

VE 2007 - 5º Seminário e Exposição de Veículos Elétricos
A Bateria, Híbridos e de Célula Combustível.
Centro Cultural Light – Rio de Janeiro - RJ
25 e 26 de outubro de 2007

**Análise e Estudos da Conversão de uma Kombi para Tração Elétrica.
Projeto Conjunto da UERJ e CEFET - RJ**

Luiz Artur Pecorelli Peres
Cleiton Magalhães Freitas; Daniel Lucas dos Santos e Raphael D'Avila Bastos (Estudantes)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Washington da Costa; Antonino P. da Silva , Sergio M. Faragasso
Diego Meireles Lopes; Filipe da Silveira (Estudantes)
Núcleo de Tecnologia Automobilística - NTA
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET / RJ

Palavras-chave: conversão de veículos elétricos, motores elétricos, baterias, simulação.

Resumo: Este trabalho descreve os estudos e análises conduzidas no âmbito do Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas da Faculdade de Engenharia da UERJ e do Núcleo de Tecnologia Automobilística – NTA do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET / RJ visando a conversão de uma Kombi para tração elétrica. O texto aborda a concepção desta iniciativa e os cálculos básicos realizados para a efetivação do projeto. A experiência é considerada muito enriquecedora no que tange ao aprendizado das equipes participantes com relação aos aspectos técnicos relacionados à adequação dos componentes fornecidos pelos patrocinadores para transformação do veículo disponível. Outro ponto de destaque se refere aos desafios de comunicação uma vez que diversas tarefas e atividades são realizadas em diferentes locais. O objetivo do projeto é de caráter educativo e de promoção dos benefícios da tecnologia veicular elétrica.

1. Introdução e Considerações Técnicas

Objetivos

As idéias iniciais do desenvolvimento deste projeto de conversão de veículo a combustão interna para tração elétrica surgiram dos entendimentos mantidos entre profissionais do Núcleo de Tecnologia Automobilística – NTA do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET / RJ, situado no bairro de Maria da Graça, na cidade do Rio de Janeiro e do Grupo de Estudos de Veículos Elétricos – GRUVE da Faculdade de Engenharia da UERJ. Posteriormente, no primeiro semestre de 2006, foi iniciado o Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da UERJ no qual freqüentaram professores do CEFET – RJ na disciplina de Sistemas de Propulsão Veicular ministrada pelo Coordenador do Grupo de Estudos de Veículos Elétricos - GRUVE. Esta circunstância propiciou novas iniciativas tendo em vista a disponibilidade de uma Kombi a gasolina, ano modelo 1982, no Núcleo de Tecnologia Automobilística - NTA do CEFET – RJ que se verificou apropriada para este fim. Além disto, a implantação do Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas – LSPV no Centro de Estudos e Pesquisas em Energias Renováveis – CEPER da Faculdade de Engenharia da UERJ, no bairro de São

Cristóvão, também no Rio de Janeiro, propiciou um ambiente de desenvolvimento de testes de desempenho de carros elétricos apropriado à realização pretendida neste trabalho conjunto.

Em setembro de 2006 foram formadas duas equipes de professores e alunos do CEFET – RJ e da Faculdade de Engenharia da UERJ para a elaboração do projeto. Basicamente, o CEFET – RJ ficou incumbido da preparação da Kombi para conversão, envolvendo a sua recuperação, retirada dos componentes que não serão utilizados após a conversão, montagem do novo sistema e do licenciamento do veículo. Coube ao GRUVE e ao LSPV a análise de desempenho visando adequar o dimensionamento dos novos componentes, os contatos com patrocinadores e o estabelecimento dos testes a serem procedidos.

Ficou acertado que as empresas e organismos comprometidos com o patrocínio do projeto poderão expor seus logotipos na carroceria do veículo convertido. Além disto, em todos os documentos publicados sobre o projeto deverão ter seus nomes mencionados em nota específica de agradecimentos bem como acesso aos resultados desta experiência.

Em Maio de 2007, ficou assegurado o patrocínio da empresa WEG Equipamentos Elétricos S. A. - Automação que ofereceu para o projeto o motor elétrico, o inversor, o carregador de baterias, o conversor DC-DC e a pintura da Kombi bem como seu suporte técnico para adequação destes componentes ao trajeto pretendido. Também, a empresa SATURNIA, fabricante de baterias, destinará estes componentes para realização deste empreendimento. Outros contatos estão em curso com fabricantes de aceleradores eletrônicos e demais acessórios. Além disto, há o apoio da Associação Brasileira do Veículo Elétrico – ABVE na busca de novos patrocínios.

A conversão da Kombi tem como objetivos básicos o seguinte:

- Desenvolver metodologia de conversão de veículos a combustão interna utilizando componentes nacionais.
- Desenvolver procedimentos de teste de veículos convertidos para tração elétrica.
- Aplicar conhecimentos analíticos na execução de projetos.
- Utilizar a Kombi convertida para transporte em trechos curtos de pessoas e cargas entre as duas instituições CEFET/RJ e UERJ, bem como em exposições educativas e desfiles de veículos elétricos.
- Conhecer e estabelecer procedimentos para obtenção de licença para veículos convertidos para tração elétrica.
- Desenvolver procedimentos de trabalho pelas instituições UERJ e CEFET – RJ.
- Incentivar a utilização da tecnologia veicular elétrica tendo em vista seus benefícios energéticos e ambientais.
- Aproximar as equipes de professores e alunos da UERJ e CEFET-RJ para elaboração de experiências e trabalhos em conjunto.
- Testar novos componentes que se adaptem ao projeto.

Considerações Técnicas

A concepção técnica do projeto visa adequar os componentes da Kombi convertida para tração elétrica de forma a atender aos requisitos do trajeto a ser realizado por este veículo.

A Kombi, de preferência, deve ser capaz de realizar trajetos curtos entre as duas instituições, por exemplo, entre o Núcleo de Tecnologia Automobilística – NTA do CEFET / RJ ir à UERJ (Unidade Maracanã) e em seguida se dirigir ao CEFET /RJ (Unidade Maracanã) totalizando cerca de 10 km. Esta consideração se deve ao fato de que o trajeto apesar de ser

curto apresenta diversos aclives com inclinações consideráveis. Como se trata de trecho urbano considerou-se uma velocidade média de 50 km/hora.

- A troca de baterias quando necessária deve ser efetuada em no máximo 40 minutos; supondo-se a existência de carros especiais para retirada das mesmas.
- O dimensionamento do banco de baterias deverá supor uma autonomia com uma margem de segurança de 20% em relação ao trajeto pretendido;
- Para efeito desta avaliação simplificada foram consideradas constantes: a tensão do banco de baterias e o valor de 1m/s^2 nos trechos de aceleração diferentes de zero. Ademais, a relação total entre a velocidade do motor elétrico e a roda do veículo foi adotada igual a 4.4, tomando como referências a velocidade nominal do motor igual a 1760 RPM, correspondente a 50 km/h, isto é, 400,52 RPM na roda e considerando o seu diâmetro igual a 663 mm. Esta relação é praticamente aquela que se consegue fixando-se a relação de transmissão da Kombi correspondente ao menor torque na roda referindo-se, portanto, à quarta marcha (1:0,88) e levando em conta a relação do diferencial (1:5,143).
- Nesta análise preliminar foi considerada a frenagem puramente mecânica e, portanto, são levados em conta apenas os trechos de aceleração e cruzeiro sem costeamento.
- De acordo com os resultados dos cálculos apresentados e tomando-se como referência os dados do motor de indução trifásico e inversor para esta conversão, foi constatada a conveniência de serem mantidas as quatro marchas originais da Kombi para a adaptação destes componentes às condições de torque e velocidade previstas.
- A informação técnica da Kombi original, de ano modelo 1982, foi levantada pela equipe do CEFET-RJ bem como as características do trajeto a ser realizado onde constam as distâncias dos trechos entre semáforos e as respectivas inclinações angulares de cada trecho.

2. Equações Básicas Utilizadas

De acordo com [PECORELLI PERES, L. A.; HORTA NOGUEIRA, L.A. et LAMBERT-Torres, G.; 2002] as seguintes equações foram utilizadas

$$P_1 = M_e \cdot a(t) \cdot v(t) \quad (1)$$

$$P_{RR} = K \cdot W_v \cdot g \cdot v(t) \cdot \cos(\theta(t)) \quad (2)$$

$$P_{AD} = \frac{\rho \cdot A_F \cdot C_D \cdot (v(t))^3}{2} \quad (3)$$

$$P_D = W_v \cdot g \cdot v(t) \cdot \sin(\theta(t)) \quad (4)$$

Onde, P_1 , P_{RR} , P_{AD} e P_D são, respectivamente, as potências para vencer a inércia, a resistência dos rolamentos, a resistência aerodinâmica, e a resistência para vencer a inclinação do percurso. Sendo,

M_e - Massa equivalente do veículo em kg, incluindo a inércia rotacional ($M_e = 1,03 \cdot W_v$).

W_v - Massa do veículo em kg.

$a(t)$ - Aceleração do veículo em m/s^2 .

$v(t)$ - Velocidade do veículo em m/s .

K - Coeficiente de resistência cinética do rolamento.

g - Aceleração da gravidade em m/s^2 .
 ρ - Densidade volumétrica do ar em kg/m^3 .
 A_F - Área frontal do veículo em m^2 .
 C_D - Coeficiente de resistência aerodinâmica.
 θ - Inclinação do percurso em graus.
 t - Tempo em segundos.

$$K = 0,033 \left(1 + \frac{(v(t))^2}{1500} \right) \quad (5)$$

$$P_T = P_1 + P_{RR} + P_{AD} + P_D \quad (6)$$

Onde, P_T é a potencia total desenvolvida pelo veículo.

$$E = \frac{1}{36 \cdot 10^5 n_A} \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (7)$$

Onde n_A é o rendimento total do sistema, ou seja, o produto entre os rendimentos de cada componente, seguindo a configuração exposta na Figura 1 a seguir, sendo E a energia consumida no percurso em kWh e $P(t)$ é a potencia fornecida pela bateria em W.

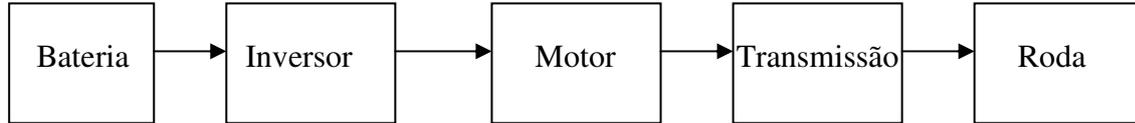


Figura 1 – Configuração do veículo elétrico para efetuar os cálculos.

3. Dados Utilizados nos Cálculos

3.1 Dados dos Componentes Principais

3.1.1. Motor Elétrico

Alto Rendimento Plus da WEG, trifásico, 60Hz, 220V, 4 pólos, carcaça 180M.

Potência: 30 cv

Torque Nominal: 119N.m.

Torque Máximo: 309,4N.m.

Velocidade Nominal: 1760RPM

Obs.: Os dados do motor elétrico mencionados são referenciais. Estão sendo analisadas alternativas quanto ao tipo de motor a ser empregado. Neste contexto está sendo verificado o emprego de uma tensão nominal igual a 240 Volt.

3.1.2 Inversor

CFW09 da WEG, modelo: CFW0086T2223POP1Z, peso:41kg.

3.1.3 Banco de Baterias:

20 baterias em série, 12V, 47Ah, Modelo STH47-12, peso 20,8kg da Saturnia.

É importante destacar que os dados do banco de baterias citado estão sendo tomados como referência. Busca-se com isto através das análises em curso minimizar o peso total do banco de baterias bem como compatibilizar a sua tensão ao emprego do tipo esquema controlador e motor que se mostrar mais apropriado.

3.2 Massas dos Componentes do Sistema

Tabela 3.1 – Tabela Referente às Massas dos Componentes do Sistema.

Componente	Massa (kg)
Veículo	963
Motor	185
Inversor	41
Banco de Baterias	400
Passageiros e Carga	210
Total	1799

A massa do veículo lava em conta a retirada do motor a combustão interna do tanque de combustível e acessório de escape. O peso líquido original era 1080kg com esta redução passou a 963kg.

3.3 Eficiências dos Componentes

Tabela 3.2 – Tabela de Eficiência Adotados para os Componentes do Veículo.

Componente	Eficiência (%)
Motor	90
Inversor	90
Baterias	90
Transmissão	85

Obs.: Os valores indicados são estimativos [1].

3.4 Dados Complementares

Área Frontal do Veículo (m ²)	2,99
Aceleração da gravidade (m/s ²)	9,81
Coefficiente de Resistência Aerodinâmica	0,3
Densidade Volumétrica do Ar (kg/m ³)	1,23

4. Cálculos Efetuados

A partir das equações apresentadas no item 2 foram elaborados diversos cálculos e análises das condições operacionais do veículo.

Procurou-se examinar diversas situações de desempenho do veículo de tal forma a verificar a adequação e compatibilidade dos componentes disponíveis.

Neste sentido foram determinados os valores de diversas grandezas relacionadas com os torques exercidos nas rodas e no motor, a quantidade de energia despendida e a potência máxima requerida pelo veículo.

4.1 Deslocamento no Plano sem Vento com Velocidade Constante 50 km/h e Trecho

Este caso, conforme Figura 4.1 e Tabela 4.1 tem como objetivo analisar a energia utilizada pelo veículo para vencer a resistência ao rolamento e a resistência aerodinâmica. O tempo necessário para completar o percurso de 1050m foi de 75,6s.

Tabela 4.1. – Resultados Referentes ao Item 4.1.

Torque Total Aplicado às Rodas (N-m)	253
Torque do Motor (N-m)	55,9
Potencia Média (kW)	10,6
Energia Fornecida pela Bateria (kWh)	0,35

4.2 Deslocamento no Plano sem Vento Partindo do Repouso com Aceleração de $1 \text{ m} / \text{s}^2$ e Atingindo Velocidade Máxima de 50 km/h no Trecho de 1050m.

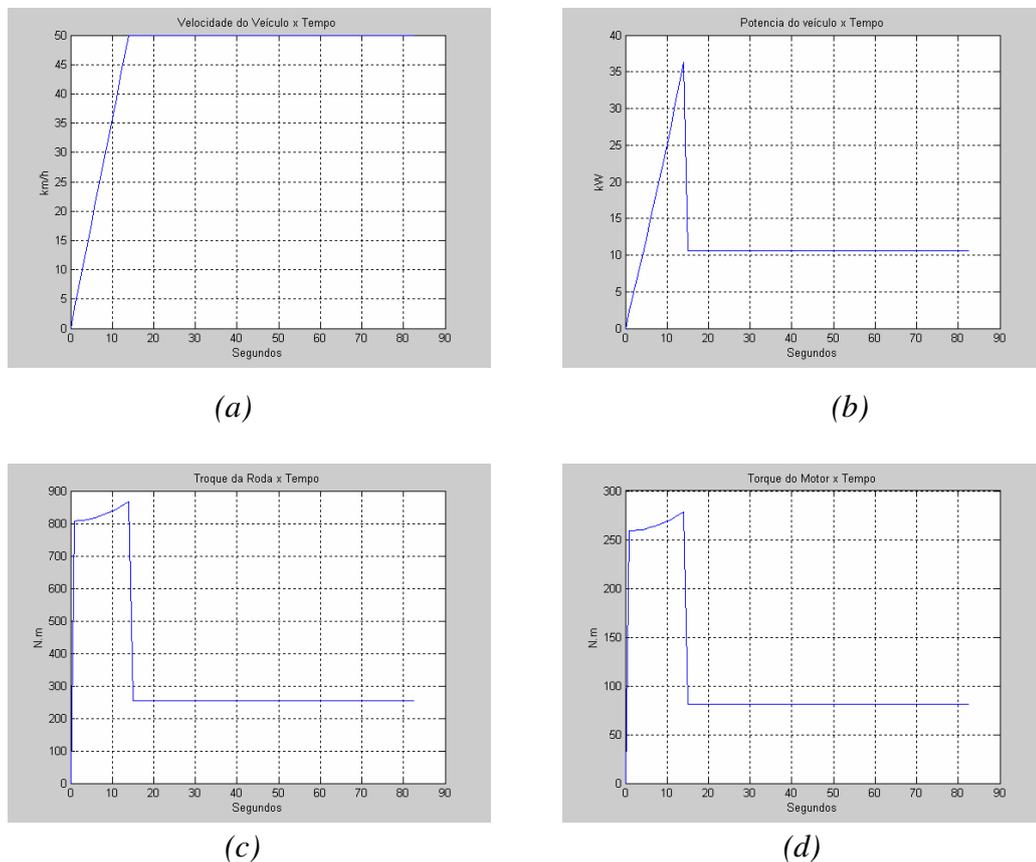


Figura 4.2. – Gráficos das grandezas indicadas em relação ao tempo em segundos. (a) velocidade do veículo, em km/h (b) potência em kw desenvolvida pelo veículo; (c) torque total aplicado às rodas, em N.m.; (d) torque no motor, em N.m,

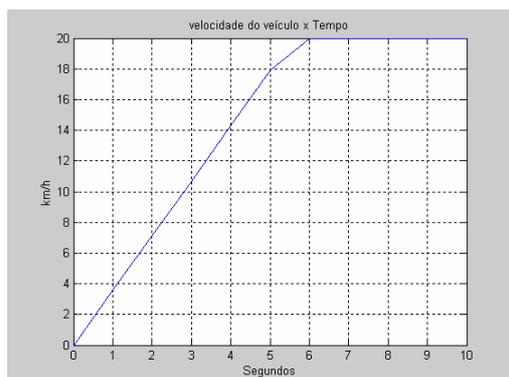
Nesta situação, de acordo com a Figura 4.2, o veículo consome energia para romper a inércia, a resistência aerodinâmica e vencer o atrito ao rolamento constatando-se que há ultrapassagem do torque nominal do motor considerado.

A partir dos cálculos executados obteve-se o tempo de percurso igual a 82,6s e os resultados da Tabela 4.2, a seguir:

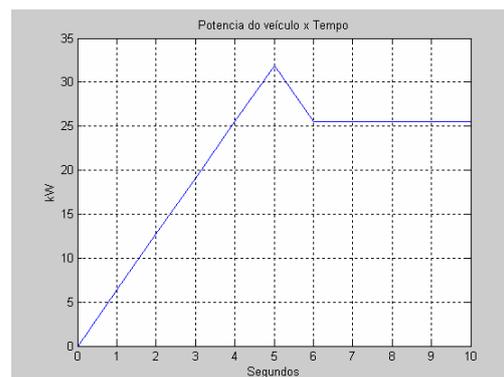
Tabela 4.2. Resultados Referentes ao Item 4.2.

Torque Máximo Aplicado às Rodas (N-m)	867
Troque Máximo no Motor (N-m)	278,2
Potencia Máxima (kW)	36,3
Energia Drenada da Bateria (kWh)	0,44

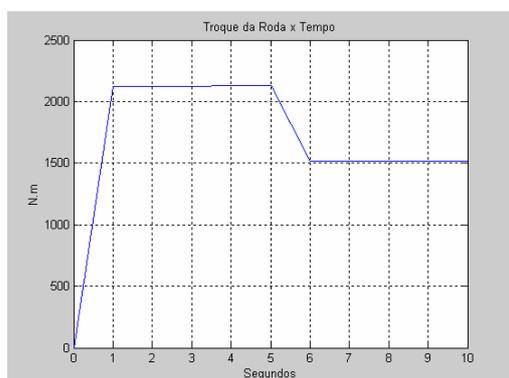
4.3 Deslocamento sem Vento em Acive de 13 Graus (“grade” 23,09%) de 40 m Partindo do Repouso e Atingindo a Velocidade de Cruzeiro de 20 km/h



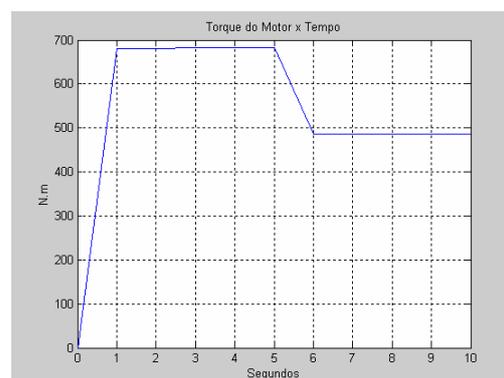
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.3. – Gráficos das grandezas indicadas em relação ao tempo em segundos. (a) gráfico de velocidade do veículo, em km/h, versus tempo; (b) gráfico da potência em kw desenvolvida pelo veículo versus tempo; (c) gráfico do torque total aplicado às rodas, em N.m, versus tempo; (d) gráfico do torque no motor, em N.m, versus tempo.

Tabela 4.3. – Resultados Referentes ao Item 4.3.

Torque Máximo Aplicado às Roda (N-m)	2130
Troque Máximo de Motor (N-m)	683,5
Potencia Máxima (kW)	31,9
Energia Fornecida pelas Baterias (kWh)	0,1

Estes cálculos, conforme Figura 4.3 e Tabela 4.3, revelam que o torque máximo do motor considerado é ultrapassado em 120% indicando a necessidade de manter as mudanças de marcha originais da Kombi.

4.4 Deslocamento sem Vento Partindo do Repouso e Alcançando a Velocidade Cruzeiro de 80km/h em Percurso de 1050 m.

Foi constatado, de acordo com a Figura 4.4 e Tabela 4.4, neste caso que o torque máximo suportável pelo motor foi ultrapassado. Além disto, o valor médio da potência desenvolvida pelo veículo encontrado foi igual a 26,5 kW.

Este valor foi considerado excessivo uma vez que ficou acima da potência nominal do motor considerado.

Os resultados encontrados indicaram a necessidade de fixar a velocidade máxima em 60 Km / hora, tendo em vista os componentes adotados.

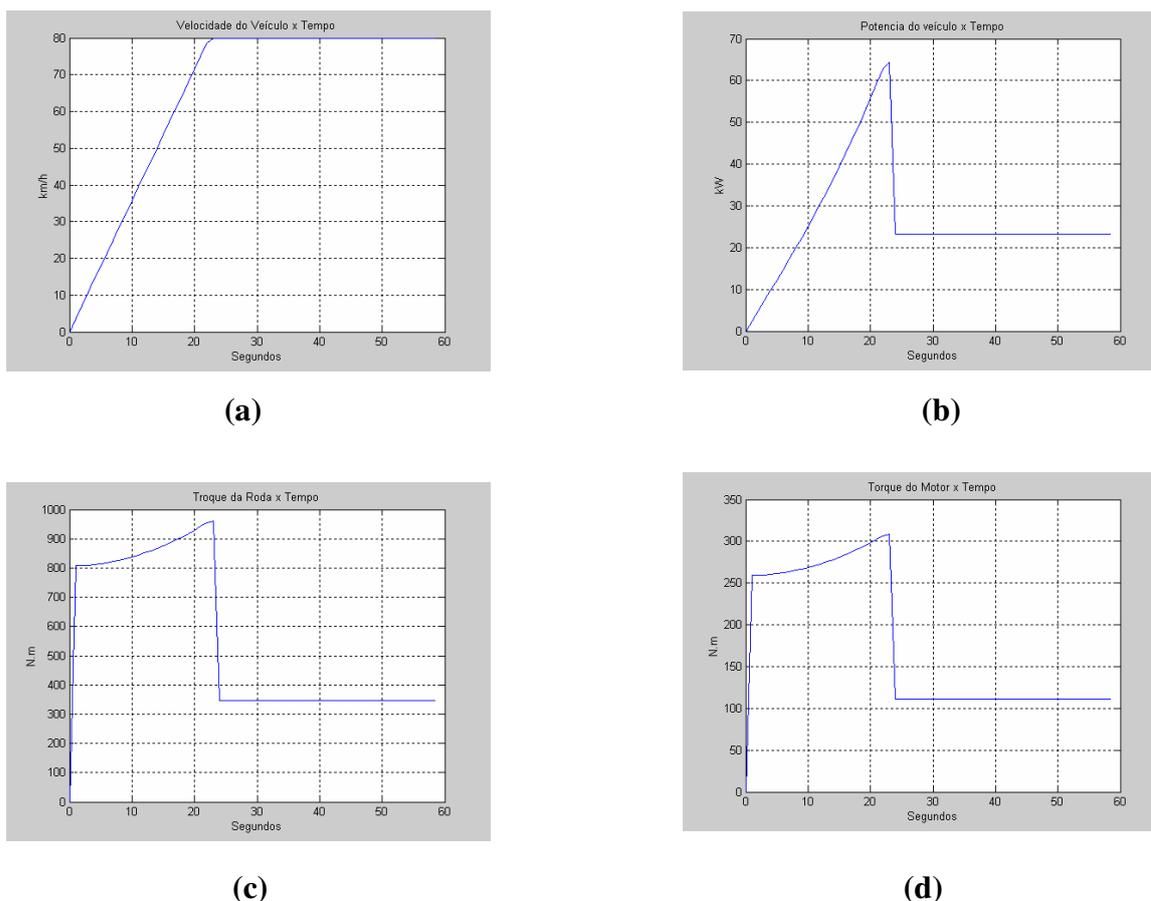


Figura 4.4. – Gráficos das grandezas indicadas em relação ao tempo em segundos. (a) gráfico de velocidade do veículo, em km/h, versus tempo; (b) gráfico da potência em kw desenvolvida pelo veículo versus tempo; (c) gráfico do torque na roda, em N.m, versus tempo; (d) gráfico do torque no motor, em N.m, versus tempo.

Tabela 4.4 – Resultados Referentes ao item 4.4

Torque Máximo Aplicado às Rodas (N.m)	960,7
Torque Máximo do Motor (N.m)	308,3
Potencia Máxima (kW)	64,4
Energia Fornecida pela Bateria (kWh)	0,7

4.5 Deslocamento no Trajeto CEFET-RJ (Maria da Graça) e UERJ (Maracanã)

Tabela 4.5 – Resultados Referentes ao Item 4,5

Torque Máximo (N.m) Aplicado nas Rodas	1470,7
Velocidade Máxima Atingida	50 km:h
Torque Máximo (N.m) no Motor	325,17
Potência Máxima (kw) do veículo	57,51
Potência Média (kw) do Veículo	15,54
Energia fornecida pelas Baterias (kWh)	4,72
Distancia total percorrida (m)	4448,78

De acordo com os resultados constantes na Tabela 4.5, constata-se que neste caso também é ultrapassado o torque máximo do motor considerado.

5. Atividades Relacionadas à Preparação da Kombi

Diversas atividades foram desenvolvidas para a preparação da Kombi receber o novo sistema de tração destacando-se a desmontagem, o levantamento dos dados técnicos originais e o levantamento detalhado do trajeto pretendido. Em seguida a Figura 5.1 apresenta uma foto do local preparado para o encaixe do motor elétrico e a Figura 5.2 a parte traseira da Kombi com as respectivas dimensões.

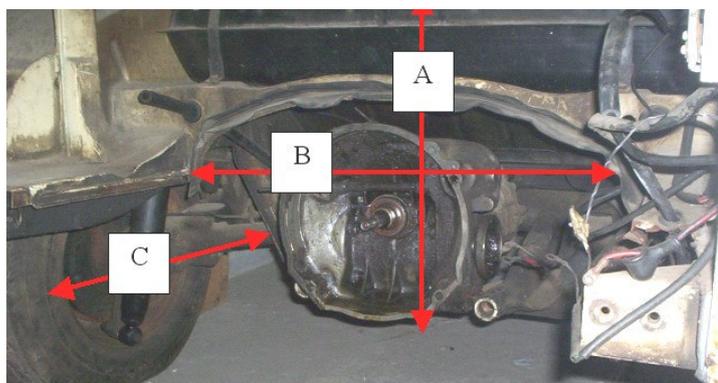


Figura 5.1- Espaço disponível para colocação do motor elétrico.
A - Altura (600 mm); B - Largura (740 mm); C - Comprimento (460 mm)

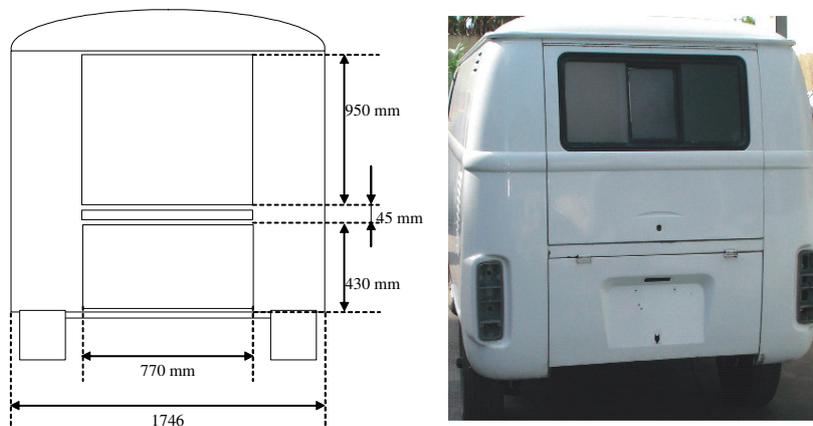


Figura 5.2 – Parte traseira da Kombi (altura total do solo até o teto - 1912mm)

A figura 5.3 indica a vista superior da parte interna (1410 mm x 1450 mm) referente ao compartimento destinado ao banco de baterias e cargas a serem transportadas..

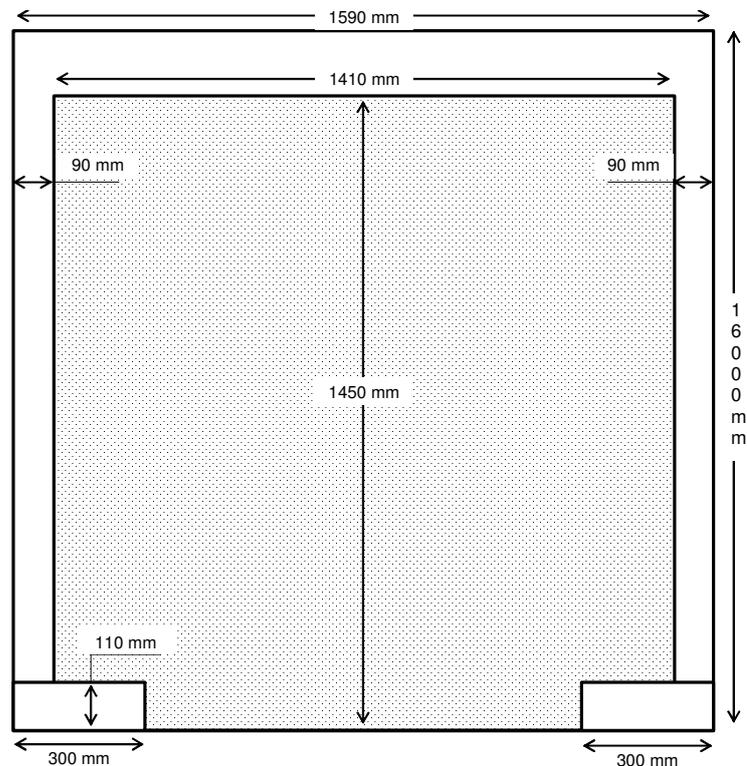


Figura 5.3 – Dimensões do compartimento interno da Kombi destinado ao banco de baterias e cargas a serem transportadas

6. Conclusões e Considerações Finais

O projeto descrito constitui um desafio para os seus participantes uma vez que os meios de comunicação na maioria das vezes se restringem às mensagens eletrônicas e o telefone. Contudo, tem sido valiosa tanto a aprendizagem das equipes como o diálogo, mesmo diante de diversas dificuldades que vão sendo enfrentadas passo a passo neste empreendimento. Um exemplo típico se refere ao espaço para o motor que é de apenas 46 cm de comprimento. A conversão de veículos de passeio, cujo motor fica na posição frontal oferece maior flexibilidade do que a Kombi.

Os cálculos apresentados possibilitaram examinar as condições de funcionamento da Kombi com tração elétrica de forma a compatibilizar a instalação dos componentes colocados à disposição pelos patrocinadores. Uma revelação importante se refere à necessidade de manter as mudanças de relação de engrenagem originais com objetivo de atender os limites de torque máximo do motor a ser instalado. Além disto, o levantamento minucioso do trajeto a ser utilizado foi útil tendo em vista a Kombi vencer os aclives detectados.

Constata-se a grande influência do peso das baterias chumbo-ácido no desempenho do veículo. Neste sentido, propõe-se numa segunda etapa o desenvolvimento conjunto de ensaios nos quais será colocada a Kombi convertida para tração elétrica à disposição dos fabricantes de bateria como plataforma de teste. Desta maneira, bastará que o fabricante substitua o banco de baterias existentes por um novo

banco de mesma tensão. Após a realização dos testes o banco de bateria será devolvido ao fabricante.

7. Referências Bibliográficas

BOTTURA, Celso P.; BARRETO, Gilmar. Veículos Elétricos 1.ed., Campinas: UNICAMP, 1989.

PECORELLI PERES, Luiz A.; HORTA, Luiz A. N.; LAMBERT-TORRES, Germano. *Analysis and Discussion on Energy Supply to Non-Road Electric Vehicles in Brazil*. IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY – T&D 2002 LATIN AMERICA CONFERENCE, São Paulo – Brazil, 2002.

PECORELLI PERES, Luiz A., HORTA, Luiz A. N., LAMBERT TORRES, Germano. *Influências Sobre os Sistemas de Energia com a Introdução dos Veículos Elétricos na Sociedade*. III Congresso Latino-Americano Geração Transmissão de Energia Elétrica, Campos do Jordão, SP, Brasil, 1997.

Agradecimento aos Patrocinadores:

A elaboração deste trabalho contou com o suporte técnico e interesse de membros da equipe da WEG Equipamentos Elétricos S. A. – Automação bem como da SATURNIA, fabricante de baterias, aos quais os participantes deste projeto na UERJ e CEFET/RJ manifestam os seus mais sinceros agradecimentos em especial aos engenheiros: Valter Luiz Knih, Vladimir Rodrigues de Lima, Gean Carlo Dallagnolo, Charles Volnei Kuehne e Marcos Amorim Menezes da WEG. Da mesma forma, mencionamos os nomes dos Engenheiros Francisco Azevedo e Dalton Silva da SATURNIA.

Colaborações Acadêmicas:

Este trabalho teve recebido o apoio e a colaboração dos Professores David Martins, Gustaf Akerman e Mila Avelino da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ; bem como dos professores do Núcleo de Tecnologia Automobilística do CEFET-RJ, Eden Nunes Junior, Luiz Cláudio Ribeiro Rodrigues e dos alunos do apoio técnico, Alexssander Braga Gomes, Álvaro Villardi, Allan Neves, Víctor Grimoni, Renan Cortes, Raphael Matias Losito, Lucas Fabiano da Costa, Vinicius Monteiro do Núcleo de Tecnologia Automobilística do CEFET-RJ.