

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

Experiência de Recarga de Moto Elétrica Através de Rede Elétrica Local e de Célula Fotovoltaica - Análise Comparativa Sob o Ponto de Vista de Geração de Harmônicos.

Adérito Marques Ferreira Marcus Lellis P. Peçanha Luiz Artur Pecorelli Peres
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ (*)

Acacio Barreto Maria Beatriz D. A. P. Medeiros David Targueta
Ampla Energia e Serviços S.A.

Palavras-chave: recarga de bateria, motos elétricas, célula fotovoltaica, qualidade da energia.

Resumo: Este texto é motivado pelo impacto ambiental das emissões causadas por motocicletas convencionais que, no Brasil, é agravado pela ausência de catalisadores, apresentando, portanto, fatores de emissão elevados. A substituição gradativa destas motocicletas por aquelas de tração elétrica é uma alternativa considerada viável. O trabalho apresenta resultados da pesquisa aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que visa avaliar o desempenho de veículos elétricos atuando em frotas de empresas distribuidoras de energia. Neste contexto, faz-se necessário um exame exploratório do desempenho dos retificadores atualmente empregados na recarga destes veículos. No presente artigo são descritos os ensaios realizados de recarga de bateria de uma moto elétrica, de pequeno porte, utilizando como fontes de alimentação de corrente alternada um inversor acoplado a um sistema fotovoltaico e a própria rede elétrica local. O objetivo é apresentar uma análise comparativa entre o abastecimento realizado a partir de cada sistema de alimentação citado, enfocando, principalmente, os aspectos relacionados à qualidade da energia.

1. INTRODUÇÃO

É crescente a preocupação em nível mundial com as emissões atmosféricas causadas pelos meios de transporte movidos na sua maioria por combustíveis fósseis. Os danos decorrentes da poluição do ar e dos desequilíbrios produzidos pelos chamados gases de efeito estufa, que apresentam inter-relações com as mudanças climáticas explicam este panorama considerado grave por diversas instituições científicas de renome. Nesse sentido, constata-se uma mudança de paradigma com relação ao sistema de propulsão veicular e a penetração de veículos elétricos no mercado, inclusive, não rodoviários [PECORELLI PERES, L. A.; HORTA NOGUEIRA, L.A. et LAMBERT-Torres, G.; 2002] propiciando novos investimentos em diversos setores, em especial as empresas de fornecimento de energia elétrica. Conforme [DUARTE, Daisy Lucid et PECORELLI PERES, L. A.; 2006] é descrito um inventário de emissões de motocicletas no Estado do Rio de Janeiro com o qual foram estabelecidos prognósticos animadores quanto a sua redução utilizando-se motocicletas elétricas. Em se tratando de um veículo de alta mobilidade e acessível à sociedade brasileira está sendo estudada, no âmbito da pesquisa em curso na UERJ, aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, a realização da recarga de motos elétricas tanto a partir do suprimento via a distribuidora de eletricidade como da fonte de energia solar fotovoltaica existente na UERJ. Os efeitos da utilização dos carregadores de bateria, inerentes às motos elétricas, são tratados no presente artigo que descreve os ensaios realizados com a recarga de bateria de uma moto elétrica, de pequeno porte, utilizando como fontes de

alimentação de corrente alternada um inversor acoplado a um sistema fotovoltaico e a própria rede elétrica local. O trabalho tem por objetivo apresentar uma análise comparativa entre o abastecimento realizado com cada sistema de alimentação citado, enfocando, principalmente, os aspectos relacionados à qualidade da energia.

2. DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS EM ANÁLISE

A seguir, é apresentada uma descrição sucinta das características técnicas dos componentes e sistemas elétricos envolvidos nos ensaios.

2.1. Moto Elétrica

A moto elétrica utilizada nos ensaios foi a GPS 500, de fabricação da GPS do Brasil, que possui os seguintes dados técnicos:

- Potência do motor – 500 W
- Velocidade máxima – 30 km/h
- Autonomia – 28 km
- Bateria – 2 (duas) baterias de 12 V - 18 Ah.
- Tempo de recarga – de 2 a 6 horas
- Carregador – Tensão de entrada: 100 a 240 V - 50/60 Hz / Tensão de saída: 24 V – 1,8 A CC

A Figura 1, abaixo, apresenta a moto utilizada nos ensaios.



Figura 1. Moto Utilizada nos Ensaios.

2.2. Sistema de Suprimento Fotovoltaico

De acordo com a descrição elaborada em [SILVA, Mariana Dias, 2007], o sistema de fornecimento de energia elétrica fotovoltaica que alimenta o LSPV – Laboratório de Sistema de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ é composto dos seguintes componentes: painel fotovoltaico/caixa de junção, controlador, banco de baterias e inversor. O diagrama a seguir encontrado em [SILVA, Mariana Dias, 2007], ilustra o sistema de suprimento fotovoltaico utilizado, conforme Figura 2, a seguir:

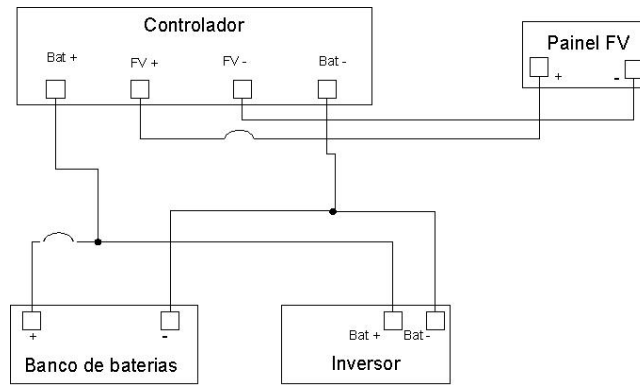


Figura 2. Diagrama dos componentes do sistema de alimentação fotovoltaico

O painel fotovoltaico é composto de 8 (oito) módulos de 24 V ligados em paralelo conectados a uma caixa de junção e esta conectada a entrada do controlador, sendo a corrente máxima fornecida por módulo de 3,6 A. O controlador tem por finalidade manter o processo de recarga do banco de baterias estável. A tensão de saída pode ser ajustada em 12 V ou 24 V, sendo a corrente de carga de 35 A e a corrente máxima de pico de 85 A. O banco de baterias visa fornecer a tensão de corrente contínua para alimentação do inversor, sendo constituído de 8 (oito) baterias de 12 V ligadas em série/paralelo a fim de obter a tensão de 24 V. O inversor propicia a conversão da corrente contínua fornecida pelo banco de baterias em corrente alternada. A tensão nominal de entrada do inversor é de 24 V, admitindo uma faixa de operação entre 21 e 32 V, sendo a corrente nominal de entrada de 38 A. A tensão nominal de saída do inversor é de $115 \pm 10\%$ V, sendo a corrente nominal de saída de 6,8 A.

2.3. Sistema Elétrico Local

A capacidade instalada da subestação que alimenta as instalações da UERJ situada à Rua Fonseca Telles, em São Cristóvão, é de 2 MVA, sendo constituída de 4 (quatro) transformadores de 500 kVA – 13,8/0,22 kV. Em função da demanda atual apenas um transformador supre a necessidade de carga da instalação, estando os outros desligados. O nível de curto-circuito trifásico máximo em 13,8 kV é estimado em 190 MVA. O diagrama unifilar da subestação pode ser visualizado na Figura 3, a seguir:

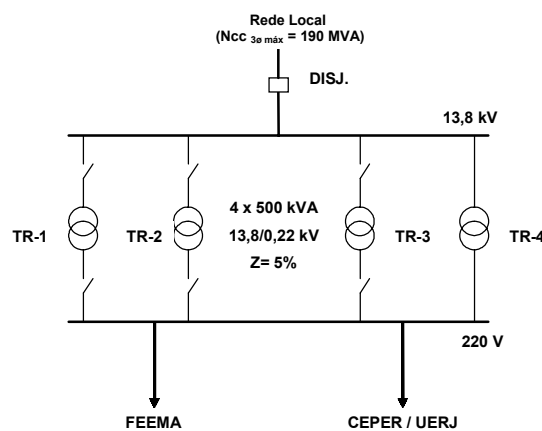


Figura 3. Diagrama Unifilar da Subestação de 13,8 kV da UERJ

3. ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios de recarga da bateria da moto elétrica foram realizados nas dependências do LSPV – Laboratório de Sistema de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas do CEPER, abrangendo a recarga através da rede elétrica local e pelo sistema fotovoltaico.

Para realizar o procedimento de descarga da referida moto foi utilizado o pátio de circulação de veículos automotivos anexo aos prédios da UERJ situados à Rua Fonseca Telles.

3.1. Recursos utilizados para realização dos ensaios

Para realização dos ensaios foram utilizados os seguintes recursos:

- Medidor de grandezas elétricas e qualidade da energia MARH-21, modelo 993, de fabricação da RMS;
- Alicates de corrente de relação 10/100 - 5 A modelo 3ALIC 10/100, de fabricação da RMS;
- Volt-amperímetro alicate, modelo ET- 3880 de fabricação da MINIPA;
- Computador Portátil, Aspire 3660, modelo NO ZB3 de fabricação da ACER;
- Painel de alimentação de veículo elétrico, confeccionado nas oficinas da UERJ;
- “No-break” Net Station de 600VA, modelo uST600FX 115 RMS, de fabricação da SMS.

3.2. Grandezas elétricas medidas

Foram medidas as seguintes grandezas elétricas:

- Tensão de suprimento em regime;
- Corrente de carga;
- Potências: ativa, reativa e aparente;
- Fator de potência e de deslocamento;
- Distorção harmônica total de tensão e de corrente, e suas componentes harmônicas;
- Energia consumida

3.3. Ensaios de recarga da bateria através da rede elétrica local

Os ensaios de recarga da bateria com alimentação pela rede elétrica local foram realizados nos seguintes dias e horários:

- Dia 10/07/07, entre 14h29min e 16h41min;
- Dia 11/07/07, entre 13h05min e 16h31min;
- Dia 24/07/07, entre 15h56min e 17h26min;
- Dia 26/07/07, entre 15h45min e 16h31min.

3.4. Ensaios de recarga da bateria através do sistema fotovoltaico

Os ensaios de recarga da bateria com alimentação pelo sistema de suprimento fotovoltaico foram realizados no seguinte dia e horários:

- Dia 25/07/07, entre 12h32min e 14h00min.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

4.1. Ensaios de Recarga pela Rede Elétrica

Tensão de Fornecimento em Regime Permanente e Corrente de Carga

As Figuras 4 e 5 apresentam os perfis da tensão em regime e da corrente de carga do carregador da bateria. Observa-se que no período inicial de recarga a corrente se mantém constante (Figura 4), decrescendo gradativamente no período médio de recarga (Figura 5).

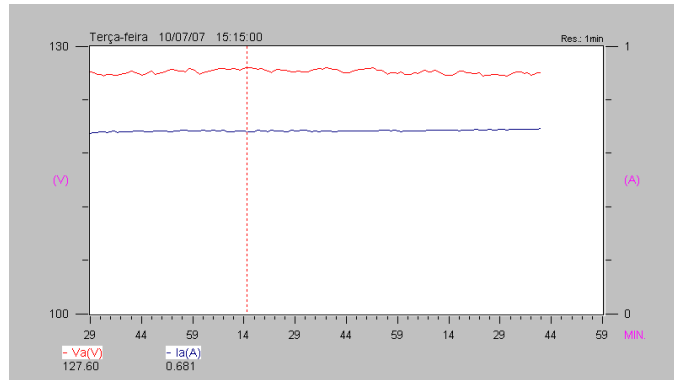


Figura 4. Perfil da tensão e da corrente de carga no período inicial de recarga. (duração 2h12min)

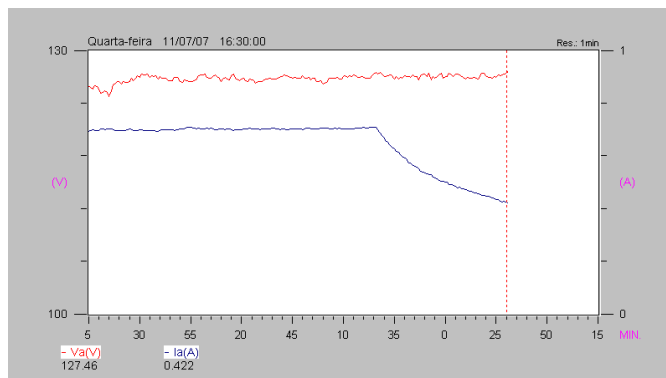


Figura 4. Perfil da tensão e da corrente de carga no período médio de recarga. (duração: 3h25min)

Potências Ativa e Aparente

As figuras 6 e 7 apresentam os perfis das potências aparente e ativa registradas na entrada do carregador da bateria. Observa-se que no período inicial de recarga os perfis das grandezas se mantêm praticamente constantes (Figura 6), decrescendo gradativamente no período médio de recarga (Figura 7).

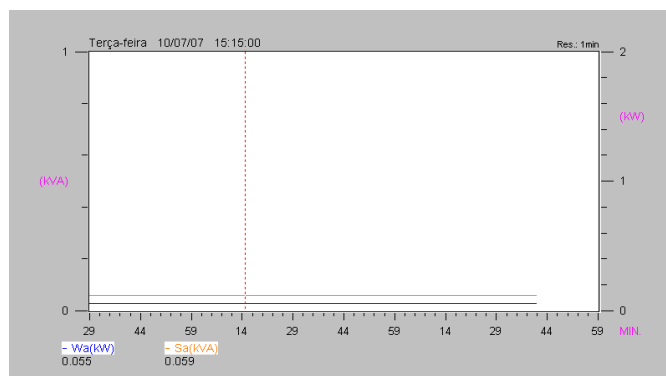


Figura 6. Perfil das potências aparente e ativa no período inicial de recarga. (duração 2h12min)

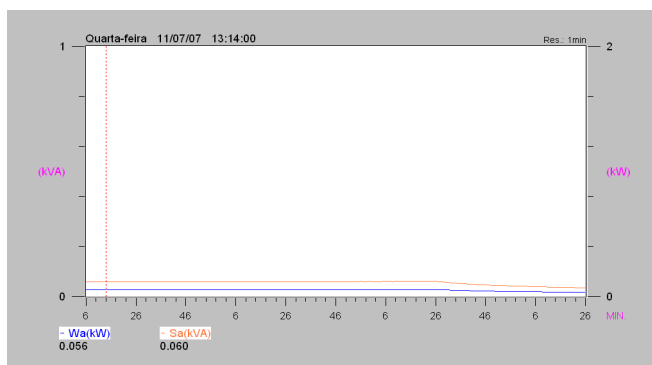


Figura 7. Perfil das potências aparente e ativa no período médio de recarga. (duração: 3h25min)

Potência Reativa e Fator de Potência / Deslocamento

As figuras 8 e 9 apresentam os perfis da potência reativa e do fator de potência/deslocamento, desenvolvidos pelo carregador da bateria. Observa-se que no período inicial de recarga os perfis das grandezas se mantêm praticamente constantes (Figura 8), decrescendo gradativamente no período médio de recarga (Figura 9).

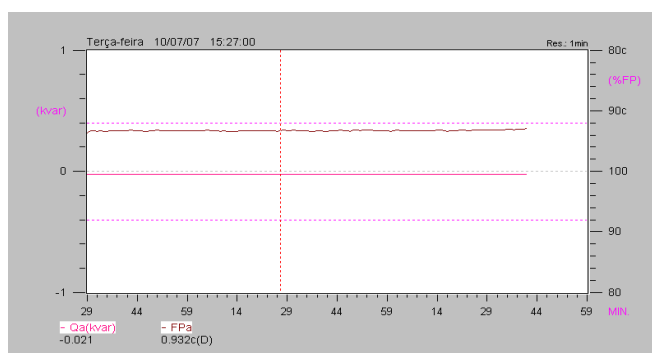


Figura 8. Perfis da potência reativa e do fator de potência/deslocamento no período inicial de recarga. (duração: 2h12min)

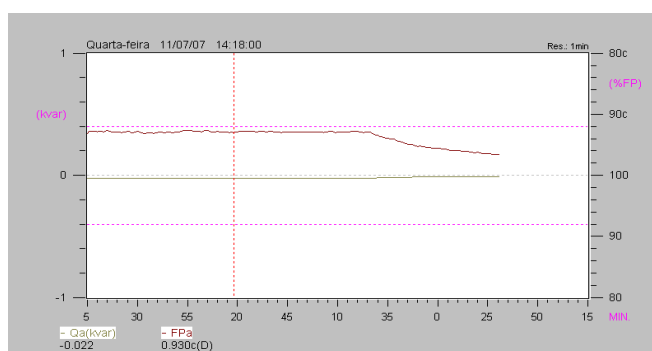


Figura 9. Perfis da potência reativa e do fator de potência/deslocamento no período médio de recarga. (duração: 3h25min)

Distorção Harmônica Total de Tensão e de Corrente, e suas Componentes

As figuras 10 e 11 apresentam os perfis da distorção harmônica total de tensão e de corrente. O perfil da distorção harmônica de tensão é função da tensão de fornecimento, mantendo-se dentro de uma faixa de variação bem estreita.

No caso do perfil de distorção harmônica de corrente, observa-se que no período inicial de recarga o perfil dessa grandeza se mantém praticamente constante (Figura 10), crescendo gradativamente no período médio de recarga (Figura 11).

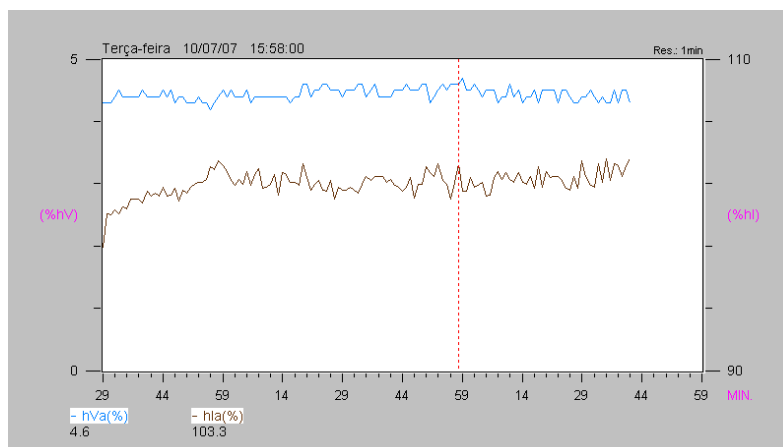


Figura 10. Perfis da distorção harmônica total de tensão e de corrente no período inicial de recarga. (duração: 2h12min)

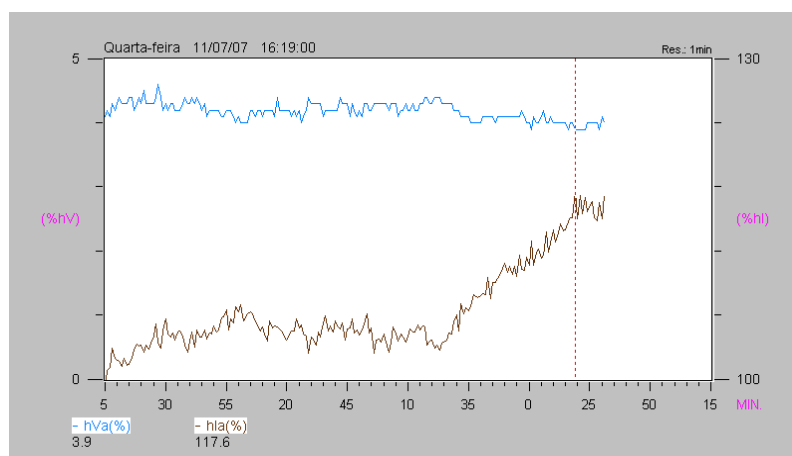


Figura 11. Perfis da distorção harmônica total de tensão e de corrente no período médio de recarga (duração: 3h25min)

As figuras 12, 13 e 14 apresentam as formas de onda da tensão de fornecimento e da corrente de carga. Muito embora o valor percentual da distorção harmônica de corrente no período médio de recarga é superior ao valor do período inicial, o valor absoluto da distorção é menor, tendo em vista que este é função da corrente fundamental.

As principais componentes harmônicas presentes, tanto na tensão como na corrente de carga, são as harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem.

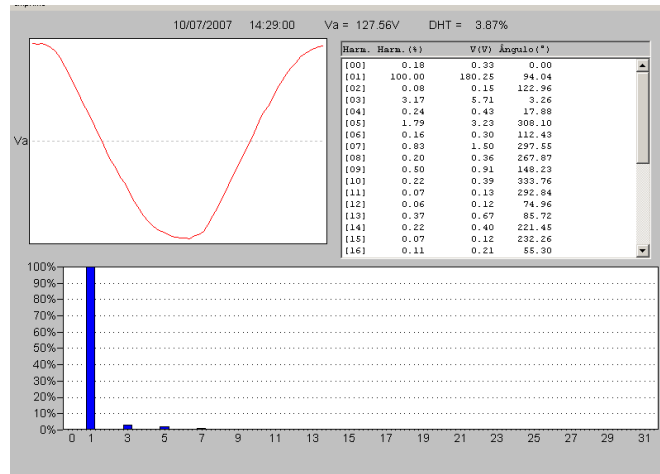


Figura 12. Forma de onda da tensão de fornecimento e suas componentes harmônicas

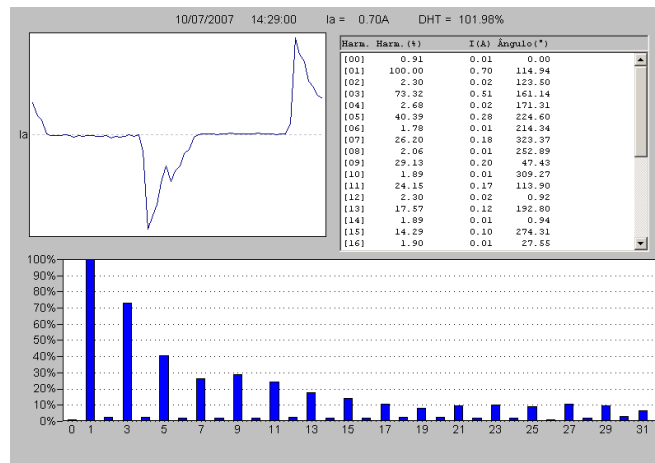


Figura 13. Forma de onda da corrente de carga e suas componentes harmônicas no período inicial de recarga

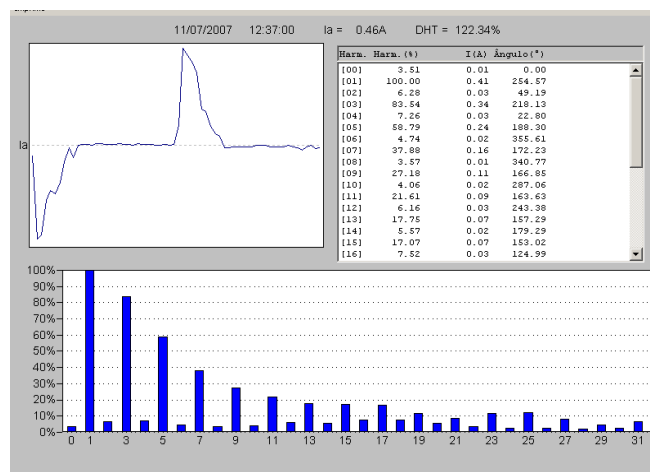


Figura 14. Forma de onda da corrente de carga e suas componentes harmônicas no período médio de recarga

Consumo de Energia

As Tabelas 2 e 3 apresentam o consumo de energia ativa e reativa durante os ensaios realizados, respectivamente, nos dias 10 e 11/07/07.

Consumos / Fator de Potência

	FORA PONTA			PONTA			RESERVADO			TOTAL		
	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP
A	-0.047	0.123	0.93c	0.000	0.000	1.00i	0.000	0.000	1.00i	-0.047	0.123	0.93c
B	-0.000	-0.000	0.56c	0.000	0.000	1.00i	0.000	0.000	1.00i	-0.000	-0.000	0.56c
C	-0.000	-0.000	0.61c	0.000	0.000	1.00i	0.000	0.000	1.00i	-0.000	-0.000	0.61c
TOTAL	-0.047	0.123	0.93c	0.000	0.000	1.00i	0.000	0.000	1.00i	-0.047	0.123	0.93c

Tabela 2. Relatório de consumo de energia durante os ensaios realizados no dia 10/07/07.
(duração: 2h15min)

Consumos / Fator de Potência

	FORA PONTA			PONTA			RESERVADO			TOTAL		
	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP
A	-0.067	0.176	0.93c	0.000	0.000	1.00i	0.000	0.000	1.00i	-0.067	0.176	0.93c
B	-0.000	-0.000	0.53c	0.000	0.000	1.00i	0.000	0.000	1.00i	-0.000	-0.000	0.53c
C	-0.000	-0.000	0.57c	0.000	0.000	1.00i	0.000	0.000	1.00i	-0.000	-0.000	0.57c
TOTAL	-0.067	0.176	0.93c	0.000	0.000	1.00i	0.000	0.000	1.00i	-0.067	0.176	0.93c

Tabela 3. Relatório de consumo de energia durante os ensaios realizados no dia 11/07/07.
(duração: de 3h25min)

4.2. Ensaio de Recarga pelo Sistema Fotovoltaico

Tensão de Fornecimento em Regime Permanente e Corrente de Carga

As figuras 15 e 16 apresentam os perfis da tensão em regime e da corrente de carga do carregador da bateria para os períodos médio e final de recarga.

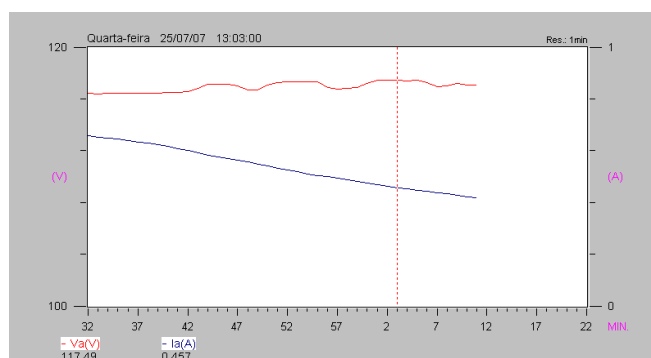


Figura 15. Perfil da tensão e da corrente de carga no período médio de recarga.
(duração: 39min)

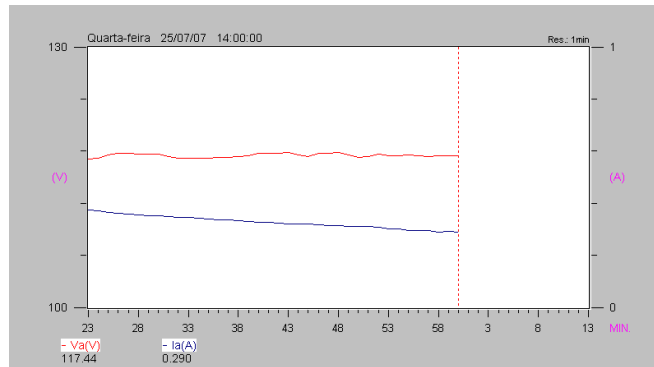


Figura 16. Perfil da tensão e da corrente de carga no período final de recarga. (duração: 37min)

Potências Ativa e Aparente

A figura 17 apresenta os perfis das potências, aparente e ativa, registradas na entrada do carregador da bateria no período médio de recarga.

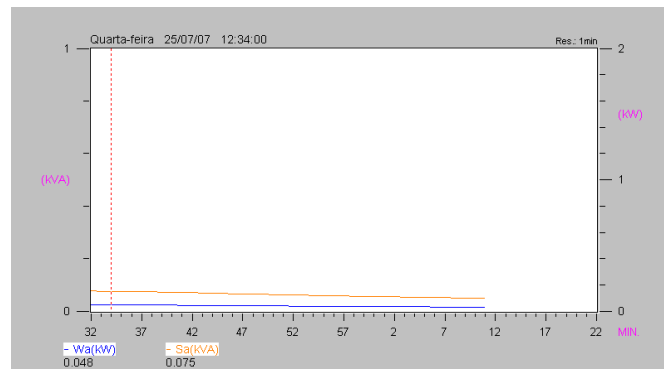


Figura 17. Perfil das potências aparente e ativa no período médio de recarga. (duração: 37min)

Potência Reativa e Fator de Potência/Deslocamento

A figura 18 apresenta os perfis da potência reativa e do fator de potência/deslocamento, desenvolvidos pelo carregador da bateria no período médio de recarga.

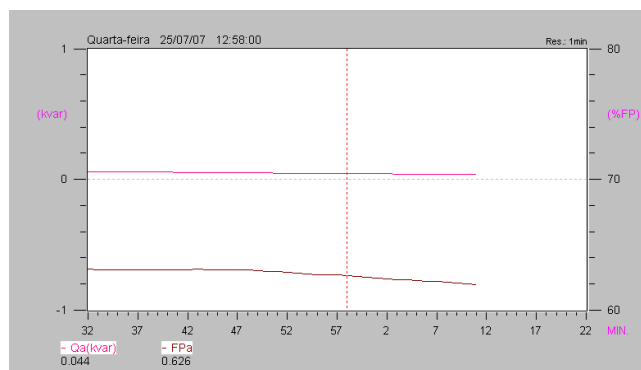


Figura 19. Perfis da potência reativa e do fator de potência/deslocamento no período médio de recarga. (duração: 37min)

Distorção Harmônica Total de Tensão e de Corrente, e suas Componentes

A Figura 20 apresenta os perfis da distorção harmônica total de tensão e de corrente. O perfil da distorção harmônica de tensão é função da tensão do inversor. No caso do perfil de distorção harmônica de corrente, observa-se um crescimento gradativo no período médio de recarga

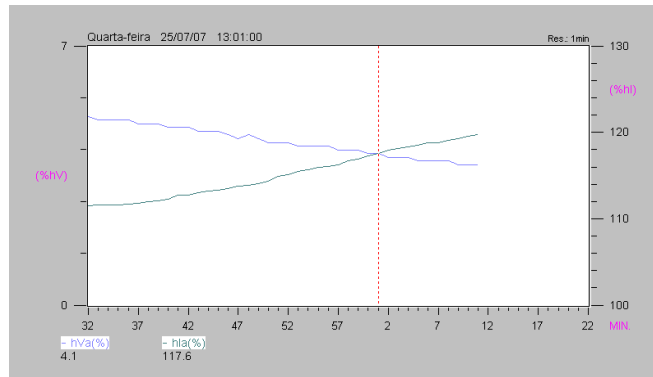


Figura 20. Perfis da distorção harmônica total de tensão e de corrente no período médio de recarga (duração: 37min)

As figuras 21 e 22 apresentam as formas de onda da tensão de fornecimento e da corrente de carga. As principais componentes harmônicas presentes, tanto na tensão como na corrente de carga, são as harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem.

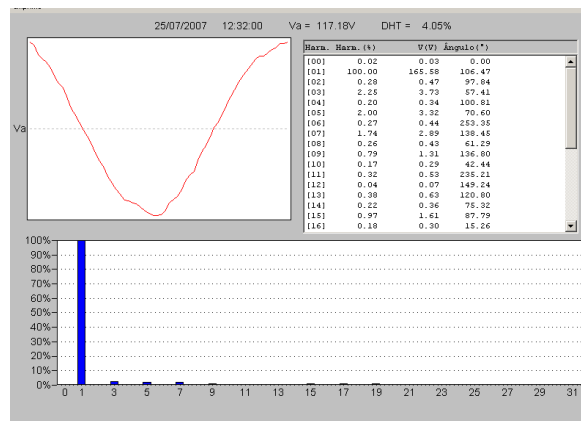


Figura 21. Forma de onda da tensão de fornecimento e suas componentes harmônicas

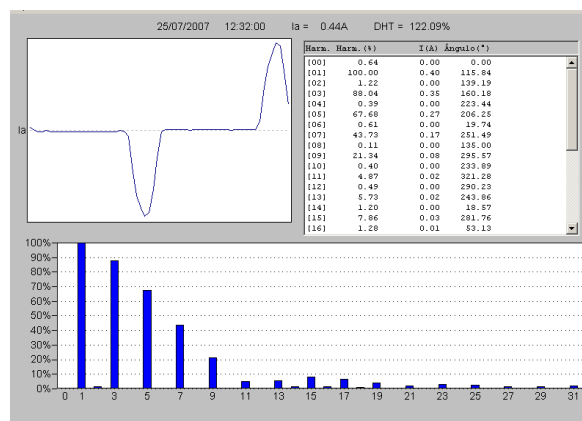


Figura 12. Forma de onda da corrente de carga e suas componentes harmônicas

Consumo de Energia

A tabela 4 apresenta o consumo de energia ativa e reativa durante os ensaios realizados no dia 25/07/07.

Consumos / Fator de Potência

	FORA PONTA			PONTA			RESERVADO			TOTAL		
	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP	kvarh	kWh	FP
A	0.032	0.026	0.63	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000	1.00	0.032	0.026	0.63
B	0.000	0.000	0.04	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000	0.04
C	0.000	0.000	0.05	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000	0.05
TOTAL	0.032	0.026	0.63	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000	1.00	0.032	0.026	0.63

Tabela 4. Relatório de consumo de energia durante os ensaios realizados no dia 10/07/07.
(duração: 37min)

5. RESUMO COMPARATIVO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Um resumo dos principais resultados das grandezas elétricas medidas durante os ensaios de recarga da bateria através da rede elétrica local e pelo sistema de suprimento fotovoltaico é apresentado na tabela 5, abaixo:

Grandeza Elétrica Medida	Recarga pela Rede Elétrica Local	Recarga pelo Sistema Fotovoltaico
Tensão em Regime (V)	124,2 a 128,5	116,4 a 117,5
Corrente de Carga (A)	0,711 (I) a 0,422 (M)	0,660 a 0,419 (M)
Potência Ativa (kW)	0,056 (I) a 0,033 (M)	0,027 a 0,021 (M)
Potência Reativa (kvar)	-0,022 (I) a -0,009 (M)	0,035 a 0,027 (M)
Potência Aparente (kVA)	0,060 (I) a 0,034 (M)	0,044 a 0,034 (M)
Fator de Potência/ Deslocamento (%)	FD: 93,1 (I) a 96,5 (M) cap.	FP: 60,6 a 61,4 ind. (M)
DHTv máxima (%) (C. Harmônicas)	5,8 (3 ^a , 5 ^a e 7 ^a)	5,2 (3 ^a , 5 ^a e 7 ^a)
DHTi máximo (%) (C. Harmônicas)	150,0 (3 ^a , 5 ^a e 7 ^a)	122,0 (3 ^a , 5 ^a e 7 ^a)
Consumo (kWh)	0,123 (I) e 0,176 (I e M)	0,026 (M)

Tabela 5. Resumo dos resultados dos ensaios realizados com a recarga da moto elétrica.
Nota: (I) – Período inicial de recarga; (M) – Período médio de recarga.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Independentemente das fontes de alimentação de corrente alternada utilizada na recarga da bateria, seja pela rede elétrica local ou pelo inversor acoplado ao sistema fotovoltaico, a distorção harmônica total de tensão manteve-se dentro valores aceitáveis e não prejudiciais ao desempenho dos equipamentos envolvidos no processo em questão, muito embora haja superação em alguns instantes do limite de 5% estabelecido pelo documento que trata deste assunto IEEE – 519-1992.

No caso do inversor nota-se um decréscimo do valor da distorção harmônica total de tensão na passagem do período inicial de recarga para o período médio e final de recarga.

No que se refere à distorção harmônica total de tensão quando o carregador da bateria da moto é alimentado pela rede elétrica local, esta permanece praticamente constante durante todos os períodos de recarga não sofrendo qualquer influência da corrente solicitada pelo carregador.

As principais componentes harmônicas presentes na tensão de alimentação, tanto pela rede elétrica local como pelo inversor, são a 3^a, 5^a e 7^a ordem harmônica.

A distorção harmônica total de corrente, para ambos os casos de alimentação, sofre um acréscimo de valor na passagem do período inicial de recarga para o período médio e final de recarga. Tal fato está relacionado com o decréscimo da corrente fundamental ao longo do processo de recarga.

As principais componentes harmônicas presentes na corrente de carga, para ambos os sistemas de alimentação do carregador da bateria, são a 3^a, 5^a e 7^a ordem harmônica.

Os estudos realizados nesta fase da pesquisa em curso permitiram estabelecer os procedimentos a serem adotados em testes de recarga de veículos elétricos com foco nas medições das distorções harmônicas de tensão e correntes que ocorrem nos processos de recargas das baterias de veículos elétricos.

O prosseguimento deste trabalho inclui os aspectos voltados para a eficiência energética em termos da relação entre consumo e distância percorrida em trajetos típicos, como parte da pesquisa em pauta, aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e que visa avaliar o desempenho de veículos elétricos atuando em frotas de empresas distribuidoras de energia. Para isto fez-se necessária a instalação de velocímetro e marcador de distância percorrida na moto elétrica uma vez que os veículos elétricos não rodoviários, em geral, não dispõem destes instrumentos.

7. BIBLIOGRAFIA

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

DUARTE, Daisy Lucid; PECORELLI PERES, L.A., *Reduzindo as Emissões com Uso de Veículos Elétricos de Duas Rodas*; 4º Seminário e Exposição de Veículos Elétricos, INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética, SENAI – São Bernardo do Campo – SP, 15 e 16 de Agosto de 2006.

DUARTE, Daisy Lucid; PECORELLI PERES, L.A., *Emissões Atmosféricas Provocadas por Motocicletas e Subsídios para os Ensinamentos e Discussões de Educação Ambiental Relacionadas com os Meios de Transporte*, V Fórum Ambiental – Políticas Públicas, Educação e Meio Ambiente os Desafios no Contexto Universitário, UERJ – Rio de Janeiro 08 de dezembro de 2006.

SILVA, Mariana Dias, “*Estudo e Concepção de Sistema para Recarga de Veículos Elétricos de Pequeno Porte Empregando Energia Solar*”, Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica, orientado pelo Prof. Luiz Artur Pecorelli Peres; UERJ - Rio de Janeiro, 2007.

Apoio:

A elaboração deste trabalho contou com o apoio proveniente dos recursos de projeto de pesquisa e desenvolvimento amparado pela AMPLA ENERGIA E SERVIÇOS S.A., aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, conforme Lei nº 9991 de 24/07/2000.

Co-participações: A execução dos testes apresentados contou com a efetiva e dedicada participação dos estagiários Cleiton Magalhães Freitas, Daniel Lucas dos Santos e Raphael Dias D’Avila Bastos estudantes do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ.