Luiz Artur Pecorelli Peres	Universidade do Estado do Rio de Janeiro	lapp_uerj@yahoo.com.br
Marcus Lellis Pacífico Pecanha	Universidade do Estado do Rio de Janeiro	marcuslellis@yahoo.com.br
Andre Rodrigues Krempser	Universidade do Estado do Rio de Janeiro	arodrigues2007@hotmail.com
Windson Braga Pereira	Universidade do Estado do Rio de Janeiro	windsonbraga@hotmail.com
Orestes Castaneda Pacheco	Ampla Energia e Serviços S/A	orestesc@ampla.com
Weules Fernandes Correia	Ampla Energia e Serviços S/A	wcorreia@ampla.com
Thiago de Farias Pullig	Ampla Energia e Serviços S/A	tpullig@ampla.com
Victor Santos Martins Gomes	Ampla Energia e Serviços S/A	vsgomes@ampla.com
Flavio Rodrigues Soares	Ampla Energia e Serviços S/A	fsoares@ampla.com

Ensaios de Sistemas de Recarga de Veículos Elétricos com Vistas à Mobilidade Urbana e o Planejamento de Redes de Distribuição

Palavras-chave

Medição Inteligente
Metodologia de Aquisição de Dados
Mobilidade Urbana
Painéis de Recarga
Planejamento de Redes
Veículos elétricos

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia de medição e análise dos dados de testes de recarga realizados com uma bicicleta elétrica no Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas – LSPV da UERJ. O texto descreve a utilização de um protótipo de um painel com este fim e no qual se adaptou um medidor inteligente bem como o emprego de um analisador de qualidade da energia para a coleta de amostras de penetração harmônica. Os dados registrados serviram de base para o desenvolvimento de um modelo de estimativa dos impactos sobre o carregamento de transformadores de distribuição. Destaca-se que este artigo foi produzido no âmbito do projeto de P&D/ANEEL "Desenvolvimento de Rede de Abastecimento de Veículos Elétricos para a Cidade Inteligente Búzios", em parceria com a empresa Ampla Energia e Serviços de Eletricidade S.A. As conclusões do trabalho assinalam que a metodologia de medição e de avaliação de impactos podem se aplicar aos diversos tipos de veículos elétricos rodoviários. Por fim, se enfatiza o cenário

que se avizinha para o reabastecimento dos veículos elétricos tendo em vista a sua eficiência e afinidade com as redes inteligentes de energia e com o meio ambiente.

1. Introdução

Segundo a Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares – ABRACICLO (1), a produção nacional de bicicletas em 2013 totalizou cerca de quatro milhões e meio de unidades e a presença da propulsão elétrica nestes veículos vem despertando cada vez mais a atenção nos centros urbanos. De forma concomitante nota-se a presença da motorização elétrica nestes veículos proporcionando um conforto adicional sem deixar de oferecer a possibilidade de realização de exercícios físicos e uma considerável contribuição ao meio ambiente e à mobilidade, pois o turismo de qualidade exige que as emissões de veículos à combustão interna sejam evitadas.

No contexto do projeto Cidade Inteligente Búzios coube à iniciativa de experiência inédita pela Ampla Energia eServiços de Eletricidade S.A com a cessão de bicicletas elétricas para atividades específicas. Diversas unidades foram oferecidas à Guarda Municipal de Búzios, à Prefeitura e a algumas pousadas, podendo ser recarregadas através de painéis de recarga desenvolvidos para este tipo de veículo, conforme pode ser demonstrado no Centro de Monitoramento e Pesquisa - CMP da Cidade Inteligente Búzios.

De acordo com os trabalhos realizados pelo Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular e Fontes Eletroquímicas - LSPV da UERJ, a recarga de cada grupo de 16 bicicletas elétricas equivale a aproximadamente à recarga de um carro elétrico, cuja corrente de recarga é da ordem de pelo menos 16 A. Este fato faz com que as bicicletas elétricas sejam ideais para serem utilizadas em centros urbanos, pois favorecerem a mobilidade e representam uma demanda mais reduzida de energia para a rede elétrica.

Entretanto, há necessidade do planejamento a médio e longo prazo, a fim de que seja examinada a demanda crescente desse tipo de carga ao sistema elétrico e a energia necessária a ser fornecida para este suprimento adicional em que não somente bicicletas, mas também carros elétricos estarão atuando.

Este artigo tem como objetivo apresentar uma metodologia de registro de dados de recarga de veículos elétricos, para avaliação do seu desempenho, visando medição inclusive de harmônicos para estudos de planejamento da rede em presença deste tipo de suprimento.

Com base no desenvolvimento de painel específico com a finalidade de executar testes de recarga de bicicletas ecarros elétricos pelo LSPV da UERJ, o trabalho enseja aplicações práticas tanto para o planejamento das empresas de energia elétrica, no tocante ao impacto sobre transformadores de distribuição frente ao comportamento deste tipo de carga, inclusive com respeito ao surgimento de harmônicos na rede.

2. Desenvolvimento

2.1 Descrição do Painel Desenvolvido pelo LSPV/UERJ para a Ampla Energia e Serviços S.A.

O painel de recarga, desenvolvido pelo LSPV da UERJ, foi utilizado no teste de recarga de uma bicicleta elétrica daLEV, modelo E-Bike S, cedida pela Ampla, possui plugues normalizados do tipo 2P+T, para recarga em 127 V fase-neutro acoplados a medidores de grandezas elétricas Powersave adaptados para este fim específico Originalmente estes medidores se destinavam de forma exclusiva às aplicações domésticas sendo capazes de registrar a corrente, a tensão, a potência, o fator de potência e a energia, durante todo o período de permanência da sua conexão a alguma carga. Dispõem ainda de memória de massa para gravação e posterior transferência destes arquivos para relatórios técnicos

por intermédio de um notebook conectado ao painel. Tais adaptações foram realizadas de acordo com as normas brasileiras de instalações elétricas (2) e (3).

Para o desenvolvimento pretendido foi verificada a necessidade de alterações nos painéis adquiridos e fornecidos pela empresa Scame do Brasil Ltda., de forma que fosse possível a inserção dos medidores especialmente modificados e preparados pela Powersave (4). Ademais foram feitos também ajustes no sistema de fixação para acomodar estes medidores, conexões, condutores e dispositivos de proteção nos trilhos DIN do painel de recarga. O esquema de proteção diferencial-residual, anteriormente individualizado por tomada, foi alterado para um esquema a montante englobando duas tomadas, tendo em vista à necessidade de liberação de espaço no trilho DIN para acomodação de dois medidores Powersave.

A Figura 1, a seguir, apresenta foto da vista frontal e interna do painel de recarga de bicicletas elétricas, após as adaptações. Na figura destacam-se dois medidores POWERSAVE, na cor preta, tendo ao centro os dispositivos de proteção.

Figura 1. Vista interna do painel de recarga das bicicletas.

2.2 Lista e Caracterização dos Equipamentos para os Ensaios de Recarga:

- Painel de recarga de bicicletas, 127 V, 2P+T;

- Bicicleta elétrica LEV, modelo E-BIKE S, bateria 36 V, 12 A.h, 350 W;

- Aplicativo GARMIN MECHANIC para smartphones dotados de comunicação GPS;

- Analisador de energia MARH 21, da RMS Sistemas Eletrônicos;

- Volt-amperímetro alicate MINIPA, modelo ET- 3880;

- Laptop ACER, modelo Aspire 3660-2314;

- Carregador de Bateria SANS ELECTRONIC LTD, modelo SSLC084V42A;

- Cabos de alimentação.

O aplicativo GARMIN MECHANIC foi utilizado para registro da distância percorrida e velocidade média desenvolvida pela bicicleta durante os trajetos percorridos. A Figura 2 mostra a bicicleta sendo recarregada, através do protótipo dos painéis de recarga, instalado nas dependências do LSPV, localizado no Centro de Ciência e Tecnologia - CCT da

Faculdade de Engenharia da UERJ, no campus do bairro Imperial São Cristóvão/RJ.

Figura 2. Bicicleta elétrica sendo recarregada através do Protótipo do painel de recarga do LSPV/UERJ.

2.3 Metodologia de Aquisição de Dados de Recarga:

Com base no relatório citado em (5), os testes de recarga foram realizados em dois modos de funcionamento: o modo 1 constitui a etapa de descarga da bateria do veículo ao percorrer trajetos pré-determinados e o modo 2 a etapa de recarga da bateria da bicicleta elétrica utilizando-se o protótipo de painel desenvolvido pelo LSPV/UERJ. Assim, a o modo 1 de funcionamento foi estabelecido com a realização de trajetos em área apropriada, utilizada anteriormente, para o estacionamento do Instituto Estadual do Meio Ambiente INEA, que funcionava nas instalações do Centro de Ciência e Tecnologia – CCT da UERJ. Para isto, a bateria da bicicleta é previamente carregada de forma que o estado de carga alcance 100%. Após o trajeto a bicicleta passa-se ao modo 2 de funcionamento, isto é recarga da bateria até que atinja novamente o pleno estado de carga. Com isto torna-se possível coletar as grandezas elétricas registradas no medidor Powersave. Além disto, foi utilizado o analisador de energia MARH -21 da RMS para verificação dos registros e coleta de amostras de harmônicos do processo de recarga. As figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, alguns membros da equipe técnica, antes e durante um dos testes de descarga da bateria da bicicleta, respectivamente.

Figura 3. Equipe técnica antes do teste de descarga da bateria da bicicleta. Na foto, da esquerda para direita, André

Figura 4. Bicicleta elétrica sendo utilizada durante um teste de descarga da bateria no Centro de Ciência e Tecnologia – CCT da UERJ.

Após os testes de descarga da bateria a bicicleta foi submetida à recarga. Estes testes permitem obter os dados de desempenho, tais como eficiência (Wh/km) e taxa de recarga (Wh/min), e diversos registros de grandezas elétricas, tais como, demanda e energia consumida de cada bicicleta em recarga, para posterior modelagem de impactos na rede elétrica e instalações em geral e que abranja também outros tipos de veículos elétricos conforme apresenta do nos itens que se seguem.

2.4. Resultados Encontrados e Modelagem de Impactos:

Inicialmente foi verificado por ocasião dos testes realizados que a corrente consumida por cada medidor Powersave é capacitiva e suficientemente pequena de forma a não comprometer as finalidades pretendidas nos ensaios realizados.

Testes de Recarga da Baterias:

As Tabelas 1 e 2, a seguir, reproduzem as condições típicas do comportamento e resultados encontrados em todos os testes efetuados em novembro de 2013 com a bicicleta elétrica nos modos 1 e 2 mencionados anteriormente. A Tabela 1 se refere ao trajeto, portanto, modo 1, correspondente à descarga da bateria, previamente recarregada em 100%. A Tabela 2 se refere ao modo 2, no qual foram repostos cerca de 22% da carga despendida no referido percurso.

Tabela 1. Dados Registrados em Teste de Descarga das Baterias da Bicicleta Elétrica em 05/11/2013 no CCT/UERJ

Condutor	Número de Voltas	Tempo de Percurso (min)	Distância Percorrida (km)	Velocidade Média (km/h)
Windson (54 kg)	20	12,51	4,40	20,54

Tabela 2. Dados Registrados em Teste de Recarga das Baterias da Bicicleta Elétrica em 05/11/2013 no LSPV/UERJ

Início (hora)	Término (hora)	Tempo de Recarga (min)	Energia Acumulada (Wh)	Eficiência (Wh/km)	Taxa de Recarga (Wh/min)
14:37	15:58	81	109,23	24,83	1,35

As Figuras 5 a 8 mostram, respectivamente, os gráficos da energia de reposição (valores acumulados de energia acada intervalo de cinco minutos), potência média, tensão e corrente, obtidos com base nos dados coletados pelo medidor Powersave instalado no painel de recarga.

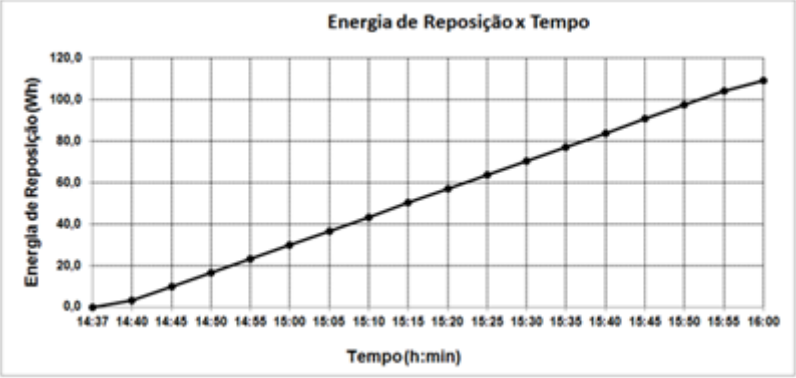

Figura 5. Gráfico da energia acumulada de reposição da bateria em função do tempo

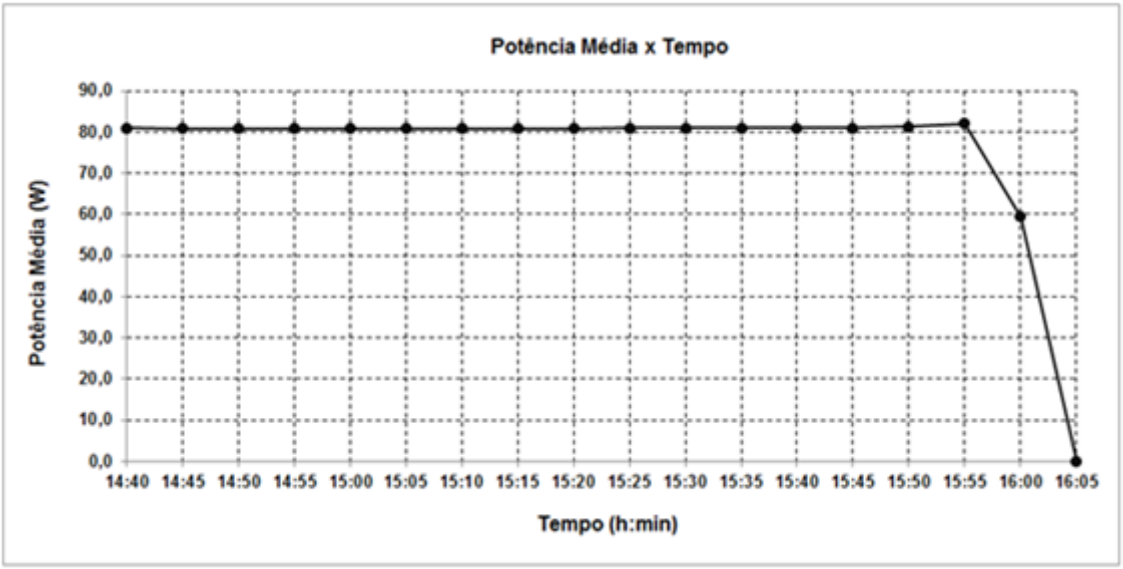

Figura 6. Gráfico da potência média de recarga da bateria em função do tempo

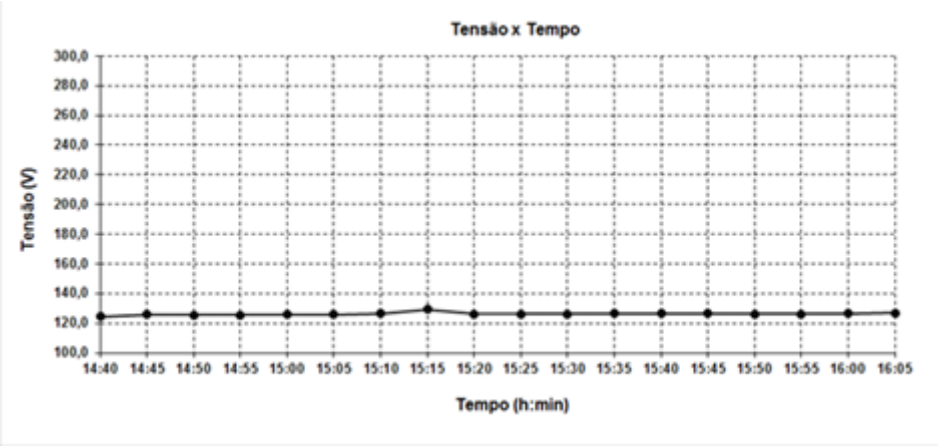

Figura 7. Gráfico da potência média de recarga da bateria em função do tempo

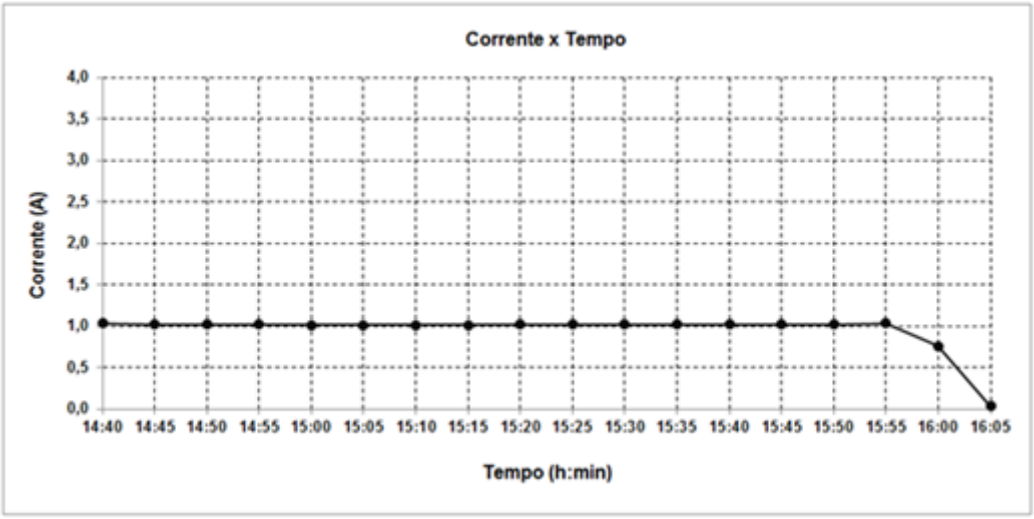

Figura 8. Gráfico da corrente CA de recarga da bateria em função do tempo

Distorções Harmônicas de Corrente Durante o Teste de Recarga:

A Figura 9 apresenta uma amostra que reproduz as situações típicas do comportamento da corrente de recarga e dasua distorção harmônica provocada pelo processo de recarga da bicicleta registrada através do analisador MARH 21, durante os testes com a bicicleta elétrica no dia 05/11/13, após ter percorrido a distância de 4,40 km. Coforme pode ser observado encontrou-se neste teste um valor de THDi de 107, 66 %. Assinala-se que quanto à distorção de tensão não foram verificadas variações perceptíveis em decorrência deste tipo de suprimento em todos os testes realizados. Estes gráficos são de suma importância para análise da penetração de harmônicos durante a recarga de frotas de bicicletas elétricas ou quaisquer outros veículos elétricos conectados à rede elétrica para recarga das suas baterias.

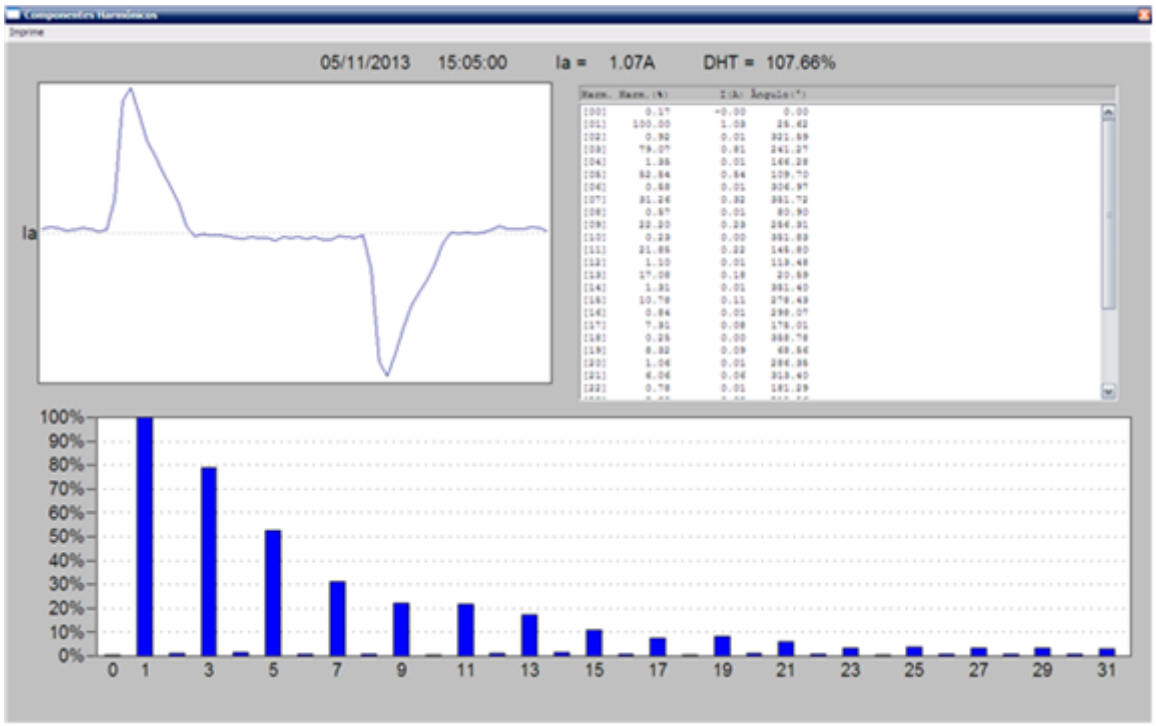

Figura 9. Gráfico da forma de onda típica da corrente de recarga com o registro da distorção harmônica e de suas componentes durante o teste de recarga da bicicleta elétrica no LSPV/UERJ

2.5 Modelagem da Recarga de Veículos Elétricos:

Os testes efetuados pelo LSPV com as bicicletas elétricas indicaram que os efeitos da tensão e corrente ao longo do processo de recarga são finalizados com um decaimento da corrente até que esta se reduza a um valor residual quando então o estado de carga da bateria alcança 100%. Obtém-se, desta forma, a demanda de potência ativa que apresenta um valor praticamente constante durante a recarga seguida de um trecho em rampa como a do Gráfico da Figura 6. Esta constatação permite uma nova modelagem para prever impactos na curva de carga da rede de suprimento aos quais poderão estar conectados os veículos elétricos em recarga uma vez que os demais veículos elétricos apresentam a mesma forma de comportamento. Para isto, foram efetuadas comparações com resultados de estudos anteriores realizados pelo LSPV com um Palio Weekend Elétrico da Ampla Energia e Serviços S.A. (6) e que atualmente faz parte da frota de veículos da Cidade Inteligente Búzios.

Assim, os alimentadores, por exemplo, de 13,8 kV e consequentemente os seus respectivos transformadores poderão ser objeto de análises específicas nas quais se deseja avaliar o suprimento aos veículos elétricos conectados à estas redes a partir destas amostras de testes de recarga. O processo utilizado para isto foi obtido pelo tratamento da recarga com uma formulação em termos de variáveis discretas para representar a demanda e a energia ativas com intervalos de tempo correspondentes à medição convencional dos sistemas elétricos igual a 15 minutos. Com isto o tempo máximo de recarga que equivale à reposição de 100% do estado de carga da bateria será um múltiplo de 15 cuja demanda máxima coincide com as características de potência e eficiência do carregador e a energia à capacidade do banco de baterias. Assim, tomando como referência os valores de eficiência (Wh / km) e taxas de recarga (Wh / minuto) da Tabela 2 foi possível gerar como exemplo a curva correspondente ao teste efetuado e apresentado na referida Figura 6, mostrado na Figura 10 a seguir e que está associado a um tempo de recarga de aproximadamente 90 minutos e um percurso de 4,4 km.

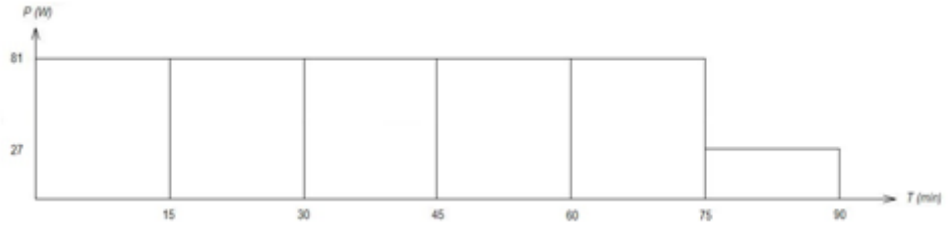

Figura 10 – Modelagem da curva de carga apresentada na Figura 6

De acordo com esta modelagem verifica-se que o erro cometido na demanda máxima foi de 0,84 % e o erro da energia foi de 1,13 %, portanto considerados bem satisfatórios. Curvas desta natureza poderão ser correlacionadas às variáveis correspondentes às distância percorridas e aos tempos de recarga. Com base nestas formulações a Figura 11 apresenta a curva de carga diária, em azul referente a um suprimento típico de um transformador de 75 kVA sob o impacto representado em vermelho da conexão de uma empresa de aluguel de bicicletas elétricas, cuja frota é de 150 unidades que percorrem a distância média de 15 km/dia.

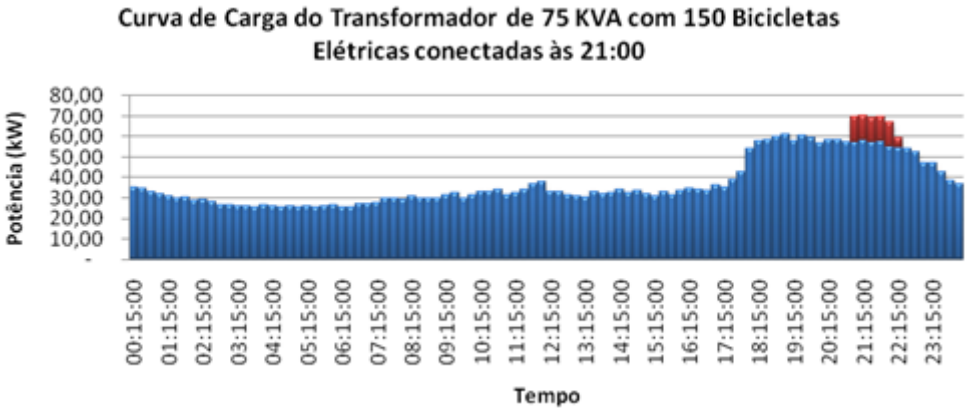

Figura 11– Influência do reabastecimento de bicicletas elétricas na curva de carga de um transformador de 75 kVA

Nesta análise foram admitidas condições conservativas considerando-se a recarga simultânea das bicicletas à partir das 21 horas. De acordo com as Figuras 10 e 11, foram obtidos os seguintes resultados:

- Energia da recarga - 16,2 kWh

- Demanda máxima da recarga - 12,15 kW

- Demanda máxima sem a recarga das bicicletas - 61,2 kW (19:00)

- Demanda máxima com a recarga das bicicletas - 70,32 kW (21:15)

Mesmo tendo sido iniciada a recarga fora do horário de ponta, a partir da 21:00 ainda assim percebe-se um acréscimo de 15 % na demanda máxima às 21:15. Depreende-se que em um ambiente de rede inteligente de energia há conveniência, por exemplo, de que a recarga seja automaticamente realizada a partir das 03:00 da madrugada caso não se desejasse exceder a demanda máxime do atendimento considerado.

Visando verificar a influência do impacto dos harmônicos foi construído o circuito equivalente na Figura 12 utilizando-se o programa PQF da Quality Engenharia e Sistemas.

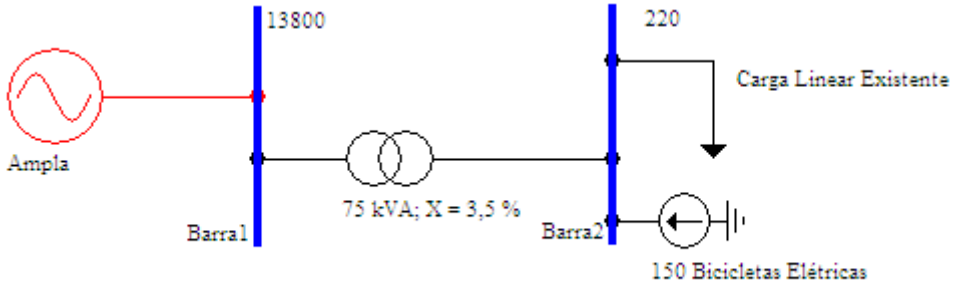

Figura 12 - Circuito equivalente para simulação da recarga com geração de harmônicos

Para esta simulação foram considerados os resultados das correntes harmônicas obtidos da amostra dos testes de recarga realizados, conforme Figura 9. Para a carga linear foi admitida a demanda das 21:00 da Figura 11 igual a 57,53 kW com fator de potência 0,92 indutivo. Quanto ao transformador foram admitidos dados típicos para a situação estudada (7) bem como para a rede da concessionária levando em conta uma corrente de curto trifásico simétrico de 10 kA (7). A Figura 13 ilustra os resultados encontrados.

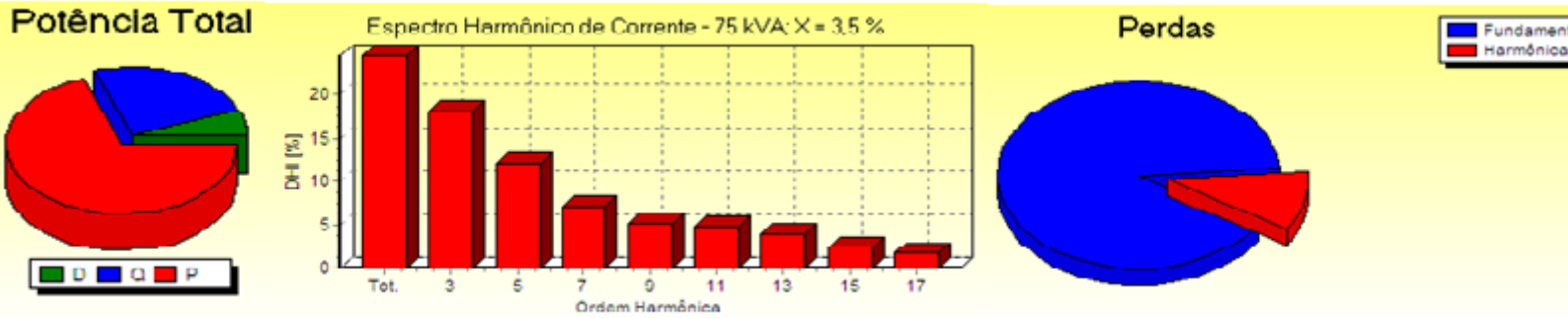

Figura 12 - Resultados obtidos no primário do transformador exibindo o efeito dos harmônicos

O gráfico da esquerda da Figura 13 indica em vermelho a potência ativa 71,12 kW, em azul a potência reativa, 42,29 kVAr e em verde o acréscimo de potência devido aos harmônicos que totalizaram 20,3 kVA, respectivamente, no primário transformador. Para esta simulação admitiu-se o sistema equilibrado com 50 bicicletas em cada fase. Como pode se observar devido às hipóteses desta simulação que corresponde a uma situação bem desfavorável, devido à superposição de harmônicos contata-se uma sobrecarga de 13,6 % no transformador que poderia também ser evitada se a recarga ocorresse, por exemplo, às 3:00 da madrugada como na análise anterior. Constata-se, levando-se em conta os benefícios energéticos, ambientais da introdução dos veículos elétricos, a validade da aplicação dos conceitos de gerência da carga pelo lado da demanda e de redes inteligentes de energia para a superação de eventuais restrições locais ao suprimento às novas solicitações da rede frente aos novos cenários a serem considerados no planejamento das redes de distribuição.

3. Conclusões

Os procedimentos propostos nos testes descritos demonstraram a viabilidade para estabelecer metodologias visando estimar o impacto na demanda, no consumo, e no nível de harmônicos na análise da penetração de veículos elétricos nas redes de distribuição dispondo-se dos parâmetros convencionais de redes elétricas e dos equipamentos utilizados.

O trabalho destaca a validade do emprego dos conceitos de redes inteligentes de energia, mostrando que através de

automatismos consegue-se levar em conta as condições operacionais da recarga de veículos elétricos conectados aos transformadores dos alimentadores de distribuição de forma à adequá-los a estas novas e atrativas exigências.

Ressalta-se a importância deste tipo de enfoque nos estudos de planejamento dos sistemas de distribuição no sentido de levar em conta o atraente mercado do transporte rodoviário, no momento por demais concentrado nas distribuidoras de combustíveis para veículos tradicionais de desempenho energético e ambiental inferiores e sem afinidade com as redes inteligentes de energia elétricas.

Uma vez que as metodologias apresentadas se mostraram adequadas, recomendam-se testes de desempenho com outros veículos a serem utilizados em Búzios, para análise da eficiência, taxa de recarga, entre outros parâmetros importantes relacionados com reabastecimento de veículos elétricos.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e a empresa Ampla Energia e Serviços S.A. pela oportunidade de realização deste trabalho bem como à Professora Diretora da Faculdade de Engenharia da UERJ Maria Eugenia de Las Mercedes Mosconi de Gouvea, ao Professor José Francisco Moreira Pessanha da UERJ, ao engenheiro Jader Monteiro Filho, ao estudante de Mestrado Idris Adeyinka Jida e ao aluno Ranther Melo pelo apoio na elaboração deste trabalho.

4. Referências bibliográficas

(1) Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares – ABRACICLO. Disponível em http://www.abraciclo.com.br/

(2) ABNT NBR IEC 61851-22- Sistema de Recarga Condutiva para Veículos Elétricos - Parte 22- Estação de Recarga em Corrente Alternada para Veículos Elétricos, 2013.

(3) ABNT Norma Regulamentadora NR - 5410 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, 2004.

(4) PECORELLI PERES, L. A.,; PEÇANHA, Marcus Lellis Pacífico; Nota Técnica 1E9.A1.2013 - Montagem, Instalaçãoe Metodologia de Coleta de Dados dos Painéis de Recarga de Veículos Elétricos do CMP em Búzios. Projeto de P&D/ANEEL da Empresa Ampla Energia e Serviços de Eletricidade S.A, 2013.

(5) PECORELLI PERES, L. A.,; PEÇANHA, Marcus Lellis Pacífico; Nota Técnica 1E12.A2.2014 - Metodologia e Análise de Testes de Desempenho de Ciclomotores Elétricos a Serem Utilizadas na Cidade Inteligente Búzios. Projeto de P&D/ANEEL da empresa Ampla Energia e Serviços de Eletricidade S.A, 2014.

(6) PECORELLI PERES, L. A.; PESSANHA, J. F. M.; PEÇANHA, Marcus Lellis Pacífico et al.; Test Procedures and Measurements for Recharge Evaluation of Battery Electric Vehicles in Power Concessionaires in Brazil In: EVS 24 The 24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium et Exhibition, 2009, Stavanger.

(7) Ampla Energia e Serviços S.A., Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária 15 kV Diretoria Técnica, Engenharia e Obras.