

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

por

Eduardo Bech

Marcos Rosa dos Santos, Engenheiro Eletricista
Orientador

Itatiba (SP), dezembro de 2011

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

por

Eduardo Bech

Relatório apresentado à Banca Examinadora do
Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
Elétrica para análise e aprovação.
Orientador: Prof. M.e Marcos Rosa dos Santos

Itatiba (SP), dezembro de 2011

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura1 – Consumo de energia elétrica no Brasil (GWh).....	11
Figura 2: Evolução do consumo de energia elétrica por setor.....	12
Figura 3: Projeção do consumo de eletricidade.....	14
Figura 4: Interferência do FP na corrente e na tensão.....	22
Figura 5: diagrama das potência.....	24
Figura 6: medição real do fator de potencia.....	25
figura 7 – Onda puramente senoidal.....	26
figura 8 – Onda senoidal com 3ª harmônica.....	27
figura 9 – Onda senoidal com picos de tensão.....	28
figura 10 – espectro harmônico.....	28
Figura 11 – interface de análise dos parâmetros.....	31
Figura 12 – tensão RMS.....	32
Figura 13 – detalhe de tensão, potência e corrente.....	32
Figura 14 – detalhe de forma de onda de tensão.....	33
Figura 15 – curva CBEMA.....	34
Figura 16 – Evento de interrupção.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

Abesco – Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

FP – Fator de Potência

GWh – Giga watts hora

EPE - Empresa de Pesquisa energética

MME – Ministério de Minas e Energia

TWh – Tera watts hora

BEN - Balanço Energético Nacional

MW – Megawatts

THD/DHT - Distorção Harmônica Total

PRODIST - Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

CBEMA – *Computer & Business Equipment Manufacturers Associations*

RESUMO

É de costume dizer que o mundo que conhecemos hoje não seria o mesmo sem o uso da energia elétrica. Atualmente, somente esta, na sua forma rudimentar, também não bastaria para propiciar os inúmeros benefícios atuais oriundos dessa fonte. Com o avanço da tecnologia, a sensibilidade de equipamentos aumentou, portanto, a qualidade da energia a que estes dispositivos são submetidos, deve ser analisada criteriosamente. Baseado nesse contexto procurou-se avaliar as mais recentes recomendações a respeito dos indicadores de qualidade, bem como seus limites de aceitação. O órgão que administra essa questão no Brasil, é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Pretende-se mostrar nesse trabalho que nem sempre a má qualidade da energia elétrica é de responsabilidade das concessionárias distribuidoras, mas pelo mau uso da energia por parte dos consumidores, que na maioria dos casos, por falta de medições adequadas, nem sabem a origem real de eventos relacionados à qualidade de energia e que podem gerar grandes prejuízos.

Palavras-chave: qualidade de energia elétrica. ANEEL.

ABSTRACT

It is usually said that the world we know today would not be the same without the use of electricity. Currently, only that in its rudimentary form, does not suffice to provide the current number of benefits from this source. With the advancement of technology, equipment sensitivity therefore increased the quality of energy that these devices are submitted must be examined carefully. Based on this context we sought to evaluate the latest recommendations on the quality indicators, and their acceptance limits. The agency that administers this issue in Brazil, is the National Agency of Electrical Energy (ANEEL). It is intended to show that not always work that the poor quality of electricity is the responsibility of the distribution utilities, but the misuse of power by consumers, which in most cases, lack of appropriate measurements, nor know the origin actual events related to power quality and that can generate large losses.

Keywords: quality of electricity. ANEEL.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	1
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	2
RESUMO	3
ABSTRACT	4
SUMÁRIO	5
1 INTRODUÇÃO	7
2 HISTÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL	9
2.1 PROJEÇÕES PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	11
3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	14
4 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	17
4.1 PARÂMETROS DE QUALIDADE	18
4.1.1 tensão	19
4.1.2 Fator de Potência (FP)	22
4.1.3 Harmônicos	24
5 ANÁLISES DE CASOS REAIS	29
6 CONCLUSÃO	35

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....36

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, os dispositivos e equipamentos elétricos tornaram-se mais precisos e conseqüentemente, mais sensíveis às variações de ondas de tensão. Portanto, é de extrema importância que se defina indicadores de qualidade de energia elétrica, tipos de distorções de onda e se aplique limites a esses parâmetros, condizentes a atual conjuntura tecnológica. Um paradoxo interessante nesse segmento é que, na maioria dos casos, os equipamentos que, para operarem, necessitam de maior qualidade de energia, ou seja, os mais sensíveis são os que mais causam os distúrbios indesejados à rede em que estão conectados.

O presente trabalho trata de analisar e expor as principais causas dos problemas relacionados a perturbações de onda de tensão e corrente, mostrando o quanto são tecnicamente prejudiciais a um sistema elétrico.

Mais especificamente, serão abordados diferentes tipos de problemas de qualidade, mostrando que, em muitos casos, tal situação ocorre em cascata, ou seja, um tipo de anomalia pode, além de prejudicar um processo de fabricação, como por exemplo, por si só, se não bastasse, acarretará em mais tipos de defeitos, que somados ao primeiro, torna o quadro mais grave do que se possa imaginar, refletindo em grandes prejuízos técnicos e financeiros.

Será abordado o tema referente às atuais normas regulamentadoras, bem como analisar a origem dos problemas, posto que, ao contrário do que é de costume pensar, em muitos casos tais variações não são de responsabilidade da empresa que fornece a energia, mas de quem a utiliza. Logo é importante conhecer a maneira correta de utilização dessa fonte, bem como dominar a interpretação das medições. Então, como a qualidade da energia empregada, e o emprego dela refletem na qualidade do produto final, é compreensiva a grande atenção destinada a esse segmento por parte do setor privado, pois a energia utilizada num processo fabril é simplesmente mais um dos insumos, e como tal, requer um criterioso programa de qualidade, assim como no caso das matérias primas, por exemplo.

Abordando o contexto histórico, baseado na evolução tecnológica e socioeconômica, esse trabalho relaciona os atuais problemas que envolvem qualidade de energia entre si e individualmente. Relaciona também o aumento da demanda, pois é foco de um dos principais temores envolvendo energia elétrica: o racionamento.

A questão que envolve a qualidade de energia elétrica é ainda pouco dominada, portanto não havendo soluções muito práticas e evidentes, o fato que contribui para isso é, entre outros, a dificuldade de compreensão das causas dos fenômenos indesejados até mesmo por profissionais do setor, pois se trata de um ramo muito complexo, e ainda, relativamente novo na eletricidade.

O presente trabalho foi baseado no conhecimento adquirido durante um curso presencial e específico voltado para engenheiros, desenvolvido pela Barretos Engenharia e ministrado pelo atual presidente da Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (Abesco) e diretor de Ação Engenharia, José Starosta. Outra contribuição importante para o trabalho foi a disponibilização de medições elétricas e trocas de conhecimentos práticos com a AES Eletropaulo através do Eng. Marcos Rosa dos Santos, orientador desse trabalho. Também se utilizou de outros trabalhos acadêmicos que abordam essa questão de maneira específica.

Como um dos objetivos desse trabalho é o de mostrar o quanto uma grandeza elétrica é associada a outras, procurou-se demonstrar através de oscilografias reais de eventos elétricos a relação desses parâmetros.

Após a abordagem teórica, contextualização na atual conjuntura, e análises de algumas medições reais, foi possível realizar uma conclusão baseada nos objetivos do trabalho comparando as reais necessidades vinculadas a QEE com as mais novas normas regulamentadoras nacionais.

2 HISTÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL

Em 1970, o consumo de energia elétrica no Brasil era de cerca de 39500 GWh [1], nessa época as cargas, principalmente as residenciais, possuíam caráter estreitamente resistivo. Com exceção dos motores das geladeiras não se via, de modo generalizado, utilização de cargas não lineares.

Entende-se por cargas não lineares aquelas cuja relação tensão/corrente não é constante, não obedecendo assim a lei de Ohm. O desenvolvimento da eletrônica contribuiu muito para a inserção dessas cargas nas residências e indústrias brasileiras.

De 1970 até 1980, ocorreram as maiores taxas de crescimento no consumo de energia elétrica anuais no Brasil, com destaque ao setor agropecuário (20,5 %) e industrial (13,4 %) [1]. Essa situação de aumento na solicitação de energia, também conhecido como demanda, é intrinsecamente relacionada ao crescimento da economia, pois os setores econômicos supracitados estão diretamente ligados ao consumo, seja interno ou externo.

Para se ter uma idéia, o setor residencial apresentou nesse período aumento anual de consumo de 10%, praticamente a mesma taxa do setor comercial. Esse período ficou conhecido na história nacional como milagre econômico brasileiro, no qual, durante o período militar houve crescimento exponencial da economia a custo de severo endividamento pelo empréstimo de capital estrangeiro. E no ano de 1980, o Brasil já consumia 122700 GWh de energia elétrica [1].

Observaremos a figura abaixo que demonstra o quão rápido evoluiu o consumo de energia elétrica no país. Os dados são apresentados na unidade de GWh.

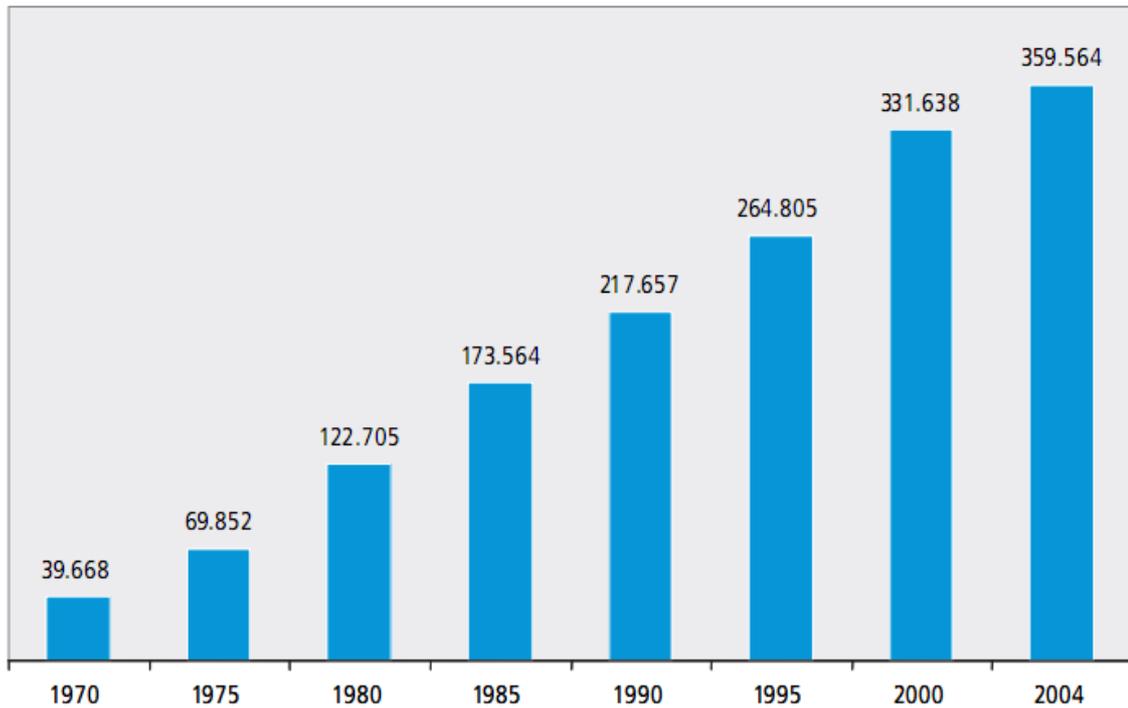


Figura1 – Consumo de energia elétrica no Brasil (GWh). (Fonte: Empresa de Pesquisa energética - EPE/MME)

No ano de 2010, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), foram consumidos 455,2 TWh de energia elétrica no Brasil, incluindo a auto produção.

A distribuição da energia elétrica nos diversos setores se apresenta de acordo com a tabela 1, abaixo.

Tabela 1 Consumo de energia elétrica por classe.

CLASSE	CONSUMO EM GWh (2010)
Residencial	105538
Comercial	69223
Outros	58766
Industrial	182338
Total	415865

Fonte: Adaptado - Plano de expansão de energia-EPE

2.1 PROJEÇÕES PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Como podemos observar através do capítulo anterior, o consumo de energia cresceu todos os anos, portanto é de se esperar que esse quadro se apresente assim pelos próximos períodos.

Uma observação com relação ao parágrafo acima deve ser introduzida, pois no ano de 2001 houve um período de racionamento de energia elétrica, causado simplesmente porque se todas as fontes geradoras de energia elétrica estivessem trabalhando, ainda assim não supriria a demanda solicitada pelo mercado. Ou seja, o sistema elétrico nacional estava subdimensionado na ocasião, na qual estávamos na eminência de um colapso energético.

De acordo com a figura abaixo, na qual mostra o consumo de energia elétrica de 1970 até 2004, pode-se verificar melhor a evolução do consumo, bem como o problema do racionamento supracitado.

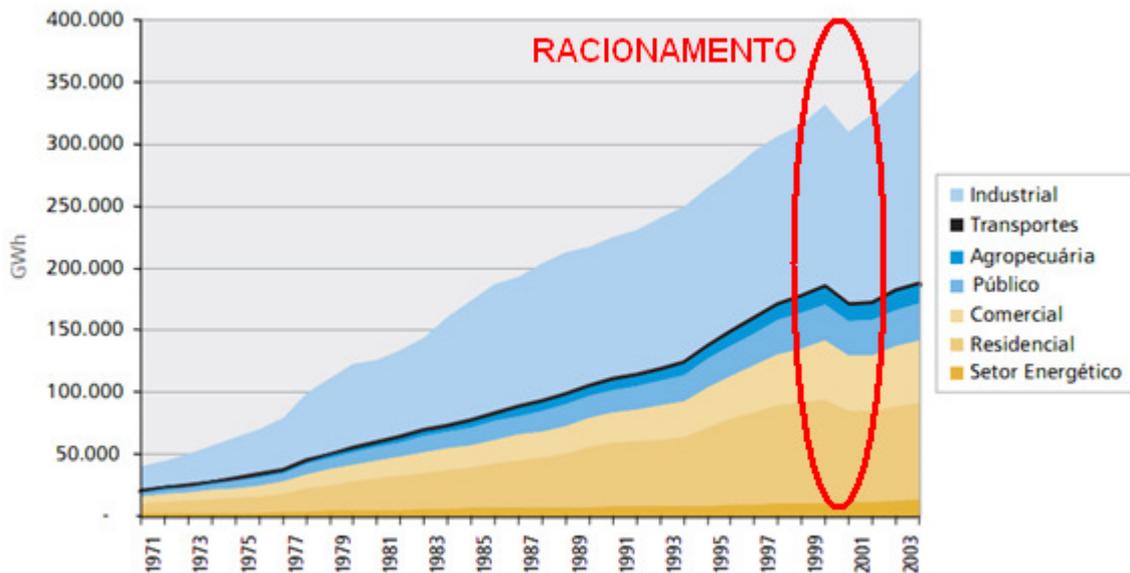


Figura 2: Evolução do consumo de energia elétrica por setor. (Fonte: Adaptado/MME)

Aumentar a produção dessa energia a um nível que se equipare ao da demanda, requer grandiosos investimentos em obras colossais, como hidrelétricas, por exemplo, e também em linhas de transmissão, estações transformadoras. Portanto não se trata de algo que possa ser feito em curto período de tempo. É necessário um planejamento eficaz através de uma política energética que visa o desenvolvimento econômico e social do país.

Nesse sentido o Brasil se desenvolveu muito, pois cerca de uma década atrás, vivenciávamos uma situação muito preocupante quando autoridades e o povo como um todo tiveram a real noção do quanto é importante ter um bom planejamento energético.

Atualmente, empresas vinculadas ao Ministério de Minas e Energia (MME) realizam muitos estudos e podemos ter uma projeção, muito precisa, do futuro do consumo, demanda e produção de energia elétrica. Podemos citar a Empresa de Pesquisas Energéticas, que mensalmente produz um relatório completo desses dados. O próprio MME divulga anualmente um relatório minucioso de todos os detalhes que envolvam energia como um todo, chamado de Balanço Energético Nacional (BEN). Esse documento é de extrema importância para se ter uma visão de maneira organizada do cenário energético do país, sendo possível apontar possíveis quesitos que devem ser melhorados, tendências de crescimento de cada fonte de energia, evoluções dos consumos regionais, etc.

Através desses estudos é que se tem ideia que serão consumidos no Brasil aproximadamente 712 TWh de energia elétrica no ano de 2019. Portanto, se comparado com o quadro atual será observado um aumento médio anual de aproximadamente 5% até esse ano.

A figura a seguir facilita a observação dessa projeção de consumo de eletricidade.

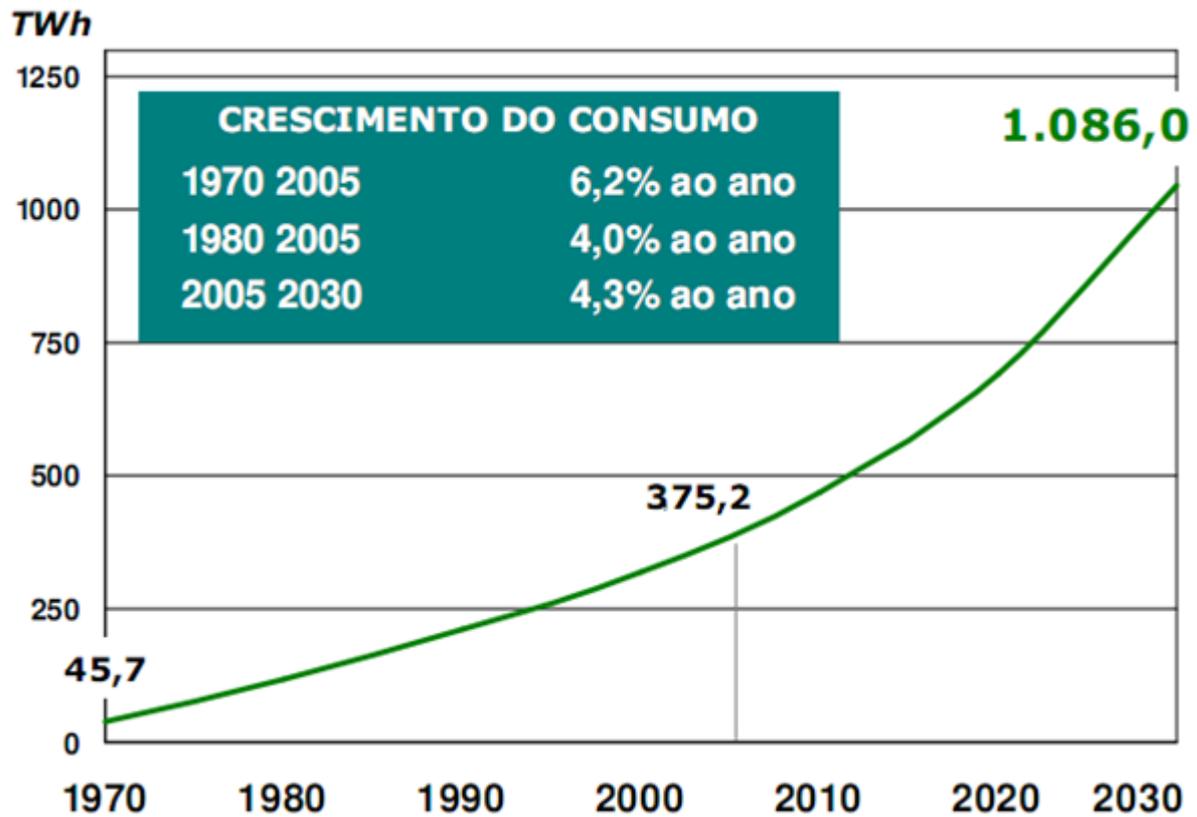


Figura 3: Projeção do consumo de eletricidade. (Fonte: EPE)

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a capacidade do sistema elétrico nacional em 31/12/2009 era de 122500 MW (considerando auto-produção). E para atender o crescente consumo, será necessário acréscimo anual de mais 3500 MW de capacidade no sistema elétrico nacional. Esse valor é pouco maior que o esperado de aumento de carga (3300 MW) [1].

3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Como exposto no capítulo anterior, o consumo de energia elétrica no Brasil aumentou mais de 1000% de 1970 até os dias de hoje e problemas de escassez de energia nunca foi discutido quando se iniciou o seu consumo, aliás, tinha-se a sensação de ser uma fonte infinita. Todavia, em 1985 o país se deparou com as primeiras crises energéticas, mais precisamente na região Sul, quando ocorreu um crescimento econômico acima da expectativa para o quarto trimestre e as reservas hídricas eram inferiores a 40% nesse ano. Estes fatores aliados ao atraso das obras de geração de energia motivaram um racionamento no primeiro trimestre de 1986 que incluía, além da redução de 20% do consumo, uma queda de tensão de 5%, e prolongamento do horário de verão [2].

Após esse racionamento, ocorreram outros eventos oriundos da falta de energia em outras regiões, geralmente ocasionados por redução da capacidade hídrica nos reservatórios das usinas geradoras. O mais comentado atualmente foi o que aconteceu em 2001, no qual houve intervenção da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANELL) no sentido de determinar metas de redução de consumo (racionamento) e estipulou multa a quem não cumprisse estas metas.

Através desse quadro preocupante fica evidente que o crescimento econômico está condicionado a disponibilidade energética e que a demanda dessa energia atingiu valores muito próximos da capacidade de produção instalada, ou seja, o consumo aumentou mais do que a produção.

Soluções em curto prazo para esse tipo de problema podem ser encontradas em diversos âmbitos, inclusive o racionamento torna-se uma delas, contudo, tal procedimento vai contra os interesses econômicos e sociais, logo outra solução deve ser considerada, a de se produzir mais com a mesma quantidade de energia disponível. Tal situação é conhecida como eficiência energética

Esse assunto foi amplamente discutido na década de 90, pode-se dizer “estava na moda” falar sobre o tema. Como consequência, dispositivos eletrônicos de operação e de controle começaram a ganhar espaço, já que possuem índice de rendimentos atraentes. Para se ter uma idéia, de acordo com um estudo que comparou índices de um reator eletrônico de

partida rápida para duas lâmpadas fluorescente de 40W, com uma lâmpada incandescente de 100W. Alguns dos valores medidos durante o ensaio se encontram na tabela abaixo:

Tabela 2

Parâmetros medidos	Reator eletrônico	Lâmpada incandescente
Corrente(A)	0,5	0,27
F. P.	0,9	1
DHT _I (%)	81,29	0%
Eficiencia Luminosa(lux/W)	9,47	1,72

Fonte: O Setor Elétrico

Esse caso exemplifica muito bem o quanto é aparentemente interessante, sob o ponto de vista de eficiência, optar pelo uso da lâmpada eletrônica, já que esta apresenta rendimento de 5,5 vezes maior que a outra. Se for considerado somente o consumo da potência ativa, como é feito atualmente pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica para efeito de fatura, realmente seria interessante optar pelo uso da lâmpada eletrônica, no entanto, se observarmos o parâmetro “Distorção Harmônica Total de Corrente” (DHTI), observaremos a disparidade entre as duas lâmpadas. Essa distorção causa diversos impactos nos equipamentos conectados no mesmo barramento, muitas vezes afetando, inclusive, outros consumidores, caracterizando assim um problema na qualidade da energia, mas não originado pela fonte nem tão pouco pelo processo de transmissão/distribuição, mas sim pelo próprio consumidor.

Esse é, atualmente, o assunto mais abordado em seminários e palestras. A Qualidade de Energia Elétrica (QEE) nunca foi tão discutida como tem sido nos últimos anos, pois essa questão é do interesse de todos os tipos de consumidores, das distribuidoras, empresas de

transmissão e geração. Portanto, o tema Eficiência Energética tornou-se, apenas mais um dos diversos tópicos que englobam a Qualidade de Energia Elétrica.

4 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Qualidade de Energia Elétrica é, atualmente, um assunto muito abordado em seminários e palestras. Esse tema nunca foi tão discutido como tem sido nos últimos anos, pois essa questão é do interesse de todos os tipos de consumidores, das distribuidoras, empresas de transmissão e geração, afeta diretamente nos custos de produção das indústrias, bem como no padrão de vida das pessoas. Interfere no valor final da energia elétrica consumida e principalmente na confiabilidade dessa energia, que passa a ser encarada como um produto, que como tal, requer um controle de qualidade e principalmente definições no que se baseiam tais características.

A definição de qualidade de energia elétrica é uma tarefa muito difícil, pois é extremamente relativa, ou seja, depende muito do aspecto que se deseja avaliar. Dependendo da fonte que se pesquisar, encontrar-se-á uma definição diferente. Observaremos o que menciona [7], por exemplo:

“O conceito de qualidade de energia elétrica significa a busca por desenvolvimento de meios para erradicar ou minimizar problemas em dispositivos alimentados por fonte de energia.”

Definir o termo “QEE” é difícil, até mesmo porque é necessário se conhecer inicialmente quais serão os critérios e parâmetros objetos de análises. Conforme dito acima, é relativo, pois uma situação que comprometeria o desempenho de um sistema elétrico, uma planta, por exemplo, não afetaria, e talvez nem fosse observado numa outra planta.

O que antigamente poderia ser considerado de alta qualidade em termos de energia elétrica, hoje já não é mais garantido que seja, devido a aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais que estão em constantes mudanças, assim sendo, muito provavelmente o que hoje é considerado tolerável, no futuro poderá ser inadmissível.

O que se observa atualmente no Brasil é uma rígida observação de alguns parâmetros relativos à QEE, com fins regulatórios e com metodologias e critérios de medição bem definidos pelo Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), inclusive estes são motivos até de imposição de penalidades às concessionárias de distribuição de energia elétrica na forma de multa quando não são cumpridos. É o caso da

tensão de regime permanente, que por meio de faixas de tolerâncias (críticas e precárias) se determina indicadores de qualidade, tais como: duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC), e duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP)

Outro fator, também dependente das concessionárias de energia, e que é regulamentado pela ANEEL, é a confiabilidade do sistema no sentido de continuidade do fornecimento de energia aos consumidores, sem que haja a interrupção desse fornecimento. Para essa observação foram criados pela agencia os indicadores de qualidade mais voltados para o serviço de atendimento individualizado. São eles: duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC), frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC), duração máxima de interrupção contínuo por unidade consumidora (DMIC). Suas respectivas fórmulas, são:

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (1)$$

$$FIC = n \quad (2)$$

$$DMIC = t(i) \max \quad (3)$$

Onde:

i = índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração.

n = numero de interrupções da unidade consumidora considerada no período de apuração.

$t(i)$ = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada no período de apuração.

$t(i) \max$ = valor correspondente ao valor da máxima duração de interrupção contínua (i), expresso em horas e centésimos de horas.

4.1 PARÂMETROS DE QUALIDADE

Vários parâmetros podem contribuir para determinar o grau de qualidade de um sistema elétrico. Efetuando-se a correta leitura destes, é possível visualizar valores e através

de conhecimento específico, determinar a origem ou causa de uma anomalia ou valor fora da faixa denominada como tolerada. Os aspectos observados para se analisar a QEE, segundo a ANEEL, são:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônicos;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variação de tensão de curta duração (VTCD);
- g) Variação de frequência.

É importante ressaltar que nem sempre todos esses aspectos citados precisam estar em desconformidade para caracterizar a má qualidade. Igualmente importante, é atentarmos para o fato de que em muitos casos, um único parâmetro fora do valor recomendado, pode causar interferência em mais outro(s) indicador(es). A ANEEL não conseguiu atribuir valores como uma imposição regulatória para vários indicadores, por exemplo, o índice de distorção harmônica total, apesar de recomendar faixas adequadas sob o ponto de vista técnico, muito semelhante o que reza as normas internacionais. Vejamos o que diz um trecho do módulo 8 do PRODIST, quando se refere a harmônicas:

“Esses valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica após período experimental de coletas de dados.” (MÓDULO 8-PRODIST, 2011)

O mesmo se observa para outros parâmetros, tais como: desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão.

4.1.1 Tensão

Dentre estes parâmetros citados os que recebem maior atenção são os relacionados com a tensão, seja de regime, transiente ou desequilíbrio. Normalmente, quando ocorre um evento elétrico, seja causado por defeito ou má operação, o aspecto mais vislumbrado é a

tensão. Ela pode diminuir em amplitude, pode se desequilibrar entre as fases ou pode oscilar de modo inadequado. Essa preocupação com a tensão faz sentido, pois ela por si só é capaz de indicar muitas outras anomalias, sendo ela mesma apenas uma consequência da percussora, visto que, quando outro parâmetro está em desconformidade, a tensão será afetada. No entanto é o fato da tensão estar alterada que muitas cargas operam de modo inapropriado.

Índices de distorções harmônicas elevados, fator de potência reduzido, sobre carga, inserções ou retiradas de operação de grandes blocos de cargas, conexões de capacitores, são uns dos exemplos dos motivos que

A tensão estando inadequada gera muitos desvios nos padrões operacionais em máquinas, exemplo disso são as máquinas de solda a ponto, que para uma soldagem homogênea e de boa qualidade depende da tensão estabilizada, caso contrário, o processo fica comprometido. O problema é que o próprio processo de soldagem gera distúrbios na forma de onda de tensão e de corrente, diminuindo o Fator de Potência, FP, causando afundamentos de tensão.

Observaremos um exemplo a seguir, no qual se apurou através de oscilografia de um caso real, a queda de tensão no momento em que há diminuição do FP.

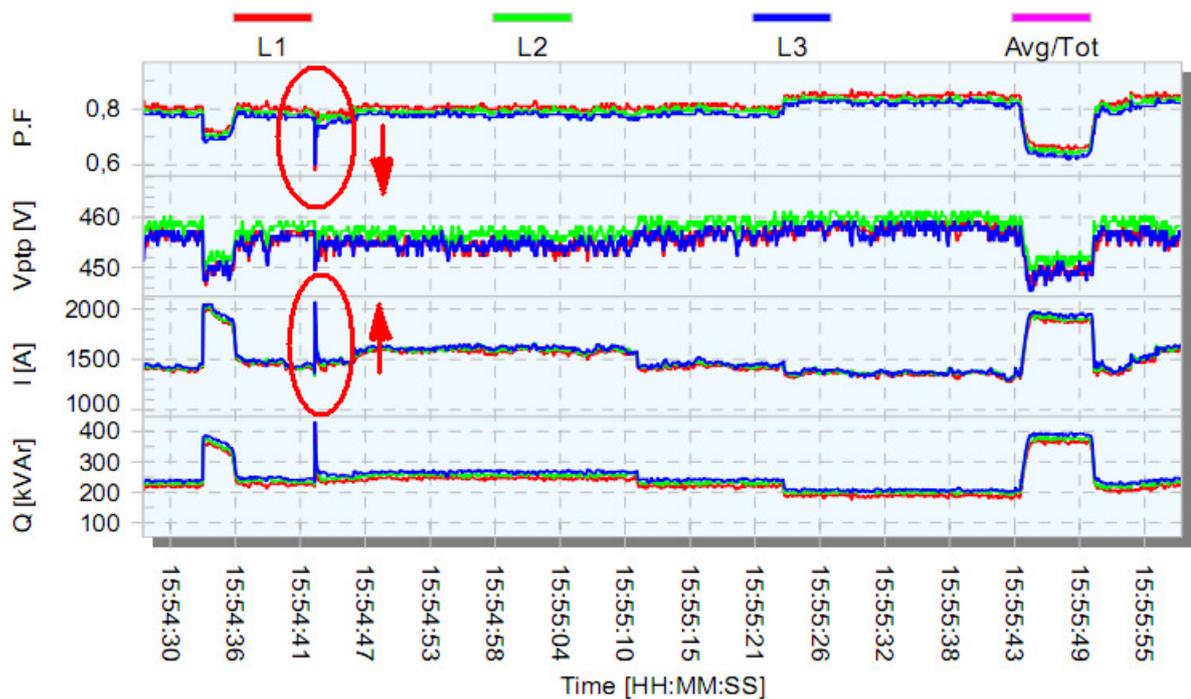


Figura 4: Interferência do FP na corrente e na tensão. (Fonte: Adaptado/Curso: Qualidade de Energia Elétrica, Barretos Engenharia).

Como podemos bem observar, no momento em que há queda no fator de potência, a corrente aumenta devido à presença da resultante reativa. Normalmente esse fenômeno acontece nos momentos em que as máquinas exigem um torque elevado, como por exemplo, numa prensa mecânica. Com o aumento brusco da corrente, as perdas são inevitáveis acarretando na queda de tensão.

Tais análises devem ser feitas por profissionais especializados no setor, já que, para se resolver definitivamente o problema é necessário conhecer a causa real. No caso usado acima como exemplo, nota-se que uma compensação reativa em tempo real resolveria o problema da brusca queda de tensão.

Apesar da ANEEL não dispor de legislação para alguns parâmetros, a avaliação da tensão pode indicar que os demais indicadores estão ou não de acordo com padrões recomendados. Daí entende-se a preocupação com a tensão. O módulo 8 do PRODIST trata essa questão com grande aprofundamento e inclusive desenvolveu uma nomenclatura própria na criação de alguns índices.

Considerando a tensão permanente, ou seja, ignorando transientes, foram criados os índices duração relativa de transgressão para tensão precária (DRP) e duração relativa de transgressão para tensão crítica (DRC) baseando-se em faixas de tolerâncias estabelecidas.

O procedimento para realizar essas medições é bem definido pela agência, sendo necessário no mínimo 168 horas de medições para que se possam atingir as 1008 leituras (dez minutos cada) exigidas pela ANEEL. Para esse caso é considerado a tensão efetiva medida em janelas de 0,20 a 0,25 segundos, ou seja, qualquer breve oscilação não será considerada nesse caso, já que esse intervalo de tempo corresponde a aproximadamente longos 15 ciclos. Mais adiante observaremos, durante a análise de casos reais, uma situação dessa natureza.

Conforme bem definido pela agência, caso seja confirmado inconformidade com os níveis de tensão, a concessionária terá um prazo máximo estabelecido para regularização que é de noventa dias para níveis precários ou quinze dias se constatado níveis críticos.

4.1.2 Fator de Potência (FP)

Esse parâmetro é o que mais interfere nos padrões de qualidade, já que ele causa distúrbios em outros parâmetros como tensão por exemplo.

O fator de potencia indica o quanto da potencia solicitada aos transformadores está sendo efetivamente utilizada, e é obtido pela equação (1):

$$F_p = \frac{P_{at}}{P_{ap}} \quad (4)$$

Onde:

F_p = Fator de potência;

P_{at} = Potência ativa (produz trabalho útil);

P_{ap} = Potência aparente (solicitada ao sistema).

Esse cálculo é realizado através da divisão de duas grandezas com mesma unidade (múltiplos e submúltiplos), portanto resulta num valor adimensional.

Vale a pena ressaltar que a potência ativa nunca será maior do que a potência aparente, podendo no melhor dos casos, ser igual, então a faixa de valores de fator de potência, em módulo, poderá variar de 0 à 1, sendo esse último o caso ideal e almejado.

A parcela da potência aparente que não resulta em trabalho útil é a potência reativa, que mesmo não se transformando em trabalho, esta sobrecarrega transformadores, geradores, linhas de transmissão e sistema de distribuição.

A elevação da corrente por conta da potência reativa aumenta as perdas por efeito joule, diminuindo a tensão.

As potências acima mencionadas podem ser analisadas por cálculos trigonométricos e expostos através de um diagrama como no exemplo abaixo.

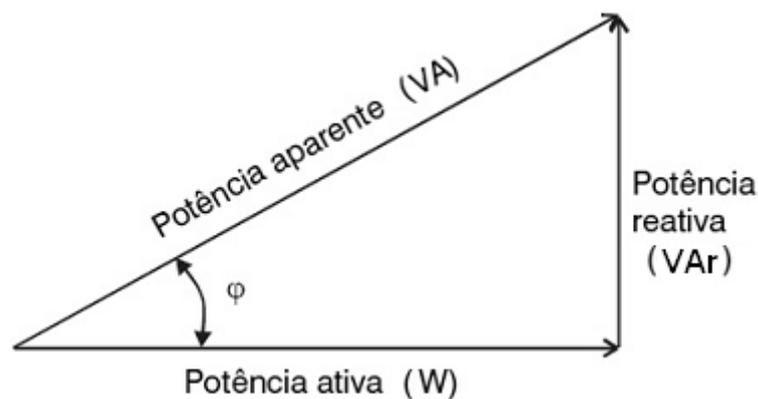


Figura 5: Diagrama das potências. Fonte: Autor

O ângulo ϕ é importante na análise das potências, pois seu cosseno indica o próprio FP. Observaremos um exemplo real de valores típicos de fator de potência.

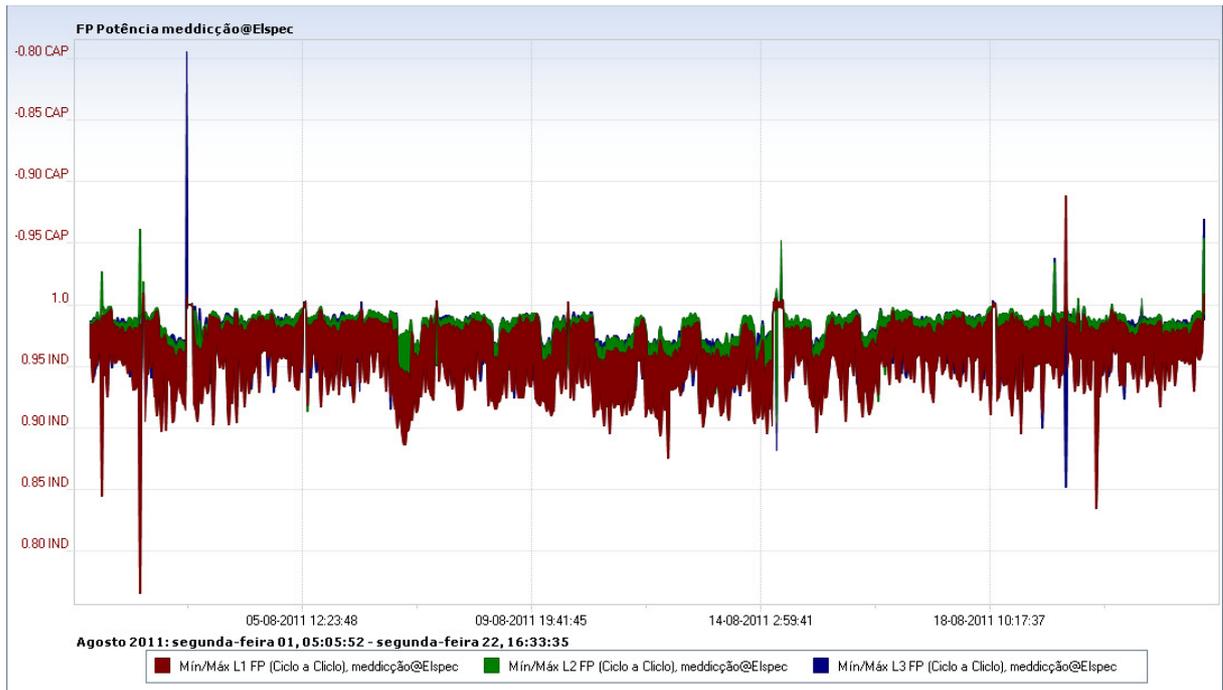


Figura 6: Medição real do fator de potencia. Fonte AES Eletropaulo

4.1.3 Harmônicos

A tensão elétrica alternada, quando em sua forma original, se apresenta em formato senoidal. Isso se dá em função do processo de geração que a originou. Se essa fonte fornecer energia a uma carga linear, ou seja, que obedeça a lei de Ohm, então a forma de onda da corrente também será senoidal e conseqüentemente, a onda de tensão não se deformará. Porém, se a carga energizada não for linear a corrente solicitada não será senoidal, contribuindo assim para a deformação da onda de tensão.

Apesar de deformada a onda continua sendo periódica, então podemos utilizar do teorema Fourier para decompor o sinal em diversas funções senos de frequências múltiplas da de fundamental [5]. Esse método, conhecido como Análise de Fourier, permite que através de um método matemático, se estabeleça a frequência e amplitude de senóides que se sobrepostas ou somadas com a fundamental resulte na onda original e deformada.

É baseado nesse procedimento que equipamentos de monitoração e medição fornece dados relativos à harmônicos. A frequência de cada harmônico e dado pela equação 2:

$$F_n = F.n \quad (5)$$

Onde:

F_n = Frequência da harmônica;

F = Frequência fundamental;

n = ordem da harmônica.

Conhecer a frequência e a amplitude das harmônicas mais importantes num sistema é importante para elaboração de um projeto de correção, por exemplo, através de filtros. Assim sendo, com a eliminação dessas frequências mais consideráveis, a onda de corrente (ou tensão) tende a forma fundamental.

Observe a figura abaixo:

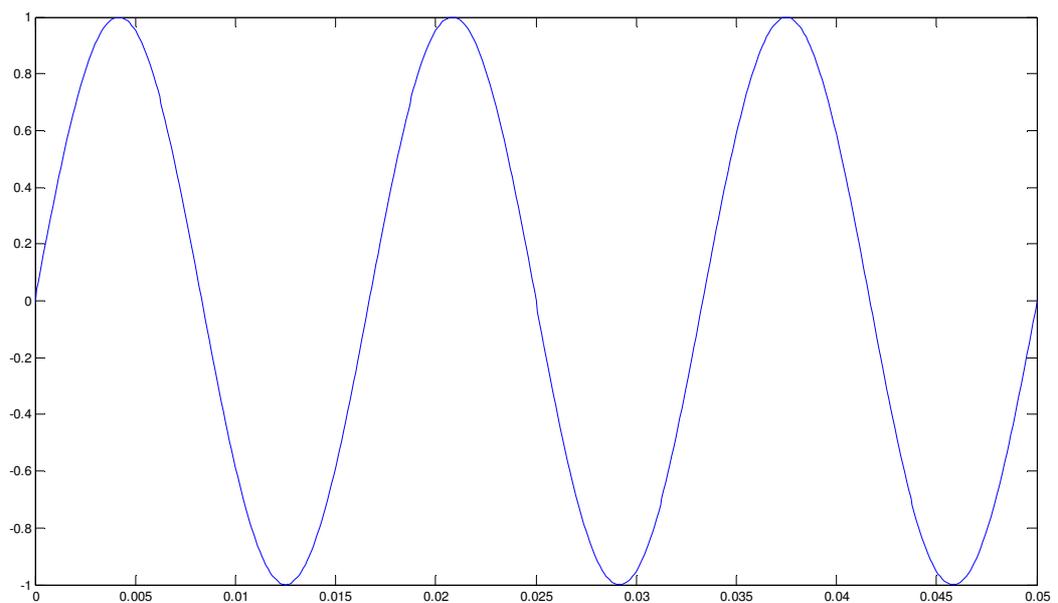


Figura 7 – Onda puramente senoidal. Fonte: Autor

A figura acima representa a forma de onda senoidal com frequência fundamental igual a 60Hz. Possui amplitude unitária, e nesse caso como bem podemos observar, se apresenta durante um período de 3 ciclos que equivale a 50ms. Introduziremos agora uma componente harmônica, mais precisamente de terceira ordem, ou seja, 180Hz com uma amplitude típica para essa ordem de 22% da fundamental.

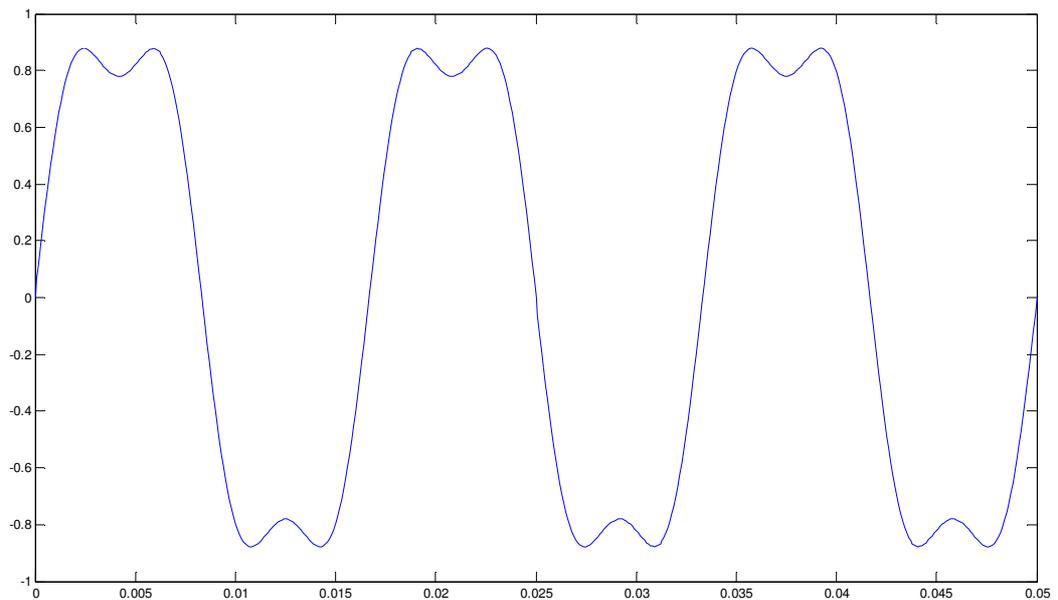


Figura 8 – Onda senoidal com 3ª harmônica. Fonte: Autor

Para sistemas elétricos como, por exemplo, aquecedores, esse tipo de distorção não afeta consideravelmente no funcionamento do processo, no entanto, em sistemas onde se deve considerar a forma de onda, ocorre mal funcionamento ou até mesmo podendo danificar a máquina ou dispositivo. Em motores e geradores, aumentam as perdas no circuito magnético, lembrando de que o fluxo magnético depende da taxa de variação momentânea da tensão.

Lembrando que em diversos equipamentos eletrônicos sensíveis, as componentes harmônicas de maiores frequências ao se combinarem com a componente fundamental podem gerar situações que levem a sua queima, pois podem criar picos de tensão com amplitudes maiores do que as tensões da onda fundamental (nominal) através a soma dessas componentes. A seguir mostraremos uma simulação na qual ao associar componentes harmônicas criaram picos de tensão.

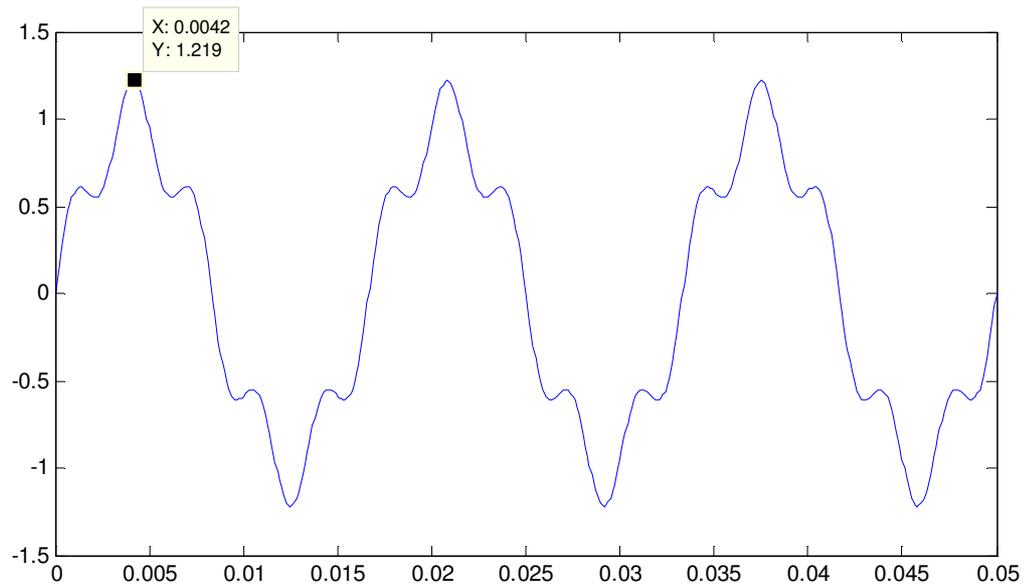


Figura 9 – Onda senoidal com picos de tensão. Fonte: Autor

Segundo a ANEEL, a monitoração deve ser feita até a 25ª ordem, pois a partir daí as contribuições se tornam cada vez mais desprezíveis. Observemos o espectro harmônico medido de um sistema elétrico a fim de exemplificar essas componentes.

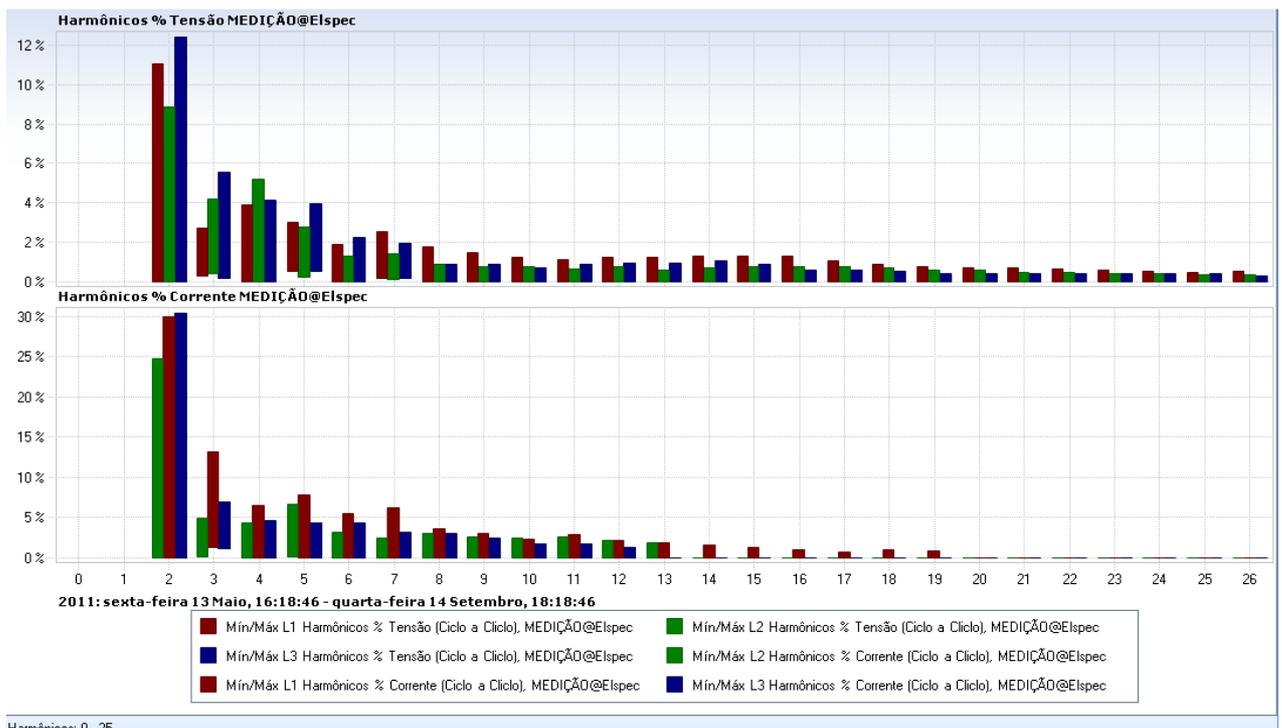


Figura 10 – Espectro harmônico. Fonte: AES Eletropaulo

Através desse exemplo prático é que podemos ter uma idéia do quanto cada componente contribui para a distorção harmônica total. Concluímos que após a 25ª ordem, as harmônicas são cada vês mais desprezíveis, daí o motivo pelo qual a ANEEL optou por monitorar até esse nível de distorção, apesar de que a maioria dos equipamentos que realizam esse tipo de monitoramento, supervisiona até a 500ª ordem de harmônico.

Um detalhe interessante nesse último gráfico é o fato de ocorrer uma incidência percentual maior dessas harmônicas na corrente do que se comparado com a tensão. Essa disparidade é em função da potência de curto circuito do barramento no qual se realizou a medição, quanto maior for essa potência menor será a distorção. É valido lembrar que apesar de menor, a distorção de tensão é a que prejudica o sistema elétrico total e conseqüentemente outros consumidores.

5 ANÁLISES DE CASOS REAIS

Analisaremos agora a monitoração da qualidade de energia elétrica através do equipamento Elspec Investigator. Essa medição ocorreu numa indústria localizada em Suzano, região metropolitana de São Paulo, no período compreendido entre os dias 12/07/2011 e 14/07/2011. Esses dados foram disponibilizados pela AES Eletropaulo.

Uma função muito útil desse instrumento é a emissão de um relatório automático dos eventos relacionados à qualidade da energia que possam ter ocorrido durante o monitoramento. Através de um algoritmo (que pode ser configurado) ele indica quais foram as falhas apontadas e seus instantes para que possamos encontrar com maior rapidez e nos permita realizarmos nossas interpretações.

Esse equipamento é de origem israelense e aqui no Brasil é representado e comercializado pela empresa Kron Medidores, que através de sua equipe técnica, nos forneceram informações importantes de como utilizar a melhor maneira os recursos mais complexos de tal instrumento.

Observemos o aspecto do software que ira expor e processar os dados colhidos pelo equipamento em campo.

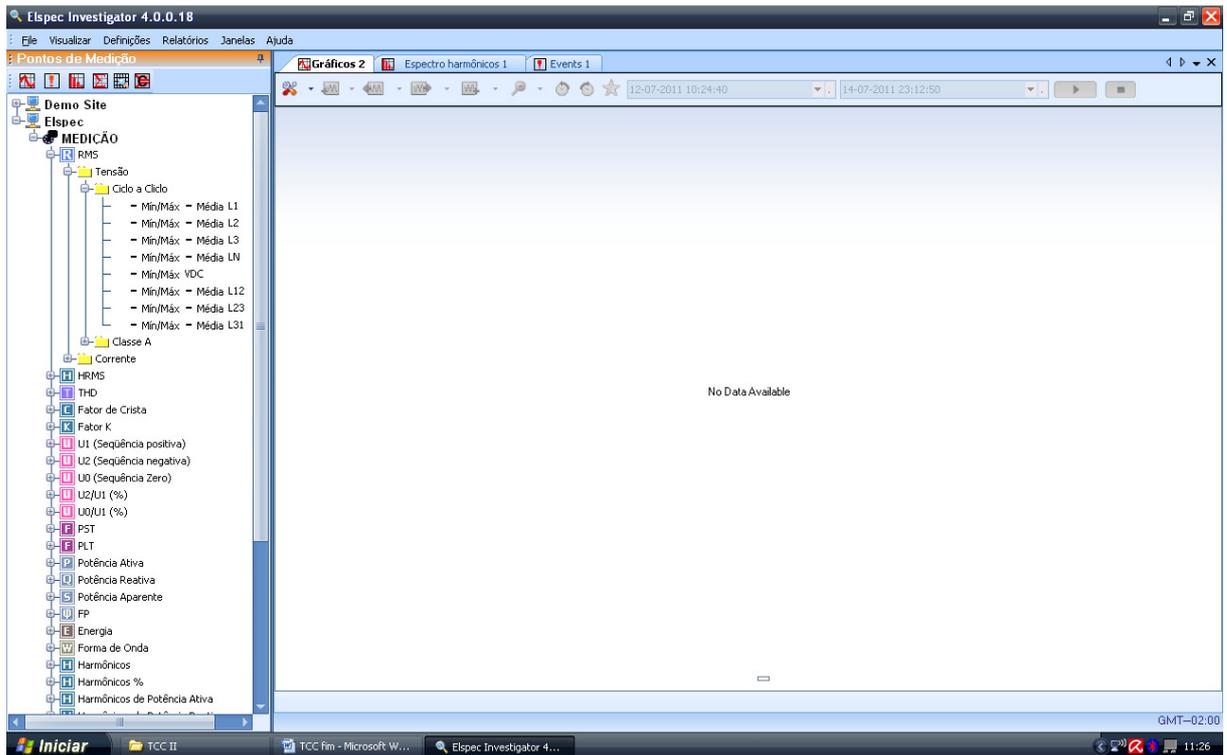


Figura 11 – Interface de análise dos parâmetros. Fonte: AES Eletropaulo

Como podemos ver no lado esquerdo da imagem que representa a tela do computador, existem muitos parâmetros que podem ser observados, basta que selecionemos o qual se deseja observar de acordo com a estratégia de análise pessoal.

Como já mencionado, a tensão é o parâmetro mais observado nesses tipos de monitorações, apesar de, como já mencionado nesse trabalho, esse parâmetro normalmente indicar a consequência de um problema e não necessariamente a causa, verificaremos a seguir a tensão RMS do período em questão.

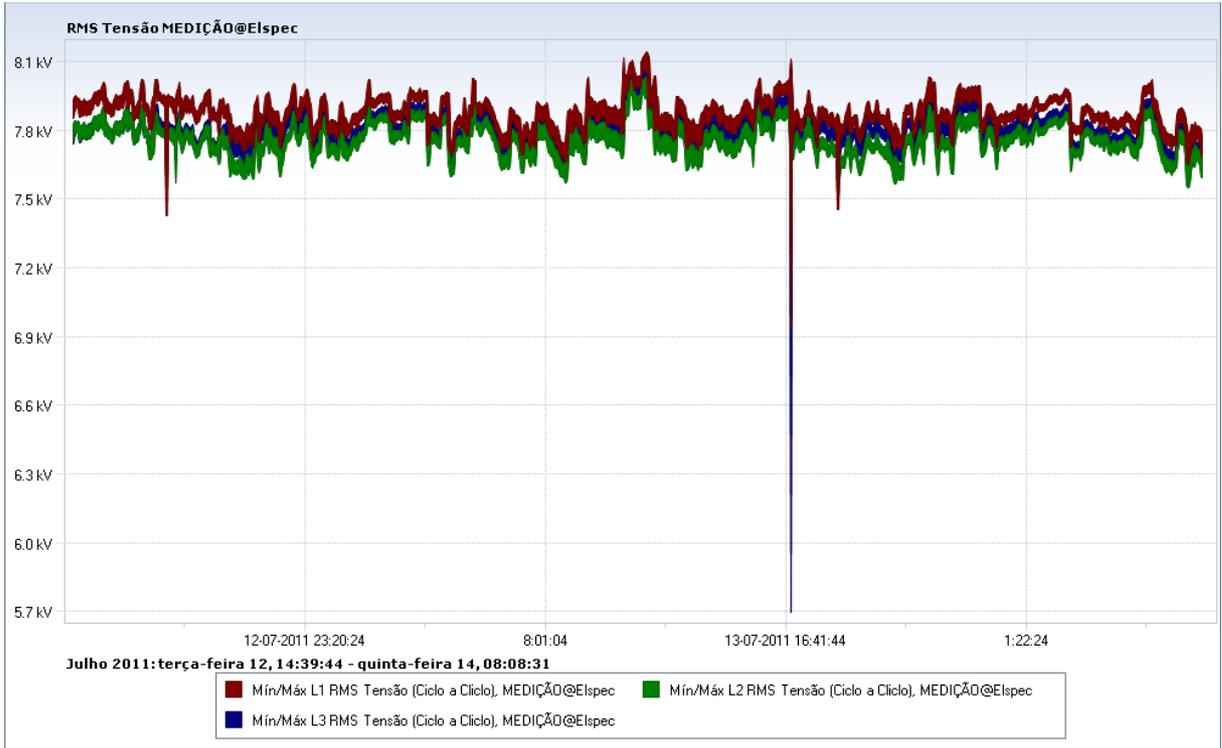


Figura 12 – Tensão RMS. Fonte: AES Eletropaulo

Podemos ver uma severa queda de tensão na fase azul, então aproximaremos para ver melhor o que realmente ocorreu na figura abaixo:

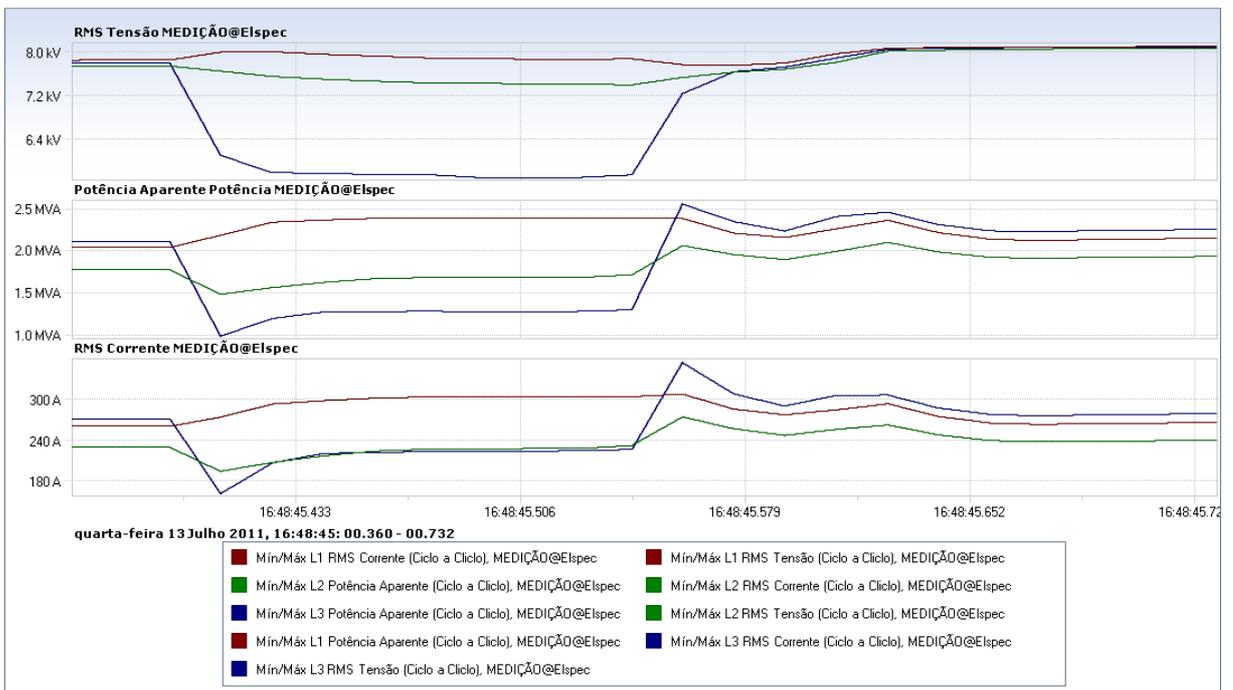


Figura 13 – Detalhe de tensão, potência e corrente. Fonte: AES Eletropaulo

Foram incluídas para esse detalhamento, a potência ativa e a corrente, que analisadas juntas com a tensão, se observa um afundamento de tensão com duração de aproximadamente dez ciclos ou cerca de 170 ms. A causa desse evento não foi definida, pois seriam necessárias mais medições para se definir com exatidão o motivo que causou o evento. A fim de melhor visualizar, será mostrado abaixo o gráfico das formas de ondas.

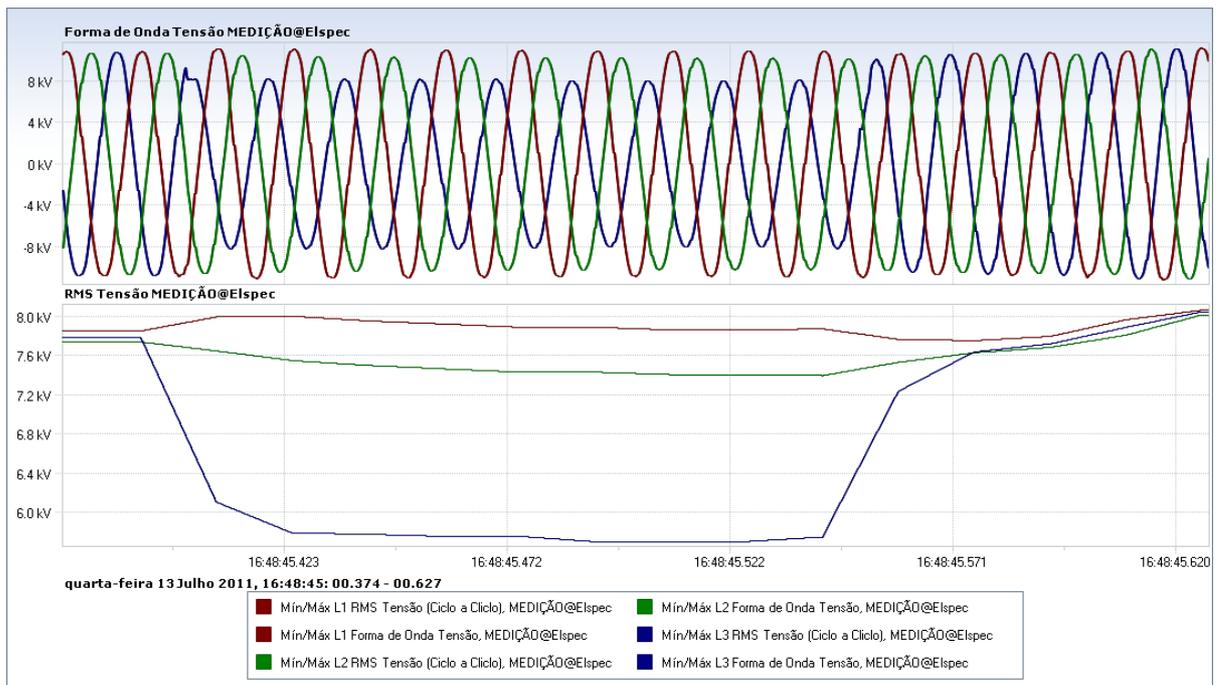


Figura 14 – detalhe de forma de onda de tensão. Fonte: AES Eletropaulo

Considerando a curva CBEMA como referência [6], podemos ver que esse afundamento de tensão pode ter comprometido o funcionamento de algum equipamento eletrônico mais sensível, pois observando a curva abaixo essa situação se enquadra na região sujeita a desligamento do equipamento. Apesar de que para os critérios de monitoramento de regime permanente do PRODIST, esse evento nem se considerou, pois conforme mencionado, deve ser monitorado em janelas de 0,20 à 0,25 segundos.

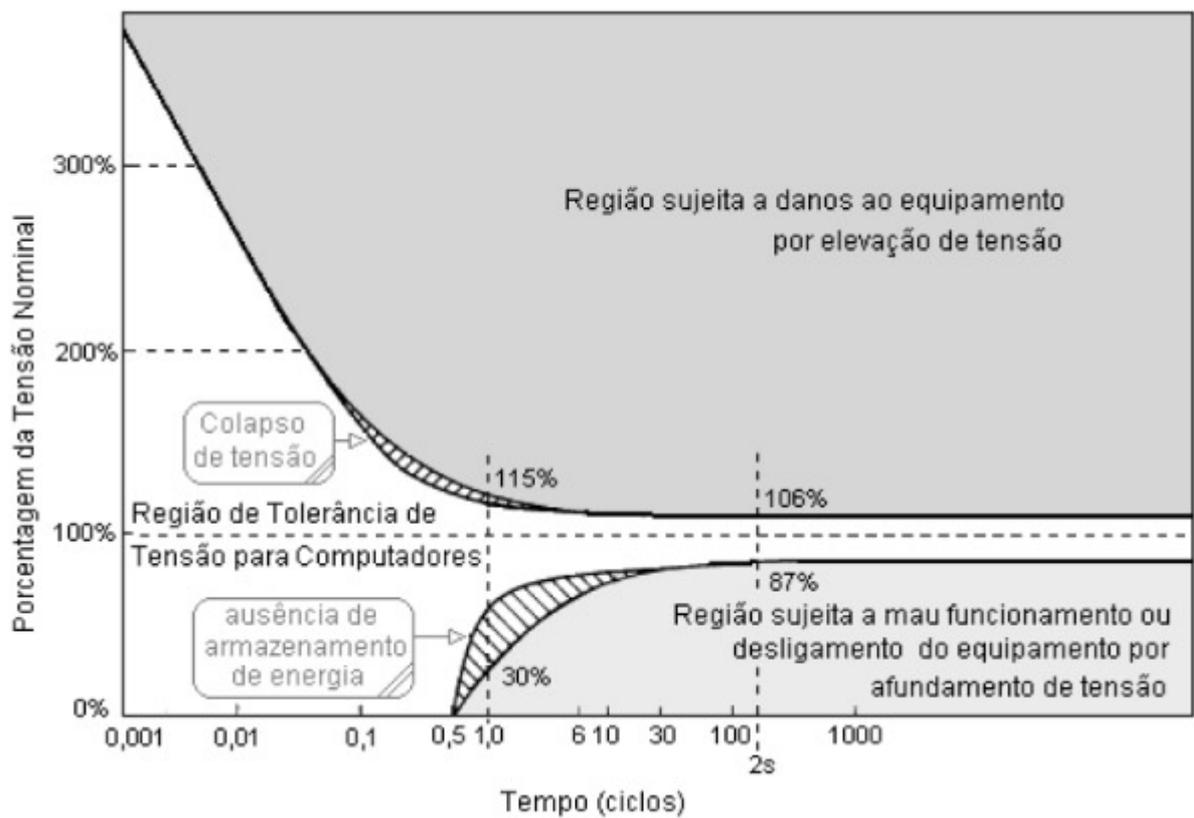


Figura 15 – curva CBEMA. Fonte: http://fourier.com.br/qualidade_de_energia.html

Outra situação que merece análise muito bem detalhada é questão das harmônicas, pois elas podem gerar uma falsa sensação de falta no sistema elétrico, muitas vezes, ocultando a verdadeira causa do evento acarretando na não solução do problema. O intervalo de tempo medido abaixo mostra um exemplo dessa situação, na qual após uma alta taxa de distorção harmônica de tensão observada, ocorreu a interrupção do fornecimento de energia, certamente devido ao aumento da corrente proveniente da potência reativa, já que, o fator de potência é afetado pelo THD.

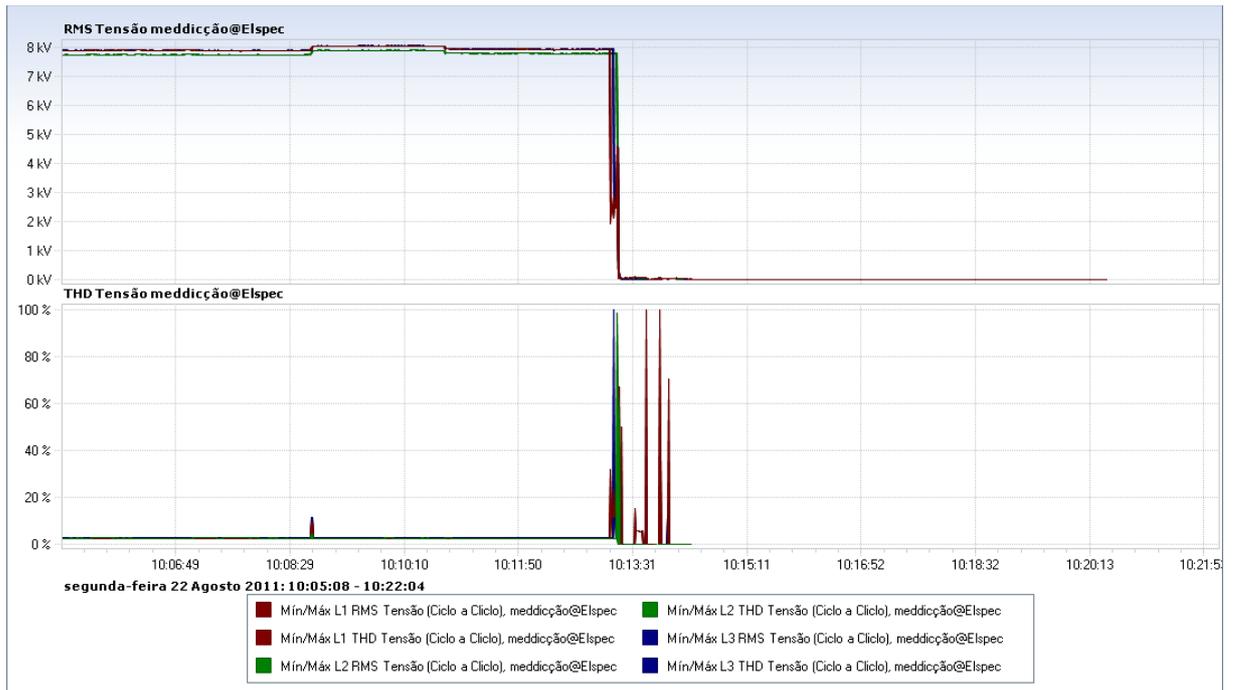


Figura 16 – Evento de interrupção. Fonte: AES Eletropaulo

6 CONCLUSÃO

Para definir qualidade de energia elétrica ou determinar níveis de tolerância aceitáveis para os diferentes parâmetros envolvidos em QEE, é necessário que inicialmente se avalie o contexto de utilização da energia, pois uma situação que possa ser considerada satisfatória para certo tipo de carga, pode não atender outro tipo de carga, danificando-a ou paralisando processos.

Avaliando de modo geral, ou seja, no sistema elétrico nacional, ainda falta disseminação da noção de responsabilidade do consumidor frente à qualidade da energia, visto que, ele próprio causa distúrbios elétricos que poderão afetar, além dele, outros consumidores, entendendo que não depende apenas das empresas distribuidoras de energia e principalmente que os maiores prejudicados serão os próprios consumidores.

Aos órgãos reguladores cabem o acompanhamento e aplicação das mais novas tecnologias de monitoramento e medições para que se identifiquem com exatidão as causas de distúrbios, atualização das faixas de tolerância dos parâmetros medidos de acordo com a necessidade técnica, definição de regulamentação para todos os parâmetros que afetem a QEE, bem como a exigência de operação dentro das faixas toleráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Plano Decenal de Expansão de Energia**. Empresa de pesquisa energética. Ministério de Minas e Energia. Extraído em:
- [2] Cunha, Livia. Memória da Eletricidade – **Gerenciamento de energia no Brasil**. O setor elétrico, Atitude. São Paulo, p 78-85, junho 2010.
- [3] **Procedimentos de Distribuição (PRODIST)**, modulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Setembro/2011.
- [4] Apostilas do curso: **Qualidade de Energia Elétrica**. (Maio/2011). Barretos Engenharia.
- [5] HAYKIN, Simon; VEEN, Barry Van: **Sinais e sistemas**. São Paulo, SP: Bookman, 1999. 668 p.
- [6] Carvalho, Paulo Luciano de. **Uma contribuição ao estudo da depressão de tensão**.
- [7] ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo – SP: Artliber, 2001. 252 p.