

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

IT - 012

Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica

Sigmar Maurer Deckmann
José Antenor Pomilio

UNICAMP/FEEC/DSE

Revista e atualizada em Fevereiro de 2020

APRESENTAÇÃO

Este texto foi elaborado em função da disciplina "Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica", ministrada nos cursos de pós-graduação em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas.

Este é um material foi originalmente preparado pelo Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann^a, pioneiro na área de Qualidade de Energia no Brasil. A partir de 2008 a disciplina passou a ser oferecida pelo Prof. José Antenor Pomilio^b, tendo como base o material desenvolvido pelo Prof. Deckmann.

O curso está dividido em duas partes. A primeira se preocupa com a caracterização dos fenômenos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica, apoiando-se em conhecimentos da área de sistemas de energia elétrica e, subsidiariamente, de eletrônica de potência. As análises referem-se não apenas às redes elétricas comerciais, mas também àquelas presentes em ambientes restritos, como em aviões e navios. A segunda parte, inovadora em sua concepção, se propõe a discutir as metodologias digitais utilizadas na instrumentação dedicada à quantificação de tal "Qualidade", embasando-se em conteúdos relacionados ao processamento digital de sinais e áreas correlatas.

Estas apostilas passam por constantes atualizações, em função da evolução tecnológica na área, além do que, o texto pode ainda conter eventuais erros, para o que pedimos a colaboração dos estudantes e profissionais que fizerem uso das mesmas, enviando uma comunicação sobre as falhas detectadas. Os resultados experimentais apresentados referem-se a trabalhos dos autores, juntamente com estudantes e outros pesquisadores e foram publicados em congressos e revistas, conforme indicado nas referências bibliográficas.

^a **Sigmar Maurer Deckmann** possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1973), mestrado em Engenharia Elétrica (1976) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1980) e curso técnico em Eletrotécnica pela Escola Técnica Parobé, Porto Alegre (1965). Atuou em inúmeros projetos junto a empresas de energia (CEMIG, CPFL, Elektro, Eletropaulo) em projetos pioneiros na área de Qualidade da Energia Elétrica, inclusive com o desenvolvimento de equipamentos de medição especializada. Aposentou-se como Professor Titular da Universidade Estadual de Campinas.

^b **José Antenor Pomilio** é engenheiro eletricitista (1983), mestre (1986) e doutor (1991) em Eng. Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. De 1988 a 1991 foi chefe do grupo de eletrônica de potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou estágios de pós-doutoramento junto à Universidade de Pádua (1993/1994 e 2015) e à Terceira Universidade de Roma (2003), ambas na Itália. Foi presidente da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência - SOBRAEP e membro de diversas diretorias desta entidade. Foi coordenador do Comitê de Eletrônica de Potência e Máquinas Elétricas da Sociedade Brasileira de Automática, SBA (duas gestões) e membro eleito do Conselho Superior desta Sociedade. Foi membro do comitê administrativo da IEEE Power Electronics Society por 4 anos. Foi editor de *Eletrônica de Potência*, publicação científica da SOBRAEP e editor associado da IEEE Transactions on Power Electronics (IEEE). É Professor Titular da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, onde atua desde 1984.

PARTE A - Conceitos de Qualidade de Energia Elétrica

1. A importância da Qualidade da Energia Elétrica

- 1.1. O que é qualidade de energia elétrica
- 1.2. Por que monitorar a qualidade da energia elétrica ?
- 1.3. Como monitorar a qualidade da energia elétrica
- 1.4. Algumas situações ilustrativas

2. Normatização e Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica

- 2.1. Padrões brasileiros para avaliação da tensão suprida
- 2.2 Comissão Internacional de Eletrotécnica – CEI/IEC
- 2.3 Associação Brasileira de Normas Técnicas
- 2.4 IEEE Standard Association e ANSI - American National Standards Institute
- 2.5 International Council on Large Electric Systems – CIGRÈ
- 2.6 Normatização de QEE em ambientes especiais

3. Distúrbios que Afetam a Qualidade de Energia Elétrica

- 3.1. Condições ideais de operação de um sistema elétrico
- 3.2. Condições reais de operação
- 3.3. Critérios de avaliação da qualidade
- 3.4. Terminologia básica e definições
- 3.5. Caracterização de distúrbios
- 3.6. Classificação dos distúrbios

4. Flutuações de Tensão e o Efeito de Cintilação Luminosa

- 4.1. O que é cintilação luminosa ou efeito “flicker”
- 4.2. Medição do efeito flicker
- 4.3. Exemplo de medição
- 4.4. Formas de atenuar os efeitos da cintilação
- 4.5. *Flicker* em outros tipos de dispositivos de iluminação

5. Distúrbios em frequência: Causas, Efeitos, Soluções e Normas

- 5.1 Origem das distorções harmônicas
- 5.2 Efeito distorcivo devido à saturação magnética
- 5.3 Efeito distorcivo causado por reator controlado por tiristores
- 5.4 Distorção causada por fornos a arco
- 5.5 Cargas eletrônicas
- 5.6 Sequência de fase das harmônicas
- 5.7 Efeito das fases relativas das harmônicas
- 5.8 Efeitos das harmônicas
- 5.9 Quantificação da distorção da onda
- 5.10 Redução do conteúdo harmônico da tensão e da corrente
- 5.11 Estudos de caso em redes de distribuição
- 5.12 Inter-harmônicas
- 5.13 Normas e Critérios de Avaliação de Distorção Harmônica
- 5.14 Detalhes da instrumentação segundo a IEC
- 5.15 Interferência eletromagnética conduzida pela rede

6. Transitórios e Desequilíbrios

- 6.1. Partida de motores
- 6.2. Energização de transformadores
- 6.3. Chaveamento de capacitores
- 6.4. Ressonância entre banco de capacitores e transformador
- 6.5 Energização de retificadores com filtro capacitivo
- 6.6 Desequilíbrio de Tensão
- 6.7 Normas referentes ao desequilíbrio

7. Variações transitórias de tensão de curta duração

- 7.1 Metodologia da Magnitude e Duração do Evento (M&D)
- 7.2 Tolerância de equipamentos a VTCDs
- 7.3 Comportamento de cargas eletrônicas frente a VTCDs
- 7.4 Dinâmica do cálculo do calor eficaz

8. Aterramento e Qualidade da Energia Elétrica

- 8.1. Aterramento com ou sem fio de retorno
- 8.2 Aterramento segundo a NBR5410
- 8.3. Aspectos de Segurança
- 8.4 Aterramento e Compatibilidade Eletromagnética

PARTE B - Técnicas de Análise de Sinais Aplicadas ao Sistema de Energia Elétrica**1. Análise de Sinais no Domínio do Tempo**

- 1.1. Caracterização de sinais periódicos
- 1.2 Exemplos de sinais periódicos presentes em conversores eletrônicos de potência
- 1.3 Análise temporal de circuito não linear
- 1.4 Processamento do fator de distorção no domínio do tempo

2. Tratamento Estatístico de Sinais

- 2.1 Processo de amostragem e classificação
- 2.2 Exemplo
- 2.3 Exemplos de medições

3. Análise de Sinais no Domínio da Frequência

- 3.1 Representação no domínio do tempo
- 3.2 Representação no domínio da frequência
- 3.3 Representação de sinais periódicos
- 3.4 Como aplicar a análise de Fourier
- 3.5 Representação da Série de Fourier na Forma Exponencial
- 3.6. Da série de Fourier à transformada de Fourier
- 3.7. Da transformada de Fourier à transformada de Laplace

4. Análise de sinais discretizados

- 4.1 Amostragem de sinais
- 4.2 Transformada discreta de Fourier
- 4.3 Exemplos de Espectros de Sinais Amostrados
- 4.4 Análise de sinais empregando a transformada discreta de Fourier (TDF)
- 4.5 Algoritmo para reversão de bits
- 4.6 Algoritmo da FFT
- 4.7 Entrada e Saída da FFT
- 4.8 Unidades para amplitudes no domínio da frequência
- 4.9 Janelas de ponderação de amostras

5. Filtros digitais e aplicações em SEE

- 5.1 Transformada Z e Filtros Digitais
- 5.2 Mapeamento de pólos e zeros
- 5.3 Utilidade da transformada Z
- 5.4 Transformações entre Sistemas Contínuos e Discretos
- 5.5. Filtro notch
- 5.6 Filtro de mediana

1. A importância da Qualidade da Energia Elétrica

1.1. O que é qualidade de energia elétrica

O termo *qualidade de energia elétrica* (QEE), que virou jargão no setor elétrico nos últimos anos, tem sido usado *lato-sensu* para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores ^[1, 2].

Uma definição abrangente se refere a QEE como sendo uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores ^[3,4]. Essa medida inclui características de *continuidade* de suprimento e de *conformidade* com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor como das cargas elétricas. Entre os parâmetros a considerar tem-se:

- Distorções;
- Flutuações de tensão;
- Variações de tensão de curta duração;
- Desequilíbrio de sistemas trifásicos;
- Transitórios rápidos.

A preocupação com a QEE é decorrente em parte da reformulação que o setor elétrico vem experimentando, para viabilizar a implantação de um mercado consumidor, no qual o produto comercializado passa a ser a própria energia elétrica. Parece evidente que o consumidor prefere adquirir a energia que apresenta parâmetros adequados de qualidade ao custo mais baixo possível. Nesse contexto, as operadoras de sistemas elétricos são estimuladas, tanto pelas agências reguladoras (ANEEL) como pelo próprio mercado, a prestar informações sobre as condições de operação ou fornecer detalhes acerca de eventos ocorridos e que afetaram os consumidores. Esse é um dos papéis do monitoramento e da análise da qualidade de energia elétrica.

Está-se tornando praxe também incluir cláusulas contratuais sobre as condições de fornecimento de energia pelos agentes fornecedores (gerador, transmissor, distribuidor) aos agentes compradores (distribuidor, consumidor final). Tais contratos podem prever multas por violação das condições previstas. Isso aumenta a necessidade de se dispor de normas com limites adequados, que possam ser satisfeitas pelo lado do fornecedor, sem onerar os custos e que atendam ao consumidor, sem maiores prejuízos devido a perdas inaceitáveis.

Além disso, deve-se levar em conta que a eletricidade atingiu o *status* de bem comum e essencial para o funcionamento da nossa sociedade, em todas as áreas. Deve-se, portanto, tratar de tal recurso, que é imprescindível à vida moderna, de modo que todas as atividades humanas possam utilizá-lo, sem criar interferências com outras atividades, sejam processos tecnológicos ou biológicos. Para tanto, os conceitos de QEE devem estar submetidos aos princípios que regem a compatibilidade eletromagnética (CEM).

Para definir o que seja qualidade de energia elétrica, tem-se que tratar de vários problemas que afetam os consumidores da energia elétrica ou seus usuários indiretos. Esses problemas vão desde os incômodos visuais provocados pela variação luminosa devido à má regulação da tensão até a interferência em equipamentos eletrônicos sensíveis, causada por interrupções no fornecimento de energia ou por fenômenos de mais alta frequência.

Verifica-se que tanto no nível de cargas domésticas ou comerciais, como em aplicações industriais, os consumidores e seus equipamentos estão cada vez mais sensíveis e dependentes das condições de operação do sistema de energia elétrica. Isso se deve ao aumento da complexidade das funções que as cargas elétricas devem desempenhar através de controle de processos, mesmo em equipamentos domésticos (fornos de microondas, máquinas de lavar, relógios digitais, etc.). Basta lembrar as dificuldades enfrentadas pelos consumidores, quando se verificam interrupções de energia elétrica, causando perda de produtos perecíveis, paralisação de serviços em escritórios,

perda de sinalização no trânsito, desligamento de fornos, paralisação de atividades essenciais em redações de jornais, hospitais, etc.

A complexidade do problema da avaliação e controle da qualidade da energia suprida não resulta apenas da grande variedade de perturbações a que o sistema elétrico está sujeito. São relevantes também os variados efeitos que podem causar, desde o sobreaquecimento (aumento de perdas e de rendimento) de máquinas elétricas devido a distorções espectrais ou desequilíbrios; variações luminosas devidas a flutuações de tensão; oscilações de potência sustentadas entre as cargas e a rede durante a operação de cargas não lineares e variáveis; até interrupções momentâneas de tensão, cujas causas em geral são curtos-circuitos de difícil prevenção.

Uma questão cada vez mais discutida no contexto de "power quality" é a definição dos objetivos e dos indicadores relevantes ^[5]. Uma vez que existem diferenças significativas entre as características de sistemas elétricos nos diversos países, dependendo, por exemplo, da predominância das fontes primárias (hidráulica, térmica, eólica, solar, etc), pode-se esperar que os indicadores de QEE também variem.

Além disso, as normas de operação para um sistema elétrico também variam de um país para outro, de modo que não existem critérios únicos para mensurar a qualidade da energia elétrica.

1.2. Por que monitorar a qualidade da energia elétrica?

Em geral, os problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica são identificados quando um equipamento alimentado pela rede elétrica deixa de funcionar como deveria. Assim, uma lâmpada que apresenta variações luminosas, um motor que sofre vibrações mecânicas, equipamentos operando com sobreaquecimento, proteção atuando intempestivamente, capacitores com sobretensões ou sobrecorrentes podem ser indícios de problemas de QEE.

Se tais problemas não forem devidamente tratados pode haver prejuízos materiais (redução da vida útil de transformadores, motores, capacitores e equipamentos eletrônicos sensíveis), bem como ocorrer perturbações físicas em pessoas (incômodo visual devido ao efeito de cintilação, ou incômodo auditivo devido a ressonâncias eletromagnéticas), levando ao comprometimento da capacidade produtiva tanto das máquinas como das pessoas.

Existem estudos que mostram os custos relacionados com perda de qualidade da energia elétrica. Há quase 20 anos estimava-se que a indústria manufatureira americana tem custos da ordem de 10 bilhões de dólares associados a interrupções de processos ^[6]. Já no cenário europeu, na mesma época ^[7], os custos estimados associados com vários tipos de distúrbios chegariam a 1,5% do PIB.

Além dos números serem elevados, estima-se que tais custos continuariam a subir rapidamente não fossem tomadas medidas saneadoras. Isso se deve aos efeitos cumulativos que a perda de qualidade pode impor, seja através da redução da vida útil de dispositivos, limitação da capacidade efetiva dos equipamentos, mau funcionamento de máquinas além das perdas elétricas em si.

Mesmo com o maior rigor nas normas, não existe indicação precisa de que tenha ocorrido melhoria sensível no cenário ^[8,9].

1.3. Como monitorar a qualidade da energia elétrica

A partir da identificação de uma falha ou mau funcionamento de uma instalação ou equipamento, se inicia um estudo para diagnosticar as causas do problema relativo à qualidade da energia elétrica. Como se trata de diagnosticar um problema de compatibilidade eletromagnética, esse pesquisa pode envolver questões que vão além de um simples problema tecnológico. Uma abordagem recomendável inclui os seguintes passos:

1. Em primeiro lugar conhecer os possíveis problemas que se poderá encontrar;
2. Estudar as **condições locais** onde o problema se manifesta;

3. Se possível, medir e **registrar as grandezas** contendo os sintomas do problema;
4. Analisar os dados e confrontar os resultados obtidos com estudos ou **simulações**;
5. Finalmente, diagnosticar o problema, sua possível causa e propor soluções.

Cada um desses passos requer um conhecimento ou estudo específico.

Tratar de conhecer os problemas é um dos objetivos deste curso. Quando se tem uma idéia de como os problemas se manifestam, das suas causas, dos seus efeitos e das soluções usuais, fica mais fácil chegar a um diagnóstico correto.

Conhecer as condições locais é fundamental para levantar corretamente as hipóteses que levam às causas do problema. As circunstâncias locais muitas vezes interferem na forma em que os sintomas se apresentam ao observador. Por exemplo, o afundamento da tensão pode ser a causa da falha na partida de um motor (dimensionamento errado do alimentador) ou a consequência (curto-circuito no enrolamento, falta de fase, etc.).

Saber escolher corretamente os instrumentos de medida e os locais mais adequados para a sua instalação é decisivo para se conseguir detectar e quantificar o problema. Por exemplo, surtos rápidos de sobretensão podem passar despercebidos mesmo quando se utilizam osciloscópios rápidos, se o nível de *trigger* não for ajustado adequadamente. Conhecer a faixa de frequências do distúrbio também é importante para escolher o tipo de registrador que deve ser usado. Fenômenos térmicos, por exemplo, costumam ser lentos, requerendo registradores contínuos para longos períodos de medição. Eventos intermitentes ou espúrios podem requerer registradores contínuos para a sua detecção. Fenômenos periódicos, como ressonâncias harmônicas ou modulação de amplitude, podem requerer analisadores de espectro.

A interpretação dos dados recolhidos exige conhecimento sobre as técnicas de medição. Isso é válido particularmente com os analisadores de espectro, devido às limitações impostas pelo truncamento do sinal amostrado. O efeito de vazamento espectral (“aliasing”), causado pelo truncamento da amostragem, pode ser confundido com componentes inter-harmônicas ou modulantes, que na verdade podem não existir. Dependendo do princípio de funcionamento do instrumento, as medidas podem ser contaminadas erradamente pela presença de harmônicas.

Os modelos de simulação também são úteis para validar as conclusões e encontrar soluções. Modelos físicos ou matemáticos, que permitam realizar simulações computacionais, ajudam a entender o fenômeno e descobrir em que condições o problema se manifesta. Uma solução às vezes só é encontrada depois de o problema ser exaustivamente estudado através de simulação. Não é porque o problema parece ser complexo, que a solução não possa ser simples.

1.4 Algumas situações ilustrativas

A máquina de refrigerante

Especialistas em qualidade de energia elétrica nos Estados Unidos foram chamados para investigar um problema no sistema de alimentação de um centro de processamento de dados de uma grande empresa. Foram instalados equipamentos para monitorar a tensão de alimentação do computador que era mais afetado e se constatou que aproximadamente a cada 15 minutos ocorria um transitório na tensão que interferia no funcionamento dos computadores.

Feito o levantamento das cargas ligadas ao ramal, se verificou que no corredor em frente à sala dos computadores havia uma máquina de refrigerante para uso dos funcionários. Na falta de alimentador próprio, o refrigerador havia sido ligado no mesmo circuito que alimentava a sala dos computadores. Quando o motor do refrigerador partia a cada 15 minutos, ocorria uma subtensão que interferia no funcionamento dos computadores. Identificado o problema e a sua causa, a solução óbvia era mudar a alimentação da máquina de refrigerante. Por falta de outra tomada, deslocou-se a máquina para outro local no mesmo corredor, verificando-se que o problema estava resolvido.

Quinze dias depois os especialistas foram novamente chamados porque o problema tinha voltado a aparecer. Nova monitoração na sala dos computadores e os transitórios lá estavam. A equipe foi verificar e constatou que a máquina de refrigerante tinha sido recolocada no corredor. Por quê? Porque os usuários não tinham sido informados sobre a causa do problema. Por isso trataram de colocar a máquina de volta para ficar mais perto do local de trabalho! Evidentemente, quem acompanhou o processo errou por não ter esclarecido os usuários sobre a causa do problema.

O vilão da história

Em outro caso, desta vez no Brasil, uma distribuidora de energia elétrica foi interpelada por uma indústria siderúrgica com a reclamação de que suas novas e modernas máquinas de laminação não estavam funcionando adequadamente, ocorrendo muitas falhas do sistema de controle do processo de laminação. O fabricante das máquinas foi chamado e diagnosticou que se tratava de um problema com a baixa qualidade da tensão de alimentação, que interferia na operação dos sistemas digitais de controle.

Foram feitas medições no local pela concessionária e se constatou que de fato os níveis de harmônicas e de *flicker* estavam acima dos limites permitidos. Encaminhado o relatório da concessionária sobre essas medições, a diretoria da indústria solicitou que a concessionária tomasse providências urgentes para sanar o problema observado na tensão de alimentação.

Restou à concessionária explicar que os problemas com os laminadores eram causados pelo forno a arco instalado na própria indústria e que, portanto era ela quem causava as perturbações da tensão de alimentação em toda a região circunvizinha. Neste caso o consumidor foi causa e vítima da perda de QEE.

Questão de economia

Um terceiro caso se passa em uma indústria americana que operava uma ponte retificadora de 6 pulsos, responsável pela geração de 5^a e 7^a harmônicas (características nesse tipo de conversor).

Devido a reclamações de outros consumidores, foi solicitado ao consumidor que tomasse providências para reduzir a emissão dessas harmônicas com a instalação de filtros. O consumidor respondeu que já dispunha desses filtros e que estavam desligados por razões de redução no consumo de energia elétrica.

Estranhando essa resposta, um técnico da concessionária foi designado para verificar o que estava acontecendo. Em conversa no bar, esse técnico soube que a questão de economia era a seguinte: quando os filtros eram ligados, a conta de energia da empresa aumentava. Por isso o filtro ficava desligado. Depois de analisar o caso acharam-se duas explicações para o que se passava:

- i) com a compensação reativa dos filtros, a componente fundamental da tensão de fato tende a subir e o consumo de energia associado a cargas do tipo impedância constante, deve subir proporcionalmente ao quadrado da elevação;
- ii) a presença de harmônicas na corrente pode afetar o medidor de energia, a depender de seu modo de operação. Especialmente em medidores eletromagnéticos, de tecnologia antiga, o efeito da 5^a harmônica é de redução do valor medido. Assim, poderia haver uma diminuição na leitura da energia consumida, explicando a "economia" quando o filtro ficava desligado.

Neste caso a “economia” tem os seus próprios riscos e é preciso explicar o que pode ocorrer com a presença de harmônicas, como por exemplo, a explosão de capacitores em bancos para correção de fator de potência, devido a ressonâncias série ou paralela.

Equipamento novo pior do que o antigo

Em uma empresa fabricante de pneus na região de Campinas-SP há um equipamento de grande porte utilizado para processar a borracha, acionado por um motor de corrente contínua de 1,5 MW. O motor é controlado por uma ponte retificadora tiristorizada, a qual é alimentada por um transformador exclusivo, com tensão de saída de 1,5 kV. Depois de muitos anos de operação foi necessário substituir o transformador.

O novo dispositivo, após alguns dias de uso, teve sua proteção de sobretemperatura ativada, levando ao desligamento do processo. A falha inicialmente identificada foi a queima do ventilador de resfriamento das aletas do transformador. O ventilador foi substituído. No entanto, após mais alguns dias a mesma falha se repetiu, levando a reclamações junto ao fabricante do transformador e deste junto ao fornecedor do ventilador.

O fabricante do ventilador, fazendo uma análise da falha, identificou a ruptura da isolação dos enrolamentos do motor do ventilador. Dado que não havia registro de redução na qualidade dos fios utilizados nas bobinas, a investigação se deslocou para as condições de alimentação no local da aplicação.

Verificou-se que o ventilador era alimentado por meio de um transformador o qual tinha seu primário conectado na saída do grande transformador de 1,5 MW. Os engenheiros da empresa fizeram medições no local e verificaram que a tensão se apresentava com forte distorção, do tipo mostrado na figura 1.1. Tal comportamento é típico de retificadores trifásicos que alimentam carga indutiva, como era o caso. No entanto, isso deveria ocorrer desde sempre e não deveria ser causado pelo novo transformador.

O que se verificou como causa da falha foi fazer a alimentação do ventilador a partir de tal tensão. As elevadas taxas de variação da tensão (dv/dt), associadas às capacitâncias entre espiras do enrolamento, provocaram, paulatinamente, a perda de capacidade de isolação, levando à queima do ventilador.

A solução, simples, foi deslocar a alimentação do ventilador para uma rede “limpa”, com o que se solucionou o problema.

Apenas como curiosidade, os engenheiros da empresa vieram consultar a Unicamp sobre a análise que realizaram, uma vez que a chefia inicialmente desconfiou de que eles estivessem corretos em seu diagnóstico...

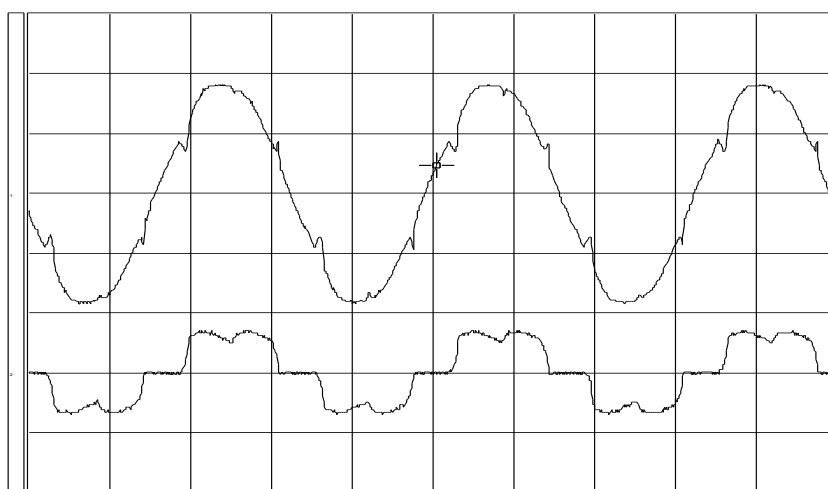


Figura 1.1 Distorção da tensão (“notch”) causada pela variação da corrente.

As baterias do Boeing 787

A causa raiz das falhas das baterias do Boeing 787 não foi definitivamente estabelecida ^[10]. A frota de 787 foi mantida em terra a partir de 16 de Janeiro de 2013, após dois incidentes em que

suas baterias de íon de lítio falharam na sequência de um superaquecimento e vazamento de eletrólito, resultando em significativa carbonização. No primeiro incidente, uma bateria de unidade de potência auxiliar na Japan Airlines 787 falhou enquanto a aeronave estava em solo no Boston Logan International Airport. No segundo incidente, uma aeronave da Nippon Airways teve que ser desviada para Takamatsu no Japão após a tripulação receber um alerta na cabine informando que a bateria principal falhara.

A Boeing e o fabricante da bateria, GS Yuasa, trabalharam para investigar os incidentes de bateria, mas nenhuma causa definitiva foi encontrada para as falhas. "Nos eventos de Logan e Takamatsu, talvez nunca tenhamos uma causa raiz única, mas o processo aplicado para entender as melhorias que podem ser feitas é o processo mais robusto que já seguimos," diz a Boeing.

Foram propostas e implementadas mudanças significativas para o sistema de bateria, destinadas a tornar mais fácil resfriar as células, bem como uma nova solução de contenção que visa impedir que as células superaquecidas da bateria entrem em combustão. Também foi reformulado o carregador de bateria, com níveis reduzidos de carga máximos, limitação do nível de descarga e uma sequência de carregamento suavizada, ou seja, soluções relacionadas à qualidade da energia elétrica processada pela bateria.



Figura 1.2 Bateria de íon de lítio utilizada inicialmente no projeto Boeing 787.

http://en.wikipedia.org/wiki/File:1-7-12_JAL787_APU_Battery.JPG

Vendendo ilusões

É fácil encontrar na internet a oferta de produtos que prometem economizar energia a partir da instalação de um “filtro de energia”, ou qualquer outra denominação semelhante. O material de divulgação em geral faz afirmações do tipo:

- *“Como o próprio nome diz ele filtra todas as impurezas da rede elétrica, frequências indesejadas que causa danos (sic) aos equipamentos eletrônicos, o filtro de rede formado por um banco de condensadores projetados para eliminar qualquer tipo de impurezas da rede elétrica mantendo sempre uma energia limpa.”*
- *“Tudo isso acontece por causa da frequência desestabilizada, e através do dispositivo Estabilizador de frequência todo esse problema é eliminado, deixando apenas à frequência correta para o perfeito funcionamento dos aparelhos elétricos.”*
- *“Como funciona o PRODUTO? Porquê (sic) PRODUTO economiza energia? PRODUTO associa circuitos internos (capacitivos, indutivos e resistivos) criando um*

^c Nome comercial omitido

curto-circuito à Terra para as frequências indesejadas, surtos, picos e descargas atmosféricas que aparecem na rede elétrica.”

- *“PRODUTO é um filtro inteligente que elimina interferências e ruídos de linha tais como: distorções harmônicas, picos gerados por partida de motores elétricos, interferências externas, variações de frequência e descargas elétricas, que atuam além dos 60 ou 50 Hz. Essas interferências geram um excesso de consumo de energia e prejudicam o funcionamento dos equipamentos eletro-eletrônicos. Eliminando essas interferências, o consumo geral diminui (sic) e o funcionamento melhora, além do ganho extra em segurança.”*
- *“Com PRODUTO você economiza até 20% na sua conta de energia elétrica.”*
- *“O REDUTOR ^d de energia é um dispositivo que trabalha em conjunto com todos os outros dispositivos, monitorando cada sujeira da rede elétrica fazendo uma filtragem geral para que os equipamentos elétricos receba uma energia limpa. Por isso o aterramento deve ter uma resistência máxima de solo de $0 \leq 5 \text{ ohms } \Omega$, e a economia vai depender também da quantidade das impurezas em sua rede elétrica. Economia mínima de 5% e máxima já alcançada de 43%.”*
- *“O PRODUTO já tem mais de 10 anos de mercado e é comprovadamente eficiente por milhares de usuários satisfeitos, além de ter já sido testado e aprovado com sucesso por órgãos certificadores e de pesquisa. Ele pode ser usado em qualquer cidade do Brasil, atendida por qualquer concessionária de energia elétrica, em qualquer tensão (voltagem) de 110 a 220 Volts.”*

Preliminarmente é conveniente reafirmar o “Princípio de Conservação da Energia”. Ou seja, a menos de perdas elétrica, a realização de um mesmo trabalho consumirá a mesma energia. Redução de consumo somente poderá acontecer com a eliminação de perdas ou com a redução do trabalho efetivamente realizado.

Nesses termos, pode-se afirmar que qualquer instalação elétrica adequadamente projetada (esteja ela sujeita ou não a contaminação harmônica) não deveria ter perdas maiores do que poucos por cento. E como é impossível ter uma instalação sem perdas, as promessas de economia após a instalação do produto devem ser olhadas com muita cautela e desconfiança.

Conforme os anúncios apregoam, o “aparelho” é composto por capacitores e, talvez, por indutores e resistores (?). A instalação é sempre feita após o medidor de energia da unidade consumidora. Por essa razão as concessionárias nunca se opõem à instalação, pois o consumidor pode colocar o que quiser em sua rede. No entanto, esse fato é usado pelos fabricantes dos produtos como se fosse uma afirmação da eficácia do mesmo, o que não é verdade.

Há afirmações de que a eficácia teria sido atestada por entidades de pesquisa. No entanto, tais resultados não são divulgados.

O LCEE/FEEC teve a oportunidade de testar vários produtos deste tipo. Invariavelmente os fabricantes que procuraram o laboratório não possuíam formação técnica minimamente adequada para o entendimento efetivo de problemas de qualidade de energia e de como é possível mitigar seus efeitos danosos.

Todos os testes realizados no LCEE comprovaram a inutilidade em termos de filtragem (pois as capacitâncias usadas são da ordem de centenas de nF) que, como facilmente pode ser analiticamente constatado, é incapaz de filtrar harmônicas de uma rede elétrica. Em termos de economia de energia, como esperado, nada foi verificado.

Os fabricantes apresentam em suas propagandas “casos de sucesso”, comparando contas de consumo que apresentam diminuição após a instalação do produto.

^d Nome comercial alterado

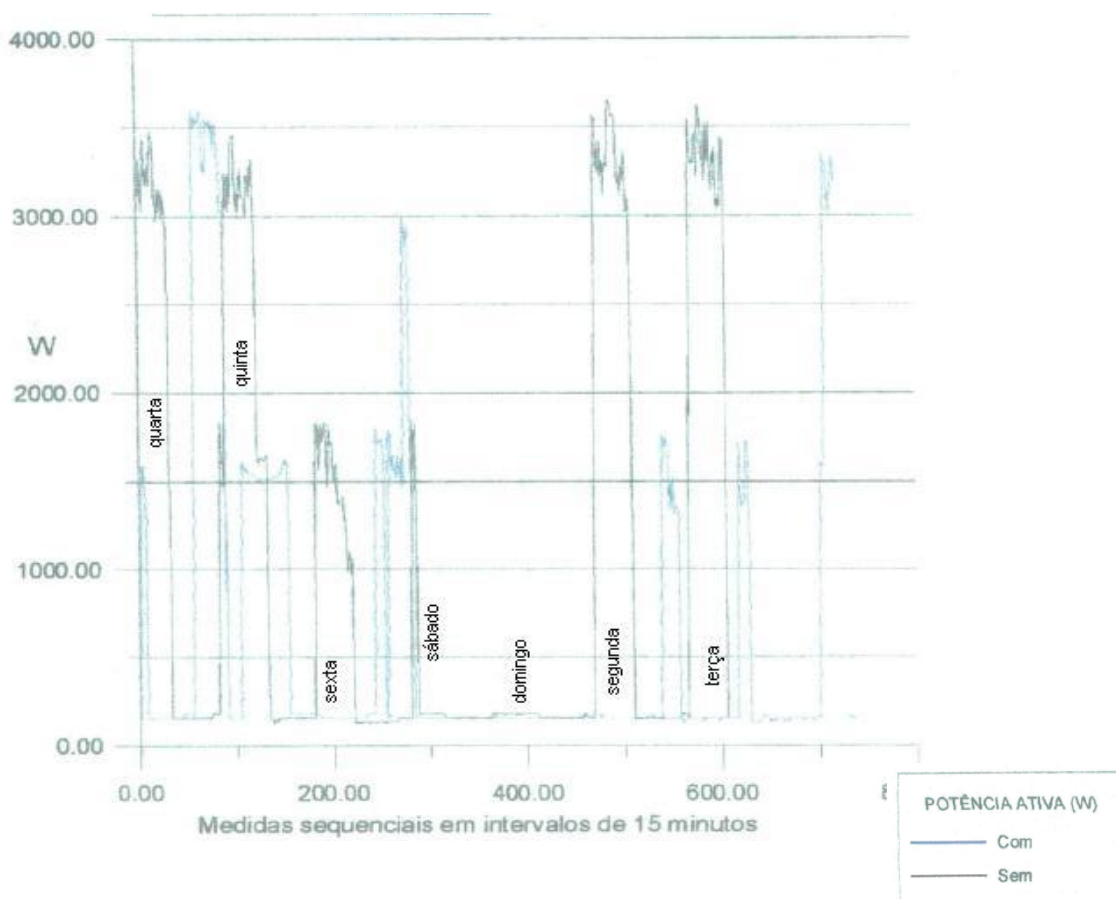
Um exemplo de como esse “sucesso” se realiza é ilustrado pelas figuras a seguir. Foi feita a medição do consumo de energia em uma instalação de um laboratório de pesquisa durante uma semana.

Analisando em detalhe os dados, verifica-se que no período inicial (sem a instalação, traço preto na Figura 1.3) se verifica consumo elevado em quatro dias úteis (quarta, quinta, segunda e terça), um consumo menor na sexta, um consumo de curta duração no sábado e sem consumo no domingo.

Na semana subsequente, após a instalação do “filtro”, o padrão de consumo se altera! Há apenas um dia em que se repete a demanda elevada. Há três dias com demanda reduzida, dois dos quais por período muito breve. Veja-se na Figura 1.4, o que se extrai do relatório.

A semana em que se verificou o “impacto” do “filtro” continha um feriado na quinta-feira...

Obviamente a redução de dia(s) útil(eis) impacta o consumo... Apesar dessa obviedade, o relatório confirma a redução do consumo, sem se ater a esse “detalhe”.



**LAUDO TÉCNICO DE AVALIAÇÃO DO CONSUMO DA REDE ELÉTRICA
DO PRÉDIO SEDE DO LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
EM FUNÇÃO DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DA
(Equipamento mais malha de aterramento específica).**

Sem o equipamento foi instalado o medidor de sinais eletrônico, entre o dia 30 de agosto de 2000 e o dia 05 de setembro do ano 2000, com medidas feitas em intervalos de 15 minutos, perfazendo um total de 606 medidas, em um total de 9075 minutos (aproximadamente 151,25 horas).

Com o equipamento foi instalado o medidor de sinais eletrônico, entre o dia 6 de setembro de 2000 e o dia 13 de setembro do ano 2000, com medidas feitas em intervalos de 15 minutos, perfazendo um total de 717 medidas, em um total de 10740 minutos (aproximadamente 179 horas).

TABELA 3. ESTIMATIVA DE REDUÇÃO.

Grandezas	%
Corrente elétrica	40,1
Potência ativa	39,1
Potência aparente	39,2
Potência reativa	43,3

Figura 1.4. Imagem do Relatório

A inevitável variabilidade das cargas impossibilita que testes dessa natureza possam ser realizados diretamente nos ambientes de uso final, o que inviabiliza a “demonstração” de qualquer efeito de economia de energia. Se a temperatura se altera, o uso de ar-condicionado muda. Se o dia está mais iluminado, o uso de iluminação artificial varia. Ou seja, sem a garantia de que as mesmas condições de carga se reproduzam, nada se pode concluir sobre qualquer aspecto de funcionamento do aparelho.

Os testes feitos no LCEE ocorreram sempre em condições controladas, com exatamente as mesmas cargas. Os estudos indicaram que a única possibilidade de que, eventualmente, de fato ocorra alguma redução de consumo se deve, exclusivamente, ao aterramento que é refeito para a instalação do “filtro”. Assim, principalmente em instalações antigas e que cresceram a carga sem cuidados com o aterramento e a distribuição entre as fases, o grau de desequilíbrio pode ser elevado. Ao refazer o aterramento e equilibrar as tensões, pode-se obter uma melhor operação das cargas. Novamente, nada se relaciona com esses “filtros”.

O projeto de filtros passivos é uma área muito estudada, que exige conhecimento específico de cargas e do alimentador. Não existem soluções genéricas.

Tornando a situação ainda mais grave, durante a crise de energia de 2001, uma importante revista semanal incluiu dentre as alternativas para redução de consumo a instalação desse tipo de aparelho. Sejam generosos e acreditemos que isso foi feito apenas por ignorância e preguiça da editoria, que não se preocupou em verificar a eficácia dessa solução.

Diante da inverdade das afirmações, a SOBRAEP (Associação Brasileira de Eletrônica de Potência) e a SBMag (Soc. Brasileira de Magnetismo) manifestaram-se. Foi também encaminhada denúncia ao Ministério Público do Consumidor, bem como um questionamento à ABINEE.

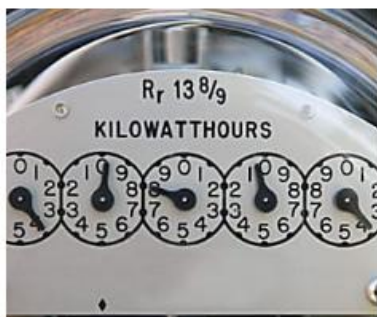
Resultados? Basta comprar o produto na internet para saber... Agora, inclusive, com financiamento do BNDES!

Em testes realizados em diversos laboratórios de universidades brasileiras, equipamentos análogos ao citado filtro de ruído apresentaram-se inócuos no que diz respeito à redução do consumo de energia. Um efeito positivo poderia advir apenas de uma eventual melhoria da conexão do neutro ao terra, que é feita quando se instala o aparelho. É verdade que é possível obter alguma melhoria na qualidade da energia elétrica com o uso de filtros passivos, mas isso se faz por meio de estudos específicos em cada instalação e com a aplicação de dispositivos que certamente não caberiam nas "caixinhas" vendidas. E, mesmo assim, dificilmente essa redução atingiria 10%.

José Antenor Pomilio
 Presidente da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (Sobraep)
 Campinas, SP

José Roberto Cardoso
 Presidente da Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo (SBMAG)
 São Paulo, SP

E quando você acha que já viu de tudo...



Cartão alemão pode economizar até 30% na conta de energia.

INSTALAÇÃO

muito fácil de instalar na sua caixa medidora

ECONOMIA

reduz até 30% o consumo de energia

PRATICIDADE

tamanho prático para levar da casa para o trabalho facilmente

TECNOLOGIA

nanotecnologia de ponta que reestrutura os íons

FACILIDADE

Sem botões, sem fios e com tudo incluso

REDUZA O CONSUMO DE ENERGIA ATRAVÉS DO PODER DOS ÍONS



O DSE é um cartão carregado com íons negativos que aumenta a eficiência do fluxo de corrente elétrica, eliminando o desperdício. Resulta na redução de gastos na sua conta de luz, proporcionando economia e qualidade de vida para sua família.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CSPE "Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica - Indicadores, Padrões e Penalidades". Documento Preliminar para Discussão. Versão 2, Jul. 1997.
- [2] P.F. Ribeiro, "Qualidade de Energia Elétrica em Sistemas Elétricos". Workshop no SBQEE- Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, Uberlândia, Jun. 1996.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. “Padrões de Desempenho da Rede Básica – Submódulo 2.2”, versão aprovada pelo Conselho Administrativo em outubro de 2000.
- [4] Power Quality in European Electricity Supply Networks - 1st Edition, Union of the Electricity Industry – Eurelectric, Feb. 2004.
- [5] Power Quality Indices and Objectives, Final Draft WG Report for Approval Cigré C4.07/Cired. - Jan. 2004.
- [6] M.McGranaghan, B. Roettger. “Economic Evaluation of Power Quality”. *IEEE Spectrum* Vol.22, No.2, Fev. 2002.
- [7] Chapman, David; “Costs – The Cost of Poor Power Quality”; *Power Quality Application Guide*, Version 0b; Copper Development Association (<http://www.cda.org.uk>); United Kingdom, November 2001
- [8] Patrão, C., Delgado, J. ; de Almeida, A.T. ; Fonseca, P., Power Quality Costs Estimation in Portuguese industry, *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, 2011
- [9] Shih-An Yin; Chun-Lien Su; Rung-Fang Chang, Assessment of power quality cost for high-tech industry, *IEEE Power India Conference*, 2006.
- [10] <http://www.flightglobal.com/news/articles/root-cause-of-787-battery-issues-may-never-be-found-boeing-383483/> Acesso em 26/01/2016.