



Análise de Distorções Harmônicas em Ambientes Residenciais e sua Contribuição Perante a Indústria 4.0

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

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

André Rodrigues Krempser
arodrigues2007@hotmail
UERJ

Resumo: O presente artigo pretende discutir a questão da majoração do perfil da distorção harmônica em ambientes residenciais, devido à disseminação do emprego de sistemas de conversão de energia, nos quais predominam circuitos de eletrônica de potência, empregados como fonte de alimentação, bem como de controle de aparelhos elétricos e eletroeletrônicos e de sistema de iluminação. Desta forma, é possível antever as condições dos sistemas elétricos nos quais as novas tecnologias em desenvolvimento, no futuro próximo, irão se estabelecer. Possibilita-se, assim, prever e precaver as possíveis repercussões sobre as redes e instalações elétricas dos efeitos que causam impactos indesejáveis aos seus componentes. De maneira análoga, guardadas as devidas considerações, estes efeitos decorrentes das distorções harmônicas se farão sentir presentes na

Palavras Chave: Distorção Harmônica - Qualidade da Energia - Casas Inteligentes - Medições de QEE - Domótica



1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, também conhecida como a "4ª Revolução Industrial", caracteriza-se por um conjunto de inovações tecnológicas responsáveis pela fusão do mundo físico, digital e biológico.

Originalmente foi concebida para modernizar e aperfeiçoar o modelo da indústria contemporânea face aos avanços tecnológicos nas áreas de automação e de tecnologia da informação, rumo à "manufatura inteligente".

Trata-se, portanto, de uma mudança de paradigma em relação à maneira como as indústrias nos dias atuais operam seus processos produtivos e que deverá ser implantada de forma gradual dependendo de fatores econômicos e estratégicos de cada país, bem como da capacitação tecnológica das indústrias ali existentes.

O pilar central responsável por interagir estes avanços tecnológicos, tornando a Indústria 4.0 uma realidade, é a denominada *Internet das Coisas* ou "*Internet of Things - IoT*" (FACCIONI FILHO, 2016).

Entre os seus principais objetivos destaca-se a formação de um sistema produtivo físico-cibernético, com intensa digitalização de informações e comunicação direta entre máquinas, produtos e pessoas.

Atualmente, estas mudanças já estão presentes no setor produtivo industrial com a utilização da automação robotizada em sistemas de linhas de montagens e com a conectividade de redes informatizadas para o gerenciamento e controle de processos. Estas ações iniciais evidenciam que os maiores beneficiários com a introdução destas novas tecnologias são realmente as empresas do segmento industrial. De fato, estas tecnologias propiciam uma transformação profunda e inovadora dos processos produtivos, tornando-os cada vez mais eficientes, autônomos e customizáveis, em prol de uma melhoria da competitividade em frente às imposições comerciais do mercado mundial.

As dimensões exatas deste processo em curso devido a estas inovações tecnológicas ocasionarão no plano humano e, por conseguinte no social, é ainda inimaginável, que pese todo o conhecimento já adquirido e o seu elevado nível de desenvolvimento tecnológico.

Além das indústrias, os segmentos comerciais e residenciais também serão contemplados com esta revolução tecnológica. Vislumbra-se que estes segmentos são um campo fértil para aplicações envolvendo a "Internet das Coisas" permitindo a aproximação, cada vez mais, do mundo físico e do digital nas atividades cotidianas.

Em se tratando do segmento residencial, o campo de atuação destes avanços tecnológicos se concretiza através das chamadas "casas inteligentes". Estas iniciativas direcionadas ao ambiente doméstico são denominadas como "*Domótica*", ou seja, a "robótica doméstica" (DE ABREU; VALIM, 2011). Neste caso, o objetivo consiste em promover a integração dos mecanismos automáticos em um espaço, simplificando, isto é, o cotidiano das pessoas, possibilitando satisfazer as necessidades de comunicação, de conforto e de segurança.

Diante deste cenário, prevê-se para as próximas décadas a proliferação em ambiente doméstico do uso de equipamentos de automação e controle, bem como de tecnologia da informação. Neste ambiente, o suprimento e o consumo da energia elétrica são reconhecidos como essenciais para o sucesso da Indústria 4.0 e da Internet das Coisas. Corroborar esta afirmação as projeções realizadas recentemente pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, que prevê nos próximos 15 anos (2017-2032) um crescimento de 76,2% no consumo nacional de energia elétrica da classe residencial, para o cenário de referência considerado. Com isto, o



consumo das residências, neste horizonte, apresenta uma participação no cenário nacional de 30,0%, chegando a um patamar de 235,9 TWh, ficando apenas 2,6% abaixo do consumo da classe industrial (EPE, 2018). Estas projeções da EPE também informam que o crescimento médio anual da classe residencial no período analisado é de 3,8%, demonstrando cabalmente a importância deste segmento para o desenvolvimento estratégico e econômico destas inovações tecnológicas no Brasil. Neste mesmo patamar de consumo de energia elétrica encontra-se a classe comercial com um crescimento médio anual neste período de 3,9%.

Decorre que, com o advento das "redes inteligentes de energia", as concessionárias de energia elétrica estão passando por transformações significativas no que diz respeito às atividades de planejamento, automação e de operação de suas redes de distribuição (BOCCUZZI, 2009). Dentro deste contexto, uma das propostas a ser explorada pelas redes inteligentes de energia vem ao encontro das iniciativas da Domótica, ou seja, que os clientes das concessionárias venham a ter acesso à informação e ao controle do uso dos equipamentos domésticos, tendo em vista o seu gerenciamento para um consumo eficiente da energia elétrica.

Unem-se às estas novas iniciativas tecnológicas as contribuições dadas pelas áreas de eletrificação de transporte rodoviário e de energias renováveis. A agregação de veículos elétricos e de painéis de geração fotovoltaica aos ambientes domésticos se mostra inexorável neste contexto (ROCHA; DOS ANJOS; SILVA E SILVA, 2015). Assim, a chamada classe residencial transforma-se de mero consumidor a "microgerador distribuído" integrado às instalações elétricas da "casa inteligente" além do suprimento normal oriundo da rede elétrica da concessionária de energia (PECORELLI PERES; PEÇANHA; PESSANHA; PEREIRA; CALDEIRA, 2015).

Especificamente no caso dos veículos elétricos poderão ser disponibilizadas as tecnologias conhecidas como "V2H" (Vehicle to Home) e "V2G" (Vehicle To Grid). Desta forma, os veículos elétricos que incluem estas tecnologias não apenas recebem energia para a recarga de suas baterias, mas estão também aptos para fornecerem energia para a residência (V2H) e até mesmo exportarem excedentes para a rede elétrica (V2G).

Por outro lado, considerando que estas inovações tecnológicas vêm se utilizando cada vez mais da eletrônica de potência para conversão de energia, torna-se imperativo conhecer as possíveis repercussões por estas geradas sobre as instalações elétricas e seus componentes, de forma a garantir suas integridades e funcionalidades (LOSADA y GONZALEZ; PIRES; SILVA, 2005).

Entretanto as perspectivas apresentadas são inerentes à temática da *Qualidade da Energia Elétrica* com amparo da literatura e experiência técnica sobre este assunto onde sobressaem os fenômenos de "distorções harmônicas", conforme chama atenção especial (DUGAN; Mc GRANAGHAN; SANTOSO; BEATY, 2004). Tais fenômenos se manifestam nos sistemas de conversão de energia que utilizam a eletrônica de potência, presentes nas redes e instalações elétricas (MOHAN; UNDELAND; ROBINS, 1995). A presença destas distorções nas redes e instalações elétricas pode provocar uma série de efeitos danosos aos componentes e equipamentos conectados (ARRILLAGA; BRADLEY; BODGER, 1985). Sumariza-se a seguir aqueles mais relevantes:

- Mau funcionamento, defeito ou falha dos aparelhos elétricos e eletroeletrônicos devido à presença de distorção harmônica de tensão;
- Sobreaquecimento dos condutores devido à circulação de correntes harmônicas;
- Diminuição da capacidade dos transformadores de distribuição pelo acréscimo de perdas ôhmicas nos enrolamentos;
- Introdução de erros nos sistemas de medição de faturamento de energia;



- Interferências eletromagnéticas em decorrência da circulação de correntes harmônicas pelo neutro das instalações e o aparecimento de tensões indesejáveis entre neutro e terra;
- Operação intempestiva dos dispositivos de proteção;
- Queima e diminuição da vida útil de bancos de capacitores;
- Sobreaquecimento de motores;
- Diminuição da eficiência energética dos aparelhos elétricos e eletroeletrônicos.

Medições realizadas no âmbito do Projeto de P&D ANEEL/ENEL "Cidade Inteligente Búzios" indicaram a presença significativa de distorções harmônicas nas redes secundárias de distribuição (PEÇANHA; PECORELLI PERES, 2017), atestando a necessidade das empresas concessionárias investirem no conhecimento e na avaliação deste assunto, dada a sua importância no desempenho operacional e econômico destas empresas.

Tal a importância do assunto, que motivou a ANEEL estabelecer indicadores para avaliação e tratamento da qualidade da energia elétrica, nos quais as distorções harmônicas se inserem, visando à preservação do padrão da qualidade do produto e dos serviços de energia elétrica oferecidos a todos os consumidores e agentes do setor elétrico (ANEEL, 2016).

O presente artigo pretende discutir a questão da majoração do perfil da distorção harmônica em ambientes residenciais, devido à disseminação do emprego de sistemas de conversão de energia, nos quais predominam circuitos de eletrônica de potência, empregados como fonte de alimentação, bem como de controle de aparelhos elétricos e eletroeletrônicos e de sistema de iluminação (DE ARAÚJO; BELCHIOR, 2011). Desta forma, é possível antever as condições dos sistemas elétricos nos quais as novas tecnologias em desenvolvimento, no futuro próximo, irão se estabelecer (PORTO; DE JESUS, 2007). Possibilita-se, assim, prever e precaver as possíveis repercussões sobre as redes e instalações elétricas dos efeitos que causam impactos indesejáveis aos seus componentes. De maneira análoga, guardadas as devidas considerações, estes efeitos decorrentes das distorções harmônicas se farão sentir presentes na "manufatura do futuro", a Indústria 4.0, considerando a intensificação da utilização da eletrônica de potência nas aplicações industriais.

Para o desenvolvimento do trabalho foi selecionada uma residência típica contendo equipamentos elétricos diversificados e representativos dos citados sistemas de conversão energia e de controle, cujo funcionamento depende de dispositivos de eletrônica de potência. O levantamento das principais características elétricas dos aparelhos elétricos e eletroeletrônicos, bem como dos componentes do sistema de iluminação existentes na residência, permitiu a identificação das possíveis fontes geradoras de correntes harmônicas. Desta maneira, foi elaborado um programa de medições que contemplassem diferentes horários de utilização dos aparelhos elétricos, sem que houvesse mudanças dos hábitos de seus moradores. As conclusões do trabalho são surpreendentes. Demonstram que os mais simples utensílios elétricos domésticos atuais, baseados em meros resistores, apresentam distorções harmônicas significativas, devido aos automatismos introduzidos. Há de fato, assim, a necessidade de prevenção no que tange às perdas ôhmicas detectadas, que comprometem de forma geral, a eficiência energética para uma adequada "Domótica".

2. METODOLOGIA ADOTADA

A metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho considera a conceituação de "Laboratório Vivo", tendo como ambiente de pesquisa as instalações elétricas de uma residência típica e as cargas elétricas ali existentes, compostas principalmente por aparelhos elétricos e eletroeletrônicos. Estas instalações e aparelhos servem de campos de experiências para realização dos ensaios pretendidos, que têm como foco à identificação do perfil de



distorção harmônica nesta residência e a possível repercussão da conjunção destes efeitos sobre a rede de distribuição da concessionária.

Inicialmente, a partir de levantamento in loco, são identificadas as cargas elétricas, suas localizações física e elétrica na residência e as suas principais características técnicas, de forma a possibilitar a estruturação de informações básicas para o desenvolvimento metodológico. De posse das informações supracitadas elaborou-se um programa de execução de medições, visando à obtenção do perfil de distorção harmônica, considerando diferentes configurações da utilização das cargas elétricas da residência e de horários ao longo de um dia típico.

3. CARACTERIZAÇÃO DO SUPRIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1. CONCESSIONÁRIA LOCAL

O suprimento de energia elétrica à residência, objeto da pesquisa, se dá a partir de ramal de ligação trifásico em baixa tensão oriundo de um transformador de potência nominal de 15 kVA, com tensões primárias de 12,0-11,4-10,8-10,2 kV e secundárias de 380/220 V. Este transformador está conectado à rede primária de distribuição de 11,4 kV da concessionária local, atendendo de forma exclusiva a residência em questão. A figura 1 ilustra o transformador acima mencionado e a sua conexão com a rede primária de distribuição.



Figura 1: Transformador de uso exclusivo da residência.

3.2. RESIDÊNCIA

A residência em estudo é suprida a partir da concessionária local através de ramal de ligação aéreo trifásico, a quatro condutores monopolares de 16 mm², em tensão de 380 V (fase/fase) e 220 V (fase/neutro), sendo que o ramal de entrada segue o mesmo padrão do ramal de ligação. A alimentação da residência se dá através de ramal de saída em cabo subterrâneo de formação multipolar de quatro condutores de 16 mm², em esquema de ligação TN-C-S, com separação dos condutores de neutro e de proteção a partir da caixa de passagem até a entrada do Quadro Geral de Distribuição de Carga (QGDC), cuja foto pode ser observada na figura 2 a seguir.



Figura 2: Quadro Geral de Distribuição de Carga.

A residência possui adicionalmente dois quadros de distribuição de carga, QDC I e QDC II, sendo o primeiro alimentado por uma derivação na caixa de passagem acima mencionada e o segundo por uma derivação no disjuntor geral localizado no QGDC. O quadro QDC I é responsável pela alimentação das instalações da área da lavanderia/garagem e o quadro QDC II pela alimentação das dependências do andar superior da residência. Estes quadros são alimentados em esquema de ligação bifásico a três condutores em tensão de 220 V (fase/neutro), com condutor de proteção independente. A carga total instalada da residência é estimada em 64 kW e o consumo de energia médio mensal de 260 kWh. A figura 3 ilustra a distribuição da alimentação de energia elétrica da residência em análise.

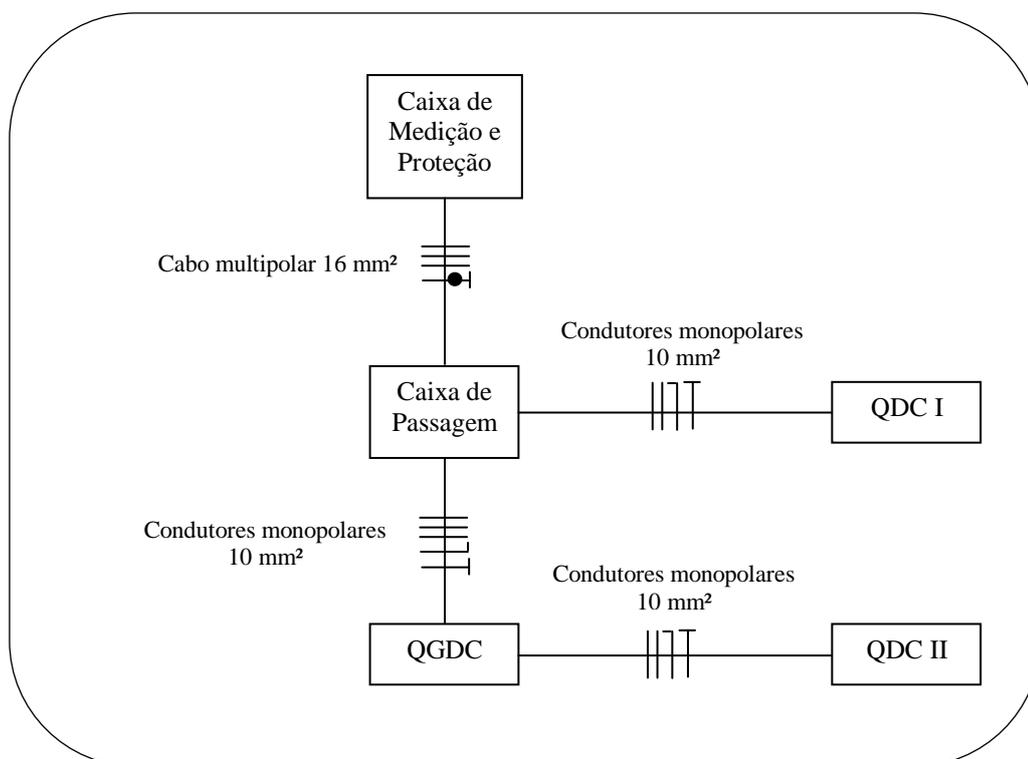


Figura 3: Distribuição da alimentação da residência.

4. LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS APARELHOS E DOS COMPONENTES DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DA RESIDÊNCIA

Este procedimento teve por objetivo identificar as principais características técnicas dos aparelhos elétricos e eletroeletrônicos e dos componentes do sistema de iluminação



presentes na residência. Foram considerados como referência para o levantamento os seguintes parâmetros elétricos:

- Tensão de alimentação;
- Potência ativa ou potência aparente;
- Corrente de carga;
- Fator de potência.

Para obtenção dos parâmetros acima definidos foram utilizados os manuais do usuário e os dados de placa estampados nos aparelhos e componentes do sistema de iluminação. Além da obtenção destes parâmetros, o levantamento teve também a finalidade de identificar a fase da alimentação na qual o aparelho ou componente de iluminação se encontra conectado. Esta informação é importante para realização de futuras simulações computacionais que se pretende promover sobre este assunto.

As tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, as características técnicas dos aparelhos elétricos e eletroeletrônicos e dos componentes de iluminação existentes na residência. Algumas características técnicas não puderam ser obtidas em face de não serem fornecidas pelos seus fabricantes.

Tabela 1: Características técnicas dos aparelhos elétricos e eletroeletrônicos da residência.

Tipo de Carga	Quantidade	Parâmetros Elétricos				Fase de Conexão
		Tensão (V)	Potência (W/VA)	Corrente (A)	FP (%)	
Geladeira	01	220	137,0	1,2	---	B
Fogão (lâmpada)	01	127/220	40,0	---	---	A
Coifa (motor/lâmpadas)	01	220	270/2x50	3,0	---	A
Máquina de lavar	01	220	615,0	2,8	---	C
Sanduícheira	01	220	750,0	---	---	C
Espremedor de frutas	01	220/127	250,0	---	---	A
Liquidificador	01	220	550,0	---	---	A
Cafeteira elétrica	01	220	920,0	---	---	C
Batedeira	01	220	200,0	---	---	C
Ferro elétrico a vapor	01	220	1250,0	5,68	---	A
Aspirador de pó	01	127 (c/trafo)	900,0	---	---	---
Secador de cabelo	01	220	1200,0	---	---	A
Barbeador	01	100-240	6,0 VA	0,028	---	A
Computador desktop	02	100-240	300,0 VA	---	---	C
Conversor notebook	01	100-240	65,0	1,6	---	---
Conversor netbook	01	100-240	40,0	1,1	---	C
Monitor de 24"	01	100-240	90,0	0,5	---	C
Monitor de 19"	01	100-240	50,0	1,0	---	C
Monitor de 15"	01	100-240	85,0	0,7	---	C
Conversor impressora	01	100-240	20,0	0,6	---	C
Conversor impressora	01	100-240	20,0	0,6	---	C
Conversor de rede	01	100-240	2,0	0,25	---	C
Conversor de wifi	01	100-240	2,0	0,3	---	C
No-break	01	220 (170-260)	360,0	---	---	C
No-break	01	115/220	360,0	6,0/3,0	---	C
Estabilizador de tensão	01	220/115	1000,0 VA	---	70	C
TV LCD 42"	01	100-240	200,0	---	---	C
TV LED 40"	01	100-240	90,0	---	---	A
DVD	01	110-240	19,0	---	---	C
Rádio cassete	01	110/220	174,0 VA	---	---	A
Rádio CD cassete	01	120 (c/trafo)	20,0	---	---	A


Tabela 1: Continuação.

Tipo de Carga	Quantidade	Parâmetros Elétricos				Fase de Conexão
		Tensão (V)	Potência (W)	Corrente (A)	FP (%)	
Conversor de satélite	02	100-240	12,0 VA	0,7	---	A+C
Conversor telefone s/fio	01	120 (c/trafo)	8,0	---	---	A
Conversor telefone s/fio	01	100-240	2,2 VA	---	---	C
Conversor de celular	01	100-240	---	0,2	---	---
Conversor de celular	01	100-240	33,0 VA	0,055	---	---
Conversor máq. fotográfica	01	100-240	2,0	0,05	---	---
Chuveiro elétrico	02	220	7700,0	35	---	A+C
Chuveiro elétrico	01	220	5400,0	25	---	B
Sauna elétrica	01	220	9000,0	13,6	---	A+B+C
Torneira elétrica	01	220	5500,0	25	---	C
Aquecedor elétrico	03	220	6400,0	29	---	2A+C
Aquecedor elétrico	01	220	4500,0	20	---	B
Portão motorizado	01	220	1/2 hp	---	---	B

Tabela 2: Característica técnicas dos componentes de iluminação da residência.

Tipo de Carga	Quantidade	Parâmetros Elétricos				Fase de Conexão
		Tensão (V)	Potência (W)	Corrente (A)	FP (%)	
Lâmpada incandescente	08	220	25,0	---	---	C
Lâmpada incandescente	03	220	40,0	---	---	B
Lâmpada incandescente	11	220	60,0	---	---	C
Lâmpada fluorescente	01	220	6,0	---	---	B
Lâmpada compacta	01	220-240	5,0	0,041	= 55	C
Lâmpada compacta	03	220-240	8,0	0,065	≥ 50	C
Lâmpada compacta	02	220-240	11,0	0,100	> 55	C
Lâmpada compacta	01	100-240	15,0	0,110	≥ 50	B
Lâmpada compacta	03	220-240	15,0	0,109	= 55	2B+C
Lâmpada compacta	02	220-240	15,0	0,130	---	C
Lâmpada compacta	01	230	15,0	---	---	B
Lâmpada compacta	04	220-240	16,0	0,125	> 55	2B+2C
Lâmpada compacta	02	220-240	20,0	0,155	≥ 50	C
Lâmpada compacta	01	220-240	25,0	0,182	= 55	C
Lâmpada halógena	02	230	35,0	---	---	C
Lâmpada dicroica	05	230	50,0	---	---	C
Lâmpada dicroica	01	220	50,0	---	---	C
Lâmpada LED	12	100-240	6,0	---	≥ 70	2A+10C
Lâmpada LED	02	100-240	7,0	---	> 40	C
Lâmpada LED	01	100-240	9,0	---	≥ 70	C
Lâmpada LED	03	100-240	9,9	---	≥ 70	B+2C
Lâmpada LED	02	100-240	12,0	---	≥ 70	C
Lâmpada LED	01	100-240	240,0	---	≥ 70	C

5. IDENTIFICAÇÃO DOS APARELHOS E COMPONENTES DE ILUMINAÇÃO DE CARACTERÍSTICA NÃO LINEAR

Com base no levantamento realizado foram identificados os principais aparelhos e componentes de iluminação de característica não linear, os quais são listados a seguir:

- Chuveiros elétricos com controle eletrônico de temperatura;
- Computadores e periféricos alimentados por no-break e estabilizador de tensão;
- Televisores de LCD e de LED;
- Conversores em geral para recarga de aparelhos com baterias;

- Lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) e lâmpadas LED;
- Eletrodomésticos diversos: máquina de lavar, espremedor, liquidificador etc.

Os gráficos da forma de onda da corrente e o respectivo histograma das componentes harmônicas de algumas das cargas elétricas acima citadas são apresentados nas figuras 4 a 11.



Figura 4: Forma de onda da corrente do chuveiro.

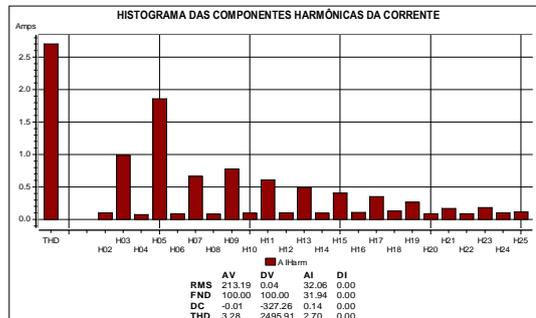


Figura 5: Histograma das componentes harmônicas.

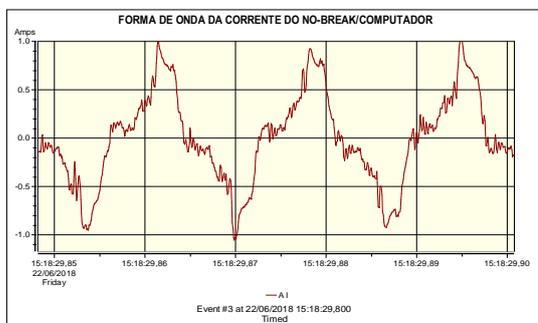


Figura 6: Forma de onda da corrente do no-break.

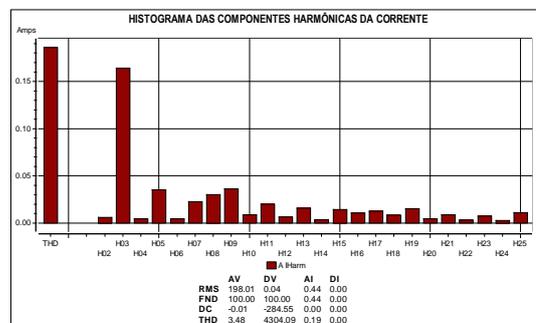


Figura 7: Histograma das componentes harmônicas.

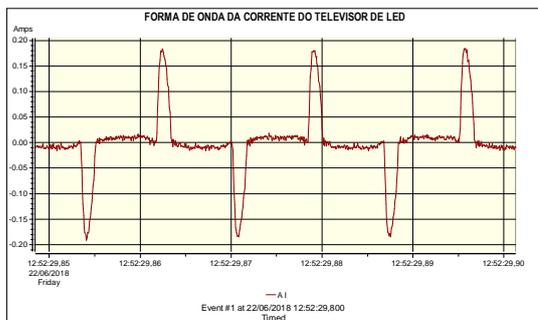


Figura 8: Forma de onda da corrente do televisor LED.

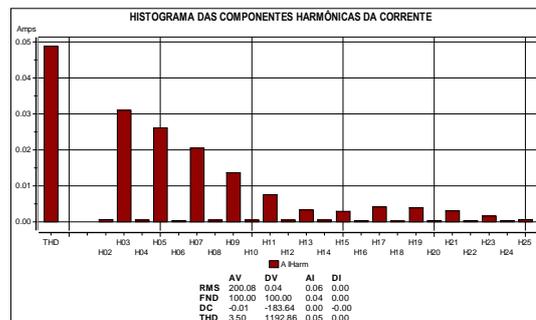


Figura 9: Histograma das componentes harmônicas.



Figura 10: Forma de onda da lâmpada LED.

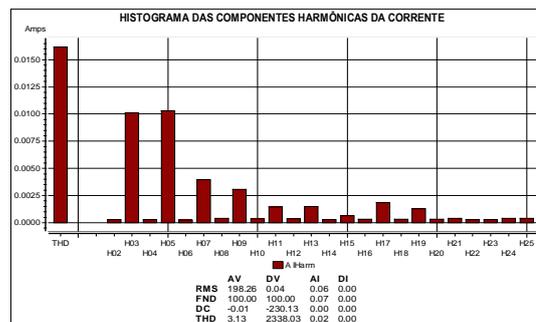


Figura 11: Histograma das componentes harmônicas.



6. INSTRUMENTOS E ACESSÓRIOS UTILIZADOS NAS MEDIÇÕES

Para realização das medições utilizou-se os seguintes instrumentos e acessórios:

Instrumentos

- Analisador de QEE portátil DRANETZ, modelo Power Visa;
- Volt-ampérmetro alicate True RMS IDEAL, modelo 61-766;

Acessórios

- Garra de corrente BMI, modelo CT-600, faixa de corrente: 30-600 A, faixa de frequência: 30 Hz - 3 kHz;
- Garras de corrente DRANETZ, modelo TR2510A, faixa de corrente: 1-10 A, faixa de frequência: 40 Hz - 5 kHz.

As figuras 12 a 15 apresentam fotos dos instrumentos e dos acessórios utilizados nas medições.



Figura 12: Analisador de QEE Power Visa.



Figura 13: Volt-ampérmetro alicate 61-766.



Figura 14: Garra de corrente CT-600.



Figura 15: Garra de corrente TR2510A.

7. ELABORAÇÃO DO PROGRAMA DE EXECUÇÃO DAS MEDIÇÕES

Para o levantamento do perfil da distorção harmônica da residência foi elaborado um programa para execução das medições que considerou os horários distintos de utilização das cargas elétricas não lineares instaladas na residência, sem, contudo, interferir na rotina de seus moradores. A adoção deste procedimento permitiu representar de maneira fidedigna o consumo de energia e a demanda da residência.

O planejamento das medições considerou-se também a distribuição das cargas pelas fases da instalação elétrica da residência, de forma a identificar o carregamento de cada fase e, assim, definir o transdutor de corrente adequado à medição.



Para execução das medições considerou-se um dia típico de seus moradores, dividido em três períodos horários, conforme a seguir:

- Período da manhã: entre 06h00min e 10h00min
- Período da tarde: entre 13h30min e 17h00min
- Período da noite: entre 18h00min e 23h00min

7.1. LOCAL DE EXECUÇÃO DAS MEDIÇÕES

Definiu-se como local de execução das medições a entrada de alimentação no Quadro Geral de Distribuição de Carga. Muito embora este local não seja o ponto de entrega de energia da concessionária, considera-se na prática o mesmo ponto, dado que são eletricamente próximos.

As figuras 16 e 17 apresentam fotos da conexão da instrumentação e das garras de corrente no quadro de distribuição QGDC.

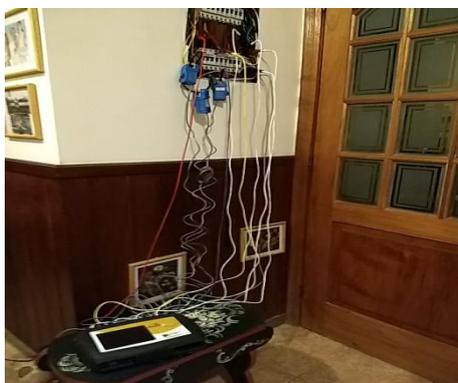


Figura 16: Conexão do registrador no QGDC.

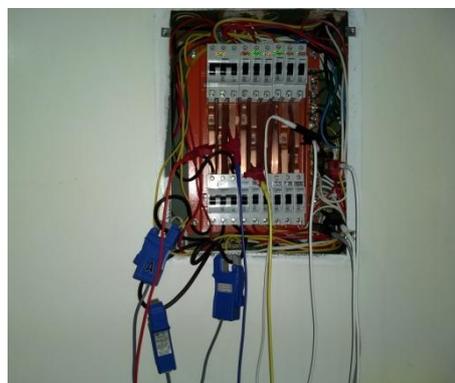


Figura 17: Detalhe da conexão das garras.

Complementarmente às medições a serem executadas no QGDC foram previstas medições nos quadros de distribuição QDC I e QDC II. Estas medições visaram obter o perfil da distorção harmônica de corrente das cargas elétricas supridas por estes quadros de distribuição.

As figuras 18 e 19 apresentam fotos da conexão da instrumentação nos quadros acima citados.



Figura 18: Medição no quadro QDC I.



Figura 19: Medição no quadro QDC II.

7.2. MEDIÇÃO DO NÍVEL DE DISTORÇÃO HARMÔNICA PREEXISTENTE NA CONCESSIONÁRIA

Este procedimento visou identificar o nível da distorção harmônica total de tensão (DTT ou THD) preexistente na rede secundária da concessionária, sem a contribuição das cargas elétricas da residência.

As figuras 20 e 21 reproduzem, respectivamente, a forma de onda da tensão de fase e o correspondente histograma das componentes harmônicas, contendo também, entre outras informações, o valor da distorção harmônica total de cada fase da tensão de fornecimento.

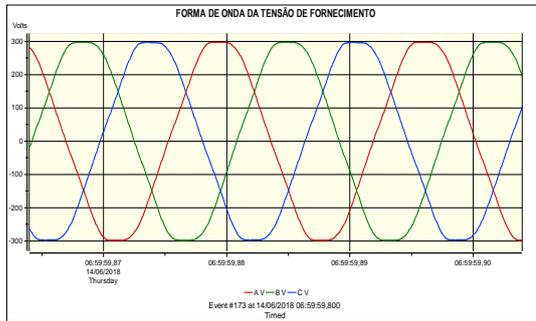


Figura 20: forma de onda da tensão de fornecimento.

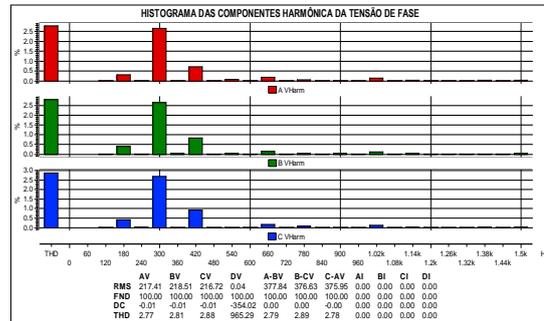


Figura 21: Histograma das harmônicas de tensão.

Observando os valores numéricos constantes na tabela da figura 21 verifica-se que a distorção harmônica total de tensão, sem participação das cargas elétricas da residência, situa-se em torno de 2,8% da componente fundamental.

8. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

Os resultados das medições são apresentados em forma de gráficos do perfil de variação das principais grandezas elétricas e das formas de onda das tensões de fase e das correntes de linha registradas durante os períodos programados para execução dos referidos ensaios. Nestes gráficos também se destacam em forma de tabela os valores estatísticos das variações a que estão sujeitas estas grandezas ao longo do intervalo de registro da medição. Assim, são apresentados os valores mínimo, máximo, médio e a probabilidade cumulativa de 95% de não superação do valor destacado como referência.

8.1. GRANDEZAS ELÉTRICAS REGISTRADAS

Foram registradas as seguintes grandezas elétricas:

- Tensão de fornecimento (tensão entre a fase e o neutro);
- Corrente de linha (corrente absorvida pela carga da residência);
- Potências ativa, reativa e aparente totais;
- Fator de potência total;
- Distorção harmônica total da tensão de fase;
- Distorção harmônica total da corrente de linha;
- Componentes harmônicas da tensão e da corrente.

As figuras 22 a 29 apresentam os gráficos do perfil de variação das grandezas acima citadas para o período de medição mais representativo.

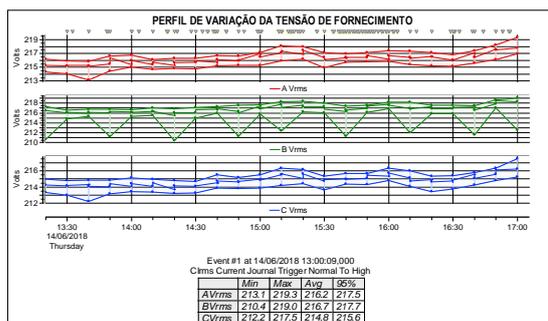


Figura 22: Perfil da tensão de fase.

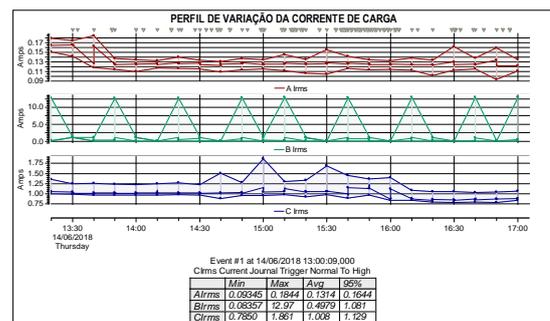


Figura 23: Perfil da corrente de linha.

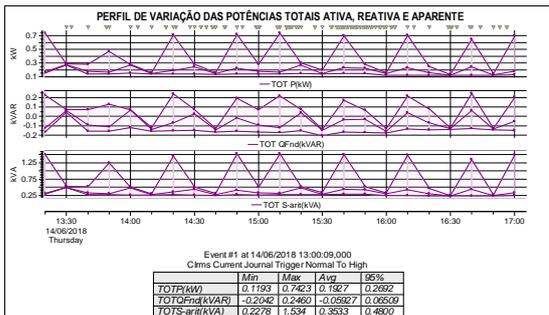


Figura 24: Perfil das potências totais.

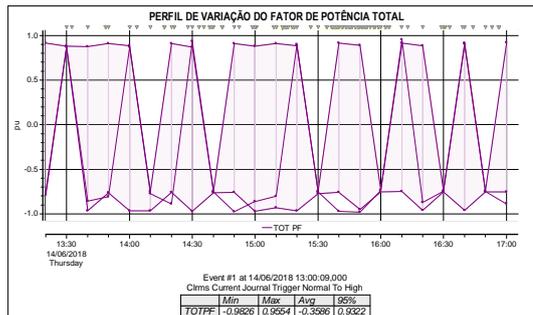


Figura 25: Perfil do fator de potência total.

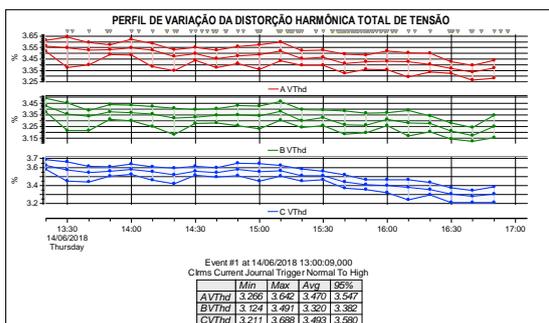


Figura 26: Perfil da distorção total de tensão.

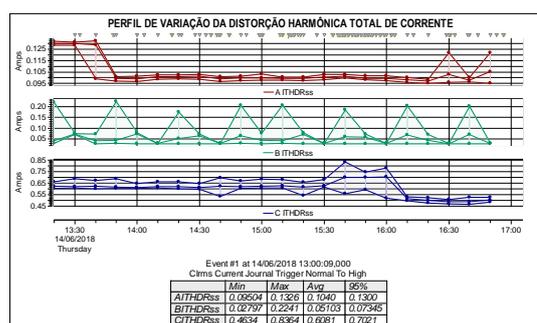


Figura 27: Perfil da distorção total de corrente.

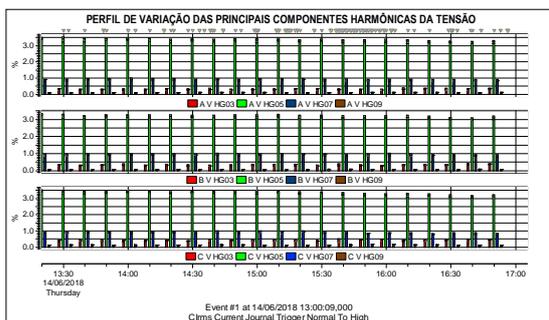


Figura 28: Perfil das harmônicas de tensão.

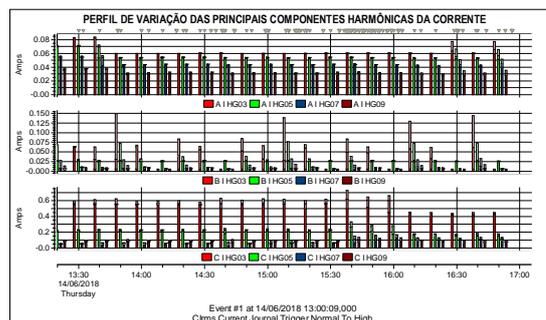


Figura 29: Perfil das harmônicas de corrente.

8.2. FORMAS DE ONDA REGISTRADAS DURANTE OS PERÍODOS DE MEDIÇÃO

As figuras 30 a 35 apresentam algumas formas de onda registradas durante o período das medições. Estas formas de onda foram obtidas a partir de registros de medição realizadas no quadro de distribuição QGDC e representam a operação conjunta das cargas elétricas da residência.

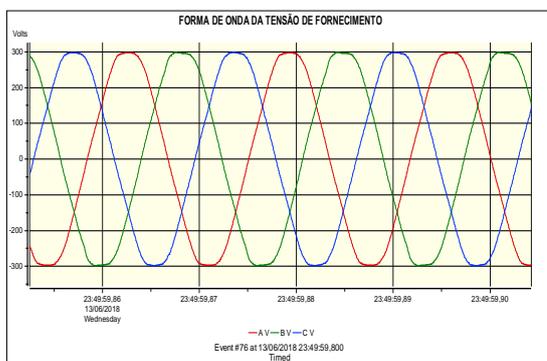


Figura 30: Forma de onda da tensão de fase.

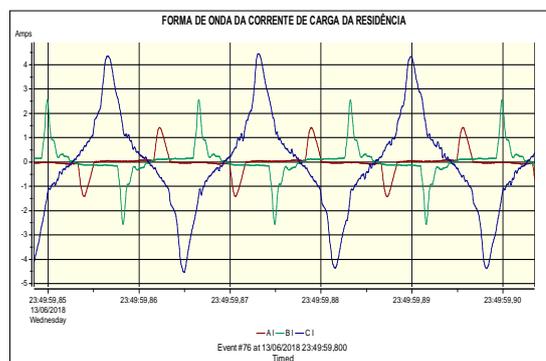


Figura 31: Forma de onda da corrente de linha.

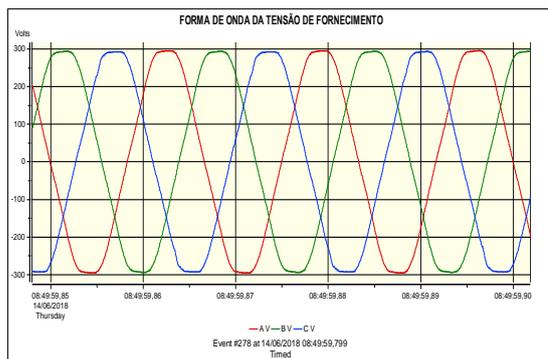


Figura 32: Forma de onda da tensão de fase.

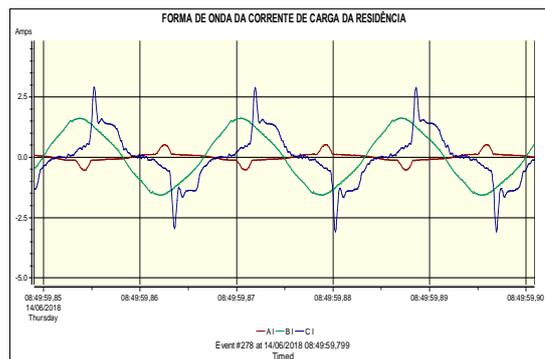


Figura 33: Forma de onda da corrente de linha.

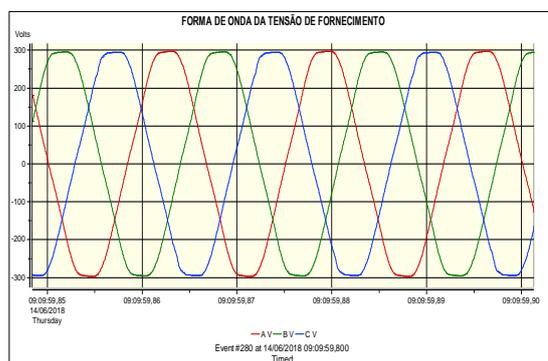


Figura 34: Forma de onda da tensão de fase.

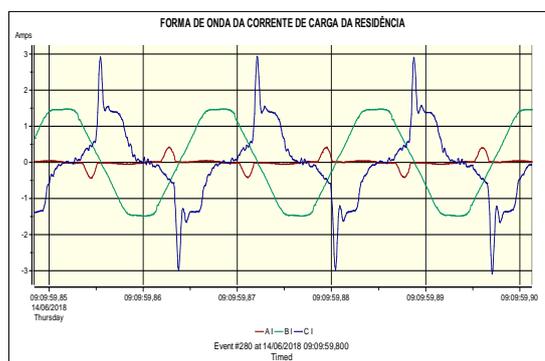


Figura 35: Forma de onda da corrente de linha.

9. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

A distorção harmônica total de tensão máxima registrada durante o período de medição foi de 3,69% e, portanto, encontra-se abaixo do limite preconizado pelo PRODIST (ANEEL, 2016) fixado em 10% da tensão fundamental.

As principais componentes harmônicas presentes na tensão de fornecimento à residência são as harmônicas de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordem. Entre estas, a mais significativa é a harmônica de 5^a ordem, que alcançou um valor máximo de 3,52% da tensão fundamental.

Análise da tensão de fornecimento da concessionária local indicou a preexistência de um nível de distorção harmônica em torno de 2,8% da tensão fundamental, sem que haja, neste caso, contribuição das correntes harmônicas geradas cargas elétricas da residência.

A máxima distorção harmônica total de corrente registrada durante o período de medição foi de 0,84 A, correspondendo 62,43 % da corrente de carga.

As principais componentes harmônicas presentes na corrente de carga da residência são as harmônicas de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordem. Entre estas componentes, a mais significativa é a harmônica de 3^a ordem, que alcançou um valor máximo de 0,73 A, correspondendo a 50,07% da corrente de carga.

Os registros das medições indicaram a presença da circulação de correntes harmônicas de sequência zero no condutor neutro, principalmente da harmônica de 3^a ordem.

A máxima distorção harmônica total de tensão registrada entre o condutor neutro e o condutor de proteção foi da ordem de 0,0236 V, sendo a tensão entre estes condutores de 0,239 V.



10. CONCLUSÕES

Os resultados das medições realizadas constataam a presença de correntes harmônicas em ambientes domésticos. Verifica-se, portanto, a coerência com as expectativas da literatura técnica a respeito deste assunto em decorrência da crescente utilização de aparelhos elétricos e eletroeletrônicos de característica não linear.

Consta-se também que os ambientes residenciais se mostram altamente suscetíveis à presença de utensílios que utilizam as chamadas fontes chaveadas, sejam para conversão de energia na alimentação de aparelhos eletroeletrônicos, assim como para uso em dispositivos de iluminação.

As medições realizadas indicam que o nível da distorção harmônica total de tensão no ponto de entrega de energia se encontra abaixo do limite recomendado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

Os resultados das medições também indicaram a preexistência de um nível de distorção harmônica de tensão na rede secundária de distribuição da concessionária, sem que se possa atribuí-lo às correntes harmônicas injetadas pelas cargas elétricas não lineares existentes na residência.

Com base na constatação acima mencionada, acredita-se que este nível de distorção harmônica preexistente na tensão de fornecimento seja decorrente da circulação de correntes harmônicas na rede primária de distribuição, não se descartando também a possibilidade de contribuição do próprio transformador que supre a residência.

A análise dos registros de medição demonstra que as correntes harmônicas geradas pelas cargas elétricas não lineares presentes na residência estudada, contribuem muito pouco para a distorção harmônica total de tensão no ponto de entrega de energia.

No entanto, com o advento de novas tecnologias se agregando às chamadas casas inteligentes, como os veículos elétricos e painéis de geração fotovoltaica, há de se esperar o surgimento de fontes adicionais de geração de distorção harmônica em ambientes domésticos.

Considerando que a circulação das correntes harmônicas pelo neutro corrobora para o surgimento de tensões entre o condutor neutro e o condutor de proteção, recomenda-se que esta questão seja avaliada oportunamente.

Face aos desafios tecnológicos identificados é recomendável que as empresas concessionárias de energia elétrica possam contar com recursos de gestão específicos para atender às novas demandas em termos do fornecimento de energia elétrica. Estas constatações estão alinhadas aos estudos em curso do agente regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, tendo em vista o ingresso de regulamentação da tarifa binômica para os consumidores do Grupo B, onde se enquadram os clientes residenciais. Assim, caso esta norma seja aprovada, poderá ter como desdobramento um tratamento diferenciado que inclua, direta ou indiretamente, a cobrança de tarifa de consumo de excedente de reativo em baixa tensão. Diante desta perspectiva, é bem provável que as empresas concessionárias sejam solicitadas a envidarem esforços para captar e compensar os efeitos deletérios das distorções harmônicas.

Com base nas informações e características dos aparelhos domésticos levantadas neste artigo considera-se importante e recomendável introduzir simulações computacionais que caracterizem situações e configurações futuras, incorporando também a este trabalho a análise de perdas ôhmicas em componentes das redes e instalações elétricas. Desta forma, torna-se possível estabelecer previsões a médio e longo prazo da problemática analisada.



É possível se prever que a questão das distorções harmônicas e seus efeitos, cada vez mais se farão sentir presentes no ambiente de uso de equipamentos elétricos. Sejam eles industriais, em suas linhas de produção, bem como nas áreas comerciais e residenciais do futuro, como demonstrado para este último, devido à intensificação da utilização da eletrônica de potência.

11. REFERÊNCIAS

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 10, janeiro, 2016.

ARRILLAGA, J.; BRADLEY, D. A. & BODGER, P. S. Power System Harmonics. John Wiley & Sons Ltd., New York, NY, 1985.

BOCCUZZI, C. V. Sistemas de Distribuição Inteligentes (Smart Grid) e Veículos Elétricos, I Seminário Brasileiro Veículos Elétricos & Rede Elétrica – VER 2009, Rio de Janeiro, Brasil, junho, 2009.

DE ABREU, E. R. & VALIM, P. R. O. Domótica: Controle de Automação Residencial Utilizando Celulares com Bluetooth. VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Resende, RJ, outubro, 2011.

DE ARAÚJO, J. E. & BELCHIOR, F. N. Lâmpadas Fluorescentes Compactas na Iluminação Residencial. IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Juiz de Fora, MG, agosto, 2011.

DUGAN, R. C.; Mc GRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S. & BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, NY, 2004.

EPE. Publicação Caderno de Demanda de Eletricidade, Ano 1, Nº1, abril, 2018.

FACCIONI FILHO, M. Internet das Coisas. Publicação UNISUL VIRTUAL, Palhoça, SC, 2016.

LOSADA y GONZALEZ, M.; PIRES, I. A. & SILVA, S. R. Correntes Harmônicas em Aparelhos Eletrodomésticos. VI Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Belém, PA, agosto, 2005.

MOHAN, NED; UNDELAND, T. M. & ROBINS, W. P. Power Electronics Converters, Applications and Design. John Wley & SONS. INC., New York, Second Edition, 1995, ISBN 0471-58408-8.

PEÇANHA, M. L. P. & PECORELLI PERES, L. A. Comportamento e Gestão das Componentes Harmônicas nas Redes de Distribuição - Case da Inserção de Veículos Elétricos na Cidade Inteligente Búzios. XIV Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Resende, RJ, outubro, 2017.

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.

PORTO, D. S. & DE JESUS, N. C. Levantamento do Perfil Harmônico em Redes Secundárias de Distribuição. VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. Santos, SP, agosto, 2007.

ROCHA, P. E. D.; DOS ANJOS, C. F. N. A. & SILVA E SILVA, C. G. Recarga Veicular Fotovoltaica Residencial Integrada à Rede de Distribuição. 11º Salão Latino Americano de Veículos Elétricos, Componentes e Novas Tecnologias. São Paulo, SP, agosto, 2015.