



VANDERSON RABELO DE PAULA

**VIABILIDADE OPERACIONAL DO USO DA
ENERGIA ELÉTRICA COMO FONTE DE
POTÊNCIA EM TRATORES AGRÍCOLAS**

LAVRAS - MG

2014

VANDERSON RABELO DE PAULA

**VIABILIDADE OPERACIONAL DO USO DA ENERGIA ELÉTRICA
COMO FONTE DE POTÊNCIA EM TRATORES AGRÍCOLAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Jackson Antônio Barbosa

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Paula, Vanderson Rabelo de.

Viabilidade operacional do uso da energia elétrica como fonte de
potência em tratores agrícolas / Vanderson Rabelo de Paula. –
Lavras : UFLA, 2014.

101 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Jackson Antônio Barbosa.

Bibliografia.

1. Mecanização agrícola. 2. Eficiência energética. 3. Energia
alternativa. 4. Sustentabilidade. 5. Biosistemas. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 333.7932

VANDERSON RABELO DE PAULA

**VIABILIDADE OPERACIONAL DO USO DA ENERGIA ELÉTRICA
COMO FONTE DE POTÊNCIA EM TRATORES AGRÍCOLAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 26 de setembro de 2014.

Dr. Alessandro Vieira Veloso	UFLA
Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato	UFLA
Dr. Flávio Castro da Silva	UFF
Dr. Giovanni Francisco Rabelo	UFLA

Dr. Jackson Antônio Barbosa
Orientador

LAVRAS - MG

2014

Aos meus pais Odair Rabelo de Paula (Em Memória) e Dulcinéia da Costa de
Paula.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por dispor do caminho necessário ao nosso progresso.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia e aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelos valiosos ensinamentos e acolhida para realizar o curso.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Campus Machado.

Ao Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, pela contribuição ímpar na realização deste trabalho.

À Green Horse Máquinas agrícolas.

A CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao Prof. Dr. Jackson Antônio Barbosa pela confiança em mim depositada na realização dos trabalhos.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato pelo incentivo.

Ao Prof. Dr. Flávio Castro da Silva pelo incentivo e apoio na realização do trabalho.

Ao grande amigo João Guilherme Pedrilho pela grande contribuição.

Aos amigos e companheiros de trabalho Murilo Machado de Barros, João Paulo Barreto Cunha, Marcos B. Z. Palma e Alessandro Vieira Veloso.

À minha família que, mesmo distante, esteve sempre presente, dando-me força espiritual, confiança, compreensão e paciência.

À Adriana Bresser Dores pelo companheirismo, paciência e incentivo.

A todos que, de diferentes formas, contribuíram para este trabalho, meu singelo agradecimento.

RESUMO

Os problemas de ordem econômica e ambiental, causados por mais de um século da intensa utilização de combustíveis derivados do petróleo, têm levado à busca constante de fontes alternativas de energia, tanto no meio urbano, quanto no meio agrícola. Nesse contexto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a viabilidade operacional do uso da eletricidade como fonte de energia para tratores agrícolas. Para isso, foi feita a comparação das curvas de desempenho entre um motor de combustão interna utilizado em trator agrícola e um motor elétrico. O desempenho do motor elétrico foi considerado na proposta para a configuração teórica do trator elétrico. Esta proposta foi avaliada em relação à autonomia em diferentes demandas de potência e, também, comparada a um trator agrícola convencional em relação ao custo energético operacional e eficiência energética. Também, foi construído um modelo de trator elétrico agrícola, em escala reduzida, que foi submetido ao ensaio de tração para determinação do seu custo energético operacional e autonomia. O motor elétrico teve os melhores resultados para torque, potência, eficiência energética e custo energético operacional. A autonomia da configuração teórica ficou acima de oito horas diárias para médias e baixas potências, trabalhando nas menores rotações. O desempenho em barra de tração do modelo em escala reduzida foi compatível com tratores convencionais além de valores de autonomia superiores a oito horas diárias para até 59% de demanda de potência. O custo energético operacional do modelo em escala foi até 89% menor comparado ao custo de tratores convencionais. Com base nos resultados, concluiu-se que o uso da eletricidade, como fonte de energia em tratores agrícolas, é viável no tocante ao custo e eficiência energética e possui potencial para intensificação das pesquisas nesse campo.

Palavras-chave: Mecanização agrícola. Eficiência energética. Energia alternativa. Sustentabilidade. Biosistemas.

ABSTRACT

The economic and environmental issues of more than a century of intense use of fuel derivative of oil have been forcing a constant quest for alternative sources of energy, either in urban or in agricultural areas. This work was performed aiming to assess the operational viability of use of electricity as source of power for agricultural tractors. Was carried out the comparison of performance curves between an internal combustion engine used on agricultural tractors and an electrical engine. The performance of the electrical engine was considered in the proposal for theoretical configuration of the electrical tractor. This proposal was assessed in relation to autonomy in different power demands, and was also compared with a conventional agricultural tractor, in relation to operating energy cost and energy efficiency. A model of electric agricultural tractor was also built in reduced scale, which was tested for traction in order to determine its operating energy cost and autonomy. The electrical engine showed best results for torque, power, energy efficiency, and operating energy cost. The autonomy of theoretical configuration was greater than eight hours a day, for mean and low power, by working at lower rotations. The performance of traction bar of small-scale model was compatible to conventional tractors plus values of autonomy greater than eight hours a day for up to 59% of power demand. The operating energy cost of the scale model was up to 89% less than the cost of conventional tractors. Based on these results, we conclude that the use of electricity as source of power on agricultural tractors is viable in terms of cost and energy efficiency, and is a potential for intensification of researches in this working field.

Key-words: Agricultural mechanization. Energy efficiency. Alternative energy. Sustainability. Biosystems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Número de animais de tração e tratores nos EUA de 1910 a 1960 ..	18
Figura 2	Evolução da População Rural e Urbana no Brasil de 1950 a 2010 ..	19
Figura 3	Variação da temperatura do planeta e da concentração de CO ₂ de 1880 a 2010	24
Figura 4	Propagandas de veículos elétricos do início do século XX	26
Figura 5	Veículos elétricos produzidos pela GURGEL S.A.; (a) Itaipu; (b) Itaipu E-400.....	29
Figura 6	Cotação do Barril de Petróleo entre 1970 e 2011 (preço em dólares).....	30
Figura 7	Esquemas de patente de trator elétrico	31
Figura 8	Esquema de propulsão de veículo elétrico; (a) veículo do início do século XX; (b) veículo do início do século XXI	33
Figura 9	Representação esquemática de uma bateria de Lítio-íon.....	36
Figura 10	a) Ensaio dinamométrico realizado no motor de combustão interna. a) Dinamômetro acoplado à TDP do trator; b) Display digital do dinamômetro.	42
Figura 11	Medidor Volumétrico de Combustível.....	43
Figura 12	Variação da eficiência do conjunto motor-transmissão do veículo Nissan Leaf em função da variação da velocidade.....	52
Figura 13	Diagrama da configuração teórica de trator elétrico	53
Figura 14	Faixas de Potência Específica Mássica (Wkg^{-1}) e de Energia Específica Mássica ($Wh kg^{-1}$).....	56
Figura 15	Bateria de lítio adotada na simulação do desempenho da configuração teórica do trator elétrico.....	57
Figura 16	Diagrama do modelo reduzido de trator elétrico	60
Figura 17	Modelo em escala reduzida	61

Figura 18	Carro dinamométrico acoplado ao modelo em escalapor meio do dinamômetro digital	62
Figura 19	Detalhe do contador de impacto instalado no veículo de tração	63
Figura 20	Painel de controle e monitoramento da potência elétrica do modelo em escala	65
Figura 21	Curvas de torque traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF	70
Figura 22	Curvas de potência traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF	72
Figura 23	Curvas de eficiência energética traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF	74
Figura 24	Curvas de custo energético traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF	76
Figura 25	Distribuição de peso nos eixos da configuração teórica de trator elétrico	78
Figura 26	Curvas de potência traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do conjunto ME-IF	80
Figura 27	Curvas de autonomia traçadas com base em modelo de descarga de baterias baseado na Lei de Peukert	82
Figura 28	Potência na barra de tração em função da variação na força de tração	85
Figura 29	Potência na barra de tração em função da patinagem	86

Figura 30	Varição da autonomia do modelo de trator elétrico em escala reduzida em função da porcentagem da potência na barra de tração	88
Figura 31	Varição do custo energético em função da variação da potência na barra de tração	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Massa dos componentes do trator convencional substituída pela massa de baterias na configuração teórica de trator elétrico	54
Tabela 2	Valores de torque (N m) obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF.....	69
Tabela 3	Valores de potência (kW) obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF.....	71
Tabela 4	Valores de eficiência energética (%) obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF	73
Tabela 5	Valores de custo energético (R\$ kW ⁻¹) obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF	75
Tabela 6	Número de baterias e potência elétrica total possível de ser instalada na configuração teórica de trator elétrico	77
Tabela 7	Comparativo de características ponderais do trator elétrico teórico com o trator convencional.....	78
Tabela 8	Valores de potência mecânica, potência elétrica absorvida e eficiência energética obtidos nos ensaios dinamométricos com 4 diferentes níveis de potência do conjunto ME-IF.....	79
Tabela 9	Tempos de autonomia (h) estimados pela lei de Peukert para quatro diferentes níveis de potência do conjunto ME-IF	81
Tabela 10	Comparativo de características da configuração teórica de trator elétrico com o modelo de trator elétrico em escala reduzida	84
Tabela 11	Valores médios obtidos nos ensaios em barra de tração para o modelo em escala reduzida.....	85

Tabela 12 Valores de potência na barra de tração, potência elétrica e autonomia do modelo de trator elétrico em escala reduzida	87
Tabela 13 Custo energético da potência na barra de tração do modelo em escala reduzida para diferentes demandas de potência.....	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	A importância do trator agrícola	17
2.2	Impactos econômicos e ambientais da utilização de combustíveis fósseis na mecanização agrícola.....	20
2.3	A busca por alternativas à utilização do petróleo e o desenvolvimento de veículos elétricos	24
2.4	Princípios de funcionamento de veículos elétricos.....	32
2.5	Baterias para os veículos elétricos.....	34
2.5.1	Funcionamento das baterias	35
2.5.2	Características de fabricação das baterias	37
2.5.3	Classificação das baterias quanto ao tipo de uso	39
3	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1	Ensaio dinamométrico do trator agrícola.....	41
3.1.1	Determinação dos níveis de rotação para ensaio	43
3.1.2	Determinação da potência efetiva – H_e	44
3.1.3	Determinação da potência reduzida – H_r	45
3.1.4	Determinação do consumo específico de combustível	45
3.1.5	Determinação da eficiência energética do motor - η (%).....	46
3.1.6	Determinação do torque – τ	47
3.1.7	Determinação da Reserva de Torque.....	47
3.1.8	Determinação do custo energético do motor de combustão interna CE_{mci}	48
3.2	Ensaio dinamométrico do motor elétrico	48
3.2.1	Determinação dos níveis de rotação do motor elétrico.....	49
3.2.2	Determinação do torque e potência do motor elétrico	49
3.2.3	Determinação da eficiência energética do conjunto motor elétrico e inversor de frequência (η_{ME}).....	50
3.2.4	Determinação do custo energético do conjunto ME- IF.....	50
3.3	Proposta de configuração teórica de trator elétrico	51
3.3.1	Estimativa da massa da caixa de câmbio do trator	55
3.3.2	Determinação do modelo e número de baterias da configuração teórica de trator elétrico.....	55
3.3.3	Simulação das características dimensionais e ponderais da configuração teórica de trator elétrico	58

3.3.4	Estimativa da autonomia da configuração teórica de trator elétrico	58
3.4	Construção de um modelo de trator agrícola elétrico em escala reduzida	60
3.5	Desempenho em barra de tração do modelo de trator elétrico em escala reduzida	61
3.5.1	Determinação da velocidade de deslocamento	62
3.5.2	Determinação do índice de patinagem	62
3.5.3	Determinação da potência na barra de tração	64
3.5.4	Determinação do rendimento na barra de tração	64
3.5.5	Determinação da potência elétrica absorvida	65
3.5.6	Determinação da autonomia do modelo em escala reduzida	66
3.5.7	Determinação do custo energético do modelo em escala reduzida ..	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	Resultados das curvas de desempenho dos dois motores	68
4.1.1	Torque	68
4.1.2	Potência	70
4.1.3	Eficiência energética	72
4.1.4	Custo Energético Operacional	74
4.2	Resultados para a configuração teórica de trator elétrico	76
4.2.1	Número de Baterias e Potência Elétrica Instalada no Trator	76
4.2.2	Características ponderais da configuração teórica de trator elétrico	77
4.2.3	Autonomia da configuração teórica de trator elétrico	78
4.3	Resultados do modelo em escala reduzida	83
4.3.1	Relação peso/potência do modelo em escala reduzida	83
4.3.2	Ensaio em barra de tração no modelo em escala reduzida	84
4.3.3	Autonomia do modelo em escala reduzida	86
4.3.4	Custo energético para potência na barra de tração do modelo em escala reduzida	88
5	CONCLUSÕES	91
	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as preocupações com as questões ambientais são cada vez mais frequentes, sobretudo em relação ao aumento do aquecimento global e as mudanças climáticas ocasionadas por tal fenômeno.

Nesse contexto, há uma preocupação crescente em reduzir o uso de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, a emissão dos gases de efeito estufa. Para reduzir a dependência dessa fonte de energia primária, os pesquisadores vêm buscando a adoção de fontes alternativas tanto no Brasil quanto no mundo.

No que concerne à atividade produtiva no meio rural, verifica-se que o trator é uma ferramenta imprescindível para que se consiga uma produção a custos competitivos no mercado interno e de exportação. Nesse tipo de máquina, o óleo diesel, ainda, é o combustível mais utilizado como fonte de energia e a sua contribuição, nas emissões de gases de efeito estufa, não pode ser ignorada.

Observa-se que os tratores são máquinas multiuso na atividade agrícola e, para garantir a versatilidade da sua utilização, é dimensionado, primordialmente, para as operações de maior demanda de potência. Dessa forma, quando o trator é utilizado em operações que não requerem grandes potências, ele acaba sendo subutilizado, reduzindo sobremaneira sua eficiência térmica.

Assim, a avaliação de alternativas ao uso de combustíveis fósseis, como os veículos elétricos e veículos híbridos, ganha destaque. O desenvolvimento de baterias de maior densidade energética e sistemas mais eficientes de controle de potência têm contribuído para a popularização dessas tecnologias que já fazem parte da realidade no transporte coletivo e, também, em veículos de menor porte. Em relação aos tratores, um fator limitante nos veículos elétricos, como o alto peso das baterias, pode se tornar um aspecto positivo considerando que o trator depende de massa para melhorar sua eficiência de tração. Outro problema desse

tipo de tecnologia, que é o arraste aerodinâmico, não seria sequer considerado num trator agrícola em função de sua baixa velocidade de operação.

1.1 Objetivo Geral

No presente trabalho apresenta-se uma proposta de avaliação da viabilidade operacional do uso da energia elétrica como fonte de potência em tratores agrícolas visando à maior eficiência energética, com redução nos custos e maior sustentabilidade das operações agrícolas por meio da utilização de fontes de energia mais limpas.

1.2 Objetivos Específicos

- a) A realização de ensaios dinamométricos em um motor do ciclo diesel de um trator agrícola convencional e de um motor elétrico determinando suas curvas de desempenho e comparando a eficiência e o custo energético operacional de cada motor;
- b) Proposta de uma configuração teórica de trator movido à eletricidade e a determinação de sua autonomia e custo operacional em diferentes demandas de potência;
- c) Construção de um modelo físico de um veículo de tração elétrico, em escala reduzida, e determinação do seu custo energético operacional e autonomia em diferentes demandas de potência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A importância do trator agrícola

O trator agrícola é, sem dúvida, uma das mais revolucionárias inovações tecnológicas na história da agricultura moderna. O trator agrícola gerou um aumento imenso na capacidade das propriedades agrícolas, contribuindo para o aumento da produtividade remodelando, assim, o panorama agrícola a partir do século XX (OLMSTEAD; RHODE, 2001).

As primeiras máquinas e implementos agrícolas começaram a ser produzidos na Europa, em meados do século XVIII, logo após a Revolução Industrial, que causou um grande êxodo rural e aumentou a demanda por produtos primários. Nos Estados Unidos da América, a guerra civil envolveu um grande contingente de pessoas, gerando a necessidade de uma maior produtividade do trabalho no campo que foi obtida por meio da construção dos primeiros protótipos de tratores e arados (VIAN; ANDRADE JÚNIOR, 2010).

De acordo com Baricelo e Baccha (2013), em 1917, a Ford começou a produzir o trator da marca Fordson, em linha de montagem, reduzindo, significativamente, os seus custos de produção e, dessa forma, tornando o trator agrícola mais acessível. No Brasil, a Produção de máquinas agrícolas começou timidamente na década de 1920, quando o governo federal permitiu a instalação da Ford em território nacional para a produção dos tratores Fordson que até então chegavam ao país importados dos Estados Unidos da América (CASTILHOS et al., 2008).

Segundo Olmstead e Rhode (2001), nos Estados Unidos da América, no início do século XX, um cavalo utilizado para trabalhos em uma fazenda, demandava 1,2 hectares da propriedade agrícola necessários apenas para sua alimentação. De 1880 a 1920, a alimentação dos animais de tração consumia

22% das áreas agrícolas e os animais utilizados nas cidades e minas consumiam mais 5%. Em 1915, a área agrícola necessária para a alimentação de cavalos e mulas atingiu seu pico com 37,6 milhões de hectares e, em 1960, graças à adoção dos tratores agrícolas, esse número estava reduzido para 2 milhões de hectares. Na figura 1, que exibe o número de tratores e de animais de tração nos Estados Unidos da América, no período de 1910 a 1960, é possível observar claramente a substituição de animais de tração por tratores.

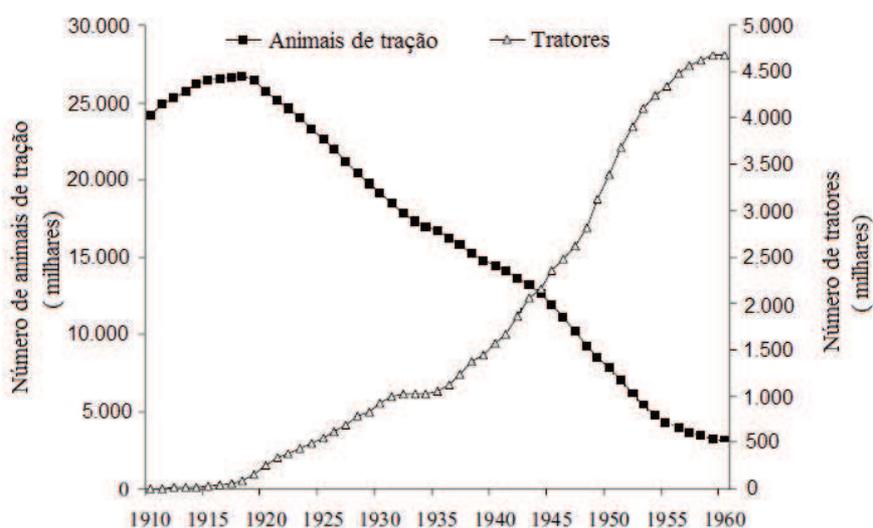


Figura 1 Número de animais de tração e tratores nos EUA de 1910 a 1960

Fonte: Olmstead e Rhode (2001)

No Brasil, o Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006) apontou que apenas 15,6% da população brasileira residiam no meio rural. Segundo Seabra (2012), a população brasileira que até meados do século XIX era majoritariamente rural concentra-se, cada vez mais nas cidades, constituindo um grau de urbanização de 88% e essa redução

crecente da população, envolvida nas atividades agrícolas, requer agilidade e produtividade para o abastecimento de produtos agrícolas da população de modo geral.

De acordo com Márquez (1990), o trator agrícola representou uma grande evolução para a agricultura, reduzindo o esforço físico necessário para a execução de determinadas tarefas, potencializando o trabalho no meio rural e levando a um aumento considerável na produtividade, permitindo a exploração de áreas maiores de cultivo. Além disso, como as atividades agrícolas dependem das variáveis climáticas, realizar as operações no prazo estipulado pode ser crucial e o trator agrícola em muito contribuiu para que isso acontecesse.

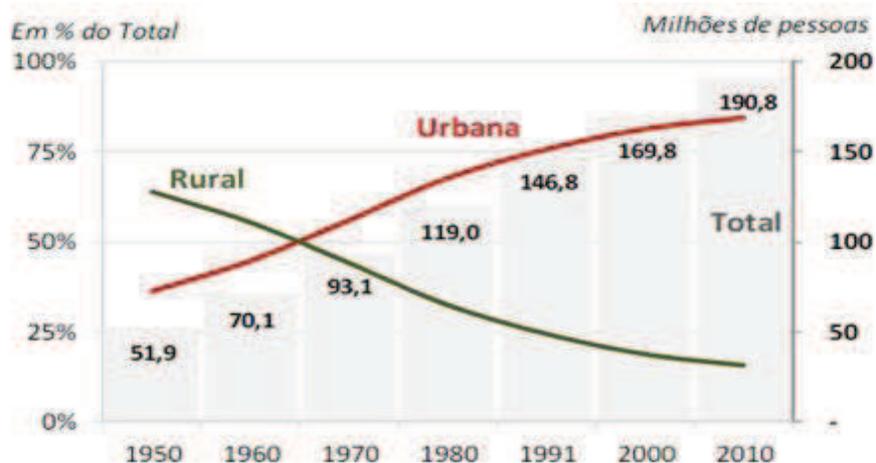


Figura 2 Evolução da População Rural e Urbana no Brasil de 1950 a 2010

Fonte: IBGE (2006)

Para Brodell e Kendall (1950), o impacto do trator não se limitou apenas ao meio agrícola. A nova máquina, também, revitalizou e transformou a indústria de equipamentos agrícolas que influenciou diretamente o desenvolvimento de outros setores da indústria moderna. Segundo Baricelo e

Bacha (2013), no Brasil, a partir da metade da década de 1920, iniciou-se um processo de industrialização com a substituição das importações e, assim, as máquinas agrícolas passaram a ser produzidas no país. Esse processo se intensificou no período de 1960 a 1980 quando a produção interna de máquinas teve um grande salto.

Para Academia Nacional de Engenharia dos Estados Unidos da América, (NAE), a mecanização agrícola é a 7ª maior invenção do século XX, à frente do computador, telefone e naves espaciais. Neste processo, o trator agrícola é um dos mais importantes insumos agrícolas, constituindo-se na principal fonte de potência da agricultura moderna (RUSSINI, 2009).

Segundo Steckel e White (2012), a eficiência dos tratores agrícolas nas operações mecanizadas tem reduzido drasticamente os insumos necessários na produção de alimentos. Os mesmos autores, tomando como base o ano de 1954, compararam o que foi produzido no referido ano com o que seria hipoteticamente produzido com a tecnologia utilizada em 1910 e concluíram que a adoção da mecanização foi responsável por um aumento superior a 8% no Produto Interno Bruto.

2.2 Impactos econômicos e ambientais da utilização de combustíveis fósseis na mecanização agrícola

Segundo Oliveira (2001), a intensificação do uso da mecanização na agricultura vem exigindo novos investimentos em máquinas com maior potência e tecnologia incorporada para atender às diversas demandas das atividades agrícolas. Do ponto de vista da empresa, à medida que o número, o tamanho e a complexidade das máquinas aumentam mais vital se torna o impacto do gerenciamento desse sistema sobre a rentabilidade do agronegócio.

Várias pesquisas têm estabelecido que o custo energético, especificamente o combustível e máquinas, representam alta porcentagem do custo energético total de produção na agricultura empresarial (FLUCK, 1981; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 1990). De acordo com Siemens e Bowers (1999), os custos com combustíveis e lubrificantes representam, no mínimo, 16%, chegando a atingir 45% dos custos totais das máquinas agrícolas, dependendo do tipo de combustível e do número de horas trabalhadas. Para Ibañez e Rojas (1994), o custo da maquinaria agrícola, fundamentalmente o combustível, varia entre 35 a 45% do custo total de produção. Avaliando o custo energético na produção de Maracujá, Furlaneto et al. (2013) observaram que o consumo de óleo diesel representou 26% de toda a energia consumida no ciclo produtivo.

De acordo com Serrano (2007), os tratores são, normalmente, selecionados para suprir as necessidades de implementos com alta demanda de potência como arados de discos e subsoladores, o que conduz frequentemente ao superdimensionamento do trator, em relação aos implementos que demandam menor potência. Nos ensaios de desempenho de tratores, como os realizados por Masiero et al. (2009), observou-se que conforme a força de tração requerida diminuiu, levando o trator a uma condição de superdimensionamento, houve um aumento significativo do consumo específico de combustível. Essa mesma tendência de aumento no consumo específico de combustível é observada, também, na redução da demanda de potência nos ensaios dinamométricos de tomada de potência (TDP) como os realizados por Grisso, Kocher e Vaughan (2004) e Volpato et al.(2009).

Segundo Silveira e Sierra (2010), na realização de estimativas comparativas da eficiência energética, utiliza-se o consumo específico médio em litros por quilowatt-hora ($L kWh^{-1}$), com base nos pontos mais frequentes de utilização do motor do trator. Dessa forma, podemos observar que, em tratores

superdimensionados, a eficiência energética, que já é baixa nos motores de combustão interna (MCI) que os equipam, torna-se, ainda, menor.

Segundo Mousazadeh et al. (2010), além da questão energética, os tratores agrícolas apresentam grande parcela de contribuição na poluição do ar. De acordo com a Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- USEPA, 2012), os veículos não rodoviários, como os tratores agrícolas, são responsáveis por 15 a 20% da poluição atmosférica nas cidades dos Estados Unidos. A contaminação do ar é considerada uma das maiores ameaças à saúde pública em todo o mundo (TOSI, 2012). A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que a poluição atmosférica seja responsável por 20% a 30% das doenças respiratórias, 4 a 8% das mortes prematuras e pela morte de 1,9 milhão de pessoas por ano em países subdesenvolvidos (PEREIRA, 2005).

Além dos gases poluentes, os motores de combustão interna, também, emitem materiais particulados (MP's) que são expelidos em partículas de tamanho variado, altamente prejudiciais que podem se acumular no sistema respiratório provocando redução da função pulmonar, diversas doenças respiratórias e até morte (JANSSEN; SCHETTLER, 2013).

Contudo, de acordo com Goldenstein e Azevedo (2006), a indústria automotiva tem modernizado continuamente a tecnologia dos motores, buscando uma queima mais eficiente dos combustíveis e uma redução da emissão de gases, visando atender às crescentes exigências ambientais. Inovações tecnológicas, como os sistemas de injeção eletrônica de combustível nos motores a gasolina, em substituição aos carburadores, possibilitam dosar a mistura ar-combustível, ponto a ponto, em todos os regimes de trabalho do motor, reduzindo o consumo e maximizando a potência do motor. Já o filtro catalisador consegue transformar a maior parte dos gases tóxicos produzidos pelo motor em gases inertes.

Além do emprego do sistema catalisador, os motores do ciclo diesel, também, utilizam a solução aquosa, contendo 32,5% do agente redutor líquido automotivo - Arla 32, conhecida como ureia, agente redutor para os veículos pesados. Trata-se de composto não tóxico, não explosivo, que pode ser transportado sem problemas e que, principalmente, não é nocivo ao meio ambiente (MARTINS; PIERRE, 2013). Seu funcionamento consiste na introdução da solução de ureia a um compartimento cerâmico adequado, onde os óxidos de nitrogênio serão transformados, por meio de reação química, em água em estado de vapor e nitrogênio, que é um componente natural da atmosfera. A tecnologia do uso da ureia líquida já vinha sendo utilizada com sucesso em incineradores e em motores a diesel de locomotivas e barcos. O uso desse sistema proporciona uma redução entre 75% e 90% nas emissões de óxido de nitrogênio e outros materiais como os hidrocarbonetos (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG- DIN, 2005).

Mas, atualmente, a grande questão que se coloca não diz respeito aos gases tóxicos e, sim, a um gás historicamente considerado como inofensivo ao meio ambiente: o dióxido de carbono (CO_2), que representa 18,1% das emissões veiculares. A liberação desse gás é inerente ao processo de combustão, e o CO_2 lançado à atmosfera é um dos principais gases de efeito estufa que tem causado a elevação da temperatura do planeta como se pode ver na figura 3.

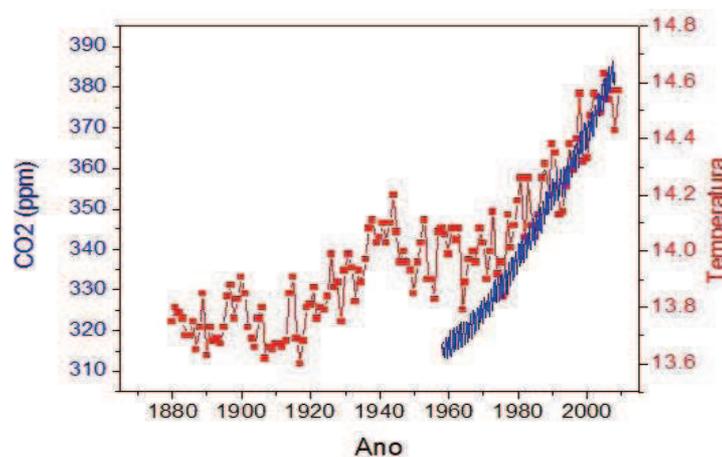


Figura 3 Variação da temperatura do planeta e da concentração de CO₂ de 1880 a 2010

Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA (2013)

2.3 A busca por alternativas à utilização do petróleo e o desenvolvimento de veículos elétricos

De acordo com Hoyer (2007), a história dos veículos elétricos (VE's) começa em meados do século XIX e está intimamente relacionada à história de desenvolvimento das baterias. Em 1859, o belga Gaston Planté realizou a demonstração da primeira bateria de chumbo e ácido. Esse equipamento veio a ser utilizado por diversos veículos elétricos desenvolvidos a partir do início da década de 1880 na França, EUA e Reino Unido.

No início do século XX, os automóveis elétricos, nas cidades americanas, eram mais comuns do que os a gasolina. No ano de 1900, foram produzidos 1575 automóveis elétricos contra apenas 936 carros a gasolina (GOLDEMBERG; LEBENSZTAJN; PELLINI, 2012). Ainda, segundo Peres (2012), em 1899, foi criado pelo engenheiro belga Camill e Jenatzy, um veículo elétrico de nome “Jamais Contenté”, que alcançou, para a época, a incrível

velocidade de 100 km h^{-1} . Nesse mesmo ano, a revista *Scientific American* afirmou que: “a eletricidade é ideal para veículos, pois ela elimina os dispositivos complicados associados aos motores movidos a gasolina, vapor e ar comprimido, evitando o ruído, vibração e calor associados”.

Thomas Edson, interessado no potencial dos veículos elétricos, desenvolveu em 1901 a bateria de níquel-ferro que possuía uma capacidade de armazenamento 40% superior à bateria chumbo-ácido. Nessa mesma época, também, foram desenvolvidos os sistemas de frenagem regenerativa que é o equipamento capaz de transformar a energia cinética do veículo em energia elétrica para recarga das baterias e, também, o sistema híbrido a gasolina e eletricidade (BARAN; LEGEY, 2010).

Um fator importante para o surgimento dos VE's foi a implementação dos bondes elétricos que substituíram as carroças e os bondes com cavalos. Outro fator foi o surgimento do sistema ferroviário elétrico utilizado na Europa (CARUSO, 2007). Na figura 4 mostram-se propagandas de veículos elétricos fabricados e comercializados no início do século XX.

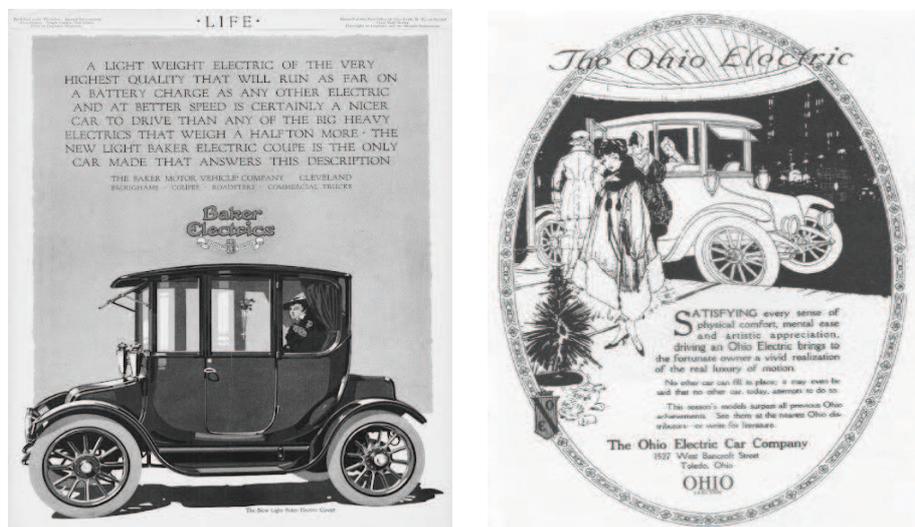


Figura 4 Propagandas de veículos elétricos do início do século XX

Fonte: Adaptado de Goldemberg, Lebensztajne Pellini (2012)

No entanto, de acordo com Struben e Sterman (2012), em 1903 havia cerca de quatro mil automóveis registrados na cidade de Nova York, sendo 53% a vapor, 27% a gasolina e 20% elétricos. Em 1912, quando a frota de carros elétricos naquela cidade atingiu o ápice de 30 mil unidades, a quantidade de automóveis a gasolina já era trinta vezes maior. A partir de então, de acordo com Baran e Legey (2010), a trajetória dos carros elétricos seguiu em forte queda. Entre os principais fatores apontados para o declínio dos carros elétricos a partir de então, podem-se citar:

- a) O sistema de produção em série de automóveis, desenvolvido por Henry Ford, permitiu que o preço final dos carros a gasolina ficasse entre US\$ 500 e US\$ 1.000, o que correspondia à metade do preço pago pelos elétricos.

- b) Em 1912 foi inventada a partida elétrica, que eliminou a manivela utilizada para acionar o motor dos veículos a gasolina, facilitando o seu uso.
- c) Nos anos 1920, as rodovias dos EUA já interligavam diversas cidades, o que demandava veículos capazes de percorrer longas distâncias.
- d) As descobertas de petróleo no Texas reduziram o preço da gasolina.

De acordo com Caruso (2007), nessa época tornou-se evidente que o carro elétrico tinha um desempenho inferior e, ainda, não havia motivações como as atuais de caráter ambiental, econômico e social para o gasto de tempo e dinheiro no intuito de desenvolver uma tecnologia inferior. Dessa forma, entre os anos de 1926 e 1960, sem interesse dessa tecnologia, nada se fez para o ressurgimento e pesquisa dos veículos elétricos.

Depois desse período de total esquecimento, pode-se dizer que a história moderna dos veículos elétricos teve início em 1960, em Phoenix, nos EUA, onde ocorreu o primeiro simpósio internacional dedicado, exclusivamente, a este assunto. Nesta época, já eram sensíveis os efeitos da poluição do ar, causada por veículos com motores de combustão interna, nos grandes centros urbanos (PERES, 2012).

Além disso, segundo Goldenstain e Azevedo (2006), os países do oriente médio, principais produtores e exportadores de petróleo, passavam por um período de grande turbulência política por perceberam que a posse física de petróleo e gás lhes dava o domínio das negociações com as empresas estrangeiras. Com a criação da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) em 1961, exigiram maior participação nas decisões sobre os preços do barril e passaram a usar o petróleo como arma de pressão política contra Israel e seus aliados ocidentais.

Em 1973, eclodiu a Guerra do Yom Kippur, que elevou as tensões no Oriente Médio. Naquele contexto, a Opep decretou um aumento unilateral de 300% nos preços do petróleo, o que provocou uma crise econômica mundial e interrompeu o longo período de grande crescimento econômico que se mantinha desde o fim da guerra. Os países industrializados encerraram o ano de 1974 com um déficit de cerca de US\$ 11 bilhões e os subdesenvolvidos, de quase US\$ 40 bilhões. A produção industrial sofreu uma redução de 10% em um ano nas economias desenvolvidas, e o comércio mundial, de 13%(MADDISON, 1982).

De acordo com Caruso (2007), as crises que se sucederam na década de 70, ao dispararem os preços do barril do petróleo, somaram argumentos à questão da poluição atmosférica em favor da opção veicular elétrica com o objetivo de diminuir o consumo deste combustível.

Segundo Goldenstein e Azevedo (2006), nessa época, a indústria automotiva viveu momentos de forte inovação. Protótipos de carros “futuristas”, movidos à energia elétrica, energia solar ou outras fontes mais promissoras, como o hidrogênio, passaram a ser pesquisados, discutindo-se a viabilidade de sua comercialização como alternativa aos veículos movidos a gasolina, então, com preços ascendentes. Nos EUA, começava-se a utilizar o álcool feito de milho para mistura com a gasolina. A partir da década de 1980, os carros japoneses, mais econômicos, conquistaram mercado tanto nos EUA como na Europa, levando dificuldades às montadoras tradicionais, que procuraram diminuir seus custos fechando unidades improdutivas e reduzindo os seus quadros.

No Brasil, foi lançado um VE fabricado pela extinta indústria nacional GURGEL S.A.(Figura 2). Furnas Centrais Elétricas S.A., em 1984, era uma das empresas que, de forma pioneira, contou com dois modelos elétricos deste fabricante e pôde testá-los em serviços gerais, nas áreas de Campinas e Tijuco Preto. Contudo, medidas de racionalização e substituição do petróleo, em vários

cantos do mundo, como a do PROALCOOL, iniciado em 1975, foram eficazes sucedendo-se o declínio dos preços do petróleo, antes que os carros elétricos, em qualquer parte, pudessem firmar a sua utilização junto ao público (PERES, 2012).



Figura 5 Veículos elétricos produzidos pela GURGEL S.A.; (a) Itaipu; (b) Itaipu E-400

Nos anos 1980, de acordo com Costa e Prates (2005), a indústria do petróleo promoveu seguidas inovações tecnológicas que permitiram a ampliação das reservas, a melhoria dos processos de extração, a viabilização de poços antes inexplorados, a abertura de poços de petróleo em águas profundas e o aumento da eficiência dos processos em geral. Tais inovações ampliaram a oferta de petróleo, e a diversificação da matriz energética mundial levou à redução do consumo. Com isso, após o pico de 1980-1981, o preço do barril de petróleo mostrou clara tendência à queda.

Segundo Goldenstein e Azevedo (2006), da década de 1970 até o final do século XX, o preço do petróleo foi fortemente influenciado por tensões geopolíticas nas principais áreas exportadoras líquidas. No entanto, as causas do aumento do preço da *commodity* eram circunstanciais, recuando quando as

tensões se dissipavam. Desta forma, os veículos “futuristas”, movidos a outras energias, não se mostraram viáveis economicamente e não foram produzidos comercialmente. Atualmente, porém, diversos fatores como o explosivo crescimento econômico asiático; as novas estimativas das reservas mundiais; o terrorismo que gera um estado permanente de tensão entre o mundo ocidental e os países árabes e a manutenção do alto consumo nos países ocidentais exercem pressão sobre o preço do barril, que levam a crer na manutenção do preço do petróleo em altos patamares (figura 6).

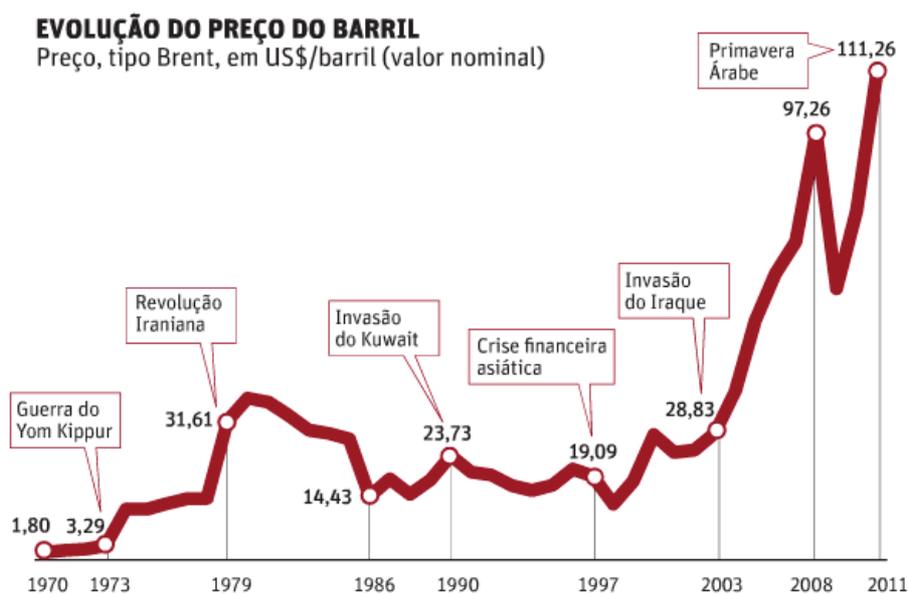


Figura 6 Cotação do Barril de Petróleo entre 1970 e 2011 (preço em dólares)

Fonte: International Energy Agency (2014)

Com base nos problemas econômicos e ambientais, causados pela dependência massiva de combustíveis fósseis, é que a indústria de veículos automotores vem investindo no desenvolvimento de veículos que se utilizem de fontes alternativas de energia como veículos elétricos e veículos híbridos

(CARVALHO, 2008; NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC, 2005). De acordo com Mousazadeh et al. (2010), o governo de Barack Obama, nos Estados Unidos, estabeleceu uma meta de um milhão de veículos elétricos circulando nas suas rodovias até 2015.

Uma série de patentes de tratores elétricos, como as requeridas por Christianson et al. (1987), Downing Junior (1978), Edmond (2006), Gingerich (1998) e Orssolini (1995), mostram que a preocupação em utilizar fontes renováveis de energia não se limita apenas aos veículos rodoviários se estendendo a outros tipos de veículos como tratores agrícolas (Figura 6).

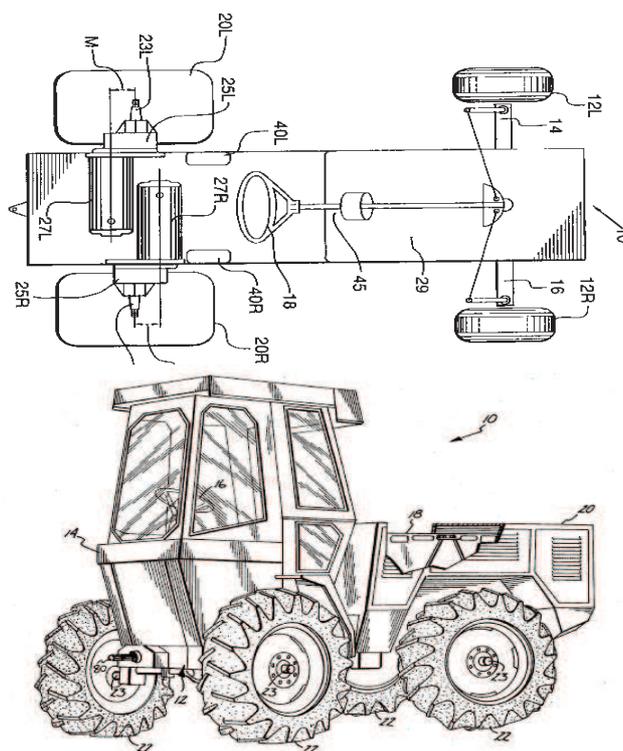


Figura 7 Esquemas de patente de trator elétrico

Fonte: Christianson et al. (1987) e Gingerich (1998)

2.4 Princípios de funcionamento de veículos elétricos

Segundo Goldenstein e Azevedo (2006), os veículos elétricos são fabricados desde o início do século XX e, pela maior eficiência energética, sempre foram considerados uma alternativa para o setor de transporte. Entre as principais vantagens de um veículo elétrico, destacam-se a emissão zero de poluente, o baixo nível de ruído e os reduzidos custos de operação e de manutenção, que é associada, basicamente, às baterias (BOTTURA; BARRETO, 1989).

Segundo Goldemberg (2002), o motor de combustão interna, com base nos veículos norte-americanos, tem uma eficiência de 35%. Por outro lado, os motores elétricos, normalmente, têm eficiência superior a 80% (FEDRIZZI, 2007).

De acordo com Costa (2009), a propulsão elétrica propicia, em última análise, a tração mecânica às rodas, transferindo energia das baterias, conforme a exigência, sob o controle do motorista. Do ponto de vista funcional, um sistema de propulsão elétrica pode ser dividido em duas partes: elétrica e mecânica. A parte elétrica inclui o motor, conversor de potência e controlador eletrônico. A parte mecânica consiste nos dispositivos de transmissão e acoplamento às rodas, incluindo, naturalmente, o chassi e carroceria.

Os dispositivos do câmbio de marchas, dependendo da arquitetura, são opcionais. A fronteira entre a parte elétrica e a mecânica é o espaço do motor, onde ocorre a conversão da energia eletromecânica. Para a propulsão elétrica, o sistema eletrônico de potência desempenha um papel importante e é, por vezes, descrito como o “coração” dos Veículos Elétricos. Na figura 7 mostram-se os esquemas de um veículo elétrico do início do século XX e de um veículo elétrico atual e nela pode-se observar que os princípios de propulsão elétrica são, basicamente, os mesmos para os dois veículos.

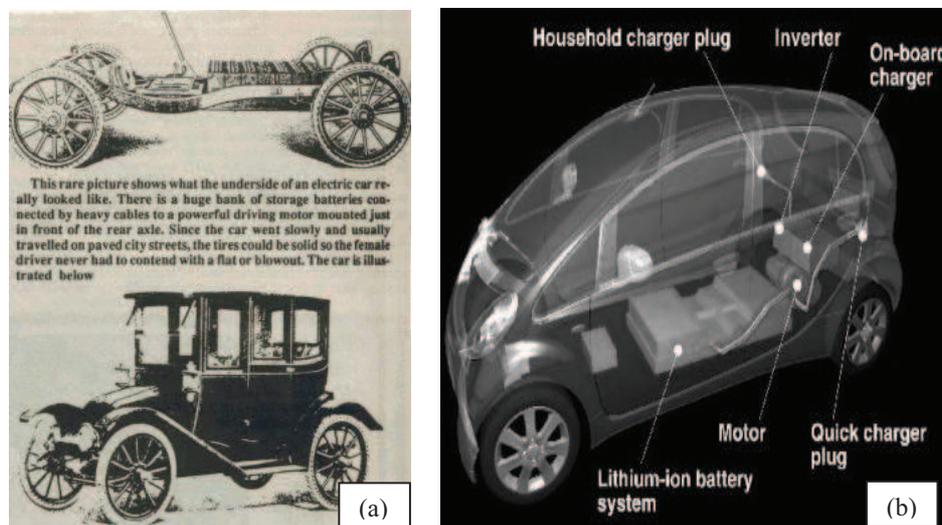


Figura 8 Esquema de propulsão de veículo elétrico; (a) veículo do início do século XX; (b) veículo do início do século XXI

Segundo Bottura e Barreto(1989), os motores para veículos elétricos podem ser de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Dentre os vários tipos de motores para Veículos Elétricos, o de indução é, essencialmente, um motor de velocidade constante, quando conectado a uma fonte com tensão e frequência constantes, porque a velocidade de operação está relacionada com a velocidade síncrona. Se o torque de carga aumenta, a queda de velocidade é muito pequena. Isto, entretanto, é conveniente para o uso em sistemas com velocidades constantes. Muitas aplicações industriais, por sua vez, requerem velocidades variáveis ou um ajuste contínuo em uma faixa específica de velocidades (IVANOV-SMOLENSKY, 1982; KOSTENKO; PIOTROVSKY, 1977).

Segundo Caruso (2007), os motores CC têm sido utilizados em sistemas com variação de velocidade. O motor CC não exige nenhum mecanismo de transmissão mecânica para variação da velocidade, embora seja caro e necessite

de manutenção frequente de seus comutadores e escovas, além de ser proibitivo em atmosferas perigosas, em razão do surgimento de fagulhas no contato das escovas e comutadores. Uma opção ao motor CC convencional é o motor CC *brushless* que, diferentemente dos motores de corrente contínua convencionais, não apresenta um comutador eletromecânico e nem escovas. Quando comparados com os motores CC com escovas, os motores CC *brushless* têm maior eficiência, menor ruído e menor relação entre suas dimensões e a potência que podem desenvolver (EMADI, 2005).

Por outro lado, motores elétricos de Corrente Alternada (CA) são baratos, robustos, não têm comutadores e são convenientes para aplicações de alta velocidade. No entanto, alimentados com tensão e frequência constantes, exigem a adoção de transmissão mecânica para a variação da velocidade. Com a evolução do controle eletrônico de potência, o motor de indução trifásico tem sido aplicado onde se necessita velocidade variável. É observado que esse motor satisfaz a uma larga faixa de velocidade, especialmente para as aplicações que têm cargas constantes (CARUSO, 2007).

De acordo com Costa (2009), a tendência atual mostra que veículos de pequeno porte, não rodoviários, utilizam motores com comutadores e baterias chumbo-ácidas, visto que as velocidades de funcionamento são baixas, permitindo um projeto satisfatório, inclusive, quanto à autonomia. Para veículos de maior porte, a tendência recente é empregar motores sem comutadores, como os motores de indução com baterias avançadas.

2.5 Baterias para os veículos elétricos

Um dos componentes mais importantes para qualquer tipo de VE, a primeira bateria surgiu em 1800, por meio do físico italiano Alessandro Volta. A partir desse momento, abriu-se um universo de novas oportunidades para a

produção e acumulação de energia. Desde a pilha de volta, existiram grandes evoluções, mas ainda existe um longo caminho até que esta área da tecnologia seja dominada, existindo, assim, uma enorme margem de evolução. É, até o momento, o único dispositivo que pode armazenar energia elétrica suficiente, de uma forma eficiente e eficaz, proporcionando uma razoável autonomia (AFONSO; BUSNARDO; BUSNARDO, 2004).

Segundo Bansal (2005), as baterias são, também, condicionantes do comportamento de um VE. Normalmente, quanto maior a tensão do sistema de armazenamento de energia, melhores são as características dinâmicas da tração, o que conduz à necessidade de aumentar o número de células em série. Em contrapartida, mais células implicam mais peso, assim, será necessário mais torque e, conseqüentemente, maior potência. Deste modo, o tipo de baterias, o seu dimensionamento e o sistema de monitoramento de carga e descarga das baterias vão depender das características desejadas para o VE e vice-versa. Posto isto, é fundamental que se entenda o funcionamento básico das baterias, suas principais características elétricas e as diferentes tecnologias disponíveis.

2.5.1 Funcionamento das baterias

Basicamente, uma bateria é um dispositivo que produz energia elétrica com base em reações químicas de oxidação e redução de metais e óxidos metálicos. É, portanto, um dispositivo capaz de armazenar e gerar energia elétrica mediante reações eletroquímicas de oxidação (perda de elétrons) e de redução (ganho de elétrons) (ROSOLEM et al., 2012). Fisicamente, a unidade básica de uma bateria é uma célula, também, denominada elemento. A associação de dois ou mais elementos, em série e/ou em paralelo, constitui uma bateria. Cada célula eletroquímica é formada por dois eletrodos (placas positiva e negativa) separados fisicamente por material isolante elétrico, porém, condutor

iônico (separador), e mergulhados ou envolvidos por um eletrólito (meio condutor aquoso ou gelatinoso) (NAZRI; PISTOIA, 2009).

Como se observa na Figura 8, o catodo tem um potencial mais alto quando comparado com o anodo. Quando os eletrodos são interligados por um circuito elétrico, surge uma corrente elétrica do anodo para o catodo que dá origem à migração de íons do anodo para o catodo, reduzindo a diferença de potencial existente entre os dois eletrodos, até que se estabeleça o equilíbrio eletroquímico (cargas elétricas se anulem). Quando este equilíbrio ocorre, a diferença de potencial entre o anodo e o catodo é nula interrompendo o fluxo de corrente elétrica. Na prática o equilíbrio químico não é atingido. Quando uma bateria chega a 85% do valor máximo de diferença de tensão entre o anodo e o catodo, diz-se que a bateria está totalmente descarregada, ou seja, que perdeu a capacidade de produzir energia elétrica (SCOTT; SE-HEE, 2011).

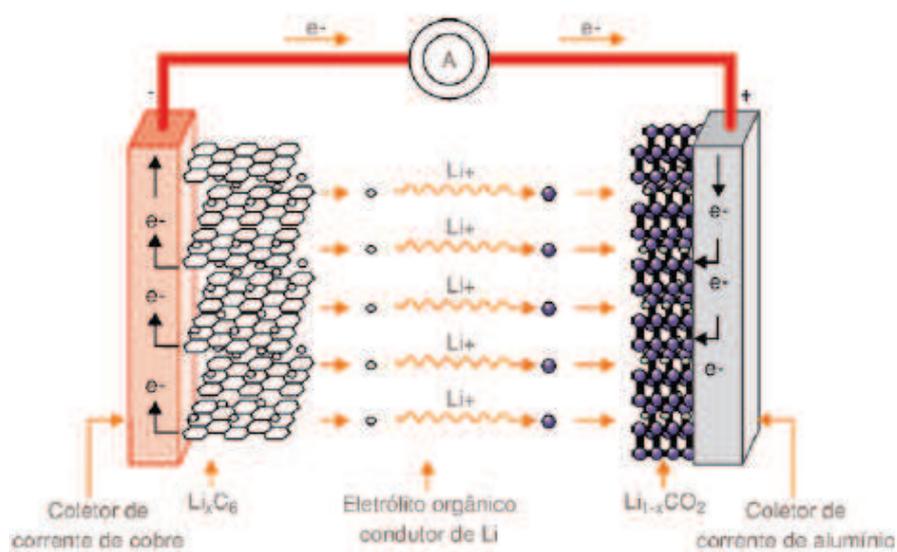


Figura 9 Representação esquemática de uma bateria de Lítio-íon

Fonte: Rosolem et al. (2012).

Existem baterias, em que a reação química pode ser invertida e a energia elétrica pode ser armazenada em forma química, a que se dá o nome de carregamento da bateria. Dessa forma, é possível dividir as baterias em dois tipos: primárias e secundárias. As primárias são aquelas que são descartadas, quando descarregadas, pois nesse tipo de bateria as reações químicas são irreversíveis. Nas secundárias, as reações químicas são reversíveis, possibilitando sua recarga (BRENNIMAN, 1994; FISHBEIN, 2013).

Uma fonte de energia externa deve ser repetidamente empregada para recarregar a bateria. Inicialmente, as baterias recarregáveis são mais caras que as primárias e requerem a compra de um carregador. Entretanto, cada bateria recarregável substitui centenas de baterias primárias, levando a um custo final menor (FISHBEIN, 2013).

Brenniman (1994) afirmou que a distinção técnica entre pilhas e baterias é o fato de a pilha representar a unidade mais simples, ou seja, unidade mínima. Sendo constituída de um anodo (polo negativo) e um catodo (polo positivo), mergulhados no eletrólito, que facilita a reação química entre os dois eletrodos. Por outro lado, a bateria é um conjunto de pilhas interligadas convenientemente, composta por catodos e anodos múltiplos. Várias pilhas ligadas em série, ou seja, o conjunto de células forma uma bateria (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986).

2.5.2 Características de fabricação das baterias

A seguir são descritas algumas características de fabricação das baterias de acordo com Bansal (2005) e Rosolem et al. (2012).

Tensão

Representa o potencial ou a força eletromotriz de uma célula eletroquímica e é a diferença entre os potenciais de oxidação e redução dos materiais ativos dos catodos e anodos. A unidade de medida é volt (V).

Corrente

Representa o movimento ordenado de partículas eletricamente carregadas (elétrons), ou corrente elétrica, que uma célula eletroquímica pode aplicar sobre um circuito externo, definida como a quantidade de carga que atravessa o condutor por unidade de tempo. Está relacionada com a velocidade das reações de oxidação e redução dos materiais ativos dos catodos e anodos, influenciada pelo separador e eletrólito, em regime permanente (contínuo) ou de pico (curta duração). A unidade de medida é o Coulomb por segundo, chamado de ampère (A).

Capacidade específica da bateria

É a quantidade total de corrente por unidade de tempo que uma célula ou bateria é capaz de fornecer até atingir sua tensão final de descarga. $C = I \times t$. Sua unidade de medida é ampère-hora (Ah). Esta é uma especificação muito importante na escolha de uma bateria, pois é diretamente proporcional à energia armazenada na mesma.

Energia específica

É a quantidade total de energia em watt-hora (Wh), que a bateria pode armazenar por unidade de massa sendo chamada Energia específica Mássica, expressa em watt-hora por quilograma (Wh kg^{-1}) ou por unidade de volume, chamada Energia específica volumétrica expressa em watt-hora por litro (Wh l^{-1}).

Potência específica

É a quantidade total de potência em watts (W), que a bateria pode armazenar por unidade de massa (Kg) ou por unidade de volume (l) para uma determinada taxa de descarga. Reflete a capacidade de a bateria fornecer altas taxas de corrente, em regime permanente (contínuo) ou de pico (curta duração). $P = E \times I$. A unidade de medida é o watt (W). Para comparar diferentes tecnologias de baterias, utiliza-se o valor de potência normalizado em massa, expressa watts por quilograma (Wkg^{-1}) ou volume, expressa em watts por litro (Wl^{-1})

Ciclo de vida

É a contagem do número total de vezes que a bateria pode ser carregada (e descarregada) durante a sua vida útil. Quando a bateria não consegue ser carregada acima de 80% do seu estado de carga nominal, considera-se que a sua vida útil chegou ao fim. É recomendado que se atinja no mínimo 1000 ciclos de carga e descarga para a utilização da bateria em veículos elétricos.

2.5.3 Classificação das baterias quanto ao tipo de uso

De acordo com Palmer (2008), as baterias são classificadas em:

- a) Baterias de Arranque – São usadas para dar partida em motores de combustão interna e para fornecer energia ao sistema elétrico do carro quando este não está rodando. Estas baterias são dimensionadas para fornecer potência sem liberar muita energia, pois seu uso prolongado, para abastecer o sistema elétrico do carro, requer baixa intensidade de corrente. Já, na partida, geralmente, é necessária uma corrente de 100 a 400 A.

- b) Baterias tracionárias – Estas baterias são as que funcionam em regimes mais severos, necessitando de potência, energia e longa vida cíclica, principalmente, quando operam em regimes de descarga profunda. Estas baterias são utilizadas em empilhadeiras elétricas, equipamentos de movimentação em aeroportos, trens e metrô e veículos elétricos em geral.
- c) Baterias estacionárias – Estas baterias são, especialmente, projetadas como fontes de reserva de energia e potência para serem empregadas em centrais telefônicas, centros de computação, centrais elétricas, hospitais, etc. nos casos de falhas das fontes principais de energia.

Segundo Costa (2009), em função de sua forma de funcionamento, somente as baterias tracionárias podem ser utilizadas como fonte de energia para veículos elétricos. O mesmo autor afirma que o desenvolvimento da tecnologia das baterias tem sido acelerado e um conjunto de critérios deve ser considerado como energia específica, potência específica, eficiência de energia, taxa de carga, ciclo de vida, ambiente operacional, custo, segurança e reciclagem.

De acordo com Larminie e Lowry (2003), até o presente momento, a mais utilizada tecnologia de baterias para Veículos elétricos tem sido a de chumbo-ácido. No entanto, quando se busca um alto desempenho e o custo não é o critério principal, as baterias de íons de lítio estão entre as mais cogitadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Ensaio dinamométrico do trator agrícola

Para realização deste trabalho, foram realizados dois ensaios dinamométricos, sendo um ensaio num trator agrícola e outro em um motor elétrico. O ensaio com o trator agrícola foi realizado no Centro Tecnológico de Máquinas e Mecanização Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras, localizado no município de Lavras-MG.

Foram obtidas as curvas de desempenho do motor de combustão interna (MCI) de ciclo diesel, quatro tempos, com três cilindros dispostos em linha, sistema de injeção com bomba rotativa, aspiração natural e potência nominal de 14,9 kW a 2300 rpm. O MCI citado estava montado em um trator 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA), com relação peso potência de 87,3 kgf kW⁻¹ e as suas curvas de desempenho foram obtidas por meio de um ensaio dinamométrico na tomada de potência (TDP).

O dinamômetro utilizado, na obtenção dos valores de torque (N m), rotação (rpm) e potência (kW) por meio da TDP foi o modelo NEB 200, marca AW Dynamometer, no qual há a transformação da energia mecânica em calor por meio da utilização de um freio hidráulico, sendo o calor gerado nesse freio dissipado pela passagem de água de arrefecimento. Esse dinamômetro permite que se faça a leitura do torque, rotação e potência diretamente em seu display e, também, permite a conexão com um sistema de aquisição de dados (Figura 9).

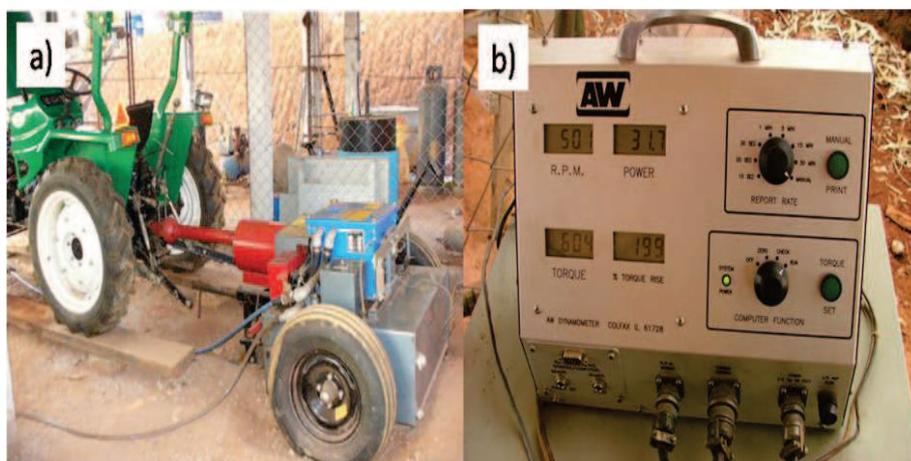


Figura 10 a) Ensaio dinamométrico realizado no motor de combustão interna. a) Dinamômetro acoplado à TDP do trator; b) Display digital do dinamômetro.

O consumo horário de combustível do motor do trator foi medido por meio de um medidor volumétrico, descrito por Gamero, Benez e Furlani Júnior (1986), que trata de uma proveta graduada, com válvulas solenoides que controlam o fluxo de entrada e saída do combustível, permitindo sua medida por diferença de nível em função do tempo (Figura 11).



Figura 11 Medidor Volumétrico de Combustível.

Para realização dos ensaios, foi adotada a norma NBR 1585 da ABNT (1996), na qual se aplica a avaliação do desempenho de motores de combustão interna; observando em particular, a apresentação das curvas de potência, torque e de consumo específico de combustível a plena carga em função da rotação.

3.1.1 Determinação dos níveis de rotação para ensaio

Para determinação dos níveis de rotação, acionou-se o sistema de transmissão da TDP com o dinamômetro acoplado sem carga e, em seguida, colocou-se o trator em máxima aceleração observando no mostrador digital do dinamômetro a rotação máxima. Os níveis de rotação (rpm) variaram, em função

da variação da carga aplicada ao trator pelo dinamômetro e estas variações foram monitoradas pelo mostrador digital do dinamômetro onde, também, foram observadas as variações de potência (kW) e torque (N m).

Segundo a norma NBR 1585/1996, medições devem ser tomadas em um número suficiente de rotações, para definir completamente a curva de potência entre a menor e a maior faixa de rotações do motor, recomendadas pelo fabricante e esta faixa deve incluir a rotação na qual o motor produz sua potência máxima.

3.1.2 Determinação da potência efetiva – H_e

É a potência que, efetivamente, está disponível no motor para atender as exigências de sua aplicação e é medida pelo dinamômetro. Vale lembrar que para este tipo de ensaio, obtivemos a potência efetiva na TDP, ou seja, diminuída pelas perdas da transmissão da potência no volante do motor até o eixo estriado da TDP. Neste caso, foi mostrada diretamente no mostrador digital, podendo, também, ser calculada com base no torque T correspondente à velocidade angular, de acordo com Mialhe (1996), por meio da Equação 1.

$$H_e = T \times N \times \left(\frac{2\pi}{60 \times 1000} \right) \quad (1)$$

Sendo:

H_e = potência efetiva (kW);

T = torque (N.m);

N = velocidade angular (rpm).

3.1.3 Determinação da potência reduzida – H_r

Segundo Mialhe (1996), o termo reduzido refere-se aos resultados reais de desempenho que foram obtidos por cálculos, efetuados nos dados dos ensaios, os quais levam em conta as condições atmosféricas consideradas padrão. Os valores de potência obtidos na TDP foram recalculados conforme a Equação 2 descrita por Salvador (1984). A temperatura média e a pressão atmosférica, no momento do ensaio foram, respectivamente, de 302K e 752 mm Hg.

$$\frac{H_r}{H_o} = \frac{P_2}{P_1} \times \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Sendo:

H_r = potência reduzida para as condições padrão de pressão e temperatura (kW);

H_o = potência observada (kW);

P_1 = pressão atmosférica, por ocasião da prova (mm Hg);

P_2 = pressão atmosférica padrão (760 mm Hg);

T_1 = temperatura absoluta por ocasião da prova (K); e

T_2 = temperatura absoluta padrão NBR ISO 1585/1996 (298 K).

3.1.4 Determinação do consumo específico de combustível

O consumo real de combustível foi determinado por meio da mensuração do tempo de deslocamento de combustível na proveta graduada do medidor volumétrico descrito por Gamero, Benez e Furlani Júnior (1986), onde, por meio de válvulas solenoides, é possível converter a referida proveta na

condição de tanque de combustível do trator, ou seja, alimentar o sistema de injeção do trator pela proveta e direcionar o retorno dos bicos injetores, também, para a proveta. Desta forma, o deslocamento de combustível lido na proveta em um determinado tempo, multiplicado pela sua seção transversal, exprime exatamente o consumo de combustível do trator por unidade de tempo.

Para determinação do consumo específico de combustível expresso em g kW^{-1} , converteu-se o consumo horário expresso em L h^{-1} para g h^{-1} , utilizando-se a massa específica do combustível e, posteriormente, aplicou-se a Equação 3 para o cálculo (MIALHE, 1996).

$$C_e = \frac{C_h}{H_o} \quad (3)$$

Sendo:

C_e = consumo específico de combustível (g kWh^{-1});

C_h = consumo horário de combustível (g h^{-1}); e

H_o = potência observada (kW).

3.1.5 Determinação da eficiência energética do motor - η (%)

A eficiência energética do motor foi determinada, segundo norma NBR1585/1996, conforme a equação 4.

$$\eta = \frac{3600}{C_e \times PCI} \quad (4)$$

Sendo:

η : eficiência energética do motor (%);

3600: constante de conversão de unidades;

C_e : consumo específico de combustível (g kWh^{-1})

PCI: poder calorífico inferior do combustível (MJ kg^{-1}).

3.1.6 Determinação do torque – τ

A medição do torque consistiu em determinar a intensidade de uma força que, atuando na extremidade de um braço, tendeu a produzir movimento de rotação. No caso de movimento rotativo contínuo, o torque é medido pelo dinamômetro (MIALHE, 1980). Os valores de torque foram observados virtualmente no mostrador digital do dinamômetro e registrados, segundo a norma NBR 1585/1996, adotando-se a média de duas leituras consecutivas estabilizadas que não variem mais que 2%, sendo a segunda leitura determinada sem qualquer ajuste do motor, aproximadamente, 1 minuto após a primeira.

3.1.7 Determinação da Reserva de Torque

Segundo Sousa Filho (2001), a reserva de torque pode ser calculada pela equação 5:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{máx}} - T_{\text{pot. máx}}}{T_{\text{máx}}} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

ΔT = reserva de torque (%);

$T_{\text{máx}}$ = torque máximo; e

$T_{\text{pot. máx}}$ = torque na potência máxima.

3.1.8 Determinação do custo energético do motor de combustão interna

$$CE_{mci}$$

O custo energético foi definido como o valor em reais (R\$) gastos por kWh de energia mecânica produzida. Para o trator com motor diesel, o custo energético pode ser definido pela equação 6:

$$CE_{mci} = \frac{C_h \times V_c}{H_r} \quad (6)$$

Sendo:

CE_{mci} : custo energético do motor de combustão interna (R\$ kWh⁻¹)

C_h : consumo horário de combustível (L h⁻¹)

V_c : valor do combustível (R\$ L⁻¹)

H_r : potência reduzida (kW)

O valor do combustível foi obtido por meio da média dos preços do óleo diesel de 24 postos de gasolina do sul do estado de Minas Gerais, obtendo-se o valor médio de R\$2,54 por litro de combustível.

3.2 Ensaio dinamométrico do motor elétrico

O ensaio dinamométrico do motor elétrico foi realizado no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo – IEE/USP. Foi feito um ensaio com um motor elétrico de indução trifásico com potência útil de 22 kW (30 cv), 60 Hz e rotação nominal de 1765 rpm. Para garantir a paridade entre o motor de combustão interna e o motor elétrico, a potência máxima do motor elétrico foi limitada a 15 kW.

3.2.1 Determinação dos níveis de rotação do motor elétrico

A variação de velocidade do referido motor foi obtida mediante um inversor de frequência trifásico. Como a proposta deste trabalho foi de comparar o desempenho do motor de combustão interna do trator agrícola com o motor elétrico, a variação de rotação do motor elétrico se fez imprescindível. Por isso, determinou-se não apenas o desempenho do motor elétrico e, sim, do conjunto motor elétrico e inversor de frequência (ME-IF).

3.2.2 Determinação do torque e potência do motor elétrico

As curvas de torque e potência do conjunto ME-IF foram obtidas por meio de um freio dinamométrico elétrico que, de acordo com Mialhe (1996), é um gerador de corrente elétrica que, ao ser acionado pelo motor ensaiado, submete-o à frenagem a qual depende dos controles e cargas elétricas instalados no circuito. Em princípio, qualquer gerador de corrente elétrica pode ser utilizado como freio dinamométrico, desde que se monitore a potência com instrumentos de mensuração de grandezas elétricas (voltímetro e amperímetro) e proceder à devida correção em função do rendimento eletromecânico do gerador. Contudo, o rendimento de um gerador elétrico varia em função da carga, da velocidade e da temperatura. Para contornar tais dificuldades, o gerador pode ser montado sobre mancais especiais que possibilitam a mensuração direta da reação na carcaça do estator que caracteriza o torque do motor submetido ao ensaio. A potência elétrica absorvida pelo conjunto ME-IF foi determinada por meio de um wattímetro.

3.2.3 Determinação da eficiência energética do conjunto motor elétrico e inversor de frequência (η_{ME})

A eficiência energética do conjunto foi determinada pela equação 7.

$$\eta_{ME} = \frac{H_{eixo}}{H_{abs.}} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

H_{eixo} : potência mecânica no eixo do motor (kW);

$H_{abs.}$: potência elétrica absorvida pelo conjunto ME-IF (kW).

3.2.4 Determinação do custo energético do conjunto ME- IF

Esse custo foi determinado considerando uma configuração de veículo elétrico. Dessa forma, o conjunto ME-IF seria alimentado por um conjunto de baterias que, ao final do trabalho, seriam recarregadas por um carregador ligado à rede elétrica. Assim, no cálculo do custo energético, é necessário considerar a eficiência do carregador de baterias. Dessa forma, foi possível deduzir a equação de determinação do custo energético do conjunto ME (Equação 8).

$$CE_{ME} = \frac{\left(\frac{H_{abs.} \times V_{EE}}{\eta_{CB}} \right)}{H_{eixo}} \quad (8)$$

Sendo:

CE_{ME} : custo energético do motor elétrico (R\$ kWh⁻¹);

$H_{abs.}$: potência elétrica absorvida pelo conjunto ME-IF (kW);

η_{CB} : eficiência do carregador de baterias;

V_{EE} : valor da energia elétrica (R\$ kWh⁻¹);

H_{eixo} : potência mecânica no eixo do motor elétrico (kW)

A eficiência do carregador de baterias, que pode ser definida como a relação entre a quantidade de energia consumida e a quantidade de energia transmitida para as baterias, exerce grande influência na eficiência e no custo energético de um veículo elétrico.

O valor da energia elétrica, utilizado no cálculo do custo energético do ME-IF, foi obtido por uma tabela de tarifas de energia elétrica, no meio rural, disponibilizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2014). Foi utilizado o valor cobrado pela Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG) que foi de R\$ 0,347 por kWh.

3.3 Proposta de configuração teórica de trator elétrico

Com base no desempenho do conjunto ME-IF, foi proposta uma configuração teórica de trator agrícola movido à eletricidade e caracterizado apenas como máquina de tração.

Como este trabalho objetivou o estudo da viabilidade da conversão da potência elétrica em potência mecânica para acionamento de um trator, a forma de utilização da potência mecânica, seja via barra de tração, TDP ou sistema hidráulico, torna-se indiferente. Dessa forma, optou-se pela forma mais simples e antiga de utilização da potência mecânica de um trator que é a barra de tração.

Segundo Fedrizzi (2007), os motores elétricos em geral, normalmente, têm eficiência superior a 80% e, por isso, optou-se por propor um mecanismo de transmissão mecânica que utilizasse toda a faixa de rotação do motor elétrico.

Nos automóveis elétricos, como o modelo *Leaf* da montadora japonesa Nissan, esse tipo de transmissão já é adotado. O único dispositivo mecânico que ainda é preciso manter entre a ponta do eixo do motor elétrico e o diferencial é

uma caixa redutora de relação única, por meio da qual a potência é transferida para o diferencial e do diferencial para as rodas. A simplicidade do mecanismo de transmissão é possível em razão das características dos motores elétricos que permitem que se obtenha a variação de velocidade desejada com torques elevados ainda em velocidades baixas (Figura 12).

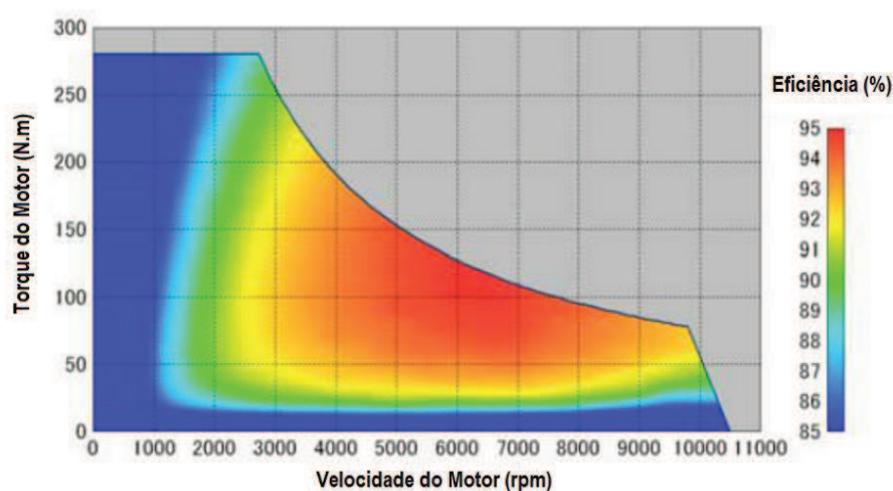


Figura 12 Variação da eficiência do conjunto motor-transmissão do veículo Nissan Leaf em função da variação da velocidade

Fonte: Nakazawa (2011).

Segundo Ribas et al. (2010), os tratores agrícolas nacionais com potência menor que 111,8kW possuem transmissão do tipo mecânica (engrenagem deslizante e sincronizada) e o modelo de trator em estudo se enquadra nessa categoria de potência e de transmissão. Assim, caso fosse feita a conversão do trator convencional para trator elétrico, grande parte da transmissão mecânica poderia ser dispensada, tornando o mecanismo mais simplificado, constituído apenas pelo motor elétrico acoplado ao diferencial (Figura 13). A caixa redutora, também, poderia ser dispensada, porque o trator já

possui redutores entre o diferencial e as rodas que são as reduções finais. Assim, bastaria que se redimensionasse a relação de transmissão da redução final, a fim de se obter o intervalo de velocidades desejado.

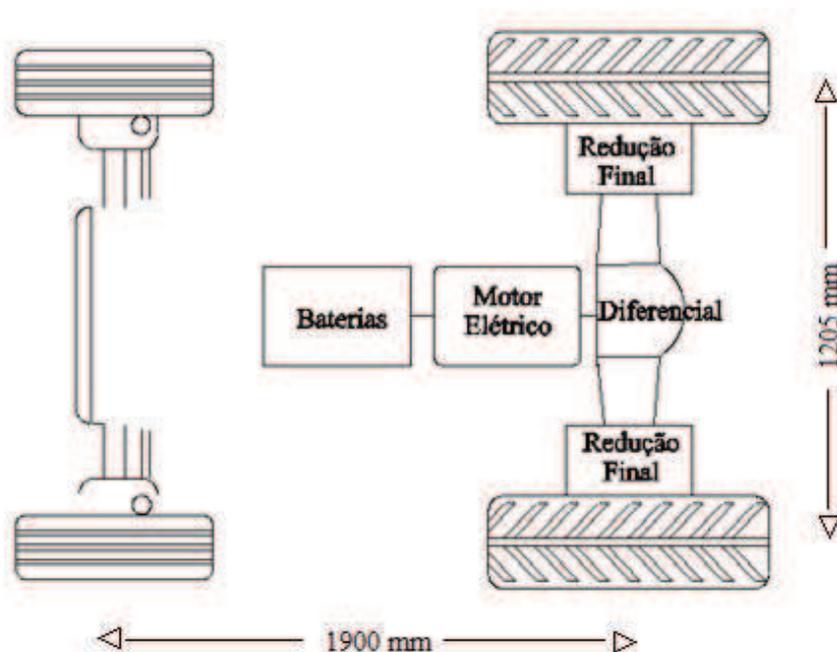


Figura 13 Diagrama da configuração teórica de trator elétrico

Até o momento, uma das maiores limitações de um veículo elétrico está na sua autonomia, por causa da baixa energia específica das baterias se comparadas aos combustíveis fósseis. Assim, quanto à configuração de trator elétrico proposta, convencionou-se que toda a massa dos componentes de um trator convencional que fossem desnecessários, no modelo de trator elétrico, fosse convertida em massa de baterias, a fim de manter a relação peso/potência do trator e estender ao máximo a sua autonomia.

A massa dos lastros do trator, também, foi convertida em massa de baterias. Assim, em operações de maior demanda de potência, a massa de baterias seria aumentada, resultando em ganho de massa, necessário em operações de maior potência e, também, em ganho de autonomia. Na Tabela 1 são descritas as alterações necessárias ao trator para se tornar um veículo elétrico. Essas alterações levaram a uma redução na massa total do veículo e essa massa foi reposta na forma de baterias.

Tabela 1 Massa dos componentes do trator convencional substituída pela massa de baterias na configuração teórica de trator elétrico

Trator convencional	Massa do componente do trator convencional (kg)	Trator elétrico	Massa do componente do trator elétrico (kg)	Massa substituída por baterias
MCI e acessórios	315 ⁽¹⁾	ME-IF	140 ⁽¹⁾	175
Caixa de câmbio	140 ⁽²⁾	Desnecessária	0	140
Lastro sólido	210 ⁽¹⁾	Baterias atuando como lastros	0	210
Lastro Líquido (água nos rodados) (75%)	130 ⁽¹⁾	Baterias atuando como lastros	0	130
Bateria automotiva	40 ⁽¹⁾	Desnecessária	0	40
Massa total de baterias (kg)				695

⁽¹⁾ Informações obtidas de manuais técnicos.

⁽²⁾ A massa da caixa de câmbio não foi fornecida pelo fabricante e não está disponível em manuais técnicos, dessa forma sua massa foi estimada pelo procedimento descrito a seguir:

3.3.1 Estimativa da massa da caixa de câmbio do trator

A massa da caixa de câmbio do trator submetido ao ensaio dinamométrico foi estimada pesando-se a caixa de câmbio de um trator de 65 CV de potência, pertencente ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Campus Machado. De posse do peso dessa caixa de câmbio, determinou-se o percentual de massa que a mesma representava em relação à massa total do trator pela equação 9.

$$\%M_C = \frac{M_C}{M_T} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

$\%M_C$: percentual da massa da caixa de câmbio em relação à massa do trator (%);

M_C : massa da caixa de Câmbio (kg);

M_T : massa do trator (kg).

De posse do percentual da massa da caixa de câmbio do trator MF 265 e conhecendo a massa do trator utilizado no ensaio estimou-se a massa da caixa de câmbio desse trator.

3.3.2 Determinação do modelo e número de baterias da configuração teórica de trator elétrico

Definida a massa total do veículo que poderia ser composta por baterias, definiu-se o modelo e a quantidade de baterias a serem utilizadas no veículo. Optou-se por uma bateria de íons de lítio que, de acordo com Winter (2009),

dentre as tecnologias disponíveis, apresenta a maior densidade energética e de potência.

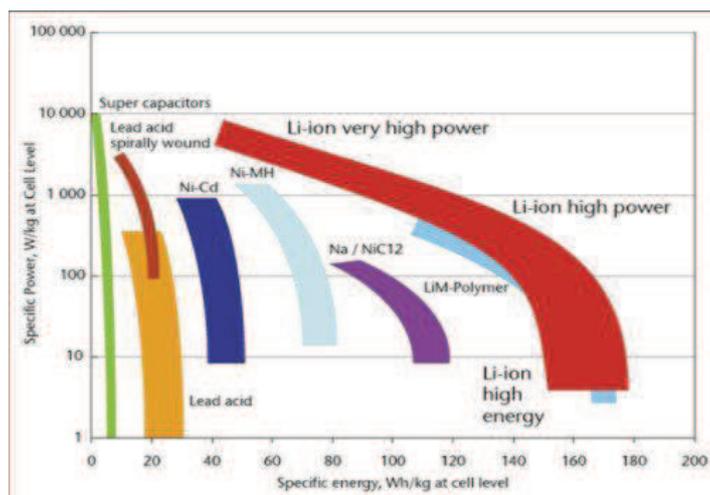


Figura 14 Faixas de Potência Específica Mássica (Wkg^{-1}) e de Energia Específica Mássica (Wh kg^{-1})

Fonte: Winter (2009)

A bateria adotada para a simulação apresenta uma tensão de 48V, corrente nominal de descarga de 30Ah e 18Kg de massa (Figura 15).



Figura 15 Bateria de lítio adotada na simulação do desempenho da configuração teórica do trator elétrico

Definido o modelo de bateria a ser adotado, foi possível descrever uma equação para definir o número de baterias (Equação 10).

$$N_B = \frac{M_{TB}}{M_B} \quad (10)$$

Sendo:

N_B : número de baterias utilizadas no trator elétrico

M_{TB} : massa total composta por baterias no trator elétrico

M_B : massa unitária da bateria

Definido o número de baterias, pode-se calcular a potência elétrica disponível no trator pela equação 11:

$$HE_T = N_B \times V_B \times C_B \quad (11)$$

Sendo:

HE_T : potência elétrica instalada no trator (W);

N_B : número de baterias;

V_B : tensão de cada bateria (V);

C_B : capacidade específica da bateria (Ah).

3.3.3 Simulação das características dimensionais e ponderais da configuração teórica de trator elétrico

Definidos os componentes utilizados na configuração teórica de trator elétrico, foi confeccionado um protótipo virtual com todos os componentes considerados, de forma a verificar algumas características ponderais do trator como a localização de seu centro de gravidade e a distribuição de massa nos eixos. Para isso, foi utilizado o software de CAD (Computer-Aided Design) (SOLIDWORKS CORPORATION, 2010).

3.3.4 Estimativa da autonomia da configuração teórica de trator elétrico

De posse do valor de potência elétrica instalada, foi possível estimar a autonomia do modelo de trator elétrico para diferentes demandas de potência mecânica. Para tanto, foi feita uma adaptação de um modelo de descarga de baterias que considera propriedades não lineares de descarga conhecido por lei de Peukert. Em virtude da exatidão desse modelo, Porciuncula et al. (2012) utilizaram-no como referência para o desenvolvimento de um programa computacional que estima o tempo de descarga de baterias. A lei de Peukert é descrita pela Equação 12:

$$L = \frac{a}{I^b} \quad (12)$$

Em que:

L : autonomia da bateria;

I : corrente de descarga da bateria;

a e b : constantes que dependem do tipo de bateria.

Porciuncula et al. (2012) determinaram as constantes a e b para uma bateria de íons de lítio do mesmo tipo proposto para a composição do modelo de trator elétrico. Dessa forma, foi possível aproveitar essas constantes, apenas corrigindo seus valores, em função do número e potência das baterias utilizadas no modelo de trator elétrico. Assim, adaptou-se a lei de Peukert para estimativa da autonomia do modelo de trator elétrico deduzindo-se a Equação 13.

$$A_{CTTE} = \frac{N_B \times \left(\frac{21787630,16}{(H_{abs} \times 270,27)^{1,0195}} \right)}{60} \quad (13)$$

Em que:

A_{CTTE} : autonomia da configuração teórica de trator elétrico (h);

H_{abs} : potência elétrica absorvida pelo conjunto ME-IF(W).

Para estimativa da autonomia da configuração teórica de trator agrícola, em diferentes demandas de potência, o conjunto ME-IF foi submetido, além do ensaio dinamométrico na máxima carga que determinou a potência máxima, a mais três ensaios com cargas parciais 25, 50 e 75% da potência máxima. Dessa forma, a autonomia da configuração teórica foi estimada com 25, 50 75 e 100% da potência máxima do ME-IF.

3.4 Construção de um modelo de trator agrícola elétrico em escala reduzida

No intuito de obter resultados práticos e de baixo custo da viabilidade de um trator elétrico agrícola, foi construído um modelo em escala reduzida de 1 : 5 tendo como referência o trator agrícola utilizado nos ensaios dinamométricos. Esse modelo, assim como a configuração teórica proposta, constituiu-se de um veículo de tração, não dispondo, portanto, de tomada de potência nem de um sistema de levante hidráulico.

O conjunto motor e transmissão constituiu-se de um motor elétrico de corrente contínua com potência de 40W e eficiência máxima de 76% de acordo com o fabricante. Esse motor foi acoplado a um redutor de velocidade e o redutor, por sua vez, foi acoplado a um diferencial que transmitia a potência às rodas traseiras do veículo (Figuras 16 e 17).

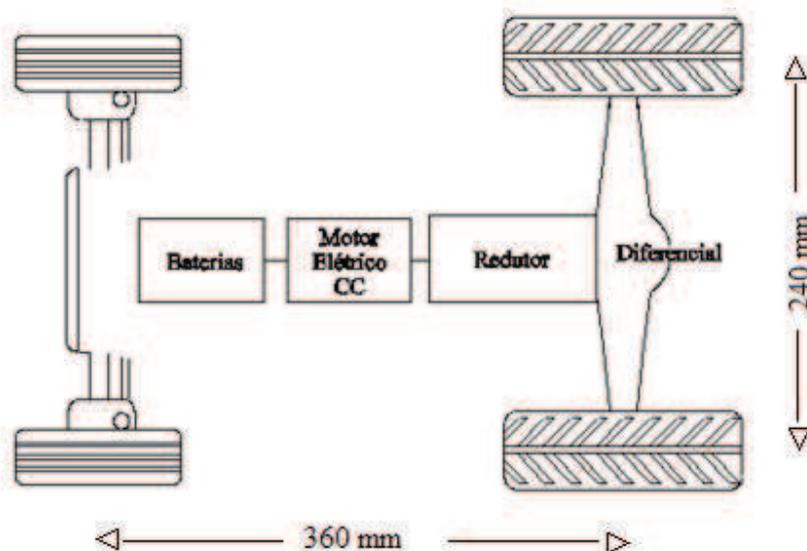


Figura 16 Diagrama do modelo reduzido de trator elétrico

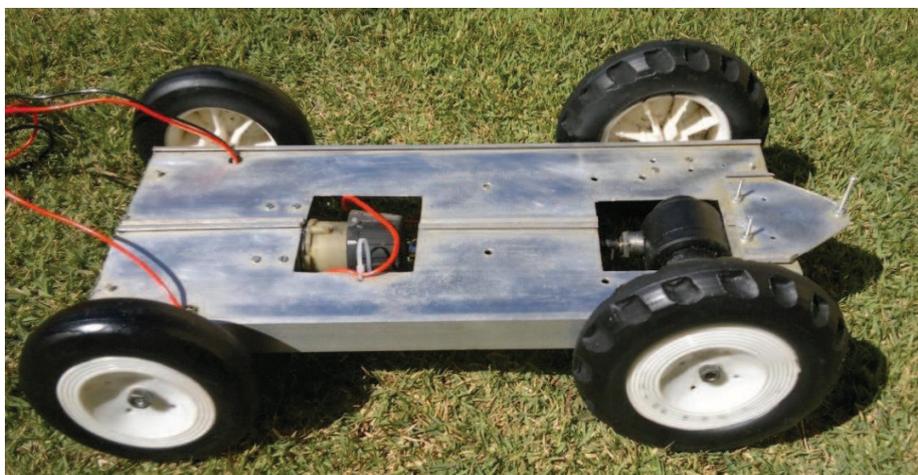


Figura 17 Modelo em escala reduzida

No modelo em escala reduzida, procurou-se manter algumas características da configuração teórica de trator elétrico proposta anteriormente, como a relação peso/potência e a relação entre a massa de baterias e a massa total do trator. A distribuição de peso no trator, também, foi uma preocupação. Como o modelo em escala reduzida se tratava de um veículo com tração 4X2, a distribuição das baterias foi feita de forma a manter uma distribuição de peso que, segundo Mialhe (1996), para tratores, 4X2 é de 70% nas rodas traseiras e 30% nas rodas dianteiras.

3.5 Desempenho em barra de tração do modelo de trator elétrico em escala reduzida

O modelo em escala reduzida foi submetido a um ensaio para determinação da potência na barra de tração. Para isso, foi construído um carro dinamométrico, também em escala reduzida, que se constitui basicamente de um chassi apoiado em quatro rodas com um engate para ser tracionado. Esse engate

foi ligado diretamente a um dinamômetro digital modelo DD-200 da marca Instrutherm, com capacidade de carga de até 196N e precisão de 0,05 N para determinação da força de tração (Figura 18). O carro dinamométrico foi dotado de um mecanismo de frenagem das rodas traseiras e de lastros móveis que podiam ser retirados ou acrescentados de forma a variar a carga de tração do veículo ensaiado.



Figura 18 Carro dinamométrico acoplado ao modelo em escala por meio do dinamômetro digital

3.5.1 Determinação da velocidade de deslocamento

A velocidade de deslocamento foi calculada pela razão entre a distância de 10 m, percorrida na pista de concreto onde se realizaram os ensaios e o tempo gasto para percorrer essa distância.

3.5.2 Determinação do índice de patinagem

Para determinação da patinagem do modelo em escala reduzida, foram instaladas 12 saliências nas rodas motrizes e essas saliências, à medida que as rodas giravam, acionavam um contador mecânico de pulsos (Figura 19), totalizando 12 pulsos em cada volta da roda motriz. Assim, registrou-se o

número de pulsos gerados para que o modelo em escala reduzida percorresse uma distância de 20 metros sem carga e o número de pulsos para percorrer a mesma distância com carga na barra de tração. Dessa forma a patinação pôde ser determinada segundo a equação 14.

$$Pt(\%) = \left[\frac{I_c - I_0}{I_0} \right] \times 100 \quad (14)$$

Onde:

$Pt(\%)$: Patinação (%);

I_c : número de pulsos na distância pré-determinada com carga;

I_0 : número de pulsos na distância pré-determinada sem carga.

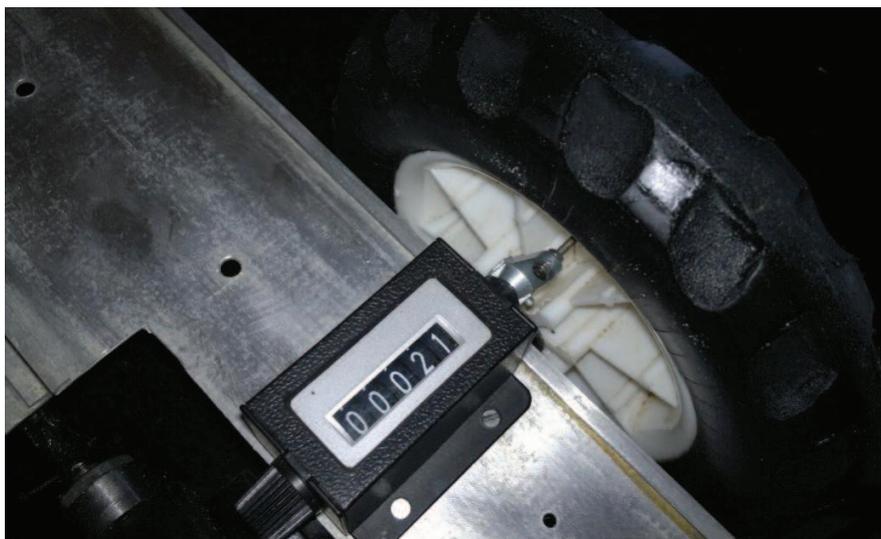


Figura 19 Detalhe do contador de impacto instalado no veículo de tração

3.5.3 Determinação da potência na barra de tração

A determinação da potência na barra de tração do modelo em escala reduzida foi medida pela equação 15.

$$H_{BT} = F \times v \quad (15)$$

Onde:

H_{BT} : potência na barra de tração (W);

F : força na barra de tração (N);

v : velocidade de deslocamento (m s^{-1}).

3.5.4 Determinação do rendimento na barra de tração

O rendimento na barra de tração (RBT) que, de acordo com Masiero, Lanças e Monteiro (2011), é a relação entre a potência na barra de tração e a potência no motor, foi determinado para o modelo em escala reduzida pela equação 16.

$$RBT(\%) = \frac{H_{BT}}{H_{motor}} \times 100 \quad (16)$$

Onde:

$RBT(\%)$: rendimento na barra de tração (%);

H_{BT} : potência na barra de tração (W);

H_{motor} : potência no motor elétrico (W).

3.5.5 Determinação da potência elétrica absorvida

Para determinação da potência elétrica absorvida pelo modelo em escala, foi confeccionado um painel de acionamento equipado com um voltímetro e um amperímetro em que monitoravam, respectivamente, a tensão e a corrente elétrica utilizadas pelo motor elétrico do modelo no momento do ensaio (Figura 20). Assim, a potência elétrica pôde ser determinada pela equação 17.

$$H_{abs} = V \times I \quad (17)$$

Onde:

H_{abs} : potência elétrica absorvida pelo motor do modelo em escala (W);

V : tensão de alimentação do motor elétrico no momento de ensaio (V);

I : Corrente elétrica medida no momento do ensaio (A).



Figura 20 Painel de controle e monitoramento da potência elétrica do modelo em escala

Foram realizados três ensaios de tração, sendo um deles com a potência máxima na barra de tração, e os outros dois com 50% e 20% da potência máxima. Cada ensaio foi submetido a quatro repetições onde se determinou a média de cada potência, bem como a média da potência elétrica absorvida por meio da corrente e tensão médias. De posse dos valores de corrente e tensão, para cada nível de potência dos três ensaios, foi determinada a autonomia do modelo em escala reduzida.

3.5.6 Determinação da autonomia do modelo em escala reduzida

A determinação da autonomia foi feita descarregando as baterias do modelo em escala reduzida por uma carga elétrica variável, onde foram ajustados os valores de corrente e tensão de cada nível de potência obtido nos ensaios de tração. Os ensaios de descarga foram interrompidos, quando as baterias atingiam a tensão de corte especificada pelo fabricante, que é a tensão limite a ser atingida na descarga sem comprometer a vida útil das baterias. Os tempos de descarga nessas condições foram definidos como os tempos de autonomia do modelo em escala para os diferentes níveis de potência.

3.5.7 Determinação do custo energético do modelo em escala reduzida

O custo energético do modelo em escala reduzida foi determinado pela relação entre o valor da energia elétrica consumida na recarga das baterias do veículo e a energia mecânica produzida pelo modelo em escala na sua barra de tração. Para isso, as baterias foram recarregadas por um carregador monitorado por um wattímetro onde foi monitorado o tempo e a potência elétrica consumida no processo de recarga das baterias, resultando na energia elétrica consumida na

recarga das baterias. Dessa forma o custo energético na barra de tração do modelo em escala reduzida pode ser determinado pela equação 18.

$$CEBT_{MTE} = \frac{(E_{RB} \times V_{EE})}{(H_{BT} \times A_{MTE})} \quad (18)$$

Em que:

$CEBT_{MTE}$: custo energético na barra de tração do modelo de trator elétrico (R\$ kWh⁻¹);

E_{RB} : energia consumida na recarga das baterias (kWh);

V_{EE} : valor da energia elétrica (R\$ kWh⁻¹);

H_{BT} : potência mecânica na barra de tração do modelo em escala (kW);

A_{MTE} : tempo de autonomia do modelo em escala (h).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados das curvas de desempenho dos dois motores

A seguir são exibidos os resultados de desempenho para o motor de combustão interna de ciclo diesel e para o conjunto Motor elétrico Inversor de frequência.

4.1.1 Torque

Na Tabela 2, estão apresentados os valores de torque do MCI diesel utilizado no trator agrícola utilizado no ensaio e do conjunto ME-IF. Os valores de rotação foram definidos em função das rotações obtidas com o conjunto ME-IF operando nas frequências de 30, 45, 60 e 75 Hz. Nessas quatro frequências de operação, o conjunto ME-IF operou, respectivamente, nas rotações de 880, 1300, 1800 e 2350 rpm. Para o MCI foi acrescentada uma quinta rotação de 2500 rpm, correspondente à máxima rotação do referido motor, pois esse motor atingiu essa magnitude de rotação e esse ponto a mais contribuiu para a melhor apresentação das curvas.

É possível observar que o conjunto ME-IF apresentou valores de torque superiores aos apresentados pelo MCI em toda a faixa de rotação em que as duas máquinas operaram.

Tabela 2 Valores de torque (N m) obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF

Rotação (rpm)	MCI (Diesel)	ME-IF	Variação (%)
880	61,6	83,9	36,20
1300	61,5	84,4	37,23
1800	59,0	83,0	40,67
2350	38,0	55,4	45,78
2500	16,5	-	

As curvas de torque para os dois motores são exibidas na figura 21. O MCI apresentou uma reserva de torque de 4,1 %, o que, segundo Liljedahl (1989) e Mialhe (1996), classifica esse motor como detentor de reserva de torque ruim. Para os mesmos autores, um trator é detentor de uma boa reserva de torque quando a mesma é superior a 15% que é a condição adequada a trabalhos agrícolas. O ME-IF apresentou uma reserva de torque de apenas 1,6%, considerada ruim de acordo com Mialhe (1996), porém com valores de torque muito superiores ao MCI. O torque do conjunto ME-IF foi 36,2 % superior ao MCI na menor diferença entre os dois e 45,7% superior na maior diferença apresentada na rotação de 2300 rpm. Nessas condições, os valores de torque apresentados pelo ME-IF viabilizam sua adoção em um trator agrícola com as características do modelo ensaiado e descartam a necessidade de reserva de torque.

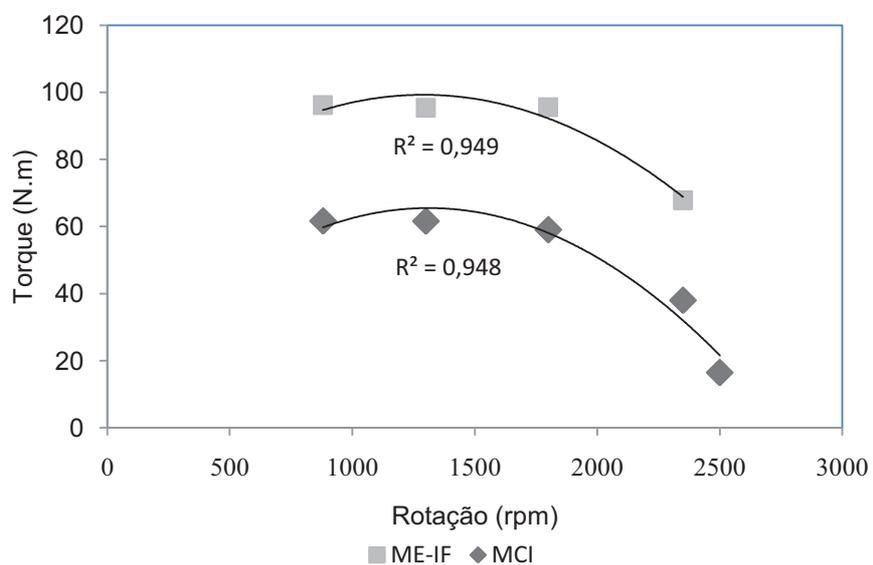


Figura 21 Curvas de torque traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF

4.1.2 Potência

Na Tabela 3, são apresentados os valores de potência obtidos nos ensaios dinamométricos do trator com MCI e do ME-IF. Os valores de potência apresentados pelo ME-IF foram maiores que os valores apresentados pelo MCI em toda a faixa de rotação em que os dois motores foram comparados. A menor diferença foi na rotação de 1300 rpm, onde a potência do conjunto ME-IF foi 1,53% maior que a potência do MCI. A maior diferença foi 15,89% na rotação de 1800 rpm.

Tabela 3 Valores de potência (kW) obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF

Rotação (rpm)	MCI (Diesel)	ME-IF	Variação (%)
880	8,34	8,81	5,63
1300	11,72	11,90	1,53
1800	13,21	15,31	15,89
2350	11,33	12,92	14,03
2500	4,99	-	-

Os valores de potência apresentados pelo ME-IF excedem o necessário para sua utilização como fonte de potência do trator utilizado. Rodrigues et al. (2006), comparando motores elétricos e motores de combustão interna como fontes de potência para um micro trator, obtiveram melhores resultados com motores elétricos, mesmo com esses apresentando uma potência 15% menor. As curvas de potência, para os dois motores, são apresentadas na Figura 22.

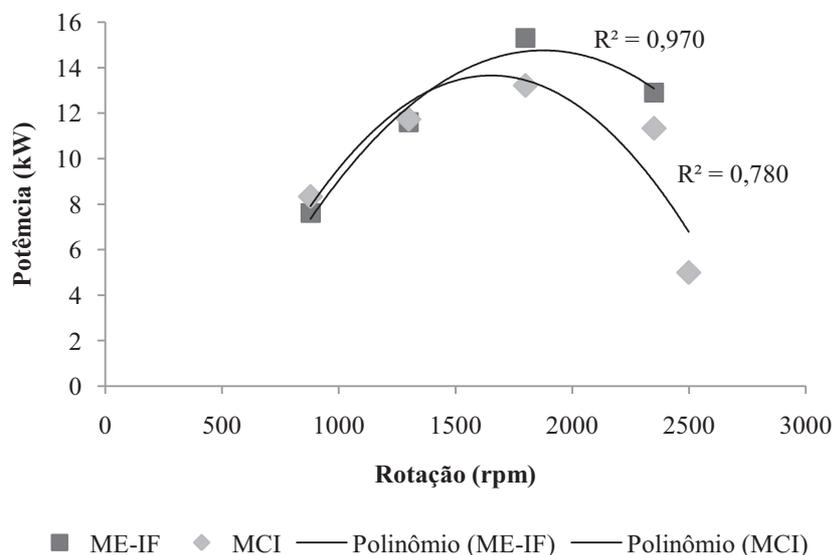


Figura 22 Curvas de potência traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF

4.1.3 Eficiência energética

Os valores de eficiência energética obtidos para os dois motores são exibidos na Tabela 4. O conjunto ME-IF apresentou valores de eficiência muito superiores aos valores apresentados pelo MCI em toda a faixa de rotação. Os valores obtidos para o conjunto ME-IF condizem com os fornecidos pelo fabricante e, também, estão de acordo com Fedrizzi (2007), segundo o qual os motores elétricos em geral, frequentemente, apresentam eficiências superiores a 80%.

Os valores de eficiência do MCI foram obtidos com o motor alimentado com o combustível B20 (mistura de 20% de biodiesel e 80% de diesel mineral). O poder calorífico inferior do combustível foi de $38,79 \text{ MJ kg}^{-1}$. A maior eficiência energética para o MCI foi de 35,83% na rotação de 1800 rpm. Os

valores de eficiência do MCI estão de acordo com os valores observados por Barbosa et al. (2008) que, ao submeter um trator de 58,2kW de potência a um ensaio dinamométrico de tomada de potência, obtiveram uma eficiência máxima de 38,36% com o motor, também, alimentado com B20 a 1497 rpm. Os valores de eficiência obtidos para o MCI são maiores que os descritos pelo United States Department of Energy - USDE (2011), segundo o qual, considerando as perdas dos acessórios, a eficiência energética de motores diesel é de apenas 18,4%. As curvas de eficiência energética são exibidas na Figura 23.

Tabela 4 Valores de eficiência energética (%) obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF

Rotação (rpm)	MCI (Diesel)	ME-IF	Variação (%)
880	31,87	82,0	157,29
1300	34,26	85,0	148,10
1800	35,83	86,9	142,53
2350	27,16	85,8	215,90
2500	21,27	-	-

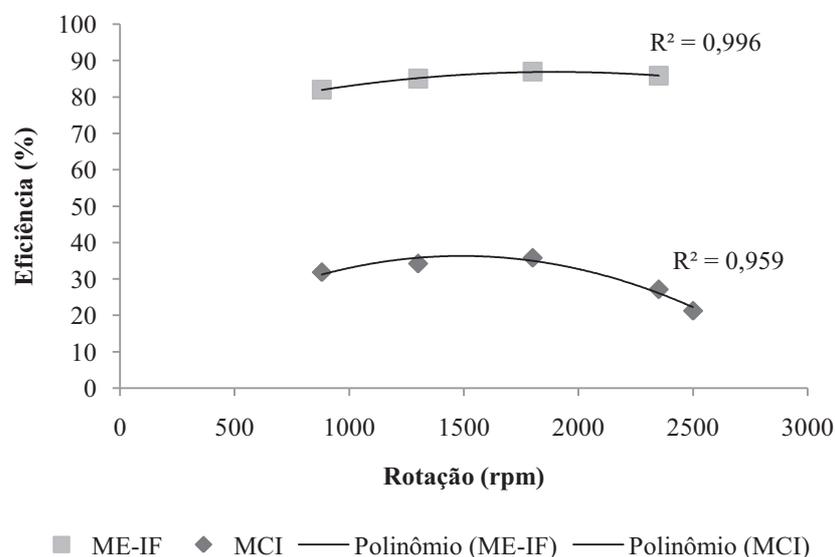


Figura 23 Curvas de eficiência energética traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinâmicos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF

4.1.4 Custo Energético Operacional

Os custos energéticos operacionais dos dois motores analisados foram calculados para toda a faixa de rotação utilizada nos ensaios e são apresentados na tabela 5. O Valor do óleo diesel considerado foi de R\$ 2,54 obtidos pela média do preço de 24 postos de combustível no sul de Minas Gerais. O valor do kWh da energia elétrica considerado foi de R\$ 0,347 fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (BRASIL, 2014).

O ME-IF teve os menores resultados de custo, em toda a faixa de rotação analisada, o que reforça a viabilidade da adoção de motores elétricos como fonte de potência em tratores agrícolas. Além disso, os custos energéticos do ME-IF apresentaram uma tendência de diminuição à medida que se aumentou a rotação, diferentemente do MCI que apresentou um aumento de custo

significativo à medida que a rotação aumentou. Os resultados para os dois motores podem ser explicados observando suas eficiências energéticas. Enquanto a eficiência do ME-IF se manteve praticamente constante, a eficiência do MCI se alterou bastante com a variação da rotação, gerando o mesmo comportamento no custo. Esse comportamento comum de um MCI torna compulsória a utilização de um grande número de marchas nos tratores, para que os mesmos possam oferecer variação de força e velocidade necessárias às diferentes operações agrícolas mantendo o MCI na faixa de rotação de melhor eficiência energética. De acordo com Mialhe (1996), essa rotação é denominada faixa de utilização do motor e está situada entre a rotação de torque máximo e a rotação de potência máxima.

Tabela 5 Valores de custo energético (R\$ kW⁻¹) obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF

Rotação (rpm)	MCI (Diesel)	ME-IF	Varição (%)
880	0,66	0,53	-19,69
1300	0,62	0,51	-17,74
1800	0,68	0,50	-26,47
2350	0,93	0,40	-56,98
2500	1,13	-	-

Os baixos valores no custo energético do ME-IF possibilitam a sua utilização em toda a faixa de rotação, permitindo um mecanismo de transmissão mais simples, de menor massa e menor custo, assim como o mecanismo descrito por Nakazawa (2011), utilizando no veículo elétrico da Marca Nissan, modelo Leaf. As curvas do custo energético dos dois motores podem ser visualizadas na Figura 24.

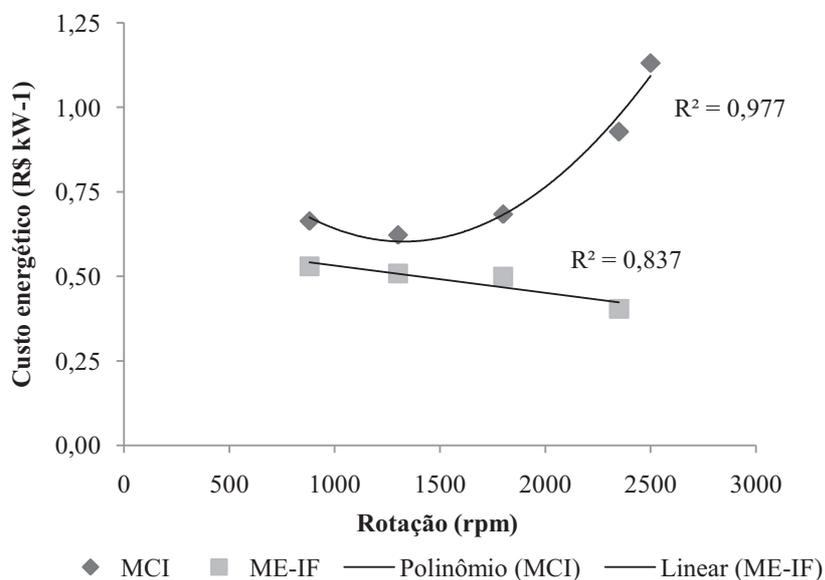


Figura 24 Curvas de custo energético traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do trator equipado com MCI e do conjunto ME-IF

4.2 Resultados para a configuração teórica de trator elétrico

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para a simulação da configuração teórica de trator elétrico.

4.2.1 Número de Baterias e Potência Elétrica Instalada no Trator

Baseado nas características do trator submetido ao ensaio dinamométrico e nos dados de desempenho do MCI e do ME-IF, foi proposta uma configuração teórica de trator elétrico, onde as massas dos componentes desnecessários no trator elétrico e a massa de lastros seriam substituídos por baterias. O número de baterias que poderia ser instalado na configuração de trator elétrico e a potência elétrica total instalada são exibidos na Tabela 6.

Descontando-se a massa de todos os elementos desnecessários na configuração teórica de trator elétrico, a massa disponível para colocação de baterias foi de 695 quilogramas. Esse valor permitiria a instalação de 38 baterias totalizando uma potência elétrica instalada de 54,72 kW.

Tabela 6 Número de baterias e potência elétrica total possível de ser instalada na configuração teórica de trator elétrico

Tipo de Bateria	Potência por bateria (kW)	Massa da bateria (kg)	Massa disponível para baterias (kg)	Número de Baterias	Potência elétrica instalada (kW)
Íons de lítio	1,44	18	695	38	54,72

4.2.2 Características ponderais da configuração teórica de trator elétrico

Na Tabela 7 são exibidos os resultados da relação peso/potência da configuração teórica de trator elétrico em comparação ao trator convencional. A relação peso/potência da configuração teórica de trator elétrico foi de 86,6 kgf kW⁻¹, sendo 0,8% menor do que a relação peso/potência do trator convencional utilizado neste trabalho. Valores de relação peso/potência dessa magnitude foram encontrados em tratores com potência inferior a 40 kW por Schlosser et al.(2005) quando compararam a relação peso/potência de 106 tratores nacionais.

A distribuição de peso nos eixos da configuração teórica ficou em 68% no eixo traseiro e 32% no eixo dianteiro. Essa distribuição é considerada adequada para tratores 4X2, de acordo com Mialhe (1996) e foi obtida por meio da adequação na distribuição das baterias na estrutura do trator conforme a Figura 25.

Tabela 7 Comparativo de características ponderais do trator elétrico teórico com o trator convencional

Característica	Configuração teórica de trator elétrico	Trator convencional
Relação peso/ potência kgf kg f kW ⁻¹ (kgf CV ⁻¹)	86,6 (63,6)	87,3 (64,1)
Peso no eixo traseiro (%)	68	66
Peso no eixo dianteiro (%)	32	34

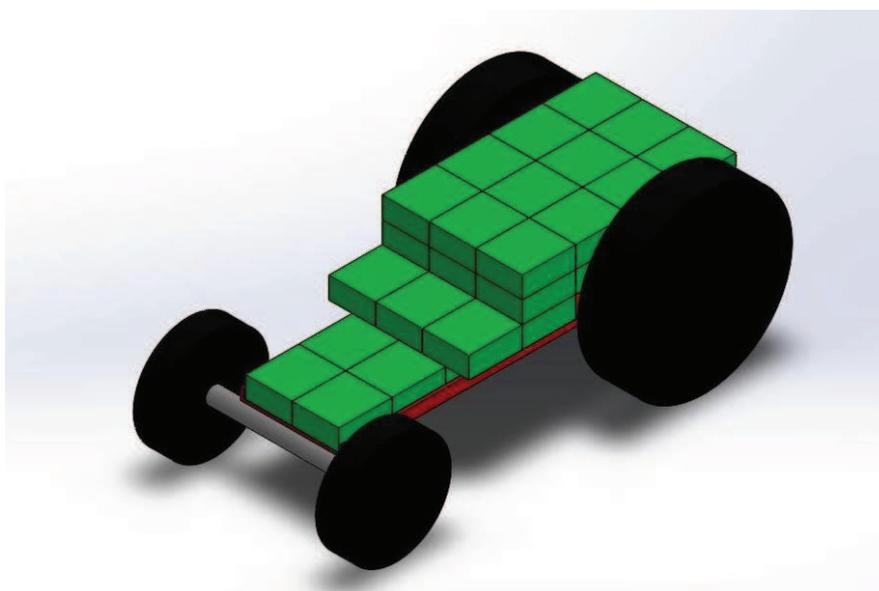


Figura 25 Distribuição de peso nos eixos da configuração teórica de trator elétrico

4.2.3 Autonomia da configuração teórica de trator elétrico

Os valores obtidos com 25, 50, 75 e 100% de potência do ME-IF, necessários para a estimativa da autonomia da configuração teórica de trator elétrico, em diferentes demandas de potência, são exibidos na Tabela 8. Nessa

tabela, também, constam os valores de potência elétrica absorvida e eficiência energética.

Mesmo na condição mais desfavorável com o motor subutilizado apresentando apenas 25% de sua potência, a eficiência energética mínima foi de 68,83%, valor 100% maior que a melhor eficiência energética apresentada pelo MCI nos ensaios vistos anteriormente na tabela 4.

Tabela 8 Valores de potência mecânica, potência elétrica absorvida e eficiência energética obtidos nos ensaios dinamométricos com 4 diferentes níveis de potência do conjunto ME-IF

Potência Mecânica (kW)				
Rotação (rpm)	25%	50%	75%	100%
880	2,23	3,33	5,53	7,61
1300	3,31	5,04	8,26	11,6
1800	4,47	6,66	11,0	15,3
2300	4,74	7,41	10,2	12,9
Potência Elétrica absorvida (kW)				
Rotação (rpm)	25%	50%	75%	100%
880	3,24	4,40	6,88	9,29
1300	4,63	6,42	9,91	13,60
1800	5,99	8,29	12,90	17,60
2300	6,18	9,00	12,00	18,00
Eficiência Energética (%)				
Rotação (rpm)	25%	50%	75%	100%
880	68,83	75,68	80,38	81,91
1300	71,49	78,50	83,35	85,29
1800	74,62	80,34	85,27	86,93
2300	76,70	82,33	85,00	71,67

As curvas de potência para os diferentes percentuais de potência são apresentadas na Figura 26. O conjunto ME-IF operou em quatro frequências diferentes de 30, 45, 60 e 75 Hz e ficou condicionado que os valores de potência desejados para as quatro curvas fossem obtidos na frequência nominal de

operação do conjunto de 60Hz correspondente à rotação de 1800 rpm. Nessa faixa de rotação, é possível observar que, na curva de 25% da potência, o valor real foi de 29,2% da potência máxima. Na faixa de 50%, o valor real ficou em 43,5% da potência máxima e na faixa de 75% o valor real observado foi de 71,89% da potência máxima.

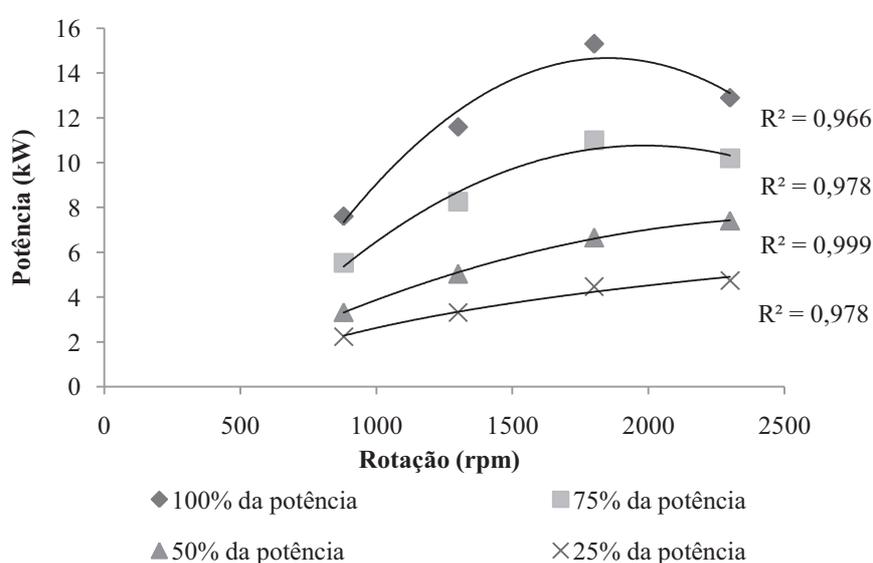


Figura 26 Curvas de potência traçadas com base em resultados obtidos nos ensaios dinamométricos do conjunto ME-IF

Os tempos de autonomia da configuração teórica de trator elétrico, calculados pela lei de Peukert adaptada de Porciuncula et al. (2012), para as diferentes demandas de potência, são exibidos na Tabela 9. Os tempos de autonomia para a faixa de potência de 25% foram superiores a uma jornada de trabalho convencional de 8 horas diárias trabalhando com rotações de até 1300 rpm. Naturalmente, à medida que se aumentou a potência, os tempos de autonomia foram reduzidos. A 100% de potência, o melhor tempo de autonomia

foi na rotação de 880 rpm com 4,12h e o pior tempo foi de 2,1 h na rotação de 2300 rpm.

Apesar dos baixos valores de autonomia apresentados para as maiores faixas de potência, esses resultados foram obtidos considerando que o motor fosse submetido constantemente a elevadas faixas de potência, o que na prática das operações agrícolas não acontece. É preciso considerar os tempos de manobra onde a potência demandada do motor é mínima, necessária apenas ao deslocamento do conjunto trator-máquina ou trator-implemento. A capacidade de uma bateria é influenciada pela velocidade de descarga. Quanto maior a velocidade de descarga menor a capacidade da bateria e quanto menor a velocidade de descarga, maior a sua capacidade. As curvas de autonomia estão descritas na figura 27.

Tabela 9 Tempos de autonomia (h) estimados pela lei de Peukert para quatro diferentes níveis de potência do conjunto ME-IF

Rotação (rpm)	Porcentagem da potência máxima			
	25%	50%	75%	100%
880	12,07	8,83	5,60	4,12
1300	8,39	6,01	3,86	2,79
1800	6,45	4,64	2,95	2,15
2300	6,24	4,26	3,17	2,10

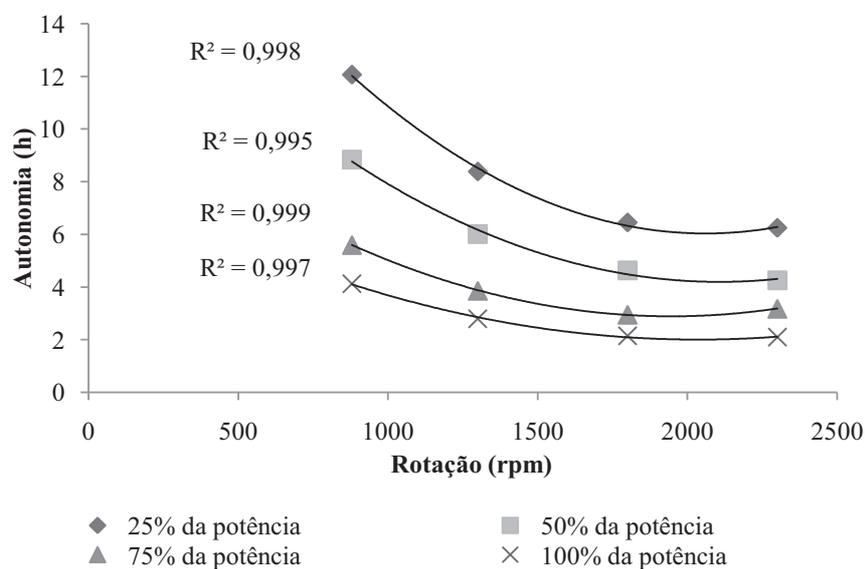


Figura 27 Curvas de autonomia traçadas com base em modelo de descarga de baterias baseado na Lei de Peukert

Além dos tempos de manobra que levam a uma redução na velocidade de descarga, é preciso considerar as diferentes demandas de potência a que um trator é submetido, em função das diferentes operações agrícolas e, também, às variações de potência que ocorrem durante uma mesma operação. Mialhe (1996) relatou que tratores em condições de campo não são solicitados com mais de 85 a 90% de sua potência máxima. De acordo com Kamphorst (2003), um estudo do Departamento de Engenharia Agrícola e Biosistemas da Universidade de Illinois, concluiu-se que o trator funciona em média a 55% de sua potência máxima durante o ano. Para Silveira e Sierra (2010), tratores com potência inferior a 30 CV trabalham apenas 29,43% do tempo em operações de tração com velocidades inferiores a 8 km h^{-1} , que demandam alta potência. Portanto, em 70,57% do tempo, os tratores com potência de até 30 CV, trabalham em operações de média e baixa demanda de potência e nessas condições os tempos

de autonomia seriam suficientes para uma jornada de trabalho convencional de oito horas diárias. Gamero e Benez (2009), avaliando o desempenho de um subsolador para diferentes velocidades e profundidades, encontraram variações de até 103,7% entre as potências máxima e média na barra de tração, evidenciando que, mesmo em operações de alta demanda de potência como a subsolagem, a potência média demandada é inferior à potência máxima do motor.

4.3 Resultados do modelo em escala reduzida

A seguir são exibidos os resultados de características ponderais e de ensaios dinamométricos de barra de tração feitos com o modelo em escala reduzida.

4.3.1 Relação peso/potência do modelo em escala reduzida

Na Tabela 10 são apresentados os resultados que comparam características da configuração teórica com o modelo em escala reduzida. A relação peso/potência do modelo em escala reduzida foi de $82,7 \text{ kgf kW}^{-1}$, sendo 8,6% menor do que a relação peso/potência da configuração teórica proposta. Schlosser et al.(2005), comparando a relação peso/potência de 106 tratores, encontraram relações peso/potência de até 90 kgf kW^{-1} para tratores com potência menor que 40kW.

Tabela 10 Comparativo de características da configuração teórica de trator elétrico com o modelo de trator elétrico em escala reduzida

Característica	Configuração teórica de trator elétrico	Modelo reduzido de trator elétrico
Relação peso/ potência kgf kW ⁻¹ (kgf CV ⁻¹)	86,6 (63,6)	82,7 (64,8)
Relação peso das baterias/ peso total do trator (%)	51,2	51,5
Peso no eixo traseiro (%)	68	67
Peso no eixo dianteiro (%)	32	33
Tipo de bateria	Íons de lítio	Íons de lítio

4.3.2 Ensaios em barra de tração no modelo em escala reduzida

Os valores de força na barra de tração, velocidade, potência na barra de tração (H_{BT}), rendimento na barra de tração (R_{BT}) e patinagem, para o modelo em escala reduzida, em diferentes cargas dinamométricas são descritos na Tabela 11.

O rendimento na barra de tração do modelo em escala reduzida apresentou o seu pior resultado no nível 1 de carga dinamométrica. O melhor resultado foi obtido no nível 2 de carga. No entanto, para todos os níveis de carga, o rendimento na barra de tração foi inferior aos descritos por Bowers (1970 citado por GABRIEL FILHO et al., 2010). Masiero, Lanças e Monteiro (2011), ao determinar o rendimento na barra de tração de diversos tratores agrícolas, também, observaram valores inferiores à bibliografia pertinente. Os valores de patinagem para todos os níveis de carga se mantiveram inferiores a 30%, que segundo Masiero, Lanças e Monteiro (2011) é considerado excessivo e descaracteriza uma condição ideal de operação.

Tabela 11 Valores médios obtidos nos ensaios em barra de tração para o modelo em escala reduzida

Nível de carga	Força na barra de tração (N)	Velocidade (m s^{-1})	Patinagem (%)	Potência na barra de tração (W)	Rendimento na barra de tração (%)
1	5,94	0,50	7,1	2,98	35,62
2	16,38	0,54	17,46	8,84	52,01
3	18,61	0,94	17,46	17,50	48,05

Na Figura 28 é exibido o gráfico da variação da potência na barra de tração em função da força de tração. Nota-se que a potência teve um aumento exponencial à medida que a força na barra de tração aumentou. Esse comportamento é corroborado por Barger et al. (1963), Fenyvesi e Szente (2011) e Zoz e Grisso (2003).

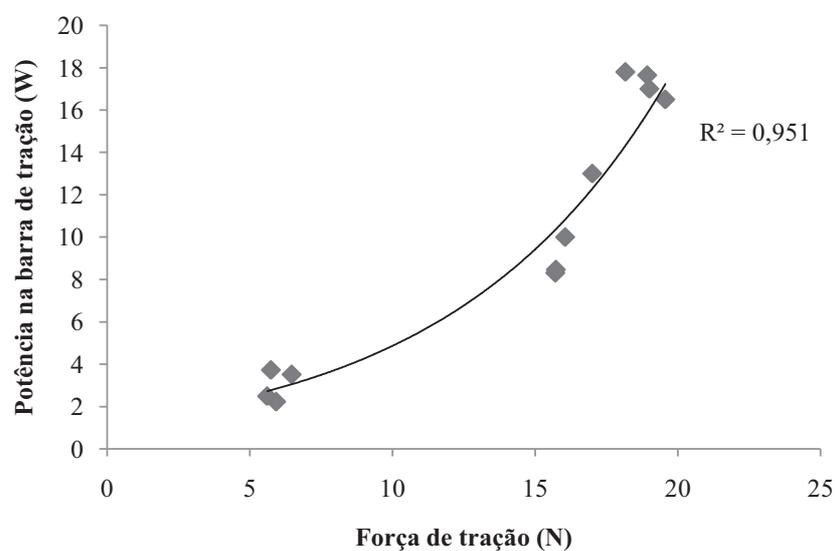


Figura 28 Potência na barra de tração em função da variação na força de tração

A variação da potência na barra de tração em função da patinagem é exibida na Figura 29. É possível observar que a potência na barra de tração aumentou à medida que se aumentou o índice de patinagem. Esse comportamento foi, amplamente, estudado por Barger et al. (1963) no tocante à teoria da tração. Zoze Grisso (2003), também, observaram esse mesmo comportamento. Esses resultados demonstraram que, mesmo com dimensões reduzidas e limitações quanto ao tipo de rodado, o modelo em escala reduzida apresentou o comportamento compatível ao de um trator agrícola convencional.

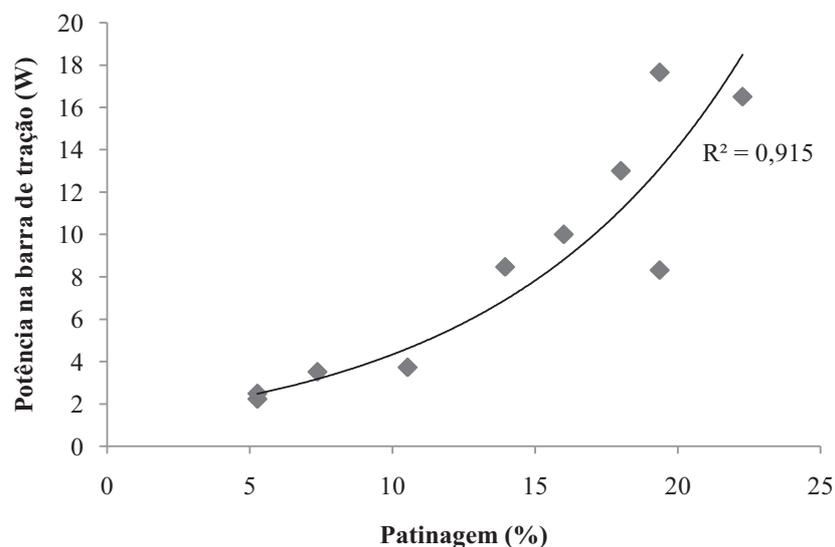


Figura 29 Potência na barra de tração em função da patinagem

4.3.3 Autonomia do modelo em escala reduzida

Os valores de potência na barra de tração, potência elétrica e autonomia do modelo em escala reduzida estão demonstrados na Tabela 12. Assim como observado na configuração teórica de trator elétrico, a autonomia do modelo em

escala reduzida apresentou uma tendência de redução à medida que a potência aumentava. Utilizando 66,31% da máxima potência apresentada na barra de tração, a autonomia foi de 8,33 horas, superando uma jornada de trabalho convencional de 8 horas diárias. O menor valor de autonomia apresentado pelo modelo em escala reduzida foi de 4,5 horas na máxima potência fornecida na barra de tração.

Tabela 12 Valores de potência na barra de tração, potência elétrica e autonomia do modelo de trator elétrico em escala reduzida

Potência na Barra de Tração (W)	Porcentagem da máxima potência na Barra de tração (%)	Potência Elétrica absorvida (W)	Porcentagem da máxima potência elétrica (%)	Autonomia (horas)
2,23	11,86	8,04	15,91	28,27
2,49	13,25	9,68	19,14	23,49
3,51	18,71	12,31	24,36	18,46
3,72	19,84	14,08	27,85	16,15
8,31	44,29	20,66	40,88	10,12
8,46	45,11	22,46	44,43	10,04
10,84	57,77	23,54	46,58	10,18
12,44	66,33	29,87	59,09	8,33
16,50	87,97	48,87	96,69	5,06
17,10	91,17	50,55	100,00	4,73
17,65	94,09	48,00	94,95	4,65
18,76	100	44,95	88,92	4,50

A curva de autonomia para o modelo em escala reduzida em função da porcentagem da potência máxima utilizada na barra de tração está apresentada na Figura 30.

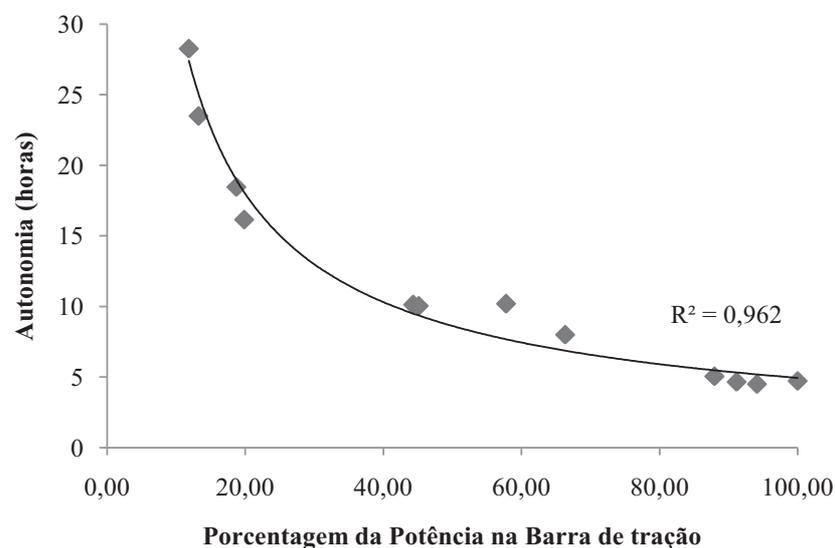


Figura 30 Variação da autonomia do modelo de trator elétrico em escala reduzida em função da porcentagem da potência na barra de tração

4.3.4 Custo energético para potência na barra de tração do modelo em escala reduzida

Os custos energéticos para diferentes demandas de potência na barra de tração do modelo em escala reduzida são especificados na Tabela 13. O menor custo foi de R\$ 0,55 kWh⁻¹, observado com a potência na barra de tração de 10,84W, o que representa 57,77 % da máxima potência observada. Além do melhor resultado de custo, esse percentual se enquadra no intervalo de potências que atendem a uma autonomia de pelo menos oito horas diárias conforme observado na Tabela 12. Os maiores custos foram observados nas menores potências sendo o maior deles de R\$ 1,04 kWh⁻¹, para uma potência na barra de tração de 2,49 W, equivalente a 13,25% da máxima potência observada. Considerando o melhor consumo específico de combustível, obtido por Gabriel Filho et al. (2010), submetendo um trator agrícola a diferentes condições de

tração, o custo energético para esse trator ficaria em R\$ 1,04, sendo, portanto, igual ao custo energético do modelo em escala no seu pior desempenho e 89% maior no melhor desempenho do modelo em escala. Esse mesmo comportamento pode ser observado, considerando os valores de eficiência energética de 41 tratores nacionais, obtidos por Silveira e Sierra (2010) o que corrobora para os excelentes resultados de custo energético do modelo em escala reduzida.

Tabela 13 Custo energético da potência na barra de tração do modelo em escala reduzida para diferentes demandas de potência

Potência na Barra de tração (W)	Porcentagem da potência máxima na barra de tração (%)	Custo energético operacional (R\$ kWh ⁻¹)
2,22	11,86	0,97
2,49	13,25	1,04
3,51	18,71	0,94
3,72	19,84	1,01
8,31	44,29	0,73
8,46	45,11	0,71
10,84	57,77	0,55
12,44	66,33	0,58
16,50	87,97	0,73
17,10	91,17	0,77
17,65	94,09	0,77
18,75	100	0,69

A curva do custo energético da potência na barra de tração para o modelo em escala reduzida é apresentada na Figura 31. Nela é possível observar uma tendência de redução do custo quando a potência fica entre 60 e 70% da potência máxima.

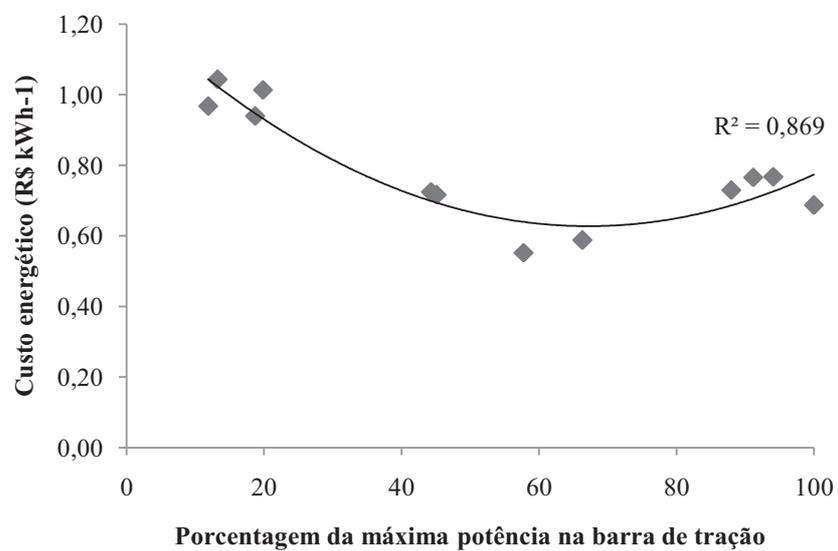


Figura 31 Variação do custo energético em função da variação da potência na barra de tração

5 CONCLUSÕES

O conjunto motor elétrico/inversor de frequência apresentou os melhores resultados de custo, eficiência energética, torque e potência quando comparado ao motor de combustão interna do trator convencional.

A configuração teórica de trator elétrico apresentou valores da autonomia, que garantem sua viabilidade operacional, para médias demandas de potência com menores níveis de rotação do motor. Para alta demanda de potência o tempo de autonomia foi inferior ao considerado viável.

O modelo de trator elétrico, em escala reduzida, apresentou desempenho na barra de tração compatível com o desempenho de tratores agrícolas convencionais. O referido modelo, também, apresentou o melhor custo energético se comparado ao custo energético de tratores convencionais.

Em relação à autonomia, o modelo em escala reduzida apresentou valores considerados viáveis para baixas e médias demandas de potência. Para altas demandas de potência, os valores de autonomia ficaram inferiores a uma jornada de trabalho diária convencional.

Os resultados obtidos indicam grande potencial do uso futuro da eletricidade no acionamento de tratores agrícolas, antevendo a necessidade da intensificação das pesquisas neste campo, com a avaliação de novas tecnologias de acumuladores de energia elétrica e de tratores elétricos em escala real.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, J. C.; BUSNARDO, R. G.; BUSNARDO, N. G. Baterias de lítio: novo desafio para a reciclagem. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v.3, n. 5, p. 3, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1585**: veículos rodoviários: código de ensaio de motores: potência líquida efetiva. Rio de Janeiro, 1996. 26 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9514**: pilhas elétricas: especificação. Rio de Janeiro, 1986. 17 p.
- BANSAL, R. C. Electric vehicles. In: _____. **Handbooks of automotive power electronics and motor drives**. Pilani: L. Taylor & Francis Group, 2005. p. 1-43.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 13., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2010. 1 CD-ROM.
- BARBOSA, R. L. et al. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set./out. 2008.
- BARGER, E. L. et al. **Tratores e seus motores**. São Paulo: E. Blucher, 1963. 398 p.
- BARICELO, L. G.; BACHA, C. J. C. Oferta e demanda de máquinas agrícolas no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 67-83, 2013.
- BOTTURA, C. P.; BARRETO, G. **Veículos elétricos**. Campinas: UNICAMP, 1989.40 p.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifas: consumidores finais**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=91&idPerfil=5>>. Acesso em: 12 jan. 2014.

BRENNIMAN, G. R. Automotive and household batteries. In: _____. **Handbook of solid waste management**. New York: McGraw-Hill, 1994. p. 149-162.

BRODELL, A. P.; KENDALL, A. R. **Fuel and motor oil consumption and annual use of farm tractors**. Washington: GPO, 1950.34 p. (U.S. Bureau of Agricultural Economics, Farm Management, 72).

CARUSO, J. M. **Controle de velocidade de um MIT tracionando um veículo elétrico**. 2007. 62 p. Dissertação (Mestrado em Automação Industrial e Robótica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007.

CARVALHO, E. G. Inovação tecnológica na indústria automobilística: características e evolução recente. **Economia e Sociedade**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 429-461, dez. 2008.

CASTILHOS, C. C. et al. A indústria de máquinas e implementos agrícolas no RS: notas sobre a configuração recente. **Ensaios FEE**, Porto Alegre, v. 29, n. 2, p. 467-502, 2008.

CHRISTIANSON, L. L. et al. **Electric tractor**. US Patent n. US4662472, 5 May 1987.

COSTA, R. C.; PRATES, C. P. O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 21, mar. 2005. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2102.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2013.

COSTA, W. **Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica**: aplicação de motor síncrono de ímã permanente com fluxo magnético radial a um furgão. 2009. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 70070**: diesel engines: NOx-reduction agent AUS 32: quality requirements and test methods. Berlin, 2005. 11 p.

DOWNING JUNIOR, J. H. **All-electric a.c. tractor**. US Patent n. US4113045 A, 12 Sept. 1978. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US4347907>>. Acesso em: 12 jun. 2013.

EDMOND, B. W. **Multifunction electric tractor**. US Patent n. EP1645456 A2, 23 Mar. 2006. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/EP1645456A2?cl=en>>. Acesso em: 12 jun. 2013.

EMADI, A. **Energy-efficient electric motors**. 3rd ed. New York: M. Dekker, 2005. 424 p.

FEDRIZZI, M. C. **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos**. Disponível em: <http://www.energia.usp.br/lstf/dissertacoes/Dissetacao_Fedrizzi.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2007.

FENYVESI, L.; SZENTE, M. A dynamometer vehicle for testing off-road vehicles, tractors. **Járművek és Mobilgépek**, Budapest, v. 3, n. 1, p.43-48, 2011.

FISHBEIN, B. **Industry program to collect Nickel-Cadmium (Ni-Cd) batteries**. Disponível em: <<http://ww.informinc.org/battery.html>>. Acesso em: 12 ago. 2013.

FLUCK, R. Net energy sequestered in agricultural labor. **Transactions of the ASAE**, Amsterdam, v. 24, n. 6, p. 1449-1455, 1981.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Energy consumption and input output relation in field operations**. Rome, 1990. 118 p.

FURLANETO, F. P. B. et al. Custo energético da produção do maracujá amarelo na região de Marília, SP. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 28, n.1, p. 57-64, jan./mar. 2013.

GABRIEL FILHO, A. et al. Desempenho do trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.3, p.333-339, 2010.

GAMERO, A. C.; BENEZ, S. H. Resultados operacionais de um subsolador com curvatura lateral (“Paraplow”) em função da velocidade e profundidade de trabalho. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 24, n. 1, p. 1-16, 2009.

GAMERO, C. A.; BENEZ, S. H.; FURLANI JÚNIOR, J. A. Análise do consumo de combustível e da capacidade de campo de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 15., 1986, São Paulo. **Anais...** Botucatu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1986. p. 1-9.

GINGERICH, N. R. **Electric powered small tractor**. US Patentn. US5743347 A, 28 Apr. 1998. Disponível em:
<<http://www.google.com/patents/US5743347>>. Acesso em: 12 jun. 2013.

GOLDEMBERG, C.; LEBENSZTAJN, L.; PELLINI, E. L. **A evolução do carro elétrico**. Disponível em:
<<http://www.lps.usp.br/lps/arquivos/conteudo/grad/dwnld/CarroEletrico2005.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2012.

GOLDEMBERG, J. Pesquisa e desenvolvimento na área de energia. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v. 14, n.3, p. 91-97, 2002.

GOLDENSTEIN, M.; AZEVEDO, R. L. S. de. Combustíveis alternativos e inovações no setor automotivo: será o fim da era do petróleo? **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 23, p. 235-266, mar. 2006.

GRISSE, R. D.; KOCHER, M. F.; VAUGHAN, D. H. Predicting tractor fuel consumption. **Applied Engineering in Agriculture**, Saint Joseph, v.20, n.5, p.553-561, 2004.

HOYER, K. G. The history of alternative fuels in transportation: the case of electric and hybrid cars. **Utilities Policy**, New York, v. 16, n. 2008, p.63-71, 2007.

IBAÑEZ, M.; ROJAS, E. **Costos de operación y producción por concepto de maquinaria agrícola**. Concepción: Universidad Concepción, 1994. 58 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário de 2006**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 8 dez. 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Medium-term oil gas markets**. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MTOGM2011_Unsecured.pdf>. Acesso em: 20 maio 2014.

IVANOV-SMOLENSKY, A. **Electrical machines**. Moscow: MIR, 1982.v. 2, 466 p.

JANSSEN, S.; SCHETTLER, T. **Health implications of snowmobile use in Yellowstone National Park**. Disponível em: <http://www.womenandenvironment.org/Health_Imp_snow.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2013.

KAMPHORST, J. S. Quanto gasta seu trator. **Revista Cultivar Máquinas**, Pelotas, n. 24, p. 8-11, out. 2003.

KOSTENKO, M.; PIOTROVSKY, L. **Electrical machines**.3rd ed. Moscow: MIR, 1977. v. 2, 522 p.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric vehicle technology explained**. Oxford: Wiley, 2003.314 p.

LILJEDAHL, J. B. et al. **Tractors and their Power Units**.4th ed. 1989. Amsterdam: AVI, 1989. 463 p.

MADDISON, A. **Phases of capitalist economic development**. Oxford: Oxford University, 1982. 274 p.

MARQUEZ, L. **Solo tractor'90**. Madrid: Laboreo, 1990. 231 p.

MARTINS, R.; PIERRE, F. C. Avaliação da Implantação da Euro V em uma empresa encarregadora de ônibus. **Tekhne e Logos**, Botucatu, v.4, n.1, p. 3-11, abr. 2013.

MASIERO, F. C. et al. Desempenho de um trator agrícola para diferentes forças na barra de tração e relações entre o peso e a potência do motor. In: CONGRESSO ARGENTINO DE INGIENIERÍA RURAL, 10., 2009, Rosario. **Anais...** Santa Fé: CAIR, 2009.1 CD-ROM.

MASIERO, F. C.; LANÇAS, K. P.; MONTEIRO, L. A. Determinação do rendimento na barra de tração de tratores agrícolas com tração dianteira auxiliar (4X2 TDA). **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 26, n. 4, p. 55-73, 2011.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificações**. Piracicaba: CNPq-PADCT/TIB-FEALQ, 1996. 722p.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPU, 1980. v. 1, 289 p.

MOUSAZADEH, H. et al. Life-cycle assessment of a Solar Assist Plug-in Hybrid electric Tractor (SAPHT) in comparison with a conventional tractor. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 52, n. 2011, p. 1700-1710, 2010.

NAKAZAWA, S. The Nissan LEAF electric powertrain. In: INTERNATIONALES WIENER MOTOREN SYMPOSIUM, 32., 2011, Vienna. **Proceedings...** Vienna: VDI-Verlag, 2011. p. 330-341.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Review of research program of the Freedom CAR and fuel partnership**: first report. Washington, 2005. 146 p.

NAZRI, G. A.; PISTOIA, G. **Lithium batteries science and technology**. New York: Springer, 2009. 708 p.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Earth system research laboratory**. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/outreach>>. Acesso em: 13 out. 2013.

OLIVEIRA, M. D. M. Custo operacional e ponto de renovação de tratores agrícolas de pneus: avaliação de uma frota. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Cascavel: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD-ROM.

OLMSTEAD, A.L.; RHODE, P. W. Reshaping the landscape: the impact and diffusion of the tractor in American agriculture, 1910-1960. **Journal of Economic History**, Cambridge, v. 61, n. 3, p. 663-698, 2001.

ORSOLINI, M. **Electric tractor vehicle**. US Patent n.USD355148 S, 7 Feb. 1995. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/USD355148>>. Acesso em: 12 jun. 2013.

PALMER, R. V. **Estudo da sulfatação durante a formação de placas positivas empastadas de baterias de chumbo-ácido**. 2008. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

PEREIRA, F. Inverno, poluição e problemas respiratórios. **Jornal Manuelzão**, Belo Horizonte, n. 30, 1 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.manuelzao.com.br/jornal/joranl30/doencas.htm>>. Acesso em: 20 abr. 2012.

PERES, L. A. P. **Veículos elétricos**: o limiar de uma era de transição. Disponível em: <<http://www.gruve.eng.uerj.br/historia.htm>>. Acesso em: 12 ago. 2012.

PORCIUNCULA, C. et al. Avaliação comparativa entre o modelo elétrico Battery e os modelos analíticos Linear e Lei de Peukert. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, Passo Fundo, v. 4, n. 1, p. 71-80, mar. 2012.

RIBAS, R. L. et al. Transmissões presentes em tratores agrícolas no Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 10, p. 2206-2209, out. 2010.

RODRIGUES, D. E. et al. Micro trator agrícola adaptado com diferentes alternativas energéticas no revolvimento de café em terreiro. **Revista Ciências Técnicas Agropecuárias**, La Habana, v. 15, n. 4, p. 8-15, 2006.

ROSOLEM, M. F. N. C. et al. Bateria de lítio-íon: conceitos básicos e potencialidades. **Revista Saber Eletrônica**, São Paulo, v. 48, n. 464, p. 59-72, set./out. 2012.

RUSSINI, A. **Projeto, construção e teste de instrumentação eletrônica para a avaliação do desempenho de tratores agrícolas**. 2009. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

SALVADOR, N. **Desempenho de um motor de ciclo diesel utilizando o éster metílico do óleo de Joannesia Princeps, Vell., em substituição e em misturas com o óleo diesel**. 1984. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1984.

SCHLOSSER, J. F. et al. Análise comparativa do peso específico dos tratores agrícolas fabricados no Brasil e seus efeitos sobre a seleção e uso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 1, p. 92-97, jan./fev. 2005.

SCOTT, I.; SE-HEE, L. Battery energy storage. In: _____. **Large energy storage systems handbook**. Boca Raton: CRC, 2011. p. 153-179.

SEABRA, G. **Terra: cidades, natureza e bem estar**. João Pessoa: UFPB, 2012. 201 p.

SERRANO, J. M. P. Desempenho de tratores agrícolas em tração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 7, p.1021-1027, jul. 2007.

SIEMENS, J. C.; BOWERS, W. W. **Machinery management: how to select machinery to fit the real needs of farm managers**. East Moline: J. Deere, 1999.5p. (Farm Business Management (FMB) Series).

SILVEIRA, G. M.; SIERRA, J. G. Eficiência energética de tratores agrícolas fabricados no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.4, p.418-424, 2010.

SOLIDWORKSCORPORATION. **Solidworks**. Concord, 2010. Software.

SOUSA FILHO, A. **Avaliação de teorias de predição do comportamento de tratores agrícolas**. 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

STECKEL, R. H.; WHITE, W. J. **Engines of growth: farm tractors and twentieth-century U.S. economic welfare**. Massachusetts: NBER, 2012.47 p. (NBER Working Paper, 17879).

STRUBEN, J.; STERMAN, J. D. **Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems**. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2006/proceed/papers/STRUB391.pdf>>. Acesso em: 2 ago. 2012.

TOSI, J. **Planos para melhorar a qualidade do ar**. Disponível em: <<http://www.agirazul.com.br/fsm4/fsm/000000194.htm>>. Acesso em: 16 abr. 2012.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Fuel economy**. Disponível em: <<http://www.fueleconomy.gov/featv.shtml>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Office of Mobile Sources. **Non-road engines and air pollution**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/OMS/consumer/20-nonrd.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2012.

VIAN, C. E. F.; ANDRADE JÚNIOR, A. M. Evolução histórica da indústria de máquinas agrícolas no mundo: origens e tendências. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 48., 2010, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: SOBER, 2010. 1 CD-ROM.

VOLPATO, C. E. S. et al. Desempenho de motor ciclo diesel alimentado com biodiesel de soja (B100). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p.1125-1130, jul./ago. 2009.

WINTER, M. Introduction into li-ion battery materials. In: SYMPOSIUM ADVANCED BATTERY TECHNOLOGIES FOR AUTOMOBILES AND THEIR ELECTRIC GRID INTEGRATION, 2009, Essen. **Proceedings...** Essen: SAB, 2009. p. 20-21.

ZOZ, F.M.; GRISSO, R.D. **Traction and tractor performance**. Saint Joseph: ASAE, 2003. 48 p. (Lecture Series, Tractor Design, 27).