XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Eduardo Augusto Cardoso Esteves	Centrais Elétricas do Pará S/A	eduardo.esteves@redenergia.com
Luiz Afonso Duarte Lisboa	Centrais Elétricas do Pará S/A	luiz.lisboa@redenergia.com
Kleber Lopes Barros	Centrais Elétricas do Pará S/A	kleber.barros@redenergia.com
Maria Emilia L. Tostes	Universidade Federal do Pará	tostes@ufpa.br
Ubiratan Holanda Bezerra	Universidade Federal do Pará	bira@ufpa.br
Joao Paulo Abreu Vieira	Universidade Federal do Pará	jpavieira@ufpa.br
Thiago M. Soares	Universidade Federal do Pará	thiago_motasoares@yahoo.com.br

Monitoração e Análise da Qualidade de Energia Elétrica - Estudo de Caso na Subestação Itupiranga, do Sistema Elétrico da CELPA

Palavras-chave

Campanha de Medição
Harmônicos
PRODIST - Módulo 8
Registradores de Energia

Resumo

Este artigo apresenta uma análise da qualidade de energia elétrica (QEE) realizada no sistema elétrico de alta tensão da Subestação Itupiranga, pertencente ao sistema das Centrais Elétricas do Pará S/A (CELPA). A análise tem como objetivo identificar os fenômenos de QEE que estão impactando no desempenho dessa subestação, tais como: anormalidades (aquecimento e zumbidos) em transformador de força de 138 kV/13,8 kV, além de rompimento de condutores de MT. Para a realização da análise, houve necessidade de se executar campanha de medição em vários pontos do sistema elétrico em estudo, constando de medições expeditas e ao longo de uma semana, onde foram obtidos os registros de distorções harmônicas, de tensão e corrente, e em seguida realizar simulações de propagação de harmônica utilizando o software ATP, cujos resultados foram validados pelos registros obtidos na campanha de medição. Dessa forma, foi possível identificar alguns problemas que estão afetando a QEE, tais como níveis elevados de distorção harmônica de corrente e de tensão.

1. Introdução

A qualidade da energia elétrica (QEE) é um assunto que vem despertando interesse e atenção de fornecedores e de consumidores de energia elétrica [1]-[2]. Tal preocupação decorre em parte da

obrigatoriedade de observação de normas e legislação que regem o mercado de energia elétrica. Com a vigência do PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia - Módulo 8, que trata exclusivamente dos indicadores da qualidade da energia elétrica (QEE), novos requisitos serão exigidos em futuro muito próximo [3]. Deste modo, cria-se uma pressão positiva nas empresas, no sentido de se prepararem para atender a esses novos padrões de qualidade, especificamente com relação ao comportamento da tensão elétrica em regime permanente, a avaliação do conteúdo harmônico da tensão, o desequilíbrio de tensão, a flutuação de tensão, e as variações de tensão de curta duração.Com o cenário cada vez mais competitivo e desregulamentado do setor elétrico brasileiro, as empresas concessionárias dos serviços de distribuição de energia são demandadas a implementar metodologias para o monitoramento sistemático da operação de seus sistemas, com o intuito de obter informações atualizadas sobre as condições operacionais, para avaliar continuamente se os indicadores de qualidade quanto ao fornecimento de energia elétrica a seus consumidores, estão dentro dos padrões e requisitos recomendados pela ANEEL. O aumento considerável da demanda do sistema de sub transmissão da CELPA, com o incremento de novas cargas residenciais, industriais e cargas monofásicas do “Programa Luz para Todos” (PLT), do Governo Federal, acompanhadas do implemento de cargas não lineares, principalmente no âmbito industrial, tem trazido grandes contribuições para as manifestações de fenômenos de QEE.Dentro deste contexto, o presente artigo se propõe a mostrar uma análise de ocorrências na SE Itupiranga (138 kV/34,5kV/13,8 kV), pertencente ao sistema de distribuição da CELPA. A análise foi executada a partir de resultados de campanha de medição, registros oscilográficos e simulações validadas pelos resultados obtidos na campanha de medição, com o intuito de mitigar os problemas encontrados. As ocorrências detectadas se originaram a partir de fenômenos de qualidade de energia elétrica, cujos efeitos são nocivos para as subestações do sistema, gerando perturbações, as quais comprometem a vida útil dos equipamentos, além de ocasionar cortes parciais ou totais de carga.

2. Desenvolvimento

2.1 Descrição do sistema elétrico em estudo

A subestação Itupiranga, conforme mostrado no diagrama unifilar básico da figura 1, faz parte do sistema de distribuição da SE Itacaiúnas, sendo concebida com arranjo de barramento simples em seus circuitos de alta tensão (setor de 138 kV) e média tensão (setores de 13,8 kV e 34,5 kV). Os dois setores de média tensão são compostos por uma entrada de Linha de Distribuição (LD), um transformador abaixador (138 kV/13,8 kV), três alimentadores em 13,8 kV, um transformador elevador (34,5 kV/13,8 kV) e dois alimentadores em 34,5 kV. O barramento de 138 kV é alimentado pela LD Itacaiúnas-Itupiranga1 (LD ITC-ITU-1) e supre o setor de 13,8 kV, através de um transformador denominado de T1, que tem as seguintes características nominais: Potência: 7,5 / 9,3 MVA (ONAN / ONAF); Relação: 138 / 13,8 kV e; Conexão: Dyn1 (delta – estrela aterrada). No barramento de 13,8 kV, são conectados três alimentadores, denominados de UI-1, UI-2 e UI-3, que suprem cargas residenciais e comerciais da cidade de Itupiranga. Nesse barramento, é conectado um bay de transformador elevador denominado de T3, para suprir o setor de 34,5 kV. O transformador T3 tem as seguintes características nominais: Potência: 5/6,25 MVA (ONAN/ONAF); Relação: 34,5 kV/13,8 kV e; Conexão: YNynd1 (estrela aterrada – estrela aterrada - delta). No barramento de 34,5 kV são conectados dois alimentadores denominados de UI-5 e UI-6, que suprem cargas rurais e fazem parte do Programa Luz para Todos.

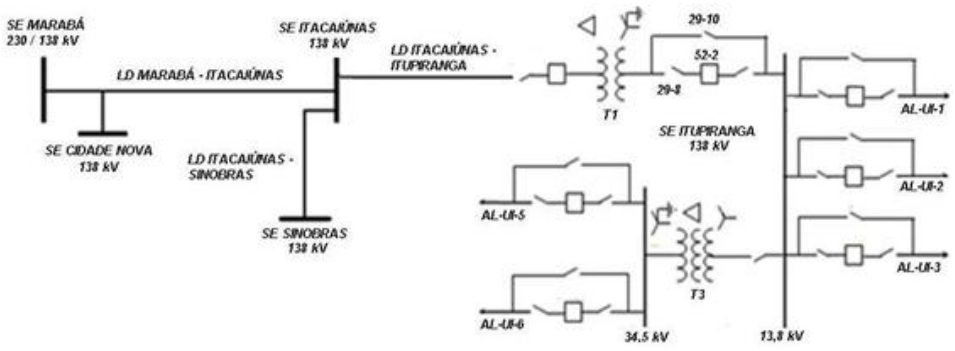


Figura 1 – Sistema elétrico em estudo, destacando-se o diagrama unifilar básico da SE Itupiranga.

2.2 Ocorrências verificadas

As ocorrências mais verificadas na SE Itupiranga, pela concessionária CELPA, foram a "emissão de ruídos estranhos (zumbidos) pelo transformador nº 1 (T1), de maneira intermitente, como se estivesse obtendo rejeição e entrada de grandes blocos de cargas" e "rompimento de cabos condutores (336,4 MCM CAA) de 13,8 kV", além de aquecimento em transformadores. Relativamente aos zumbidos emanados do T1, supôs-se que poderia haver relação com efeitos de harmônicas, em razão de possíveis influências oriundas da SE Itacaiúnas e também de harmônicos gerados nos alimentadores que alimentam cargas monofásicas. Relativamente aos cabos condutores, estes fazem a interligação aérea interna na SE, entre o disjuntor 52-2 com as chaves seccionadoras 29-8 e 29-10. Esse condutores se encontravam encapsulados através de algumas camadas de fita auto-fusão, desde as buchas do religador 52-2 até certa parte do condutor. O rompimento envolveu os três condutores entre o disjuntor 52-2 e a chave seccionadora 29-8 e deu-se no ponto da fronteira da parte encapsulada com a parte nua do condutor, conforme mostrado nas Figuras 2. Para se justificar essa ocorrência, foram verificadas algumas possibilidades, que também recaíram em suspeitas sobre propagação de harmônicos, pois além dos condutores que romperam, os outros condutores localizados entre o disjuntor 52-2 e a chave seccionadora 29-10, já apresentavam evidências de que iriam romper, devido o desgaste profundo dos seus tentos conforme mostrado na figura 2. Portanto, houve necessidade que se aprofundasse o estudo, de tal forma a identificar as prováveis causas para esses problemas, iniciando-se pela campanha de medição.

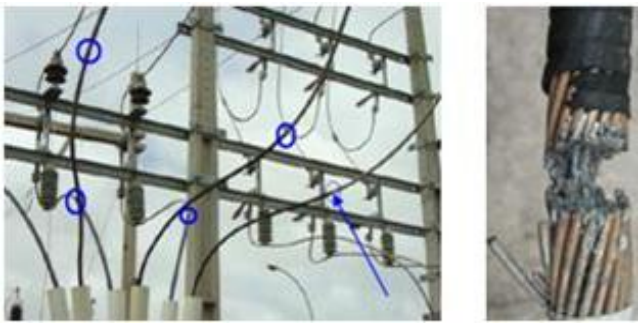


Figura 2 – Fronteira entre a parte encapsulada e a parte nua do condutor e a direita, o detalhe do estado em que se encontrava um dos cabos condutores (desgaste corrosivo dos tentos).

2.3 Capanha de Medição realizada

Foram realizadas medições de distorções harmônicas de tensões e correntes harmônicas, no intuito de se avaliar se esses pontos de medição apresentam níveis de propagação de harmônicos fora das faixas especificadas pelas normas vigentes. Ressalta-se que devido a SE Itupiranga não ser dotada de TP´s e TC´s em 138 kV, as leituras nesse nível de tensão foram realizadas na SE Itacaiúnas, que é fonte para a SE Itupiranga, e também fonte para a siderúrgica Sinobras. As leituras foram obtidas por meio de instrumentos

que operam segundo o princípio da amostragem digital e que atendem aos requisitos do PRODIST em seu módulo 8. O instrumento utilizado na campanha de medição de sete e quatro dias foi um analisador de qualidade de energia, MARH-21, que é um medidor e registrador de grandezas em tempo-real (tensão, correntes fundamentais, harmônicas, potência ativa, potência reativa, fator de potência entre outras grandezas e fenômenos). Para os períodos menores (medições expedidas), foram utilizados os analisadores de qualidade de energia, PowerNet P-600 e Fluke 435. Esses instrumentos foram instalados nas subestações, sendo conectados aos circuitos secundários dos transformadores de potencial (TP) e dos transformadores de corrente (TC), correspondentes aos circuitos primários sob medição. Também, realizaram-se estudos de curto-circuito para este sistema com a utilização do ANAFAS (programa de análise de faltas simultâneas), para efeito de utilizar a norma IEEE 519 com relação aos limites de distorção harmônica de corrente, tendo-se os seguintes resultados: 2.011 (A/f) para a barra de 138 kV da SE Itacaiúnas, 3.506 (A/f) para a barra de 13,8 kV da SE Itupiranga e 645 (A/f) para a barra de 34,5 kV da SE Itupiranga.

Relativamente à tensão, os valores para as distorções harmônicas total (DTT%) e individual (DIT%) foram referenciados de acordo com o estabelecido pelo PRODIST em seu módulo 8, conforme Tabela 1. Já para as distorções harmônicas de corrente (DTI%), os valores foram referenciados de acordo como estabelecido pela norma IEEE-519, conforme Tabelas 2 e 3.

Tabela 1 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais e individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).

VALORES DE REFERÊNCIA GLOBAIS PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS DE TENSÃO (PRODIST)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (%)
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13{,}8kV$	8
$13{,}8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 230kV$	3

VALORES DE REFERÊNCIA GLOBAIS PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAL DE TENSÃO (PRODIST)

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
		$V_n \leq 1$ kV	1 kV < $V_n \leq$ 13,8 kV	13,8 kV < $V_n \leq$ 69 kV	69 kV < V_n < 230 kV
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Tabela 2 - Limites de distorção de corrente harmônica (Ih/I1) em % (por cento) para carga não linear conectada no PCA da concessionária a uma Tensão de 120 V a 69.000 V.

HARMÔNICA DE ORDEM ÍMPAR						TDD
I_{SC}/I_1	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 < h	(%)
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,6	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Sendo que: I_{SC} é a corrente máxima de curto-circuito no PAC, I_1 é a média da corrente de demanda máxima no PAC e TDD é a Taxa de Distorção de Demanda; Harmônicas pares estão limitadas a 25% dos limites dos harmônicos ímpares, imediatamente superior; Distorções de corrente que resultem em *dc offset* não são permitidas e; *Todo equipamento de geração é limitado a esses valores de distorção de corrente independente da relação ISC/I1.

Tabela 3 - Limites de Distorção da corrente harmônica (Ih/I1) em % (por cento) para Sistemas de Sub-Transmissão genéricos (69.001 V a 161.000 V).

HARMÔNICA DE ORDEM ÍMPAR						TDD
I_{SC}/I_1	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 < h	(%)
< 20*	2,0	4,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	120,0

Sendo que: As harmônicas pares são limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares superiores; As distorções de corrente que resultarem em um dc offset, p.ex., conversores de meia onda, não são permitidos e; *Todo equipamento de geração é limitado a esses valores de distorção de corrente independente da relação ISC/I1.

2.4 Resultados obtidos na Campanha de Medição

2.4.1 Medição na barra de 138 kV da SE Itacaiúnas e corrente na chegada da Linha de Distribuição Marabá-Itacaiúnas, na SE Itacaiúnas.

O resultado desta medição é mostrado nas Figuras 3 e 4. As análises das demonstram que a DTT% é menor que 3% atendendo o estabelecido no PRODIST para o nível de tensão de 138 kV. Já para a DTI% este valor é sempre maior que 2,5% e não atende a norma IEEE 519, pois o ponto de medição foi enquadrado na relação Icc/IL < 20, e para esta relação, em tensão de 138 kV a DTI% não pode ultrapassar a 2,5%.

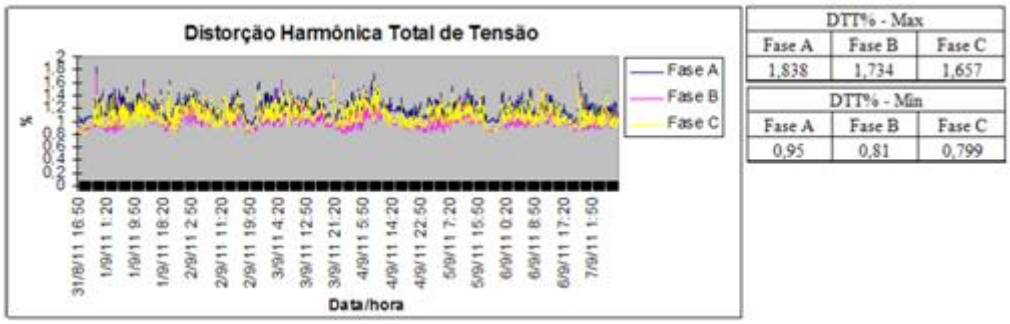


Figura 3 – Valores medidos de distorção harmônica total de tensão (DTT%) nas fases A, B, C da Linha Marabá – Itacaiunas, na SE Itacaiunas no período de 31/08/2011 a 07/09/2011.

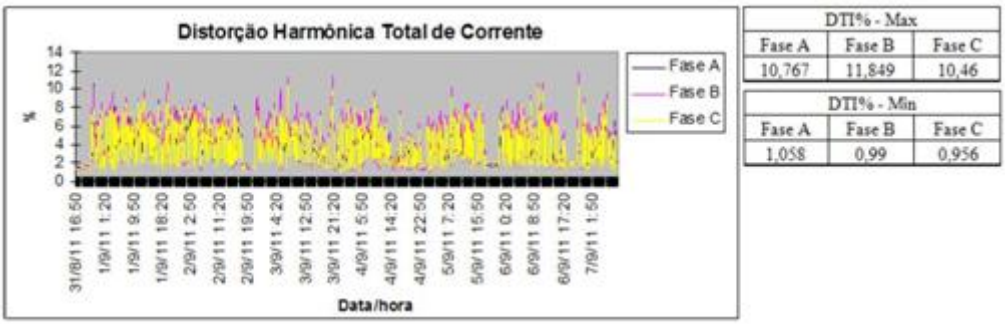
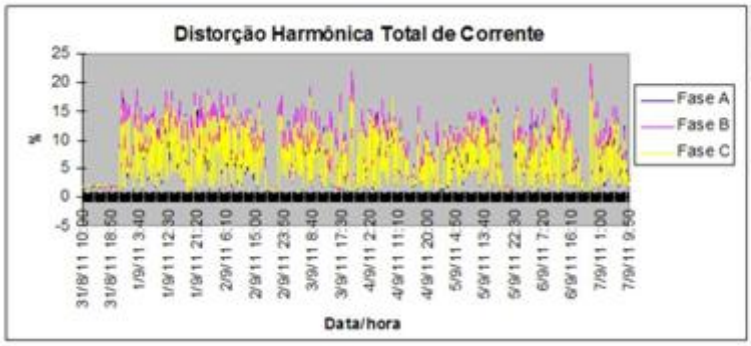


Figura 4 – Valores medidos de distorção harmônica total de corrente (DTI%) nas fases A, B, C da Linha Marabá – Itacaiunas, na SE Itacaiunas no período de 31/08/2011 a 07/09/2011.

2.4.2 Medição na Saída da Linha de Distribuição Itacaiúnas-Sinobras, na SE Itacaiúnas.

O resultado desta medição de DTI% é mostrado na Figura 5. A corrente tem um perfil tipicamente industrial, com valor médio de 150 A nas fases A, B e C. O nível de curto-circuito para este ponto de medição é de

2.011 A, que dividido pela corrente média de 150 A para o cálculo da DTI%, fornece a relação Icc/IL = 13,41. Para esta relação, e para o nível de 138 kV o limiar de DTI% é igual a 2,5%. Então, pela inspeção da Figura 5 este valor é ultrapassado com larga margem.



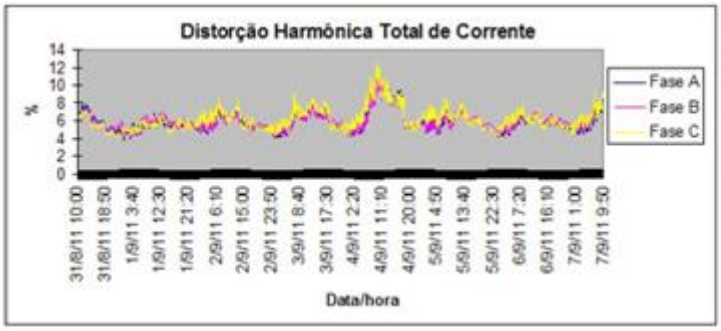
DTI% - Max		
Fase A	Fase B	Fase C
19.878	22.723	18.788

DTI% - Min		
Fase A	Fase B	Fase C
0.869	1.042	1.048

Figura 5 – Valores medidos de distorção harmônica total de corrente nas fases A, B, C da LD Itacaiunas – Sinobras em 138 kV, na SE Itacaiunas no período de 31/08/2011 a 07/09/2011.

2.4.3 Medição na Saída da Linha de Distribuição Itacaiúnas-Itupiranga, na SE Itacaiúnas.

O resultado da medição de DTI% é mostrado na Figura 6. As análises com relação a tensão se mantem iguais aqueles referentes à Figura 3. Com relação a corrente, foi observado que tem um perfil tipicamente comercial e residencial, com um valor médio de 50 A nas fases A, B e C, tendo sido calculado uma relação Icc/IL = 36,56. Logo, a máxima DTI% admissível para essa LD é igual 4, onde observa-se que esse valor é ultrapassado em todo o período da medição, não atendendo recomendado na norma IEEE-519.



DTI% - Max		
Fase A	Fase B	Fase C
11,89	11,53	12,55

DTI% - Min		
Fase A	Fase B	Fase C
3,86	4,19	4,16

Figura 6 – Valores medidos de distorção harmônica total de corrente nas fases A, B, C da LD Itacaiunas – Itupiranga em 138 kV, na SE Itacaiunas no período de 31/08/2011 a 07/09/2011.

2.4.4 Medição no Secundário do Transformador T1, na SE Itupiranga.

Os resultados das medições de DTT%, DIT% e DTI%, são mostrados nas Figuras 7, 8 e 9, a seguir. Com relação à corrente, foi observado que tem um perfil de consumo típico residencial-comercial, composto pelo consumo conjunto das cargas dos alimentadores IU-01, IU-03, IU-05 e IU-06, onde as cargas apresentam-se razoavelmente equilibradas, com uma corrente média de 112 A, sendo a fase C, a mais carregada.

Com relação à distorção harmônica total de tensão, ilustrada na Figura7, pôde-se perceber que não houve violação da norma (módulo 8 do PRODIST) durante todo o período de medição, cujo valor é de 8% para o nível de tensão considerado (13,8 kV). Para a distorção harmônica total de corrente, os níveis atingiram valores elevados, com um máximo de 17,36% na fase A, 15,13% na fase B e 19,65% na fase C, como pode ser visto na Figura7. Segundo a norma IEEE 519, para este ponto de medição com valor Icc/IL = 29,22, a DTI% máxima é de 8%, onde observa-se que este ponto de medição não atende a esta norma.

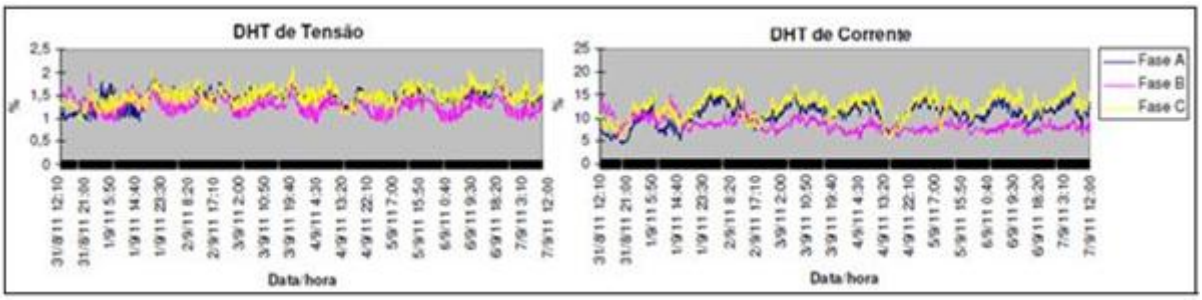


Figura 7 – Valores de distorção harmônica total de tensão e de corrente medidos nas fases A, B e C do secundário do transformador T1 da SE Itupiranga, na campanha de medição de 31/08/2011 a 07/09/2011.

No que diz respeito aos harmônicos individuais de tensão e corrente, os mais significativos foram os de 2ª, 3ª e 5ª ordens. A Figura 8 ilustra o perfil de distorção harmônica de tensão destes harmônicos especificamente, de onde se conclui que todos eles atendem individualmente aos limites impostos pelo PRODIST e a figura 9 ilustra o perfil de distorção harmônica individual de corrente.

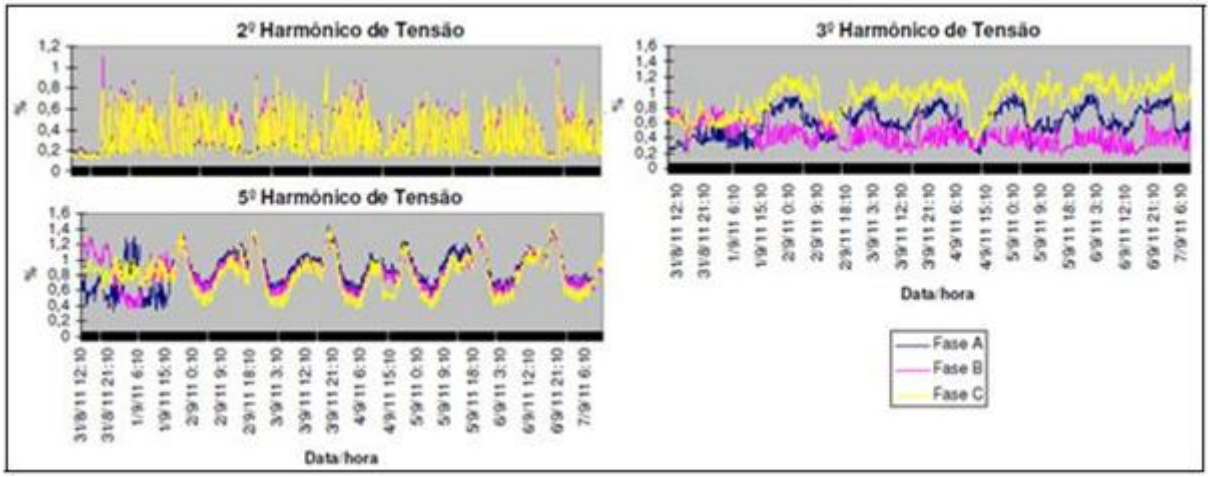


Figura 8 – Distorções do 2º, 3º e 5º harmônicos de tensão medidas nas fases A, B e C do secundário do transformador T1 da SE Itupiranga, na campanha de medição de 11/08/2011 a 07/09/2011.

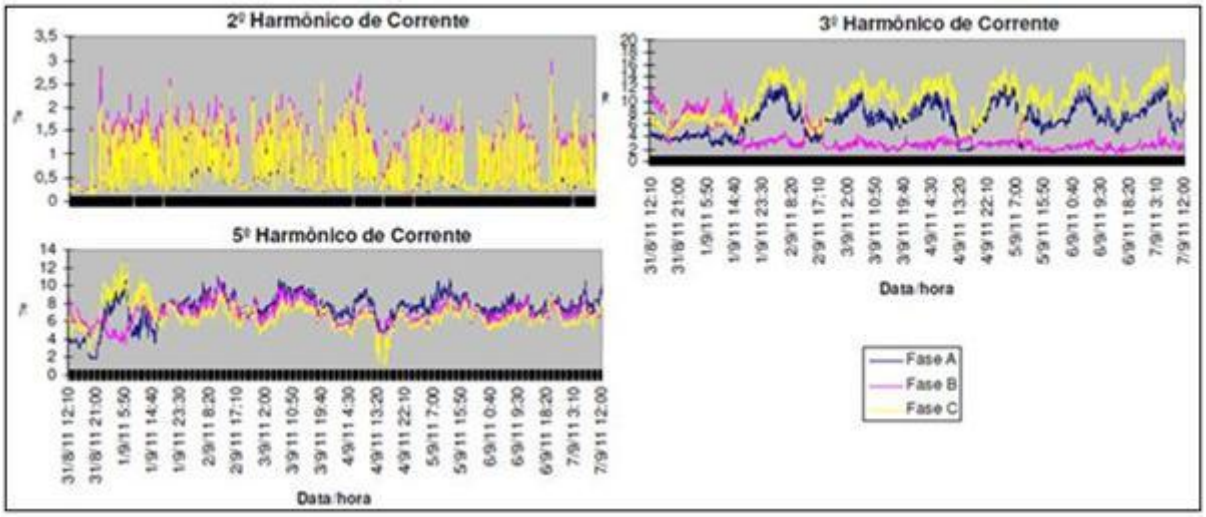


Figura 9 – Distorções do 2º, 3º e 5º harmônicos de corrente, medidas nas fases A, B e C do secundário do transformador T1 da SE Itupiranga, na campanha de medição de 31/08/2011 a 07/09/2011.

2.4.5 Medição no Alimentador IU-05 da SE Itupiranga.

O resultado desta medição é mostrado na Figura 10. A análise dos valores de DTT% demonstra que este alimentador atende a recomendação do PRODIST, exibindo valores sempre menores que 8%. No entanto, com relação à distorção total de corrente este alimentador não atende a norma IEEE-519, apresentando valores elevados de DTI% em todas as fases. A maior contribuição individual de distorção harmônica para os elevados valores de DTI% medidos é devido a componente de 3º harmônico, fato este ilustrado na Figura 11 para os harmônicos de 3ª, 5ª, e 7ª ordens da fase C.

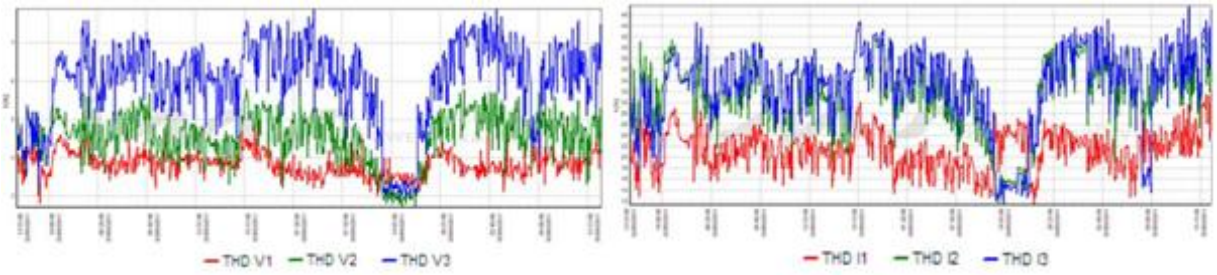


Figura 10 – Valores de distorção harmônica total de tensão e corrente, medidos nas fases A (vermelho), B (verde) e C(azul) do Alimentador IU-05 da SE Itupiranga do dia 02/09/2011 ao dia 05/09/2011.

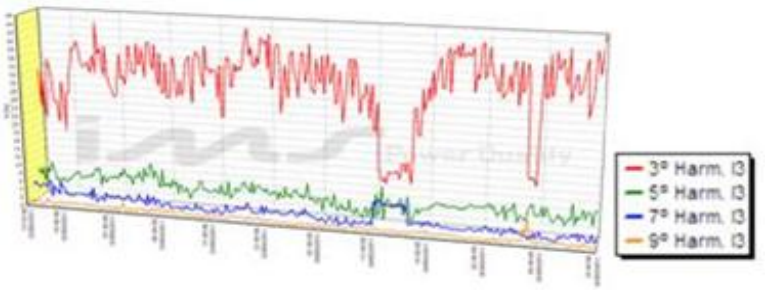


Figura 11 – Valores de distorção harmônica individual de corrente medidos na fase C, sendo representado em vermelho a componente de 3º. Harmônico do Alimentador IU-05 da SE Itupiranga do dia 02/09/2011 ao dia 05/09/2011.

2.4.6 Medição no Alimentador IU-06 da SE Itupiranga.

O resultado desta medição é mostrado nas Figuras 12 e 13 quando novamente repete-se o comportamento verificado para o alimentador IU-05, ou seja, apresenta distorção harmônica total de corrente bastante elevada, como mostrado na Figura12, sendo a componente de 3º harmônico aquela que oferece a maior contribuição para a DTI%.

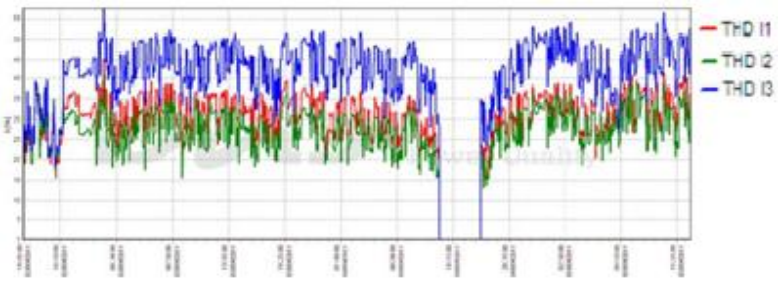


Figura 12 – Valores de distorção harmônica total de corrente medidos na fase C, sendo representado em vermelho a fase A, em verde a fase B e em azul a fase C do Alimentador IU-05 da SE Itupiranga do dia 02/09/2011 ao dia 05/09/2011.

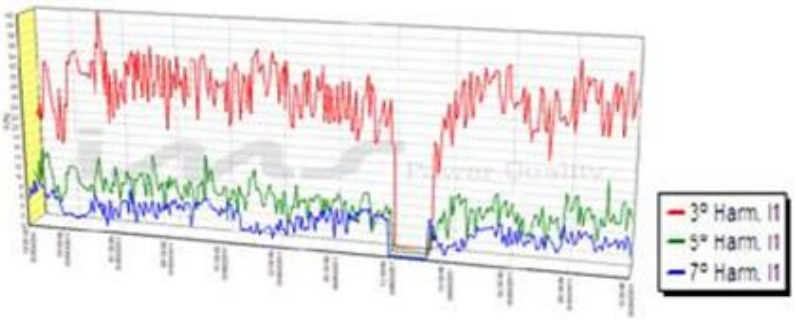


Figura 13 – Valores de distorção harmônica individual de corrente medidos na fase A, sendo representado em vermelho a componente de 3º. Harmônico do Alimentador IU-06 da SE Itupiranga do dia 02/09/2011 ao dia 05/09/2011.

2.5Análise da Propagação de Harmônicos nas Subestações Itacaiúnas e Itupiranga

O principal motivo de incluir o estudo de propagação harmônica na SE Itacaiúnas, é que essa subestação, além de suprir a SE Itupiranga, também supre a siderurgia SINOBRAS (consumidor particular). Logo, fez-se necessário estender o estudo harmônico para a SE Itupiranga, de tal forma a avaliar quão forte é a influência desse consumidor nesta subestação, uma vez que se observou níveis consideráveis de componentes harmônicas atípicas, essencialmente o 2º harmônico. O estudo de propagação harmônica das SEs Itacaiúnas e Itupiranga foi realizado no software ATP. Durante o estudo, modelaram-se as duas subestações no ATP Draw, sendo que os alimentadores foram considerados como cargas de impedância constante e o consumidor Sinobras como fonte de corrente harmônica. Além disso, também se considerou como fonte de harmônicos os alimentadores IU-05 e IU-06, uma vez que se observaram níveis significativos de correntes harmônicas medidas nos mesmos. De acordo com a Figura 14, mostrando as duas SE´s modeladas no ATP, consideraram-se duas fontes harmônicas de correntes: Fonte 1: Sinobras, uma siderúrgica ligada na barra de 138 kV da SE Itacaiúnas; Fonte 2: os alimentadores IU-05 e IU-06, que suprem energia elétrica para consumidores rurais num nível de tensão de 34,5 kV da SE Itupiranga. No primeiro momento do estudo harmônico das SE´s Itacaiúnas e Itupiranga, validaram-se os resultados da simulação do modelo ATP dessas SE´s,com as medições obtidas em campo.

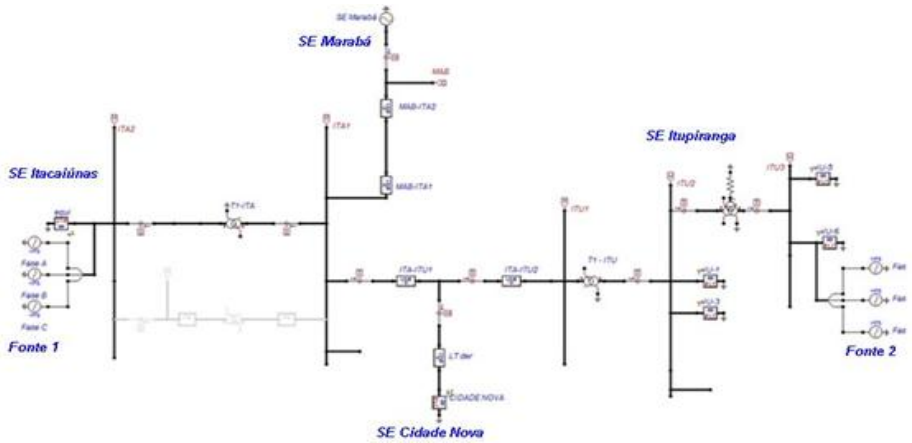


Figura 14 - Subestações de Itacaiúnas e Itupiranga modeladas no ATP, para efeito do estudo de propagação harmônica.

As Tabelas 4 e 5 mostram os níveis de distorção harmônica total de tensão e individual do 2º, 3º, 5º e 7º harmônicos de tensão proveniente da simulação e das campanhas de medições, respectivamente. Observa-se por comparação, que alguns valores não coincidem perfeitamente, o que se explica pelo fato de nos estudos de simulação ter sido considerado somente um conjunto menor de componentes harmônicas, ou seja, as mais significativas, ao passo que as medidas englobam a influência (interação) de todos os componentes harmônicos presentes nas instalações elétrica.

Tabela 4 - Níveis de distorção harmônica total de tensão e individuais do 2º, 3º, 5º e 7º harmônicos de tensão das três fases nas barras de 34,5 kV, 13,8 kV da SE Itupiranga e 138 kV da SE Itacaiúnas, obtidos por simulação, utilizando o modelo ATP da Figura 17.

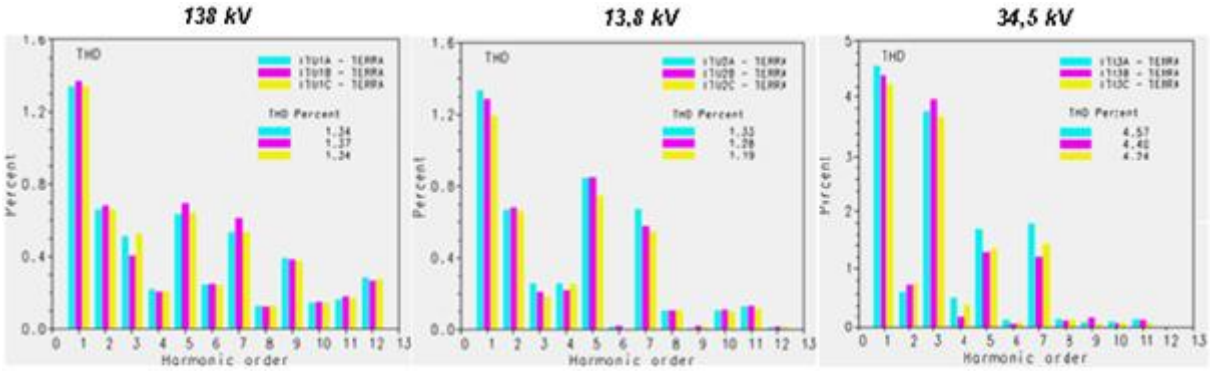
SE	Barra (kV)	DTT %			DIT_2 (%)			DIT_3 (%)			DIT_5 (%)			DIT_7 (%)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Itupiranga	34,5	4,40	4,57	4,24	0,7	0,7	0,7	3,8	3,9	3,8	1,5	1,3	1,3	1,5	1,3	1,3
Itupiranga	13,8	1,33	1,28	1,19	0,55	0,58	0,54	0,25	0,28	0,18	0,85	0,84	0,73	0,85	0,84	0,73
Itacaiúnas	138	1,19	1,25	1,21	0,65	0,67	0,64	0,46	0,48	0,48	0,52	0,58	0,55	0,53	0,6	0,56

Tabela 5 - Níveis de distorção harmônica total de tensão e individuais do 2º, 3º, 5º e 7º harmônicos de tensão das três fases nas barras de 34,5 kV, 13,8 kV da SE Itupiranga e 138 kV da SE Itacaiúnas, obtidos da campanha de medição.

SE	Barra (kV)	DTT %			DIT_2 (%)			DIT_3 (%)			DIT_5 (%)			DIT_7 (%)		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Itupiranga	34,5	3,3	4,2	5,3	0,8	0,6	0,5	3,6	3,4	3,8	1,8	1,6	1,5	0,5	0,3	0,2
Itupiranga	13,8	1,57	1,34	1,56	0,47	0,50	0,39	0,56	0,41	0,95	1,04	0,89	0,89	0,45	0,37	0,45
Itacaiúnas	138	1,55	1,33	1,50	0,7	0,6	0,66	0,48	0,46	0,53	0,52	0,47	0,53	0,52	0,4	0,51

A Figura 15, a seguir, foi obtidas pela simulação no ATP, e mostram os níveis de distorção harmônica total de tensão e individual do 2º ao 12º harmônico de tensão. Nota-se a presença do 2º harmônico de tensão em níveis considerados elevados nas barras de de 138 kV, 13,8 kV e 34,5 kV da SE Itupiranga. Além desse harmônico, também se constatou a presença de outros harmônicos pares de tensão com níveis mais elevados do que o normal.

Figura 15 - Níveis de distorção harmônica total e individual de tensão das fases A, B e C na barras de 138 kV 13,8 kV da SE Itacaiúnas.



Para avaliar o impacto da propagação dos harmônicos gerados pela SINOBRAS, nas subestações Itacaiúnas e Itupiranga, foram realizadas simulações incluindo somente a Fonte 1. Observou-se que a operação do processo industrial da Sinobras, provoca o aparecimento de harmônicos pares de tensão em níveis significativos, porém dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST, nas barras das duas subestações. Para o estudo da influência dos alimentadores de 34,5 kV nos níveis de distorção harmônica de tensão das SE´s Itacaiúnas e Itupiranga, foram realizadas simulações incluindo somente a Fonte 2. Verificou-se que essa fonte apresenta uma pequena influência nos níveis de distorção harmônica nas barras da SE Itacaiúnas e uma influência mais significativa nas barras da SE Itupiranga, principalmente na barra de 34,5 kV.

Além disso, um ponto importante observado durante o estudo harmônico, foi a redução da tensão do 3º harmônico na barra de 13,8 kV da SE Itupiranga, fato este que se deve à ligação do transformador T2 entre as barras de 13,8 kV (estrela) e 34,5 kV (estrela-aterrada). Todavia, não será possível a eliminação total da terceira harmônica, devido somente a componente harmônica de sequência zero ser filtrada. Pela razão desses alimentadores serem muito longos e atenderem cargas rurais monofásicas, há preponderância de efeito capacitivo resultando em elevação de tensão, que por sua vez, saturam os transformadores monofásicos instalados nesses alimentadores, gerando as componentes harmônicas de terceira ordem. Comparando os níveis do 2º harmônico de tensão gerados pelas duas fontes harmônicas consideradas no estudo, nota-se que a SINOBRAS é a principal fonte geradora de 2º harmônico, uma vez que ela provocou o surgimento de níveis mais significativos deste harmônico em todos os pontos analisados.

3. Conclusões

O estudo de caso refere-se a uma subestação real da concessionária CELPA, no estado do Pará. Baseado na análise realizada constata-se níveis de propagações harmônicas significativos nesses sistemas elétricos e que certamente estão contribuindo para o surgimento dos problemas de QEE detectados. Apesar dos dados de monitoramento apresentarem resultados mais precisos em relação ao comportamento do sistema elétrico, os resultados das simulações computacionais destacaram sua importância, pois, como na maioria dos casos, não é economicamente viável instalar monitoradores em cada ponto do sistema elétrico. Devido a isso, programas que descrevem o comportamento do sistema elétrico de forma detalhada e precisa se tornam fundamentais para a análise de tais fenômenos.

Relativamente ao estudo de caso na SE Itupiranga, chega-se as seguintes conclusões abaixo citadas.

- Para a emissão de ruídos do transformador da SE Itupiranga:

  Segundo a literatura técnica, a presença principalmente do 2º harmônico, mas também dos 3º, 5º e 7º harmônicos, é responsável pelo surgimento de um fenômeno conhecido como magnetostrição, que provoca a vibração das lâminas do núcleo do transformador e como conseqüência a emissão de um zumbido característico. Quando um transformador é ligado a um sistema de frequência “f”, seu núcleo fica sujeito a uma vibração mecânica complexa de frequência “2f”, resultante da superposição de vibrações senoidais cujas frequências são harmônicas pares da frequência do sistema elétrico [6]. Então, tudo indica que os zumbidos observados nos transformadores das subestações de Itacaiúnas e Itupiranga são devido a presença, principalmente, do 2º harmônico, em combinação com o 3º, 5º, e 7º. Em outras subestações da CELPA, onde não ocorre a presença do 2º harmônico, embora tenha a presença dos outros, não se tem observado esses zumbidos característicos.

- Para o rompimento do condutor:

  Com relação ao o rompimento do condutor, um dos fatores que pode ter influenciado é a perda por efeito Joule na fronteira entre a parte isolada com a parte nua do condutor, provocada pelo efeito pelicular (skin) em razão das frequências harmônicas, aliando-se a um processo corrosivo no condutor de alumínio, nessa região de fronteira. Com a simples mudança de permeabilidade relativa na superfície do

condutor energizado, passando de um meio para outro, no caso “ar” e “borracha” (fita de proteção do condutor), haverá alteração do campo elétrico nessa interface, podendo provocar alterações eletroquímicas, levando à corrosão metálica [7]. Também, a disposição física dos condutores, é propícia ao acúmulo de água no espaço entre a fita de borracha e o condutor, podendo causar corrosão metálica. Quase sempre, a corrosão metálica (por mecanismo eletroquímico), está associada à exposição do metal ou uma liga metálica a um meio com presença de moléculas de água, juntamente com o gás oxigênio ou íons de hidrogênio, num meio condutor [8].

Frente a este cenário, e considerando-se que esses aspectos ainda não estão completamente regulamentados pela agência reguladora, recomenda-se que a Empresa elabore suas próprias notas técnicas para regular a atribuição de responsabilidades entre concessionária e consumidor, com relação aos impactos de suas cargas especiais na rede elétrica.

4. Referências bibliográficas

REFERÊNCIAS

1 R. C. Dugan & Mark F. Mcgranaghan & S. Santoso & H. W. Beaty,*Electrical Power Systems Quality* . McGraw-Hill, 2002.

2 A.Baggini,*Handbook of Power Quality*. John Wiley & Sons. 2008

3 ANEEL – Agência Nacional de energia Elétrica. PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no sistema Elétrico Nacional. Módulo 8 – Qualidade da Energia. 2010.

4 G. Putrus & J. Wijayakulasooriya & P. Minns, “Power Quality: Overview and monitoring”, IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS07), 2007, pp: 551-558.

5 R. Lima & D. Quiroga & C. Reineri & F. Magnago, “Hardware and software architecture for power quality analysis.” Computers & Electrical Engineering, Vol. 34 (6), pp. 520-530, 2008.

6 N. J. Guaraldo & C. L. Monteiro & J. A. B. Grimoni & L. G. G. Kiatake & M. A. Saidel; & S. R. Bistafa, Avaliação do Ruído de Transformadores no Entro-no de SE´s – Aplicativo e Simulação. Publicação científica In: XIV SNPTEE – XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, outubro 1997.Belém, PA.

7 PRYSMAN CABLES; Estado da Arte da Tecnologia de Acessórios Para Conexão de Cabos para Redes de Distribuição de MT Subterrâneas. Disponível em: <http://www.see.asso.fr /jicable/OtherEvents /cabos09/content /Cabos'09%20P1.4.P.pdf

8 P. H. Tavares, Engenharia de Aplicações, Universidade Federal de Uberlândia, 2009. Disponível em: <http://www.feelt.ufu.br/pastas/Ciencia_e_Tecnologia_dos_Materiais/ Apostila_ CTM_ PARTE _1.pdf. Acesso em 06/12/2011.