

Comportamento e Gestão das Componentes Harmônicas nas Redes de Distribuição - Case da Inserção de Veículos Elétricos na Cidade Inteligente Búzios

Marcus Lellis Pacífico Peçanha
marcuslellis@yahoo.com.br
UERJ

Luiz Artur Pecorelli Peres
lapp_uerj@yahoo.com.br
UERJ

Resumo: O presente artigo descreve as simulações computacionais realizadas a partir do planejamento da infraestrutura de abastecimento de veículos elétricos conectada às redes secundárias de distribuição da ENEL, no município de Armação dos Búzios, no âmbito do projeto de P&D ANEEL/ENEL

Palavras Chave: Veículos elétricos - Simulações - Distorção harmônica - Controle - Planejamento

1. INTRODUÇÃO

A ENEL Distribuição Rio implantou o projeto “smart grids” na cidade de Armação dos Búzios, Estado do Rio de Janeiro, que é reconhecido como a primeira iniciativa de implantação de uma cidade inteligente em território brasileiro (ENEL, 2011).

A cidade de Armação dos Búzios foi escolhida estrategicamente devido ao seu perfil geográfico e ao seu reconhecido potencial turístico, que a fez despontar no cenário nacional e internacional. Além destes aspectos, a cidade de Búzios evidencia-se pela potencialidade de recursos naturais voltados à geração de energias renováveis e, em particular, pela vocação inerente de atender o apelo atual por meio de transportes sustentáveis, em especial os veículos elétricos. Diante deste contexto, o projeto “Cidade Inteligente Búzios” teve como intuito principal incorporar novas tecnologias às redes de distribuição e integrá-las à população da cidade de Búzios ao projeto por meio de ações de cunho social, visando promover o uso e a gestão da energia elétrica de forma sustentável, racional e eficiente, rumo à cidade do futuro. A figura 1, a seguir, apresenta a estrutura de trabalho e pesquisa adotada pela ENEL para desenvolvimento do projeto “Cidade Inteligente Búzios” (ENEL, 2012).



Figura 1: Blocos do projeto “Cidade Inteligente Búzios”.

No âmbito das pesquisas vinculadas à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o bloco “Mobilidade Elétrica” ficou a cargo do Grupo de Estudos de Veículos Elétricos – GRUVE, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar as atividades de pesquisa que resultaram em uma metodologia de avaliação do comportamento das componentes harmônicas em decorrência dos processos de controle e automação a que as futuras estações de recarga de veículos elétricos (PEÇANHA; PECORELLI PERES; CALDEIRA, 2011) estarão sujeitas. Neste sentido, o presente artigo descreve as simulações computacionais realizadas a partir do planejamento da infraestrutura de abastecimento de veículos elétricos conectada às redes secundárias de distribuição da ENEL, no município de Armação dos Búzios.

O contexto das simulações computacionais foi precedido pela realização de testes e validação de modelos matemáticos utilizados para a representação da não linearidade de aparelhos elétricos e eletroeletrônicos presentes nas redes secundárias de distribuição nas quais passam a ser inclusos os veículos elétricos. A determinação dos modelos representativos destas não linearidades necessitou a realização de um conjunto de ensaios com os veículos

elétricos no Centro de Monitoramento e Pesquisa - CMP em Búzios e medições nos postos de transformação do alimentador primário BUZ 05 que supre o CMP. Adicionalmente, foram adotados modelos matemáticos para representação de processos de recarga de ônibus elétricos e de recarga rápida de carros elétricos, tendo como referência o modelo de ponte retificadora de 12 pulsos convertida em fonte de correntes harmônicas, de forma a representá-los como dados de entrada na ferramenta computacional PQF 7.0 (QUALITY ENGENHARIA & SISTEMAS, 2014) utilizada para realização das simulações de fluxo de potência harmônico.

Com base nos resultados das simulações de fluxo de potência harmônico foi elaborada uma estimativa do carregamento dos transformadores de distribuição do alimentador BUZ 05, de forma a suprirem a recarga de veículos elétricos sem que haja superação da capacidade destes componentes (PECORELLI PERES; PEÇANHA; PESSANHA; PEREIRA; CALDEIRA, 2015).

Os resultados desta análise demonstram que o uso de veículos elétricos na cidade de Búzios poderá ser estimulado pela ENEL. Estas simulações permitem vislumbrar, por exemplo, mesmo de forma conservativa, o ingresso imediato de 2100 carros elétricos e cerca de 6 ônibus elétricos no município de Armação de Búzios, supondo-se que condições similares de carregamento do alimentador BUZ 05 se reproduzam nos demais alimentadores primários de distribuição. Assinala-se que permanece, mesmo assim, folga significativa de capacidade dos transformadores da Subestação Búzios 2 x 25 MVA / 69 - 13,8 kV. Estes resultados também validam as iniciativas da ENEL neste projeto com foco nos veículos elétricos em termos da mobilidade inteligente e sustentável, voltados também para bicicletas e motonetas elétricas.

2. METODOLOGIA E CRITÉRIOS DE DESENVOLVIMENTO

A metodologia desenvolvida para avaliação das componentes harmônicas sobre o sistema elétrico provenientes de procedimentos simultâneos de recarga de veículos elétricos visou os seguintes efeitos:

- Carregamento dos componentes da rede elétrica;
- Perdas elétricas nos transformadores e nos condutores;
- Níveis de tensão em regime permanente da rede elétrica.

Para realização das simulações foram adotados os seguintes critérios de representação da rede elétrica e das cargas elétricas:

▪ Definiu-se como ponto de representação do sistema equivalente da rede externa da ENEL um barramento do sistema de transmissão de 138 kV, eletricamente distante da Subestação Búzios, de forma a propiciar uma melhor fidedignidade na resposta em frequência do barramento de 69 kV desta subestação.

▪ Determinou-se que os alimentadores primários de distribuição derivados de um mesmo transformador do sistema de distribuição sejam representados por uma carga equivalente à demanda do referido transformador, ficando restrito ao alimentador BUZ 05 a representação de seus componentes com nível maior de detalhamento.

▪ Considerou-se relevante para a pesquisa a existência de consumidores de média e baixa tensão supridos pelo alimentador BUZ 05, capaz de permitir o levantamento do perfil da distorção harmônica gerada por aparelhos elétricos e eletroeletrônicos utilizados nos segmentos comercial hoteleiro, comercial em geral e condominial/residencial de Búzios.

▪ Estabeleceu-se que as cargas das redes secundárias de distribuição que estejam vinculadas a um determinado posto de transformação do alimentador BUZ 05, sejam

3.2. SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO EM MÉDIA TENSÃO

O sistema de distribuição em média tensão a ser representado é constituído por alimentadores primários de 13,8 kV oriundos das Subestações Transformadoras do Sistema de Distribuição das Regiões Macaé e Lagos, incluindo-se também nesta representação os alimentadores atendidos pela Subestação Silva Jardim da Região São Gonçalo. Para efeito de representação destes alimentadores considerou-se como referência os dados obtidos do caso de fluxo de potência cedido pela ENEL para o Ano 2015 – Patamar de Carga Pesada.

O alimentador primário a ser modelado em nível de detalhes de seus componentes é atendido pela Subestação Búzios de 2 x 25 MVA / 69 - 13,8 kV, pertencente ao sistema de distribuição da Região Lagos. Esta subestação está interligada à Subestação Porto do Carro de 2 x 67 MVA / 138 - 69 kV, pertencente ao sistema de transmissão através de dois circuitos aéreos de 69 kV com 16,4 km de extensão, sendo responsável pelo suprimento de energia elétrica a sete alimentadores primários de distribuição de 13,8 kV.

O alimentador primário de distribuição selecionado para modelagem foi o alimentador BUZ 05, que possui as seguintes características:

- Capacidade instalada de transformação: 20.482,5 kVA
- Extensão total (tronco e ramais): 27,79 km
- Quantidade de transformadores da rede: 158
- Quantidade de transformadores de cliente: 64
- Demanda máxima registrada (jan/2015): 312 A (7,46 MVA)

A figura 3 apresenta o diagrama unifilar simplificado da Subestação Búzios com a distribuição dos alimentadores primários e bancos de capacitores por transformador.

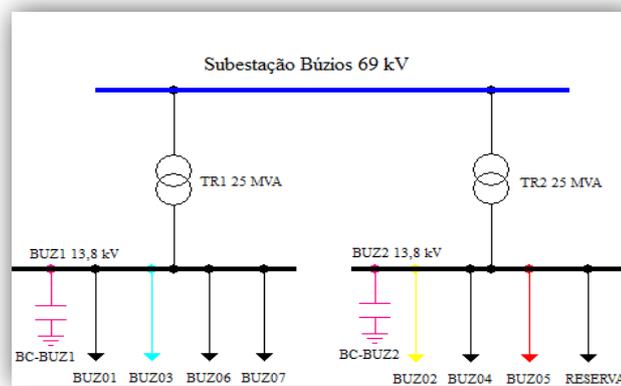


Figura 3: Diagrama unifilar simplificado da SE Búzios.

No detalhamento dos componentes do alimentador primário BUZ 05 deu-se preferência, principalmente, à representação dos trechos de rede e dos transformadores que compõem o tronco principal do alimentador, onde estão presentes as cargas mais significativas. Com esta simplificação, os ramais do alimentador foram representados por cargas equivalentes conectadas na média tensão no ponto de derivação do tronco principal. Entretanto, as cargas atreladas aos transformadores de distribuição selecionados para serem modelados no alimentador BUZ 05 foram representadas por cargas equivalentes e concentradas no lado de baixa tensão do transformador.

A figura 4 apresenta o mapa da macrozona peninsular do município de Armação dos Búzios (PREFEITURA DA CIDADE DE ARMAÇÃO DOS BÚZIOS, 2006), contendo em

destaque o diagrama de percurso dos alimentadores primários de distribuição contemplados pelo projeto "Cidade Inteligente Búzios".



Figura 4: Macrozona Peninsular - Percurso dos alimentadores primários de distribuição.

A construção da base de dados das redes elétricas modeladas exigiu a realização de uma série de reuniões visando manter entendimentos específicos com especialistas com da ENEL envolvendo os setores de Pesquisa e Desenvolvimento, Planejamento, Operação e Qualidade de Fornecimento, Proteção, Padronização, Grandes Clientes e o Polo Lagos – Manutenção Cabo Frio, de forma a esclarecê-los sobre os objetivos das simulações e a caracterização da base de dados necessária para modelagem adequada dos sistemas elétricos da ENEL. As informações de planejamento do sistema elétrico de transmissão em alta e média tensão das Regiões Macaé e Lagos, permitiram identificar e localizar os “pontos elétricos” relevantes para a montagem da rede. No caso específico do alimentador primário de distribuição BUZ 05, em complementação à base de dados fornecida pela ENEL, procedeu-se uma pesquisa exaustiva através do “Google Maps”, visando identificar possíveis inconsistências de dados do referido alimentador, promovendo, caso necessário, as devidas correções dos componentes representados.

4. REPRESENTAÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS NÃO LINEARES DAS REDES SECUNDÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO

4.1. REPRESENTAÇÃO DAS CARGAS ELÉTRICAS VEICULARES

As cargas elétricas veiculares inseridas nas redes secundárias de distribuição foram representadas pelos respectivos carregadores atuando como fontes de correntes harmônicas.

Os modelos representativos dos carregadores de carro elétrico, motoneta elétrica e bicicleta elétrica foram desenvolvidos a partir de registros de medição obtidos dos ensaios de recarga (PECORELLI PERES; PESSANHA; PEÇANHA, 2009) com os veículos elétricos disponibilizados para o projeto realizados no CMP e no laboratório e no Laboratório de Sistemas de Propulsão Veicular - LSPV da UERJ (PEÇANHA; PECORELLI PERES; CALDEIRA, 2015). Já o modelo de carregador de carga rápida em corrente contínua de carro elétrico e o modelo de carregador de ônibus elétrico foram desenvolvidos a partir da representação das correntes harmônicas geradas por um conversor trifásico de doze pulsos (ARRILLAGA; BRADLEY; BODGER, 1985).

Os modelos desenvolvidos foram representados na ferramenta computacional "PQF" pelo agrupamento de carregadores trifásicos unitários equilibrados, combinados de forma a resultar em uma potência nominal proporcional à potência de transformação atrelada. Todos os carregadores trifásicos unitários equilibrados foram representados nas simulações em ligação estrela, a menos dos carregadores de carros elétricos que foram conectados em ligação triângulo, visando compatibilizar esta conexão à configuração das redes secundárias de distribuição existentes em Búzios. Considerando que as componentes harmônicas de sequência zero (DUGAN; Mc GRANAGHAN; SANTOSO; BEATY, 2004) são tratadas pelo programa "PQF" como componentes de sequência positiva, assumiu-se que os conjuntos de carregadores conectados em ligação triângulo fossem representados pelas componentes harmônicas da corrente de fase e não pela corrente de linha, visto que não foi possível obtê-las através dos ensaios realizados. Observa-se que a adoção deste procedimento permitiu simular condições mais realistas em termos da penetração das correntes harmônicas nas redes secundárias de distribuição, considerando, desta forma, as atenuações inerentes a este tipo de conexão.

4.1.1. REPRESENTAÇÃO DE CARREGADORES DE CARROS, MOTONETAS E BICICLETAS ELÉTRICAS.

Os carregadores de carros, motonetas e bicicletas elétricas foram representados pelos seguintes modelos:

- Carregador de carro elétrico: representado pelo carregador embarcado no veículo FIAT Palio Weekend Elétrico, fabricação da MES-DEA, modelo BC 278-Z-3-A EF. As componentes harmônicas típicas registradas durante a recarga do veículo correspondem a corrente de recarga à frequência nominal da rede de 16 A @ 220 V, com potência solicitada à rede de 3,52 kVA e fator de potência de deslocamento de 99,99% adiantado.
- Carregador de motoneta elétrica: representado pelo carregador externo dedicado à motoneta GPS Future 500, fabricação da ZHE JIANG JING BEN ELECTRIC, modelo HBC-01. As componentes harmônicas típicas registradas durante a recarga da motoneta correspondem a corrente de recarga à frequência nominal da rede de 0,494 A @ 127 V, com potência solicitada à rede de 62,74 VA e fator de potência de deslocamento de 91,95 % adiantado.
- Carregador de bicicleta elétrica: representado pelo carregador externo dedicado à bicicleta LEVE Bike-S, fabricação da SANS ELETRONIC, modelo SSLC084V42A. As componentes harmônicas típicas registradas durante a recarga da bicicleta correspondem a corrente de recarga à frequência nominal da rede de 0,735 A @ 127 V, com potência solicitada à rede de 93,35 VA e fator de potência de deslocamento de 94,97% adiantado.

As figuras 5, 6 e 7 apresentam a forma de onda da corrente de linha dos respectivos carregadores trifásicos unitários de carros elétricos, motonetas elétricas e bicicletas elétricas.

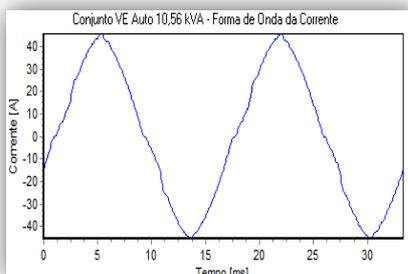


Figura 5: Carregador/carros.

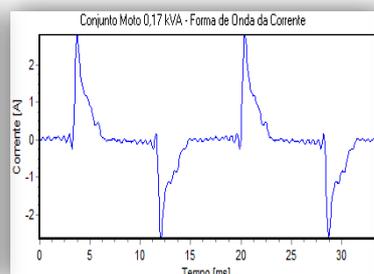


Figura 6: Carregador/motonetas.

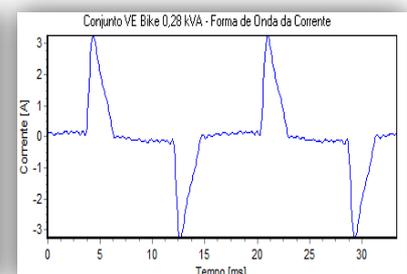


Figura 7: Carregador/bicicletas.

4.1.2. REPRESENTAÇÃO DE CARREGADORES DE CARGA RÁPIDA DE CARROS ELÉTRICOS E DE ÔNIBUS ELÉTRICOS

Os carregadores de carga rápida de carros elétricos e de ônibus elétricos foram representados pelos seguintes modelos:

- Carregador de carga rápida de carro elétrico: representado pelo carregador externo EFACEC, modelo EFAPOWER EV-QC 45, com as seguintes especificações nominais: potência aparente de 50 kVA, faixa da tensão de alimentação de $400\text{ V} \pm 10\%$, corrente de carga de 73 A, fator de potência de 98%.
- Carregador de ônibus elétrico: representado pelo conjunto de recarga/carregador embarcado BYD, modelo EVA080KG3806/01, com as seguintes especificações nominais: potência aparente de 80 kVA, faixa da tensão de alimentação de $380\text{ V} \pm 10\%$, corrente de carga de 126 A, fator de potência de 98%.

As formas de onda das correntes de linha dos carregadores de carga rápida de carros elétricos e do ônibus elétricos são apresentadas, respectivamente, nas figuras 8 e 9 abaixo. Estas formas de onda representam as correntes de linha geradas por um conversor trifásico de doze pulsos para as potências nominais especificadas para cada carregador.

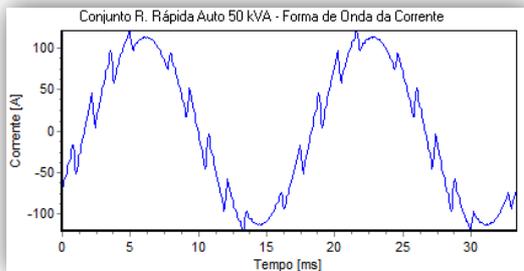


Figura 8: Carregador/carro - recarga rápida.

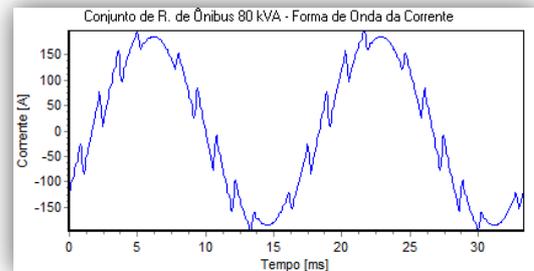


Figura 9: Carregador/ônibus.

As componentes harmônicas das respectivas formas de onda acima mencionadas foram obtidas através de simulações realizadas com a ferramenta computacional "PQF".

4.2. REPRESENTAÇÃO DE CARGAS ELÉTRICAS NÃO VEICULARES AGRUPADAS

A metodologia estabelecida considerou-se como cargas elétricas não veiculares agrupadas ao conjunto de determinados aparelhos e dispositivos elétricos e eletroeletrônicos, de uso geral, cujo regime de funcionamento se dá de forma programada ou aleatória. Os modelos desenvolvidos para estas cargas foram desenvolvidos a partir dos registros de medições obtidos na baixa tensão de transformadores de distribuição conectados em pontos estratégicos do alimentador BUZ 05 conforme estabelecidos nos critérios metodológicos. Para concepção dos modelos representativos do conjunto de cargas típicas destes segmentos de consumidores considerou-se o carregamento dos transformadores de 30% da potência nominal. Estes modelos baseiam-se na recomposição da corrente de carga a partir dos valores médios da corrente fundamental e das componentes harmônicas (ARRILLAGA; BRADLEY; BODGER, 1985) referidos ao período de medição. Face à inviabilidade de execução de medições em um conjunto mais expressivo de transformadores, optou-se por representar as cargas elétricas não veiculares agrupadas para os transformadores remanescentes, por modelos baseados em projeções proporcionais aos modelos preestabelecidos.

4.2.1. REPRESENTAÇÃO DE CARGA DO SETOR COMERCIAL HOTELEIRO

A representação de carga do segmento comercial hoteleiro foi obtida a partir dos resultados das medições realizadas no secundário do transformador de 150 kVA que atende exclusivamente um consumidor hoteleiro. A demanda aparente máxima registrada durante o

período das medições foi de 25,29 kVA. A carga alimentada por este transformador é composta, principalmente, de aparelhos de ar-condicionado, bombas, aquecedores, televisores de LCD, lâmpadas eletrônicas de LED, lâmpadas fluorescentes compactas e computadores. A figura 10, a direita exibe a forma de onda da corrente média de carga do segmento comercial hoteleiro para um carregamento de 30% da potência nominal do transformador acima mencionado.

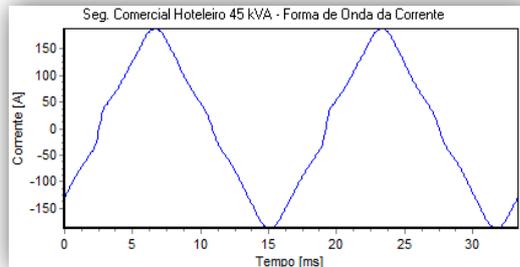


Figura 10: forma de onda do setor comercial hoteleiro.

4.2.2. REPRESENTAÇÃO DE CARGA DO SETOR COMERCIAL EM GERAL

A representação de carga do segmento comercial em geral foi obtida através das medições realizadas no secundário do transformador de 150 kVA que atende lojas comerciais locais. A demanda aparente máxima registrada durante o período das medições foi de 61,40 kVA. A carga alimentada por este transformador é composta, principalmente, de aparelhos de ar-condicionado, lâmpadas eletrônicas de LED, lâmpadas fluorescentes compactas, computadores, impressoras e monitores de LCD, bem como lâmpada de iluminação pública. A figura 11 apresenta a forma de onda da corrente média de carga para um carregamento de 30% da potência nominal do transformador acima mencionado.

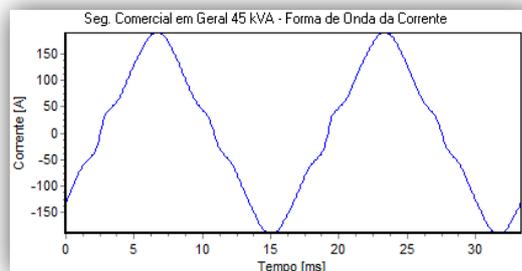


Figura 11: Forma de onda da corrente do setor comercial em geral.

4.2.3. REPRESENTAÇÃO DE CARGA DO SETOR CONDOMINIAL/RESIDENCIAL

A representação de carga do segmento condominial/residencial foi obtida a partir dos resultados das medições realizadas no secundário do transformador de 112,5 kVA que atende consumidores condominiais. A demanda aparente máxima registrada durante o período das medições foi de 18,75 kVA. A carga alimentada por este transformador é composta, principalmente, de aparelhos de ar-condicionado, aquecedores elétricos, televisores de LCD, lâmpadas eletrônicas de LED, lâmpadas fluorescentes compactas, lâmpadas incandescentes, computadores e monitores. A figura 12 apresenta a forma de onda da corrente média de carga do segmento condominial/residencial para um carregamento de 30% da potência nominal do transformador acima mencionado.

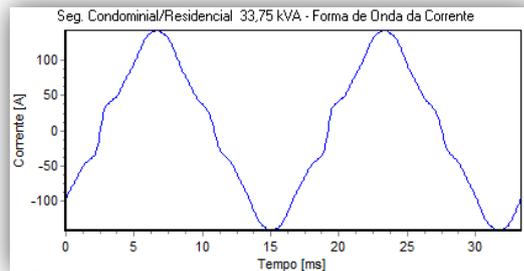


Figura 12: Forma de onda da corrente do setor condominial/residencial.

5. CASOS DE FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICO SIMULADOS

Foram concebidos três casos de simulação de fluxo de potência harmônico que levaram em conta a abrangência da rede elétrica e os modelos representativos das cargas lineares e não lineares, conforme resumido na tabela 1, a seguir.

Tabela 1: Resumo dos casos simulados de fluxo de potência harmônico.

Caso Simulado	Abrangência da Rede Elétrica e Modelos das Cargas Lineares e Não Lineares			
	Representação da Rede Elétrica	Modelagem da Carga Linear		Modelagem da Carga n/ Linear (Circuito BUZ 05)
		Transmissão	Distribuição	
Caso de Referência	Sistemas de transmissão e de distribuição com representação do alimentador BUZ 05	Base de dados do ONS - Caso de fluxo de carga 2015	Transformador (30% de S_{NOM}) Ramal primário (30% da carga)	Composição da infraestrutura de recarga veicular em função de S_{NOM} do transformador
Caso de Abrangência	SE Búzios e sistema de distribuição representado pelo alimentador BUZ 05	---	Transformador (30% de S_{NOM}) Ramal primário (30% da carga)	Composição da infraestrutura de recarga veicular em função de S_{NOM} do transformador
Caso Atual	Sistemas de transmissão e de distribuição com representação do alimentador BUZ 05	Base de dados do ONS - Caso de fluxo de carga 2015	Ramal primário (15% da carga)	Cargas por tipo de setor de consumo Transformador (30% de S_{NOM}) Ramal primário (15% da carga)

5.1. SIMULAÇÃO DO CASO DE REFERÊNCIA

Na simulação do "caso de referência" considerou-se o sistema elétrico de transmissão externo representado pelo equivalente de curto-circuito trifásico no barramento de 138 kV da Subestação Rocha Leão e as infraestruturas de abastecimento veiculares elétricas inseridas no alimentador primário BUZ 05 como fontes de correntes harmônicas.

Estas simulações tiveram por objetivo verificar o comportamento das distorções harmônicas de tensão nos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, decorrente dos processos de recarga de veículos elétricos por meio das infraestruturas de abastecimento conectadas às redes secundárias de distribuição da ENEL na cidade de Armação dos Búzios. Idealizou-se uma penetração hipotética de veículos elétricos na matriz de transporte urbano no município de Armação dos Búzios proporcional ao montante da frota atual de veículos a motor de combustão interna desta cidade (DENATRAN, 2015). Esta referência assumiu-se como conservativa, uma vez que foram adotadas quantidades de veículos elétricos que se

supõem possíveis no período 2020-2030, com penetrações esperadas da ordem de 10% e 15%. A tabela 2 resume a quantidade de veículos representados na simulação, as potências agregadas ao alimentador BUZ 05 por tipo de veículo e os respectivos percentuais de participação.

Tabela 2: Frota de veículos elétricos adicionada ao alimentador BUZ 05

Tipo de Veículo Elétrico	Quantidade	Potência (kVA)	Participação (%)
Carro (recarga normal)	303	1.066,56	79,80
Motoneta	48	3,01	0,23
Bicicleta	75	7,00	0,52
Ônibus	02	160,00	11,97
Carro (recarga rápida)	02	100,00	7,48
Total	430	1.336,57	100,00

A figura 13 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico modelado para simulação de fluxo de potência harmônico do “caso de referência”.

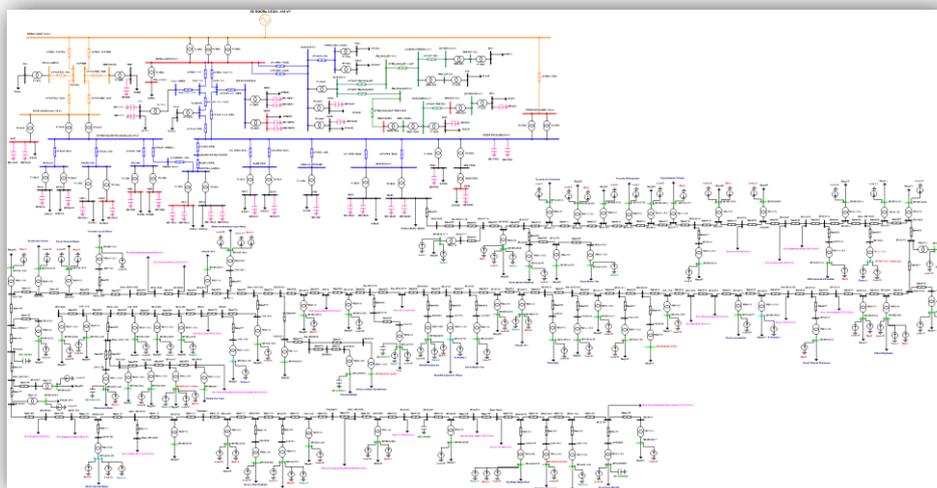


Figura 13: Diagrama unifilar do sistema elétrico do "caso de referência".

5.2. SIMULAÇÃO DO CASO DE ABRANGÊNCIA

Na simulação do "caso de abrangência" considerou-se o sistema elétrico de transmissão representado pelo equivalente de curto-circuito trifásico no barramento de 69 kV da Subestação Búzios e as infraestruturas de abastecimento veiculares elétricas inseridas no alimentador primário BUZ 05 como fontes de correntes harmônicas.

Esta simulação teve por finalidade promover uma análise de sensibilidade no que tange à abrangência da representação do sistema elétrico a ser modelado para análise de distorção harmônica de tensão. Para simulação deste caso o sistema elétrico de distribuição foi representado pelo alimentador primário BUZ 05 da mesma forma que no “caso de referência”, sendo a fonte de tensão representada pelo nível de curto-circuito trifásico (DUGAN; Mc GRANAGHAN; SANTOSO; BEATY, 2004) e pela tensão operacional na barra de 69 kV da Subestação Búzios obtidos também deste caso.

A figura 14 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico modelado para simulação de fluxo de potência harmônico do “caso de abrangência”.

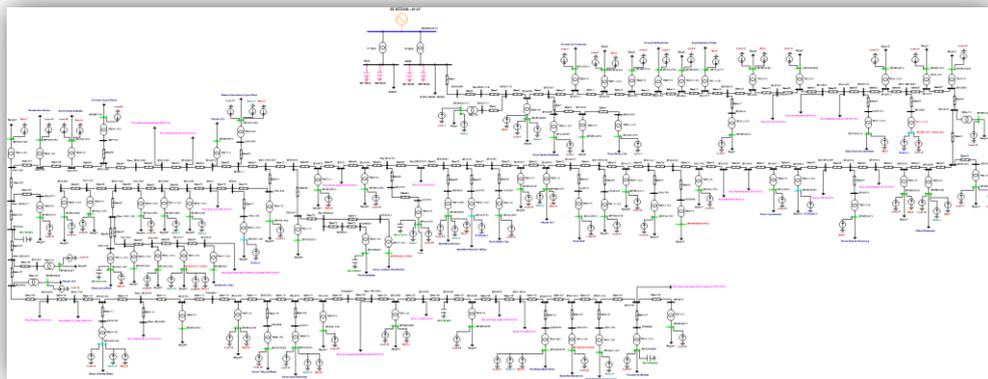


Figura 14: Diagrama unifilar do sistema elétrico do "caso de abrangência".

5.3. SIMULAÇÃO DO CASO ATUAL

Na simulação do "caso atual" considerou-se o sistema elétrico de transmissão externo representado pelo equivalente de curto-circuito trifásico no barramento de 138 kV da Subestação Rocha Leão e as cargas elétricas não veiculares agrupadas inseridas no alimentador primário BUZ 05 como fontes de correntes harmônicas.

Esta simulação teve por finalidade estimar o comportamento dos níveis atuais das distorções harmônicas de tensão diante de cargas lineares e não lineares comumente presentes nas redes secundárias de distribuição. Estas cargas são compostas, principalmente, por aparelhos elétricos e eletroeletrônicos (DUGAN; Mc GRANAGHAN; SANTOSO; BEATY, 2004), cuja utilização pelo público em geral vem crescendo de forma expressiva nestes últimos anos, contribuindo desta maneira para impactar os níveis das distorções harmônicas nas redes secundárias de distribuição.

A figura 15 apresenta o diagrama unifilar do sistema elétrico modelado para simulação de fluxo de potência harmônico do "caso atual".

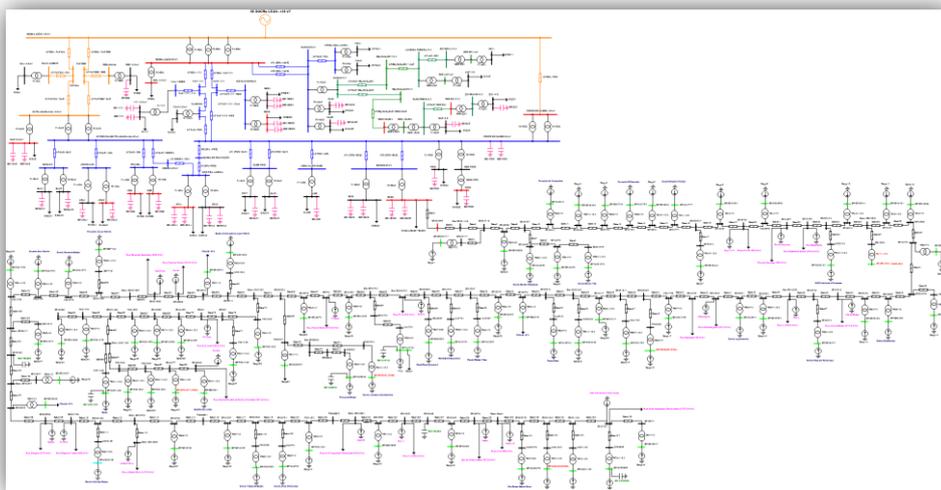


Figura 15: Diagrama unifilar do sistema elétrico do "caso atual".

Neste caso as cargas de baixa tensão associadas aos transformadores de distribuição não modelados foram representadas por cargas equivalentes conectadas diretamente nas barras de derivação dos ramais de média tensão. Estas cargas foram consideradas parte, como carga linear, e parte, como fonte de correntes harmônicas. Este modelo de representação pretende levar em conta o efeito de atenuação das correntes harmônicas injetadas nas redes de

distribuição atribuído a estas cargas não lineares, devido a não representação dos ramais de média tensão e dos transformadores associados a estas cargas.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE FLUXO DE POTÊNCIA HARMÔNICO

As simulações realizadas indicaram que não houve superação dos limites estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2016) para as distorções harmônicas totais de tensão e para as distorções harmônicas individuais de tensão em nenhum ponto do sistema elétrico representado.

No que se refere ao carregamento dos componentes do alimentador BUZ 05, pode-se afirmar que não houve superação de suas capacidades nominais.

Quanto aos bancos de capacitores instalados nas subestações do sistema distribuidor, muito embora não tenha sido observada a superação dos limites de suportabilidade (ABNT, 1998), estima-se uma redução de vida útil de alguns bancos de capacitores em face do elevado nível da tensão operacional do sistema de distribuição.

Com relação às perdas devido à circulação de correntes harmônicas nos componentes da rede elétrica modelada verifica-se que não há acréscimos significativos que possam afetar o desempenho de tais componentes.

Pode-se ainda afirmar que a resposta em frequência das barras do sistema elétrico de transmissão em alta e média tensão independente da representação de cargas lineares nas redes secundárias de distribuição.

No entanto, a resposta em frequência das barras de média tensão depende significativamente do montante de cargas lineares representadas neste nível de tensão, havendo muito pouca influência das cargas lineares existentes nas redes secundárias de distribuição, independentemente do modelo adotado para representação destas cargas.

Com relação à resposta em frequência das barras da rede secundária de distribuição verifica-se que depende do montante das cargas lineares e do modelo adotado para representá-las, sendo significativamente influenciada pela impedância do transformador de distribuição e pela existência de banco de capacitores para correção de fator de potência (DUGAN; Mc GRANAGHAN; SANTOSO; BEATY, 2004).

Quanto à especificidade da análise dos resultados de cada caso simulado, comenta-se a seguir:

6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS "CASOS DE REFERÊNCIA E DE ABRANGÊNCIA"

Pela análise do "caso de referência" verifica-se que a distorção harmônica total de tensão nas barras do sistema de transmissão em alta e média tensão ficou abaixo de 0,06% da tensão fundamental, tendo esta ocorrida na barra de 69 kV da Subestação Búzios.

Nas barras do alimentador primário BUZ 05 o valor da distorção harmônica total de tensão ficou abaixo de 1% da tensão fundamental.

De maneira geral na maioria dos pontos que compõem as redes secundárias de distribuição o valor da distorção harmônica total de tensão ficou abaixo de 1% da tensão fundamental. Excetuam-se os pontos nos quais foram inseridas as infraestruturas de abastecimento de ônibus elétrico e de recarga rápida de carros elétricos, bem com em alguns pontos com banco de capacitores para correção de fator de potência nas quais foram inseridas infraestruturas de recarga de carros elétricos.

O máximo valor da distorção harmônica total de tensão verificado foi de 7,63% da tensão fundamental e se refere aos pontos nos quais foram inseridas as infraestruturas de abastecimento de ônibus elétrico. As figuras 16 e 17 apresentam, respectivamente, a forma de onda da tensão de linha e o histograma das componentes harmônicas da barra conectada à infraestrutura de abastecimento de ônibus elétrico.

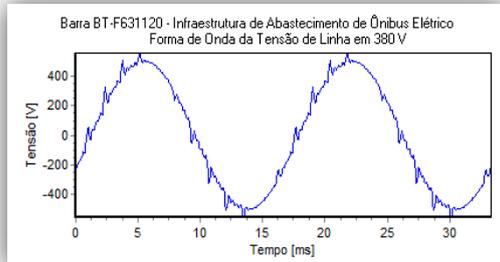


Figura 16. Forma de onda da tensão de linha.

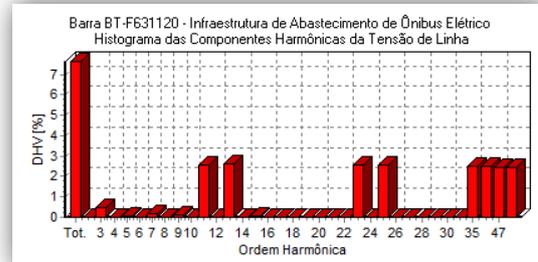


Figura 17. Histograma da tensão de linha.

6.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DO "CASO ATUAL"

Pela análise deste caso verifica-se que a distorção harmônica total de tensão nas barras do sistema de transmissão em alta e média tensão ficou abaixo de 1,61% da tensão fundamental, tendo esta ocorrida na barra de 69 kV da Subestação Búzios.

Nas barras do alimentador BUZ 05 a distorção harmônica total de tensão variou entre 1,61% (início da rede) e 4,42% (final da rede).

De uma maneira geral verifica-se um crescimento do nível da distorção harmônica total nas barras das redes secundárias de distribuição associadas aos transformadores do alimentador BUZ 05, conforme se percorre o alimentador do início ao final do seu percurso. Observa-se uma variação entre o mínimo de 1,74% e o máximo de 5,87% da tensão fundamental, ocorrido em consumidor do segmento comercial hoteleiro, cuja instalação possui banco de capacitores para correção do fator de potência e carga geradora de correntes harmônicas de 33,75 kVA de potência à frequência nominal. As figuras 18 e 19 apresentam, respectivamente, a forma de onda da tensão de linha e o histograma das componentes harmônicas da barra de baixa tensão do consumidor do segmento comercial hoteleiro.

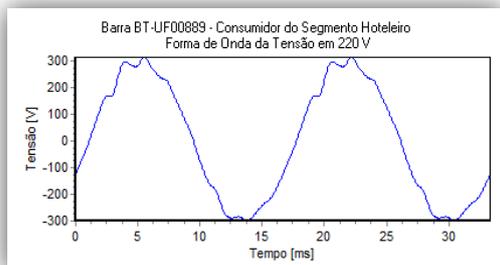


Figura 18. Forma de onda da tensão de linha.

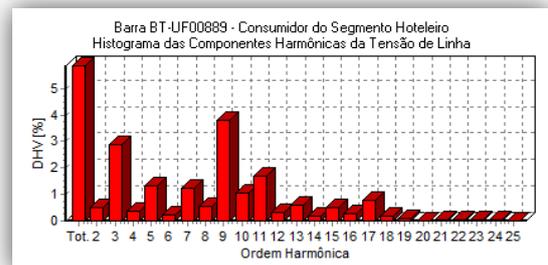


Figura 19. Histograma da tensão de linha.

7. CONCLUSÕES

Os resultados das simulações indicaram que os limites estabelecidos pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica para as distorções harmônicas totais de tensão e para as distorções harmônicas individuais de tensão não foram superados em nenhum ponto do sistema elétrico representado.

A comparação dos resultados gerados pelo “caso de referência” com os do “caso de abrangência” evidencia a não necessidade de representação do sistema de transmissão em

estudos de fluxo de potência harmônico voltados às redes primárias de distribuição de característica radial. Tal afirmativa é consubstanciada pela resposta em frequência dos pontos das redes primárias e secundárias, que permaneceram idênticas nos dois casos simulados.

Pode-se afirmar que as cargas veiculares elétricas colaboram para melhorar o fator de potência (fator de potência de deslocamento) no ponto de conexão com outras cargas, visto que possuem um fator de potência capacitivo próximo da unidade.

Comparando os resultados da simulação do “caso atual” com dados de medições realizadas na saída do alimentador BUZ 05 da Subestação Búzios, conclui-se que os níveis da distorção harmônica de corrente simulado e medido estão compatíveis, indicando uma consistência na representação das cargas atuais como fontes de correntes harmônicas.

Os resultados das simulações de fluxo de potência harmônico evidenciam que as fontes de correntes harmônicas oriundas nas redes secundárias de distribuição pouco ou quase nada colaboram para a distorção harmônica total de tensão na rede primária de distribuição.

No caso inverso, quando a injeção de correntes harmônicas se dá a partir da rede primária de distribuição a influência destas sobre as redes secundárias de distribuição é mais pronunciada.

No que se refere ao carregamento dos componentes da rede de distribuição modelada, pode-se afirmar que não houve qualquer comprometimento deste parâmetro, tendo em vista o baixo carregamento do alimentador BUZ 05 para a condição de carga simulada.

Com base nos critérios de suportabilidade estabelecidos pela NBR 5282/1988 pode-se afirmar que não houve superação dos limites operacionais, tanto para os bancos de capacitores instalados na rede de média tensão como para os bancos de capacitores instalados na baixa tensão de consumidores. No entanto, estima-se com base no critério da tensão de crista uma redução da expectativa de vida da maioria dos bancos de capacitores instalados nas subestações do sistema elétrico de transmissão e distribuição, tendo em vista que são submetidos a uma tensão operacional superior a sua tensão nominal.

Com relação às perdas devido à circulação de correntes harmônicas nos componentes da rede elétrica modelada, verifica-se que não há perdas significativas adicionais que possam afetar o desempenho de tais componentes.

De acordo com os critérios estabelecidos, verifica-se perfeitamente possível uma penetração de veículos elétricos sem afetar a operação segura dos componentes da rede, tanto no que tange ao alimentador BUZ 05 como também em relação à capacidade dos respectivos transformadores de distribuição.

Desta maneira, com base nas simulações de fluxo de potência harmônico descritas para o alimentador BUZ 05 foi elaborada uma estimativa da capacidade dos transformadores de distribuição deste alimentador suprirem a recarga de veículos elétricos sem que haja superação da capacidade dos componentes do alimentador BUZ 05. Os resultados desta análise demonstram que o uso de veículos elétricos em Búzios poderá ser estimulado pela ENEL. Estas simulações permitem, por exemplo, mesmo de forma conservativa, o ingresso imediato de 2100 carros elétricos e cerca de 6 ônibus elétricos na frota do município de Armação de Búzios supondo-se que condições similares de carregamento do alimentador BUZ 05 se reproduzam nos demais, permanecendo ainda folga significativa dos transformadores da Subestação Búzios 2 x 25 MVA / 69 - 13,8 kV.

Por último conclui-se que de uma maneira geral que, cidades turísticas (PECORELLI PERES; KREMPSEK; PESSANHA; PEÇANHA, DE PANTIS, 2016) com o perfil de Búzios se mostram altamente apropriadas para introdução de veículos elétricos uma vez que os

efeitos decorrentes das distorções harmônicas não se apresentam significativos a tal ponto que possam restringir as iniciativas nesta direção. Enfatiza-se que esta conclusão é sustentada pelo fato deste trabalho basear-se em medições reproduzidas através das simulações procurando, assim, e de fato, fazer com que a “Cidade Inteligente Búzios” pudesse ser utilizada no âmbito desta pesquisa como um verdadeiro Laboratório.

Agradecimentos

Os autores manifestam seus agradecimentos à ENEL Distribuição Rio, em especial ao Coordenador de P&D do projeto "Cidade Inteligente Búzios", Weules Fernandes Correia, e toda a sua equipe, bem como à Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL pelo suporte de recursos aos desenvolvimentos apresentados neste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- ABNT.** NBR 5282/1988 “Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1000 V”, junho, 1998.
- ANEEL.** Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 7, janeiro, 2016.
- ARRILLAGA, J.; BRADLEY, D. A. & BODGER, P. S.** Power System Harmonics. John Wiley & Sons Ltd., New York, NY, 1985.
- DENATRAN.** Censo da Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação, abril, 2015.
- DUGAN, R. C.; Mc GRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S. & BEATY, H. W.** Electrical Power Systems Quality, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, NY, 2004.
- ENEL.** Apresentação "Cidade Inteligente Búzios" - A 1ª Cidade Inteligente da América Latina, julho, 2011.
- ENEL.** Apresentação "Cidade Inteligente Búzios", setembro, 2012.
- PEÇANHA, M. L. P.; PECORELLI PERES, L. A. & CALDEIRA, J. F.** Desenvolvimento e Instalação de Painéis de Recarga Inteligentes para Veículos Elétricos no Contexto da Cidade Inteligente Búzios. XVI Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2015.
- PEÇANHA, M. L. P.; PECORELLI PERES, L. A.; PERES, N.; PARTICELLI, F. M. F. & CALDAS, A. C. I. L.** Concepção e Desenvolvimento de Eletropostos para Empresas de Energia Elétrica. In: IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Juiz de Fora, MG, 2011.
- PECORELLI PERES, L. A.; KREMPSE, A. R., PESSANHA, J. F. M.; PEÇANHA, M. L. P. & DE PANTIS, L.** Análise Energética e Ambiental da Utilização de Ônibus Elétrico em Serviços Turísticos. XIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Resende, 2016.
- PECORELLI PERES, L. A.; PEÇANHA, M. L. P.; PESSANHA, J. F. M.; PEREIRA, W. B. & CALDEIRA, J. F.** Development of Recharge Panels for Electric Vehicles at Buzios Smart City. European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress Brussels, Belgium, 2nd - 4 th December, 2015.
- PECORELLI PERES, L. A.; PESSANHA, J. F. M.; PEÇANHA, M. L. P. 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, Stavanger, 2009.
- PREFEITURA DA CIDADE DE ARMAÇÃO DOS BÚZIOS.** Plano Diretor da Cidade de Armação dos Búzios, Lei Complementar nº 13, de 22 de maio de 2006. Armação dos Búzios, 2006.
- QUALITY ENGENHARIA & SISTEMAS.** Manual do programa PQF 7.0, versão comercial 7.0.1.93, 2014.