ano, ele perfaz, ao final de um ano, a seguinte distância:

$$D_{ano} = D_{ciclo} \cdot 2 \cdot d = 40\,000 \text{ km}$$

Onde:

d é o número de dias por ano que cada caminhão executa a coleta.

5.4 Dados complementares sobre a produção de energia elétrica através do biogás em uma ETE.

Para realizar a simulação, são necessárias algumas entradas relacionadas à produção de biogás em ETE. Nesse item, os valores pesquisados desses parâmetros serão mostrados.

a) PCI do biogás produzido

Para ser utilizado como energia elétrica ou como combustível, o biogás deve ser purificado e, com isso, apresenta uma elevada concentração de metano. Assim, o teor de CH₄ considerado foi de 99% [31]. Para essa percentagem, tem-se da figura 12 que o PCI desse biogás é 8500 kcal/m³.

b) Densidade do Biogás

Segundo [31], a densidade do biogás com essa concentração de metano é de 0,727 kg/m³.

c) Vazão de biogás gerado

Foi considerada uma vazão de 75m³/h de biogás purificado com 99% de metano, que é a vazão da ETE Alegria - RJ [31]

d) Custo dos equipamentos necessários para gerar energia elétrica a partir do biogás e valores financeiros relacionados

Os dados de análise econômica foram retirados dos trabalhos de SEADI et Al. [6] e GARCILASSO et Al.[7].

GARCILASSO et Al.[7] analisa a geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente de estação de tratamento de esgoto, promovendo um estudo de custos para a geração de eletricidade a partir de microturbinas e motores Otto, ambos com potência instalada de 30 kW.

Os dados encontrados nos trabalhos citados são resumidos abaixo:

- Tributos (TT)

O valor escolhido para esse parâmetro foi 37%, baseado em [6];

- Fração de Débitos (FD)

Foi suposto que o empreendedor tem metade do capital necessário, sendo a outra metade financiada. Assim, a FD é igual a 50%;

- Taxa de Débitos (TD)

Com base em [6], TD foi considerado 8% ao ano;

- Taxa de Capital Próprio (TE)

TE é igual a 15% ao ano, com base em [6];

- Vida Útil
Foi considerada uma vida útil de 7 anos, segundo [7];
- Cotação do dólar americano
A cotação do dólar usada foi US\$1,00 = R\$ 2,00, tendo como base a cotação do dia 21/04/2013, do Banco Central [32];
- Custo do Capital
Segundo GARCILASSO et al.[7], para o motor Otto de 30 kW de potência, o custo dos equipamentos é de R\$ 68.000,00. Assim, pode-se obter um custo de capital de US\$ 1133,00/kW.
- Custo de O&M anual
Foi considerado o valor de US\$ 430,30/kW para o custo de O&M anual, baseado em GARCILASSO et al.[7], que fornece o custo de O&M de R\$25.816,00 para uma vida útil de 40.000 h.
- Eficiência na geração de potência
Em [6], tem-se o valor de 31% para a eficiência na geração de potência;
- Fator de capacidade
Para esse parâmetro, [6] fornece o valor de 63%;
- Tempo de construção
Foi considerado que o tempo de construção dos equipamentos de geração de energia elétrica é de 1,5 anos. Esse tempo envolve licenciamento, projeto, aquisição de equipamentos e construção propriamente dita da planta.

5.5 Energia Específica e Densidade de Energia

Esses dois parâmetros são fundamentais na simulação. Através desses, é possível comparar diferentes tipos de combustível a serem utilizados. Na tabela 12, são apresentados esses dados para os combustíveis estudados.

Tabela 12 – Dados específicos dos combustíveis [13]

	Energia Específica (Wh/kg)	Densidade de Energia
VE Bateria de NiMH	70	165 Wh/l
VE Bateria de Li Ion	160	270 Wh/l
Diesel	10360	7970 Wh/l
Biogás (99% metano)	13774	9917 Wh/m ³

5.6 Preço dos combustíveis

Para estudo de viabilidade financeira, os preços (ou no caso biogás, o custo) dos combustíveis envolvidos foram pesquisados:

- Biogás produzido em ETE

Os custos operacionais para produção de biogás numa planta com reator anaeróbico de manto de lodo e fluxo ascendente (RALF), de médio porte, situam-se entre US\$ 0,03/m³ e US\$ 0,05/m³. [5] O custo de purificação do biogás está diretamente relacionado com o custo anterior e, para aquelas condições, apresenta um valor aproximado de R\$0,03/m³. [5] Assim, será considerado um custo total do biogás produzido em uma ETE de R\$0,08/m³.

- GNV comprado comercialmente

Com base na ANP [33], o preço médio do GNV no estado do Rio de Janeiro é de R\$1,67/m³, enquanto a média nacional é de R\$1,78/m³. Será usado o último valor para a simulação. Esses são preços médios obtidos na semana de 14/04/2013 a 20/04/2013;

- Eletricidade gerada pelo biogás produzido em ETE

Como foi detalhado no capítulo 9 do presente trabalho, o preço da energia elétrica depende do custo do combustível, que é o biogás nela gerado. Sendo

assim, tendo como base o valor citado acima para o preço do biogás produzido, o preço aproximado da eletricidade gerada é de R\$0,34/kWh.

Esse valor se refere ao custo de geração, supondo que a energia seja fornecida pela ETE sem lucro, a preço de custo.

A figura 26 mostra um estudo de sensibilidade do custo final da energia elétrica em relação ao custo do biogás.

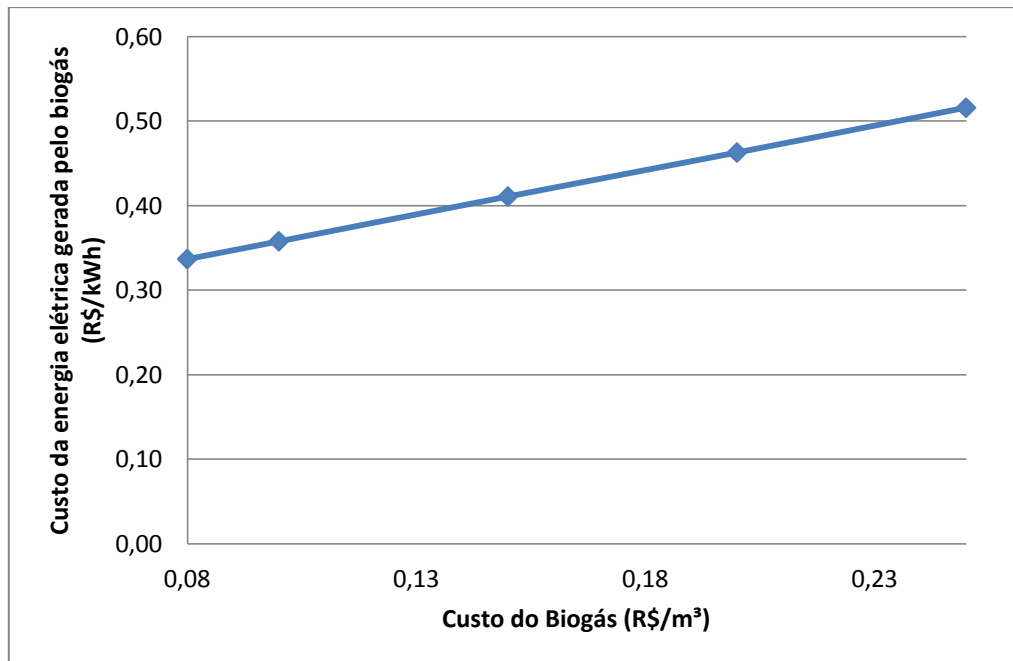


Figura 26 – Análise de sensibilidade de custo da eletricidade por custo do biogás

Para as análises de custo das arquiteturas, serão usados os valores de R\$0,08/m³ de biogás (sem lucro) e R\$0,20/m³.

- Eletricidade comprada da Rede Elétrica por uma ETE
Há uma grande variação do preço de eletricidade comprada por uma Estação de Tratamento de Esgoto. Considerando uma planta de médio porte UASB com lagoa, o valor médio anual pago pela energia elétrica é de R\$0,29/kWh. Para isso, considerou-se que a ETE paga tarifa horo sazonal verde [34].
- Diesel
O preço do Diesel comum a nível nacional é de R\$2,33/L, segundo a ANP [33].

Capítulo 6 – ESTUDO DE CASO

No capítulo anterior, foram selecionados os parâmetros a serem usados na simulação para o caminhão de coleta. O presente capítulo apresenta análises dos seguintes fatores:

- Valor economizado de combustível com a substituição da arquitetura veicular;
- Capacidade de atendimento do biogás;

Além disso, serão feitos comentários, com base na literatura, sobre poluição sonora causada por caminhão de coleta e emissões de gases poluentes.

6.1 Valor economizado de combustível com a seleção de uma nova arquitetura veicular

Para calcular a viabilidade de substituição do MCI utilizando diesel como combustível por uma nova arquitetura veicular, foi calculado inicialmente o consumo de energia usando o PAMVEC. A figura 27 mostra a energia necessária por km usando cada sistema de propulsão.

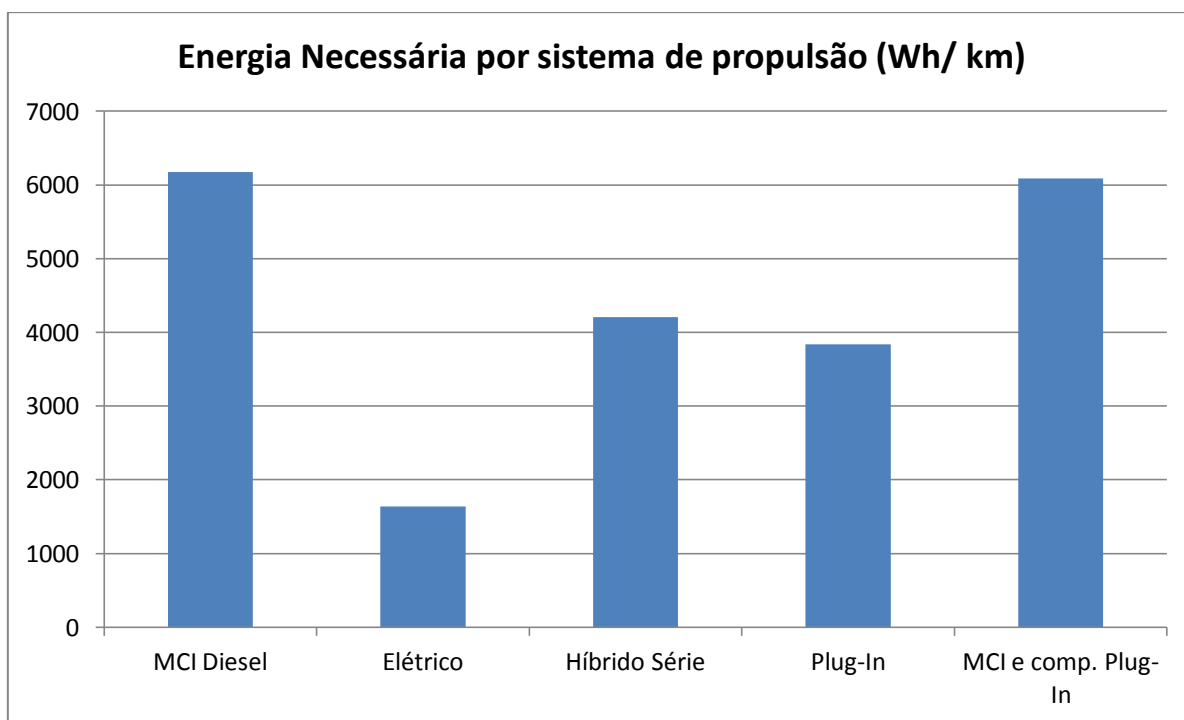


Figura 27 - Relação da energia necessária com a arquitetura veicular selecionada

O consumo de combustível depende também do combustível. A tabela 13 mostra os custos de combustível por km de todas as arquiteturas testadas no presente trabalho. A coluna da direita representa os custos, caso o biogás veja vendido a R\$0,20/m³ pela ETE.

Tabela 13 – Custo por km das arquiteturas veiculares testadas

Arquitetura Veicular	R\$/km (1)	R\$/km (2)
MCI diesel	1,81	-
MCI Biogás	0,28	0,45
Elétrico à Bateria (energia elétrica da rede)	0,38	-
Elétrico à Bateria (energia elétrica do biogás ETE)	0,55	0,76
Híbrido Série Biogás	0,24	0,34
<i>Plug-In</i> Biogás (en. elétrica do biogás)	0,33	0,46
<i>Plug-In</i> Biogás (en. elétrica da rede)	0,29	-
MCI Biogás e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. biogás)	0,29	0,31
MCI Biogás e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. rede)	0,28	-
MCI Diesel e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. biogás)	1,79	1,81
MCI Diesel e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. rede)	1,78	-

Notas: “en. el. rede” significa compra de eletricidade da rede; “en. el. biogás” significa geração elétrica em ETE a partir do biogás.

(1) Para biogás a preço de custo na ETE – R\$ 0,08/m³.

(2) Para biogás vendido com lucro pela ETE – R\$ 0,20/m³.

Para simplificar a comparação de consumo de combustível, será feita uma normalização. Será atribuído o valor 1 à arquitetura veicular tradicional (MCI diesel). Assim, as outras estruturas apresentarão valor da divisão do custo dessas pelo custo do MCI diesel. A figura 28 mostra a relação normalizada de consumo de combustível para as diferentes estruturas que usam motor de combustão interna.

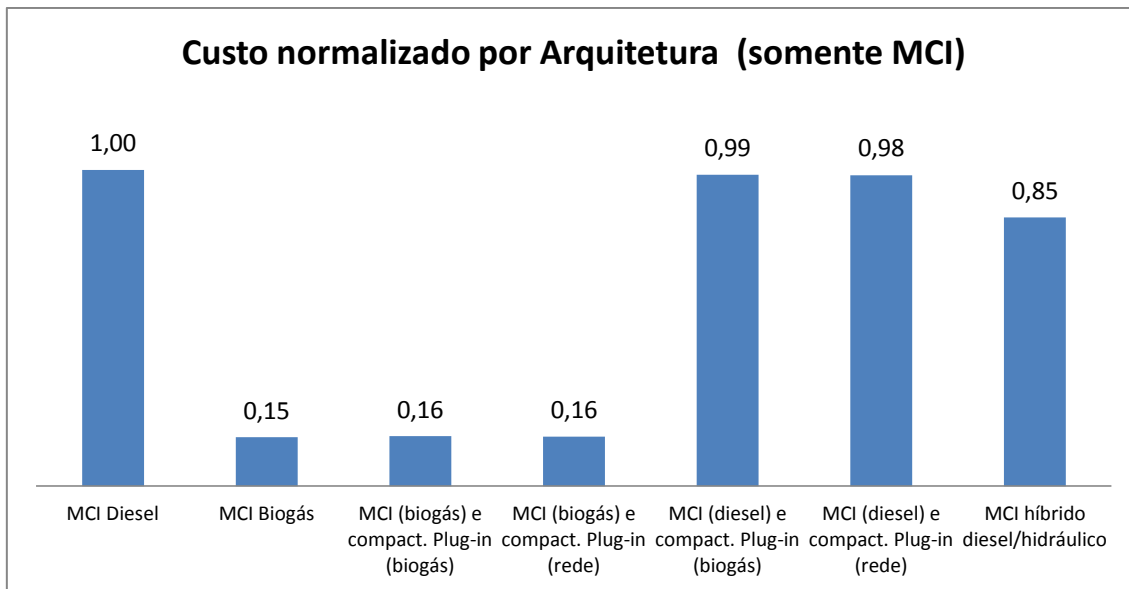


Figura 28 – Gráfico do custo normalizado por arquitetura veicular com MCI

Como pode ser observado na figura 27, os custos relacionados ao MCI são consideravelmente menores quando se utiliza biogás como combustível. As combinações com MCI diesel apresentam pouca diminuição de custo.

Deve-se lembrar que a combinação MCI híbrido diesel/hidráulico não foi testada no PAMVEC. Seus dados foram retirados de uma simulação presente em [15] utilizando o mesmo ciclo de condução, como já foi detalhado no capítulo 2 (item 2.3.1.2).

A figura 29 apresenta a mesma normalização agora para os outros veículos. O valor 1 é novamente atribuído para o MCI diesel, para obter uma melhor comparação.

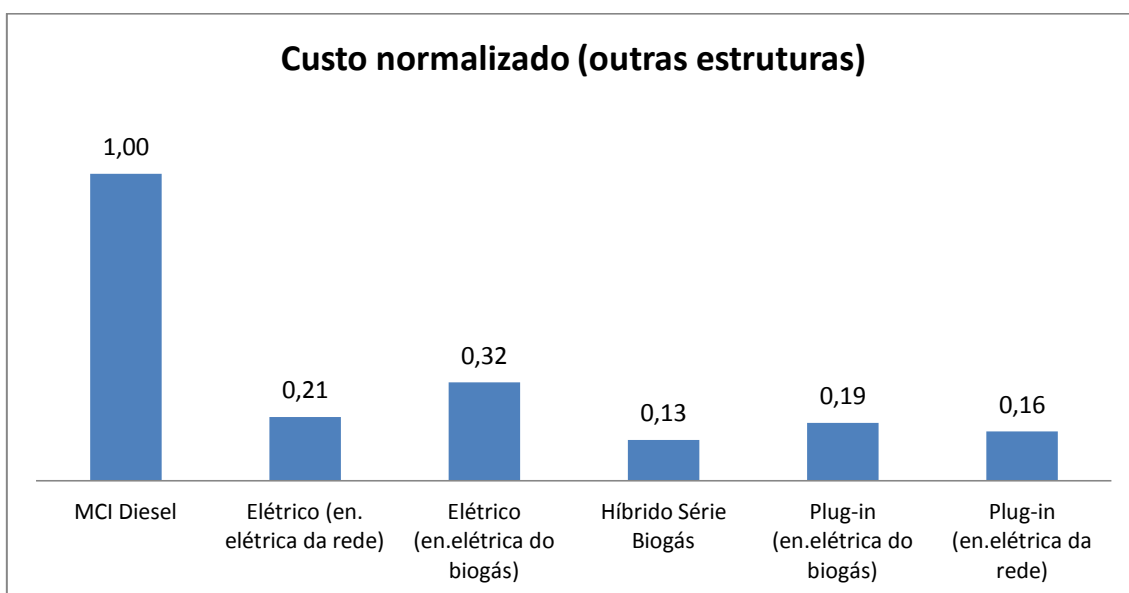


Figura 29 – Custo normalizado para as outras arquiteturas veiculares simuladas

Da figura 29, pode-se observar que as estruturas que utilizam motor elétrico são consideravelmente mais econômicas, em relação ao consumo de combustível.

A viabilidade da utilização dessas estruturas para os caminhões de coleta deve ser analisada tendo em vista que o custo de aquisição de veículos contendo essas arquiteturas é sensivelmente maior.

Como a substituição trata de algumas estruturas que ainda não estão disponíveis, torna-se inviável estimar o custo dessas arquiteturas.

O presente trabalho faz uma análise da economia de combustível durante toda a vida útil do caminhão. Assim, um usuário pode analisar a viabilidade de seu projeto, desde que tenha uma estimativa dos gastos iniciais desse.

Para estudar a economia total de combustível durante a vida útil do caminhão, foi utilizada a seguinte relação:

$$TCE = (C_{MCI\ diesel} - C_{nav}) \cdot d_{ciclo} \cdot ciclos_{dia} \cdot dias_{ano} \cdot vu \cdot \frac{1}{FVA} \quad (77)$$

Onde:

TCE é o total de combustível economizado, corrigido para valor atual [R\$];

$C_{MCI\ diesel}$ é o custo do diesel por km rodado usando MCI [R\$/km];

C_{nav} é o custo por km rodado usando a nova arquitetura veicular [R\$/km];

d_{ciclo} é a distância percorrida por ciclo [km];

$ciclos_{dia}$ é o número de ciclos que o veículo executa por dia;

$dias_{ano}$ é o número de dias por ano que o veículo executa os percursos;

vu é a vida útil do caminhão [ano];

FVA é o fator de valor atual.

O termo C_{nav} é o único que varia para cada arquitetura veicular. Seus valores de entrada foram apresentados na tabela 13.

Os valores para outros termos já foram definidos em capítulos anteriores. O caminhão executaria 2 ciclos de 80 km cada, durante 300 dias por ano.

Para a vida útil do caminhão de coleta, foi considerado o valor de 5 anos [35]. Já para o valor de FVA, foi considerada também uma taxa de débito de 6,4% ao ano, relativa aos juros de um financiamento do BNDES [36] na área de infraestrutura de energia renovável. FVA é definido pela fórmula:

$$FVA = \frac{(1 + i)^n - 1}{i (1 + i)^n} \quad (77)$$

Onde:

i é a taxa de juros do financiamento [% ao ano];

n é o tempo de vida útil do caminhão de coleta [anos].

Assim, usando os valores citados acima, encontra-se o TCE para cada arquitetura veicular proposta. A tabela 14 apresenta o total economizado por cada nova estrutura.

Tabela 14 – TCE para cada estrutura nova

Arquitetura Veicular	TCE (R\$) (1)	TCE (R\$) (2)
MCI Biogás	88.300	78.600
Elétrico à Bateria (energia elétrica da rede)	82.700	-
Elétrico à Bateria (energia elétrica do biogás ETE)	71.000	60.700
Híbrido Série Biogás	90.600	85.000
<i>Plug-In</i> Biogás (en. elétrica do biogás)	84.800	78.000
<i>Plug-In</i> Biogás (en. elétrica da rede)	87.700	-
MCI Biogás e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. biogás)	88.000	86.700
MCI Biogás e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. rede)	88.200	-
MCI Diesel e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. biogás)	1.500	0
MCI Diesel e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. rede)	1.700	-

(1) Para biogás a preço de custo na ETE – R\$ 0,08/m³.

(2) Para biogás vendido com lucro pela ETE – R\$ 0,20/m³.

Assim, tem-se a diferença máxima de preço em relação ao MCI diesel que viabilizaria adquirir um veículo com outra arquitetura veicular. Por exemplo, para ser mais viável economicamente ter um caminhão de coleta híbrido em série que um caminhão MCI diesel, o custo de aquisição do primeiro deve ser no máximo R\$90.600,00 a mais que o custo do segundo.

É importante destacar que os valores expostos na tabela 14 se baseiam apenas nos aspectos econômicos. Aspectos ambientais relacionados à poluição sonora e à emissão de gases poluentes serão abordados nos próximos itens desse capítulo.

6.2 Capacidade de fornecimento de biogás em relação ao número de caminhões atendidos

Como foi visto nos capítulos anteriores, o biogás gerado em uma ETE deve ser purificado, para depois ser utilizado como combustível ou na geração de energia elétrica.

Admite-se que toda a vazão de biogás gerado foi purificada e, posteriormente, usada para os caminhões de coleta (como combustível diretamente ou convertido em energia elétrica usada nas baterias).

Com isso, foi estimado o número de caminhões que poderiam ser atendidos por uma ETE de médio porte. Para isso, foi usada uma vazão de 75m³/h de biogás purificado relativa à Estação de Tratamento de Esgoto de Alegria [31].

A figura 30 apresenta o consumo de biogás por caminhão para cada arquitetura veicular. As estruturas não mostradas utilizam apenas diesel ou energia elétrica da rede como fonte.

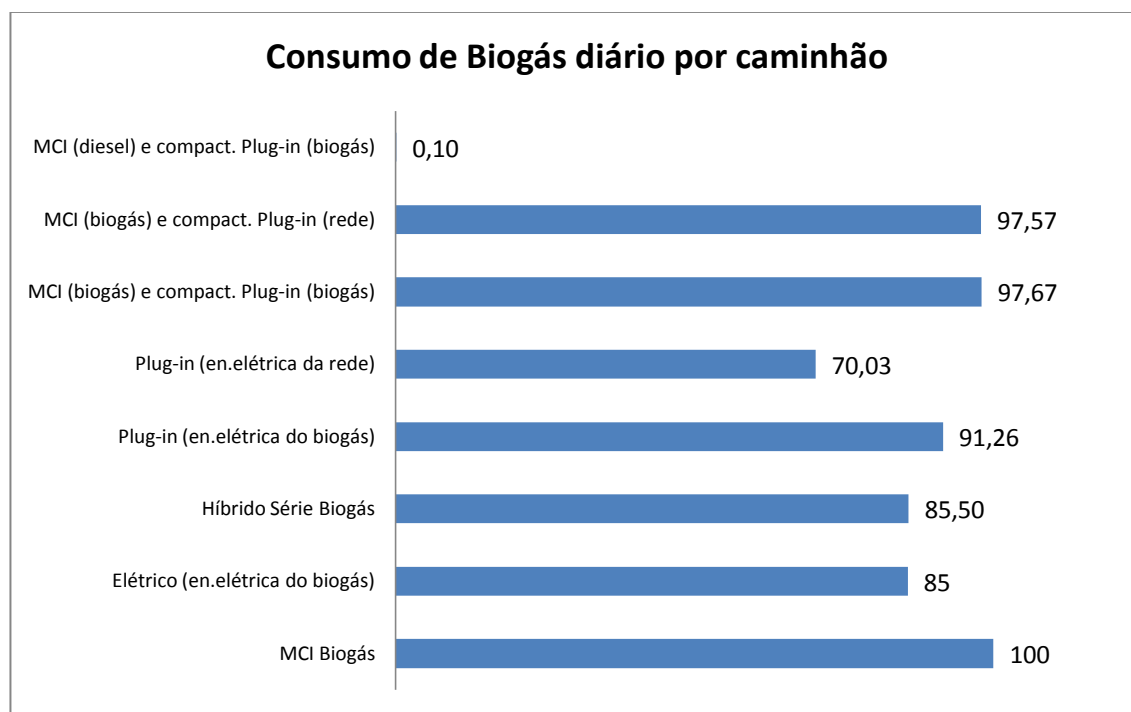


Figura 30 – Consumo diário de biogás por caminhão de cada estrutura veicular

Assim, tendo o consumo de biogás por caminhão, torna-se possível calcular o número máximo de caminhões que poderiam ser atendidos pelo biogás gerado exclusivamente dessa ETE. A tabela 15 apresenta os valores encontrados para esse estudo.

Tabela 15 – Número máximo de caminhões atendidos

Arquitetura Veicular	Número Caminhões
MCI Biogás	18
Elétrico à Bateria (energia elétrica do biogás ETE)	21
Híbrido Série Biogás	21
<i>Plug-In</i> Biogás (en. elétrica do biogás)	20
<i>Plug-In</i> Biogás (en. elétrica da rede)	26
MCI Biogás e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. biogás)	18
MCI Biogás e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. rede)	19
MCI Diesel e compactador <i>Plug-In</i> (en. el. biogás)	18019

Segundo a COMLURB [37], o município do Rio de Janeiro possui 220 caminhões de coleta com compactador de lixo. Assim, somente a produção de biogás na ETE Alegria já seria responsável por fornecer aproximadamente 10% do biogás necessário para alterar todos os caminhões de coleta do município.

Para tornar mais viável a substituição, poderia usar biogás gerado por outras ETE. Outra opção seria utilizar mais de uma arquitetura veicular. Pode-se ter o máximo possível de caminhões com qualquer uma das 6 primeiras estruturas da tabela 15 e, para atender aos outros veículos, utilizar a estrutura MCI Diesel e compactador *Plug-In* (energia elétrica do biogás), pois essa consome um valor consideravelmente menor de biogás.

6.3 Poluição Sonora Causada por Caminhão de Coleta com Compactador

O relaxamento e o descanso são bastante alterados quando as pessoas são expostas a um índice elevado de ruído. A Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda que em áreas residenciais o nível de ruído não ultrapasse os 55 dB(A)¹.

A escala decibel é logarítmica de intensidade sonora. O zero da escala corresponde ao nível sonoro mínimo que um ser humano é capaz de ouvir (com a frequência de 1000 Hz). A 160 dB ocorre a perfuração instantânea da membrana do tímpano. [3]

De acordo com a OMS, um ruído de até 50 dB(A) pode perturbar, mas o organismo se adapta facilmente a ele. A partir de 55 dB(A) pode haver a ocorrência de estresse leve, acompanhado de desconforto. 70 dB(A) é tido como o nível do desgaste do organismo, aumentando os risco de doenças graves. Já a 100 dB(A), pode haver perda parcial da audição. Essas taxas de ruído, contudo, são referentes a um elevado tempo de exposição, não ficando sujeita aos males a pessoa que for exposta esporadicamente.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) produziu a norma NBR-10.151/2000, que analisa os níveis máximos de ruído considerados suportáveis em áreas habitadas. Na tabela 16, esses limites são relacionados com o tipo de área em que a pessoa se encontra e com o horário do dia.

Tabela 16 –Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos , em dB(A) [3]

Tipos de Área	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área residencial urbana ou de hospitais e escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista com vocação comercial	60	55
Área mista com vocação recreacional	65	55
Área mista com vocação industrial	70	60

Segundo QUADROS [3], a perda auditiva induzida por ruído é uma doença cumulativa e insidiosa, que evolui com o tempo de exposição, associada ao ambiente de trabalho. Pode ser consequência de níveis de ruído que excedam uma média de 90 dB; oito horas por dia, sucessivamente, por vários anos. Após poucos anos de contato diário com o estímulo sonoro elevado, a perda auditiva inicia na frequência de 4000 Hz e atinge uma faixa de 3000 a 6000 Hz.

Os efeitos não auditivos do ruído, de acordo com SELIGMAN apud QUADROS [3], referem-se às alterações orgânicas, podendo ser neurológicas, cardiovasculares, bioquímicas, digestivas e comportamentais. O ruído é considerado como fator causador de inúmeras dessas alterações, especialmente nos casos de exposições ocupacionais,

além de ser mencionado como relevante no surgimento de problemas de saúde, tais como hipertensão, taquicardia, psicoses, neuroses, gastrites, úlceras e outros.

O nível sonoro máximo devido à presença do caminhão com compactador que chega à edificação está situado na faixa de 77-79 dB(A) [3], causando certo incômodo mas por um período curto de tempo.

A situação é consideravelmente pior para os funcionários da coleta. Eles são expostos a 105-115 dB(A) durante a compactação. Dependendo do tempo de exposição a essa taxa de ruído, os coletores estão passíveis a sofrer vários males, podendo chegar à perda parcial da audição, com o passar dos anos. [3]

Para caminhões de coleta com compactador elétrico ou caminhões completamente elétricos, não há informações precisas de quantidade de ruído gerado, mas, por várias fontes [3,8,11,38], pode-se concluir que o ruído nesses veículos é consideravelmente menor do que o apresentado na arquitetura tradicional.

6.4 Efeitos ambientais da substituição do MCI Diesel

A utilização de combustíveis fósseis como o petróleo e o gás natural emite para a atmosfera elevadas taxas de CO₂ que estavam armazenadas na crosta terrestre. A elevação da concentração desse gás na atmosfera acentua o aquecimento global. [6]

A combustão do biogás também gera CO₂, mas esse gás foi retido pela fotossíntese da planta que deu origem ao biogás. No caso da produção de biogás por biodigestão anaeróbica, como na ETE, a produção de biogás reduz a emissão de metano e N₂O, o que é de grande relevância, pois o potencial poluidor do metano é 23 vezes maior que o do CO₂. [6]

Os veículos movidos à energia elétrica não emitem gases. Sendo assim, as composições veiculares que possuam parte da energia ou toda ela fornecida por baterias apresentam emissões de gases poluentes consideravelmente menores, relacionadas apenas com a geração da energia elétrica. [9]

Capítulo 7 - CONCLUSÕES

O MCI diesel é a arquitetura veicular tradicionalmente usada em caminhões de coleta. Conforme discutido neste trabalho, essa arquitetura apresenta alguns inconvenientes: o ruído causado pelo compactador é bastante elevado, prejudicando especialmente os coletores de lixo, e a combustão do diesel, que gera emissões elevadas de gases poluentes.

A substituição dessa estrutura por outra que atenuasse os problemas citados foi simulada através da ferramenta PAMVEC. Para isso, a ferramenta foi complementada de modo a permitir o estudo da geração de biogás em ETE e atender às particularidades de caminhões de coleta com compactador.

Para cada arquitetura veicular, foi calculado um custo adicional (em relação ao MCI diesel) máximo no qual ainda seria mais atrativo substituir o MCI diesel por uma nova estrutura. Por se tratar de tecnologias em desenvolvimento, calcular o custo de certas arquiteturas seria inviável. Assim, foi obtido um valor de referência para cada uma delas.

Em relação à produção de biogás, pode-se observar que uma ETE de grande porte poderia fornecer em torno de 10% do biogás necessário para alimentar toda a frota caminhões de coleta com compactador do município do Rio de Janeiro. Essa porcentagem se refere a arquiteturas que utilizam somente biogás, tanto no MCI quanto para geração de energia usada no motor elétrico. Com isso, a diminuição do ruído e a redução das emissões de gases poluentes são atendidas.

Visando atender a uma maior quantidade de caminhões, a estrutura MCI diesel e compactador *Plug-In* (energia elétrica do biogás) foi simulada, já que seu consumo de biogás é consideravelmente menor. Apesar disso, ela não diminui tanto as emissões de gases poluentes e não reduz tanto o ruído.

Assim, o uso combinado de diferentes arquiteturas veiculares pode aumentar o número de caminhões atendidos e alcançar os objetivos ambientais. Usando estruturas menos poluentes, como aquelas que utilizam energia elétrica, aliadas ao MCI diesel e compactador *Plug-In* (energia elétrica do biogás), pode-se atender a todos os caminhões, além de ter uma frota com veículos menos ruidosos e poluentes.

Para estudos futuros, seria importante fazer a análise de geração de biogás e energia elétrica através de aterro sanitário. Com isso, poderia ter uma rede de coleta de

lixo doméstico que produziria boa parte da energia que seria utilizada por ela. Assim, além de diminuir a carga poluidora dos resíduos, pode-se gerar energia para seu funcionamento, reduzindo seus custos.

Outro item de grande relevância para estudos posteriores é a quantificação da redução de ruído. Um estudo através de ensaios e testes pode indicar a redução de ruído de forma precisa e mostrar os impactos positivos dessa redução.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Urbana. Disponível em:
<<http://www.ablp.org.br/conteudo/artigos.php?pag=integra&cod=498>> (acesso em 10/04/2013)
- [2] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:
<<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/ids2010.pdf>> (acesso em 23/04/2013)
- [3] QUADROS, F.S., 2004, Avaliação do Ruído Ambiental causado por Veículo de Utilidade Pública. Estudo de Caso: Caminhão de Coleta de Resíduo Domiciliar. Dissertação de Mestrado, UFTPR, PR, Brasil.
- [4] GEESINKNORBA. Disponível em:
<<http://www.geesinknorba.com/>> (acesso em 10/02/2013)
- [5] TAVARES, A.V.J, 2008. Análise de Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.
- [6] SEADI, T.A., RUTZ, D, *et al*, 2008. Biogas Handbook. University of Southern Denmark Esbjerg, Esbjerg, Dinamarca.
- [7] GARCILASSO, V.P., VESCOVO, E., 2012. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente de estação de tratamento de esgoto. 4º Congresso de Cogeração de Energia. São Paulo, SP, Brasil.
- [8] THOMAS, C.E, 2009. “Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared”. International Journal of Hydrogen Energy 34. Virginia, USA.
- [9] BORBA, B.S.. 2012, Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro. Tese de doutorado, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil

- [10] SOVACOOOL, B.K, HIRSH, R.F., Beyond batteries: an examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition, *energy Policy* 37, pp.1095-1103, 2009.
- [11] SMITH, C.B., 2012, Análise de difusão de novas tecnologias automotivas em prol da eficiência energética na frota de veículos leves no Brasil. Tese de Doutorado, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [12] KIVILUOMA J. Methodology for modelling plug-in electric vehicles in the power system and cost estimates for a system with either smart or dumb electric vehicles. *Energy* 2011; 36:1758-67.
- [13] SIMPSON, A.G., 2005, Parametric Modelling of Energy Consumption in Road Vehicles. Ph.D. dissertation, The University of Queensland, Queensland, Australia.
- [14] BUENO, M.F.,2010, Simulação de Veículo Elétrico utilizando a Ferramenta PAMVEC. Tese de Graduação, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. Brasil.
- [15] CHAVES, R., MARQUES, G., ET AL., 2012, “Caminhão de Lixo Híbrido Diesel-Hidráulico. Redução de 15% no consumo de combustível.”. Prêmio Tecnologia Diesel – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva. São Paulo, SP, Brasil.
- [16] FERREIRA, A.A., POMILIO, J.A., ET AL., 2009, Metodologia para dimensionar múltiplas fontes de suprimento de energia em veículos elétricos. UNICAMP. Campinas, SP, Brasil.
- [17] ABVE – Associação Brasileira de Veículos Elétricos. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/>> (acesso em 23/04/2013)
- [18] VAN WYLEN, G.J., SONNTAG, R.E, 2003. Fundamentos da Termodinâmica. Editora Edgard Blucher. Tradução da sexta edição inglesa.. São Paulo, SP, Brasil.

- [19] STONE, R. 1993, Internal Combustion Engines. Society of Automotive Engineers, Inc. 2nd Edition.. Warrendale, PA, USA.
- [20] LAPUERTA, M., ARMAS, O. ET AL, 2006, Stability of diesel–bioethanol blends for use in diesel engines. University of Castilla – La Mancha. Ciudad Real, Espanha
- [21] NEMRY, F., LEDUC, G., et al., 2009. “Plug-in Hybrid and Battery-Electric Vehicles: State of the research and development and comparative analysis of energy and cost efficiency”. JRC Technical Notes, 54699. Seville, Spain.
- [22] BRANCO. Disponível em: <www.branco.com.br> (acesso em 23/04/2013)
- [23] CAPSTONE. Capstone Product Catalog 2010. Disponível em: <www.capstoneturbine.com>. (acesso em 23/04/2013)
- [24] CATERPILLAR. Electric Power Rating Guides CATERPILLAR: Generator Sets. Disponível em: <www.caterpillar.com> (acesso em 23/04/2013)
- [25] RETSCREEN. RETScreen International Software e Dados. Government of Canada - Natural Resources Canada. Disponível em: <<http://www.etscreen.net/pt/version4.php>>. (Acesso em 5/8/2012)
- [26] CARVALHO DE CASTRO, C.F., 2008, Avaliação de Fatores Intervenientes nas Emissões Veiculares em Corredores de Ônibus. Tese de Mestrado, USP. São Paulo, SP, Brasil.
- [27] USIMECA. Disponível em: http://www.usimeca.com.br/sub_produtos/pdfs/Delta.pdf (acesso em 01/12/2012)
- [28] BARROS, R.T.V., 2005. “Propostas de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos nas Cidades de Comarcão e Francisco Badaró” In: 8º Encontro de Extensão UFMG. pp17889. Belo Horizonte, MG, Brasil

[29] BARTH, M ; YOUNGLOVE ,T ; SCORA, G. Development of a Heavy-Duty Diesel Modal Emissions and Fuel Consumption Model. University of California, Riverside, 2005.

[30] VALENTE, Victor. Comunicação Pessoal com Especialista em Engenharia Sanitária.

[31] MACHADO, L.L.N. 2011. Aspectos Teóricos na Geração de Energia Elétrica a partir do Lodo de Esgoto. Tese de Mestrado. Rio de Janeiro, RJ. UFRJ.

[32] COTAÇÃO DO DÓLAR. Disponível em:
<http://dolarhoje.com> (acesso em 21/04/2013)

[33] ANP – Agência Nacional do Petróleo. Disponível em:
http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Quatro_Combustiveis.asp (acesso em 21/04/2013)

[34] LIGHT. Disponível em:
<http://www.light.com.br/web/institucional/atendimento/informacoes/tarifas/tetarifas.asp>
(acesso em 21/04/2013)

[35] RECEITA FEDERAL. Disponível em:
<http://www.receita.fazenda.gov.br/pessoajuridica/dipj/2003/pergresp2003/pr460a473.ht>
(acesso em 01/07/2013)

[36] BNDES. Disponível em:
http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Produtos/FINEM/energias_alternativas.html (acesso em 01/07/2013)

[37] COMLURB. Disponível em:
<http://www.rio.rj.gov.br/web/comlurb> (acesso em 01/07/2013)

[38] FLEIG, R. , 2004, Perda auditiva induzida por ruído em motoristas de caminhão de coleta de lixo urbano. Dissertação de Mestrado, UFSCar. Florianópolis, SC, Brasil.

Anexo I: Programação em VBA utilizada

Para o presente trabalho, foram utilizados alguns recursos de programação em Microsoft Visual Basic, que é o software de programação utilizado pelo Microsoft Excel, onde foi idealizado o PAMVEC, com o objetivo de facilitar o acesso à informação do usuário.

Abaixo se encontra a estrutura em VBA feita para o presente trabalho:

a) Para a inicialização do PAMVEC

```
Private Sub Workbook_Open()
```

```
Sheets("Entradas").Activate
```

```
With ActiveSheet.Ciclo
```

```
.AddItem "PF COLETA"
```

```
.AddItem "NYCC"
```

```
.AddItem "NYCCOMP"
```

```
.AddItem "WVUCITY"
```

```
.AddItem "UDDS"
```

```
.AddItem "NEDC"
```

```
.AddItem "US06"
```

```
.AddItem "MANHATTAN"
```

```
.AddItem "NYCTRUCK"
```

```
.AddItem "UDDSHDV"
```

```
.AddItem "PERSONALIZADO"
```

```
.Value = ""
```

```
End With
```

```
Sheets("MCI").Activate
```

```
With ActiveSheet.Combustivel
```

```
.AddItem "Biogás"
```

```
.AddItem "Diesel"
```

```
.AddItem "Gasolina"
```

```
.AddItem "GNV"
```

```
.AddItem "Etanol"
```

```
.AddItem "Gasolina 77% "
```

```
.AddItem "Outro"
```

```
.Value = ""
```

```
End With
```

```
Sheets("Híbrido Série").Activate
```



```

With ActiveSheet.CombHS
    .AddItem "Biogás"
    .AddItem "Diesel"
    .AddItem "Gasolina"
    .AddItem "GNV"
    .AddItem "Etanol"
    .AddItem "Gasolina 77%"
    .AddItem "Outro"
    .Value = ""
End With

```

```

Sheets("Elétrico").Activate
With ActiveSheet.Bateria
    .AddItem "VRLA"
    .AddItem "Ion de Lítio"
    .AddItem "NiMH"
    .Value = ""
End With

```

```

Sheets("Início").Activate
End Sub

```

b) Para a planilha “Entradas”

```

Private Sub Worksheet_SelectionChange(ByVal Target As Range)
End Sub

```

```

Private Sub Ciclo_Change()
If Ciclo.Value = "PF COLETA" Then
    Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("H20")
    Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("H21")
    Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("H22")
    Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("H23")

```

```

ElseIf Ciclo.Value = "NYCC" Then
    Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("C3")
    Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("C4")
    Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("C5")
    Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("C6")

```

```

ElseIf Ciclo.Value = "NYCCOMP" Then
    Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("D3")
    Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("D4")

```

Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("D5")
Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("D6")

ElseIf Ciclo.Value = "WVUCITY" Then
Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("E3")
Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("E4")
Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("E5")
Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("E6")

ElseIf Ciclo.Value = "UDDS" Then
Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("I3")
Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("I4")
Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("I5")
Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("I6")

ElseIf Ciclo.Value = "NEDC" Then
Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("J3")
Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("J4")
Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("J5")
Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("J6")

ElseIf Ciclo.Value = "US06" Then
Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("H12")
Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("H13")
Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("H14")
Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("H15")

ElseIf Ciclo.Value = "MANHATTAN" Then
Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("C20")
Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("C21")
Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("C22")
Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("C23")

ElseIf Ciclo.Value = "NYCTRUCK" Then
Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("D20")
Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("D21")
Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("D22")
Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("D23")

ElseIf Ciclo.Value = "UDDSHDV" Then
Range("B18").Value = Sheets("Ciclos").Range("G20")
Range("B19").Value = Sheets("Ciclos").Range("G21")
Range("B20").Value = Sheets("Ciclos").Range("G22")
Range("B21").Value = Sheets("Ciclos").Range("G23")

```
ElseIf Ciclo.Value = "PERSONALIZADO" Then
```

```
    Range("B18").Value = Range("B33")
```

```
    Range("B19").Value = Range("B34")
```

```
    Range("B20").Value = Range("B35")
```

```
    Range("B21").Value = Range("B36")
```

```
End If
```

```
End Sub
```

c) Para a planilha “MCI” e “Híbrido Série”

```
Private Sub Combustivel_Change()
```

```
If Combustivel.Value = "Biogás" Then
```

```
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("J18")
```

```
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("L18")
```

```
    Range("J26").Value = Sheets("Entradas").Range("J19")
```

```
    Range("K26").Value = Sheets("Entradas").Range("K19")
```

```
ElseIf Combustivel.Value = "Diesel" Then
```

```
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("J6")
```

```
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("L6")
```

```
    Range("J26").Value = Sheets("Entradas").Range("J17")
```

```
    Range("K26").Value = Sheets("Entradas").Range("K14")
```

```
ElseIf Combustivel.Value = "Gasolina" Then
```

```
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("J4")
```

```
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("L4")
```

```
    Range("J26").Value = Sheets("Entradas").Range("J14")
```

```
    Range("K26").Value = Sheets("Entradas").Range("K14")
```

```
ElseIf Combustivel.Value = "GNV" Then
```

```
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("J9")
```

```
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("L9")
```

```
    Range("J26").Value = Sheets("Entradas").Range("J18")
```

```
    Range("K26").Value = Sheets("Entradas").Range("K19")
```

```
ElseIf Combustivel.Value = "Etanol" Then
```

```
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("J11")
```

```
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("L11")
```

```
    Range("J26").Value = Sheets("Entradas").Range("J16")
```

```
    Range("K26").Value = Sheets("Entradas").Range("K14")
```

```
ElseIf Combustivel.Value = "Gasolina 77%" Then
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("J5")
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("L5")
    Range("J26").Value = Sheets("Entradas").Range("J15")
    Range("K26").Value = Sheets("Entradas").Range("K14")
```

```
ElseIf Combustivel.Value = "Outro" Then
    Range("B9").Value = Range("B30")
    Range("B10").Value = Range("B31")
    Range("J26").Value = Range("B32")
```

```
End If
End Sub
```

d) Para a planilha “Elétrico”

```
Private Sub Bateria_Change()
If Bateria.Value = "VRLA" Then
    Range("B7").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("B15")
    Range("B8").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("C15")
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("E15")
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("D15")
    Range("B11").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("G15")
```

```
ElseIf Bateria.Value = "Ion de Lítio" Then
    Range("B7").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("B17")
    Range("B8").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("C17")
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("E17")
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("D17")
    Range("B11").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("G17")
```

```
ElseIf Bateria.Value = "NiMH" Then
    Range("B7").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("B16")
    Range("B8").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("C16")
    Range("B9").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("E16")
    Range("B10").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("D16")
    Range("B11").Value = Sheets("Powertrain Components").Range("G16")
```