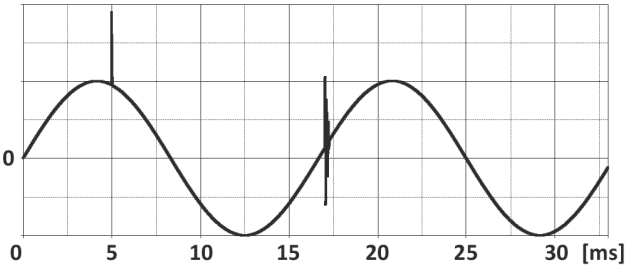
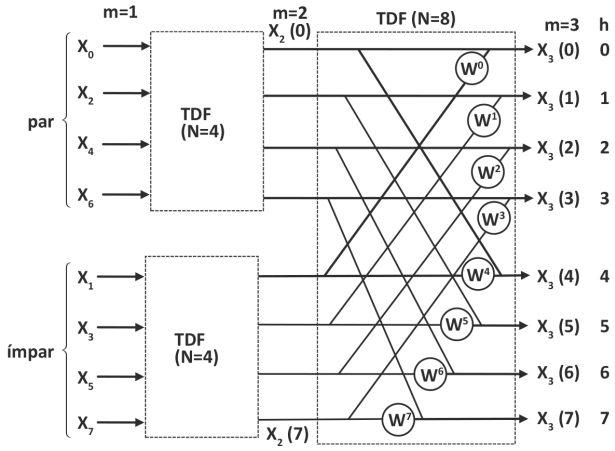
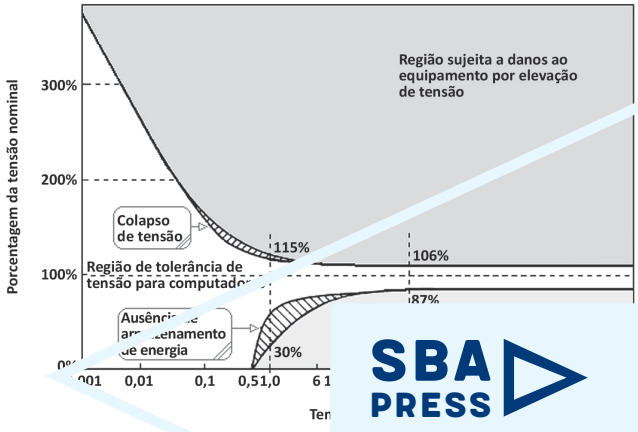






SIGMAR MAURER DECKMANN
JOSÉ ANTENOR POMILIO

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

CONCEITUAÇÃO E PROCESSAMENTO DIGITAL

SBA PRESS

Blucher

sociedade brasileira de AUTOMÁTICA

Sigmar Maurer Deckmann

José Antenor Pomilio

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Conceituação e processamento digital

Qualidade da energia elétrica: conceituação e processamento digital
© 2024 Sigmar Maurer Deckmann, José Antenor Pomilio
Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher
Editores Eduardo Blücher e Jonatas Eliakim
Coordenação editorial Andressa Lira
Produção editorial Regiane da Silva Miyashiro
Preparação de texto Mariana Góis
Diagramação Claudia Barros
Revisão de texto Sérgio Nascimento
Capa Leandro Cunha
Imagens da capa Foto: George Becker, disponível em Pexels (www.pexels.com) / Gráficos: elaborados pelos autores

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Deckmann, Sigmar Maurer
Qualidade da energia elétrica : conceituação e processamento digital / Sigmar Maurer Deckmann, José Antenor Pomilio. – São Paulo : Blucher, 2024.
386 p. : il. (Coleção Projeto SBA)

Bibliografia
ISBN 978-85-212-2155-5

1. Energia elétrica - Controle de qualidade I. Título II. Pomilio, José Antenor III. Série

23-6365 CDD 621.31

Índices para catálogo sistemático:
1. Energia elétrica - Controle de qualidade

Conteúdo

PARTE 1 – CONCEITUAÇÃO DE QEE **27**

1. CONCEITUAÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA **29**

1.1. INTRODUÇÃO 29

1.2. CONCEITUAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DA QEE 30

1.3. MOTIVOS PARA MONITORAR A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA 33

1.4. COMO MONITORAR E ANALISAR PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA 33

1.5. ALGUMAS SITUAÇÕES ILUSTRATIVAS 35

1.6. RESUMO 38

QUESTÕES 39

REFERÊNCIAS 39

2. CONCEITOS BÁSICOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA **41**

2.1. INTRODUÇÃO 41

2.2. DEFINIÇÕES BÁSICAS 42

2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE ANÁLISE FASORIAL EM QEE 43

2.4. EQUIVALENTES DE THÉVENIN E DE NORTON DE UM SISTEMA ALIMENTADOR 47

2.5. CONCEITUAÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA 49

2.6. REPRESENTAÇÃO DE GRANDEZAS ELÉTRICAS POR UNIDADE 55

2.7. RESUMO 57

QUESTÕES 57

REFERÊNCIAS 58

3. CARACTERIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS E NORMAS APLICÁVEIS 61

3.1. INTRODUÇÃO 61

3.2. CONDIÇÕES IDEAIS DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO 63

3.3. CONDIÇÕES REAIS DE OPERAÇÃO 68

3.4. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE 68

3.5. TERMINOLOGIA BÁSICA 69

3.6. CARACTERIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS TÍPICOS DE QEE 72

3.7. CLASSIFICAÇÃO DOS DISTÚRBIOS SEGUNDO FAIXAS DE FREQUÊNCIAS 84

3.8. ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES 87

3.9. PADRONIZAÇÃO E NORMAS 90

3.10. PADRÕES BRASILEIROS PARA AVALIAÇÃO DA TENSÃO SUPRIDA 93

3.11. COMISSÃO INTERNACIONAL DE ELETROTÉCNICA (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION) 94

3.12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 96

3.13. IEEE STANDARDS ASSOCIATION E AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI) 96

3.14. INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS (CIGRE) 97

3.15. NORMATIZAÇÃO DE QEE EM AMBIENTES ESPECIAIS 98

3.16. EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA E OBSOLESCÊNCIA DE NORMAS: O CASO DE *FLICKER* 98

3.17. RESUMO 100

QUESTÕES 100

REFERÊNCIAS 101

4. FLUTUAÇÕES DE TENSÃO E EFEITO DA CINTILAÇÃO LUMINOSA 103

4.1. INTRODUÇÃO 103

4.2. CINTILAÇÃO LUMINOSA OU EFEITO *FLICKER* 105

4.3. MEDIÇÃO DO EFEITO *FLICKER* 107

4.4. EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE *FLICKER* 118

4.5. FORMAS DE ATENUAR O EFEITO *FLICKER* 119

4.6. *FLICKER* EM OUTROS DISPOSITIVOS DE ILUMINAÇÃO 120

4.7. OUTROS FENÔMENOS QUE PODEM PRODUZIR O EFEITO *FLICKER* 121

4.8. PROPAGAÇÃO DE *FLICKER* POR MEIO DA REDE ELÉTRICA 122

4.9. RESUMO 124

QUESTÕES 125

REFERÊNCIAS 125

5. DISTORÇÕES DE FORMA DE ONDA: CAUSAS, EFEITOS, ATENUAÇÃO E NORMAS 127

5.1. INTRODUÇÃO 127

5.2. CAUSAS DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS DAS TENSÕES 128

5.3. SEQUÊNCIA DE FASE DE HARMÔNICOS TRIFÁSICOS 144

5.4. EFEITOS PROVOCADOS POR HARMÔNICOS DE CORRENTE E DE TENSÃO NA REDE 148

5.5. QUANTIFICAÇÃO DA DISTORÇÃO DA ONDA 149

5.6. REDUÇÃO DO CONTEÚDO HARMÔNICO DA TENSÃO E DA CORRENTE POR MEIO DE FILTRAGEM 151

5.7. INTER-HARMÔNICOS 162

5.8. NORMAS E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE DISTORÇÃO HARMÔNICA 163

5.9. INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA CONDUZIDA PELA REDE 178

5.10. RESUMO 183

QUESTÕES 183

REFERÊNCIAS 184

6. TRANSITÓRIOS E DESEQUILÍBRIO 187

6.1. INTRODUÇÃO 187

6.2. IMPACTO DA PARTIDA DE MOTORES 187

6.3. ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES 192

6.4. CHAVEAMENTO DE CAPACITORES 194

6.5. ENERGIZAÇÃO DE RETIFICADORES COM FILTRO CAPACITIVO 196

6.6. DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES 199

6.7. NORMAS REFERENTES AO DESEQUILÍBRIO 204

6.8. RESUMO 207

QUESTÕES 207

REFERÊNCIAS 207

7. VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO 209

7.1. INTRODUÇÃO 209

7.2. REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA 210

7.3. IEEE – STD. 1159 217

7.4. EN 50160 – NORMA EUROPEIA 218

7.5. TOLERÂNCIA DE EQUIPAMENTOS A VTCD 220

7.6. COMPORTAMENTO DE CARGAS ELETRÔNICAS DIANTE DE VTCD 223

7.7. RESUMO 231

QUESTÕES 231

REFERÊNCIAS 232

8. ATERRAMENTO E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA 233

8.1. INTRODUÇÃO 233

8.2. ATERRAMENTO COM OU SEM FIO DE RETORNO 234

8.3. ATERRAMENTO SEGUNDO A NBR 5410 E A IEC 60364 235

8.4. BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA 240

8.5. ASPECTOS DE SEGURANÇA 241

8.6. ATERRAMENTO E COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA 242

8.7. RESUMO 243

QUESTÕES 243

REFERÊNCIAS 243

9. MEDIÇÕES E ANÁLISE DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO 245

9.1. INTRODUÇÃO 245

9.2. REDE SECUNDÁRIA COM PREDOMINÂNCIA DE CONSUMIDORES RESIDENCIAIS 246

9.3. REDE SECUNDÁRIA COM PREDOMINÂNCIA DE CONSUMIDORES COMERCIAIS 249

9.4. COMPENSAÇÃO CAPACITIVA EM REDES RESIDENCIAIS E COMERCIAIS 250

9.5. CAPTURA DE EVENTOS ISOLADOS 253

9.6. RESUMO 256

QUESTÕES 257

REFERÊNCIAS 257

PARTE 2 – PROCESSAMENTO DIGITAL 259

10. ANÁLISE DE SINAIS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA 261

10.1. INTRODUÇÃO 261

10.2. CONDICIONAMENTO DE SINAIS 261

10.3. ANÁLISE DE SINAIS PERIÓDICOS NO DOMÍNIO DO TEMPO 264

10.4. EXEMPLOS DE SINAIS PERIÓDICOS TÍPICOS EM CONVERSORES ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA 266

10.5. EXEMPLOS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO 269

10.6. COMPORTAMENTO DO FILTRO *NOTCH* SOB FREQUÊNCIA VARIÁVEL 275

10.7. RESUMO 276

QUESTÕES 276

REFERÊNCIAS 277

11. TRATAMENTO DE GRANDEZAS ALEATÓRIAS 279

11.1. INTRODUÇÃO 279

11.2. PROCESSO DE AMOSTRAGEM E CLASSIFICAÇÃO 280

11.3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DO HISTOGRAMA 285

11.4. APLICAÇÃO EM GRANDEZAS ELÉTRICAS 287

11.5. RESUMO 289

QUESTÕES 290

REFERÊNCIAS 290

12. ANÁLISE DE SINAIS NO DOMÍNIO DAS FREQUÊNCIAS 291

12.1. INTRODUÇÃO 291

12.2. REPRESENTAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA 292

12.3. REPRESENTAÇÃO DE SINAIS PERIÓDICOS 294

12.4. COMO APLICAR A ANÁLISE DE FOURIER 295

12.5. REPRESENTAÇÃO DA SÉRIE DE FOURIER NA FORMA EXPONENCIAL COMPLEXA 298

12.6. DA SÉRIE DE FOURIER À TRANSFORMADA DE FOURIER 300

12.7. DA TRANSFORMADA DE FOURIER À TRANSFORMADA DE LAPLACE 307

12.8. RESUMO 309

QUESTÕES 309

REFERÊNCIAS 310

13. ANÁLISE DE SINAIS DISCRETIZADOS 311

13.1. INTRODUÇÃO 311

13.2. AMOSTRAGEM DE SINAIS 312

13.3. TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (TDF) 315

13.4. EXEMPLOS DE ESPECTROS DE SINAIS AMOSTRADOS 316

13.5. ANÁLISE DE SINAIS EMPREGANDO A TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER 320

13.6. ALGORITMO PARA REVERSÃO DE BITS 327

13.7. ALGORITMO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT) 328

13.8. USO DE FILTRO *ANTI-ALIASING* 336

13.9. UNIDADES PARA AMPLITUDES RELATIVAS 338

13.10. JANELAS DE PONDERAÇÃO DAS AMOSTRAS 339

13.11. DETALHES DA INSTRUMENTAÇÃO PARA ANÁLISE ESPECTRAL SEGUNDO A IEC 344

13.12. RESUMO 347

QUESTÕES 347

REFERÊNCIAS 348

14. FILTROS DIGITAIS E APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA 349

14.1. INTRODUÇÃO 349

14.2. TRANSFORMADA $\mathcal{Z}$ E FILTROS DIGITAIS 350

14.3. MAPEAMENTO DE POLOS E ZEROS 352

14.4. APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA $\mathcal{Z}$ 352

14.5. TRANSFORMAÇÕES ENTRE SISTEMAS CONTÍNUOS E DISCRETOS 355

14.6. FILTRO *NOTCH* DISCRETO 368

14.7. DISCRETIZAÇÃO PELO OPERADOR DELTA 374

14.8. FILTRO DE MEDIANA 379

14.9. RESUMO 382

QUESTÕES 383

REFERÊNCIAS 383

SOBRE OS AUTORES 385

CAPÍTULO 1

Conceituação de qualidade da energia elétrica

1.1. INTRODUÇÃO

O termo qualidade da energia elétrica (QEE), que se tornou jargão no setor elétrico nas últimas décadas, tem sido usado, *lato sensu*, para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores. Da mesma forma que a expressão *electric power system* tornou-se "sistema de energia elétrica" (SEE) em nosso meio, *power quality* foi conceituada como "qualidade da energia elétrica" (QEE). E assim como não se usa em inglês a expressão *energy quality*, também não se tem utilizado a expressão "qualidade da potência elétrica" em português, não cabendo qualquer discussão de ordem conceitual.

A preocupação com QEE no Brasil se tornou mais explícita com a reformulação que o setor elétrico experimentou no final do século XX, com a privatização de diversas empresas de geração e de distribuição de energia elétrica. Na época, permaneceram sob controle estatal algumas empresas de geração e o sistema de transmissão. O interesse pela QEE acentuou-se com a implantação de um mercado consumidor no qual o produto comercializado passou a ser a própria energia elétrica.

A formulação de políticas públicas no tema de QEE foi impulsionada com a instituição da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pela Lei n. 9.427, de 26 de dezembro de 1996, com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica em conformidade com as políticas e diretrizes do

governo federal. A ANEEL iniciou suas atividades em 2 de dezembro de 1997 [1]. De modo concomitante, no estado de São Paulo foi criada a Comissão de Serviços Públicos de Energia (CSPE), em 17 de outubro de 1997, tendo entre suas atividades o papel de "regular, controlar e fiscalizar: I – a qualidade do fornecimento dos serviços públicos de energia; e II – os preços, tarifas e demais condições de atendimento aos usuários de tais serviços". Dado o papel assumido pela ANEEL nas legislações de QEE, a CSPE foi substituída pela Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo (ARSESP), que não mais possui atividades de regulamentação na área de QEE [2].

Neste contexto da reformulação do setor elétrico, começaram a se estruturar no Brasil, de maneira consistente e sistemática, os padrões de QEE [3], [4]. Passaram-se 10 anos até a efetivação da primeira edição dos "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica" [5]. Como apresentado ao longo deste livro, as questões de QEE e as decorrentes normas são continuamente revistas em função das mudanças tecnológicas, de modo que se exige dos profissionais da área uma constante atualização.

1.2. CONCEITUAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DA QEE

Uma definição mais conceitual estabelece a qualidade da energia elétrica como uma medida de quão bem essa energia pode ser utilizada pelos consumidores [6], [7]. Essa medida inclui características de *continuidade* de suprimento e de *conformidade* com parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor como das cargas elétricas. Os principais parâmetros a considerar estão associados a distúrbios como:

- Distorções de forma de onda;
- Flutuações da amplitude da tensão;
- Variações da amplitude de tensão de curta ou média duração;
- Variações da frequência de fornecimento;
- Desequilíbrio de sistemas trifásicos;
- Transitórios de curta duração.

Estes parâmetros estão, na verdade, associados a tensões e correntes elétricas em um sistema de corrente alternada. As tensões de suprimento são controladas basicamente pelas empresas concessionárias, responsáveis pela geração, transmissão e, em última instância, pela distribuição de energia elétrica. Por outro lado, as correntes dependem das cargas conectadas pelos consumidores. Grande parte dos problemas de QEE ocorre na fronteira entre os interesses (econômicos) das concessionárias e dos consumidores. Parte-se do pressuposto que o consumidor prefere adquirir a energia que apresenta os parâmetros de qualidade melhores, ao menor custo. Nesse contexto,

as operadoras de sistemas elétricos são estimuladas, tanto pela ANEEL, como agência reguladora, quanto pelo próprio mercado, a prestar informações sobre as condições de operação ou fornecer detalhes acerca de eventos ocorridos e que possam ter afetado os consumidores. Esse é um dos papéis do monitoramento e da análise da QEE.

Tornou-se praxe incluir cláusulas contratuais sobre as condições de fornecimento de energia pelos agentes fornecedores (gerador, transmissor, distribuidor) aos agentes compradores (transmissor, distribuidor, consumidor final). Tais contratos podem prever multas por violação das condições estipuladas. Isso aumenta a necessidade de implementar normas com limites adequados que possam ser satisfeitos pelo lado do fornecedor sem onerar demais os custos e que atendam ao consumidor, sem maiores prejuízos devido a perdas adicionais. Estabelece-se ao mesmo tempo a necessidade de regulamentar os procedimentos de medição e análise desses parâmetros. 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 essencial 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 e, mais recentemente, levar em conta as características diferenciadas das fontes de energia renováveis (solar, eólica etc.) visando à sustentabilidade de obtenção da energia elétrica e ao mínimo impacto ambiental, desde a geração até o uso final.

Para estabelecer critérios de quantificação da qualidade da energia elétrica é necessário tratar de vários problemas que afetam os consumidores ou as cargas alimentadas. Esses problemas vão desde os impactos sobre o meio ambiente, passando por incômodos sensoriais provocados pela variação luminosa ou de ruídos auditivos devido à não conformidade da tensão, chegando até a interferências na operação de equipamentos eletrônicos sensíveis, causadas por interrupções no fornecimento de energia ou por fenômenos de mais alta frequência. Constata-se que, tanto no nível de cargas domésticas e 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 por meio do controle de processos, mesmo em equipamentos de uso doméstico (dispositivos de iluminação, de informação e comunicação, máquinas de processar alimentos, de lavagem, secagem ou de refrigeração etc.). Basta lembrar as dificuldades enfrentadas pelos consumidores, quando ocorrem interrupções de energia elétrica, causando perda de produtos perecíveis, paralisação de serviços em escritórios, interrupção de sinalização no trânsito, desligamento de complexos industriais, paralisação de atividades essenciais em hospitais, redações de jornais e meios de comunicação etc.

A complexidade do problema da avaliação e controle da qualidade da energia suprida não resulta apenas da grande variedade de perturbações às quais o sistema elétrico está sujeito. São relevantes também os variados efeitos que essas perturbações

podem causar, resultando em sobreaquecimento de máquinas e equipamentos devido às distorções de corrente; vibrações de motores devido a 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 previsão e prevenção.

Uma questão muito discutida no contexto de QEE é a definição dos objetivos e dos indicadores relevantes [8]. 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 dos sistemas elétricos também são distintas de um país para outro, ficando difícil estabelecer critérios gerais para mensurar a qualidade da energia elétrica.

Como mencionado, pode-se presumir, em teoria, que a responsabilidade pela qualidade da tensão suprida é de quem fornece a energia e que a qualidade da corrente é responsabilidade dos consumidores, com suas variadas cargas. Na prática, porém, essa questão de atribuição não é tão simples, pois distúrbios na corrente ocasionam perturbações na tensão e vice-versa. Em geral, separar causa e efeito não é trivial.

Outro ponto importante e que deve ser levado em conta na análise de QEE é a matriz energética que compõe o sistema de geração que se está considerando. Com a diversificação das chamadas fontes alternativas de energia elétrica – visando eliminar sistemas de geração que resultem na emissão de carbono na atmosfera, como centrais termoelétricas, ou que apresentem riscos ambientais, como as nucleares –, os indicadores de QEE podem assumir diferentes pesos relativos quanto à qualidade da energia suprida. Em redes com predominância eólica, por exemplo, a limitação das variações de frequência assume importância maior do que nos grandes sistemas hidroelétricos interligados. Isso porque a geração eólica requer processos eletrônicos individualizados para o controle da frequência, dada a menor inércia desses geradores. As perdas de potência na rede de distribuição da energia eólica também podem ser mantidas em níveis relativos baixos, uma vez que atendem regiões mais próximas aos locais de geração, comparadas aos sistemas com geração predominantemente hidroelétrica, como tem sido o sistema brasileiro até aqui.

A energia obtida por meio de painéis fotoelétricos, por sua vez, depende de conversores eletrônicos CC-CA, que precisam sintetizar a forma de onda senoidal a partir do chaveamento da tensão CC, mantendo os níveis de harmônicos abaixo dos limites preconizados. Além disso, esse tipo de fonte não apresenta, em princípio, qualquer efeito inercial que possa contribuir para o sincronismo do sistema como um todo. Outra peculiaridade é que placas fotoelétricas podem ser usadas para atender cargas individualizadas em residências, instalações comerciais ou industriais de menor porte, prescindindo inclusive de conexão com a rede de distribuição convencional.

No caso de consumidores com autogeração, quando é comum que o excedente da potência gerada localmente seja injetado no sistema elétrico principal, indicadores como fator de potência e distorção harmônica precisam ser rediscutidos, conforme será mostrado em capítulos posteriores. A tendência de diversificação das fontes energéticas já se apresenta também no Brasil e deverá definir como serão os sistemas de potência no futuro próximo.

1.3. MOTIVOS PARA 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, 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 vibrações mecânicas ou ressonâncias eletromagnéticas), levando ao comprometimento da capacidade produtiva tanto das máquinas como das pessoas.

Existem estudos que acompanham os custos relacionados com perda de qualidade da energia elétrica. No início do século XXI estimava-se que a indústria manufatureira norte-americana tinha custos da ordem de 10 bilhões de dólares associados a interrupções de processos [9]. Já no cenário europeu, na mesma época [10], os custos estimados associados com vários tipos de distúrbios chegariam a 1,5% do produto interno bruto (PIB). Além de os valores serem elevados, estimava-se que tais custos continuariam a subir rapidamente caso não fossem tomadas medidas saneadoras. Isso se deve aos efeitos cumulativos que a perda de qualidade pode impor, seja por meio de redução da vida útil de dispositivos, limitação da capacidade efetiva dos equipamentos ou mau funcionamento de máquinas, além das perdas elétricas. Mesmo com o maior rigor nas normas, não existe indicação precisa de que tenha ocorrido melhoria sensível no cenário [11], [12].

1.4. COMO MONITORAR E ANALISAR PROBLEMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A partir da identificação de uma falha ou mau funcionamento de uma instalação ou equipamento, inicia-se uma pesquisa (estudo) para diagnosticar as causas do problema relativo à qualidade da energia elétrica. Como se trata de diagnosticar

basicamente um problema de compatibilidade eletromagnética, essa pesquisa pode envolver questões que vão além de um simples problema tecnológico. Uma abordagem recomendável inclui os seguintes passos:

1) Conhecer os possíveis problemas;
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) Diagnosticar o problema, sua causa e possíveis responsabilidades;
6) Propor soluções.

Cada um desses passos requer um conhecimento ou estudo específico. Identificar os problemas é um dos objetivos deste texto. Quando se tem uma ideia 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 maneira como os sintomas se apresentam ao observador. Por exemplo, o afundamento da tensão pode ser a causa da falha na partida de um motor (dimensionamento inadequado do alimentador) ou a consequência (curto-circuito no enrolamento ou falta de fase etc.).

Escolher corretamente os instrumentos de medição e os locais mais adequados para a sua instalação pode ser decisivo para detectar e quantificar o problema. Por exemplo, surtos rápidos de sobretensão podem passar despercebidos mesmo quando se utilizam osciloscópios, se o nível de detecção (*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, precisam de mais tempo para serem percebidos, exigindo registradores contínuos para longos períodos de medição. Eventos intermitentes ou transitórios podem requerer registradores contínuos para a sua detecção. Fenômenos periódicos, como ressonâncias harmônicas ou modulação de amplitude, podem requerer analisadores de espectro em frequência.

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, seja em amplitude (escala) ou no tempo (duração). Tanto uma quanto outra limitação pode gerar falsas informações sobre o conteúdo espectral do sinal amostrado. Os principais problemas relacionados com esse tipo de limitação serão devidamente explorados nos capítulos finais do livro.

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 permitem descobrir em que condições o

problema se manifesta. Por outro lado, a melhor solução às vezes só é encontrada depois que o problema foi exaustivamente estudado por meio de simulação. Ou seja, embora o problema pareça complexo, a solução pode ser simples.

Em relação aos passos seguintes, nem sempre é fácil tratar os itens citados como diagnóstico, causa, responsabilidade, para, finalmente, propor alguma solução. Chegar ao diagnóstico e à causa pode ser decorrência dos quatro primeiros passos, quando se dispõe de acesso ao local, instrumentação adequada e ferramentas de simulação e análise. A indicação da solução decorre de disponibilidades tecnológicas e orçamentárias. Em geral, a solução não necessariamente requer a eliminação total do problema, mas a sua mitigação ao ponto de obter conformidade com as normas.

A questão da responsabilidade, que está vinculada a quem deve arcar com os custos da solução, pode ser simples quando existe apenas uma fonte de distúrbio na rede analisada, ou quando a potência da carga problemática é muito grande em relação a outras cargas do sistema. É o caso de problemas de flutuação de tensão causados por fornos a arco com potência da ordem de dezenas de MW.

Em outras situações, como no caso de harmônicos, chegar a um diagnóstico e apontar a causa pode ser mais complicado. Cargas não lineares são produtoras de correntes harmônicas. No entanto, tais cargas encontram-se dispersas por toda a rede, de modo que já existe uma distorção de fundo nas tensões. A distorção na tensão interage com a não linearidade das cargas, podendo resultar impossível identificar se alguma violação normativa ocorre apenas por conta da carga ou é ampliada pela distorção da tensão.

Para quem deseja se aprofundar no tema da QEE, as referências [13], [14], [15] e [16] constituem boas leituras.

1.5. ALGUMAS SITUAÇÕES ILUSTRATIVAS

1.5.1. A MÁQUINA DE REFRIGERANTES

Especialistas em análise da qualidade da energia elétrica 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 dos computadores mais afetados e se constatou que aproximadamente a cada 15 minutos ocorria um transitório na tensão que interferia no funcionamento desses computadores.

Feito o levantamento das cargas ligadas ao ramal, verificou-se que no corredor em frente à sala dos computadores havia uma máquina de refrigerantes para uso dos funcionários. Na falta de alimentador próprio, o refrigerador havia sido ligado no mesmo circuito que alimentava os 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 foi mudar a alimentação da máquina de refrigerantes. Por falta de outra tomada próxima, deslocou-se a máquina para outro local no mesmo corredor, verificando-se que o problema estava resolvido.

Quinze dias depois, os especialistas foram chamados porque o problema tinha voltado a aparecer. Nova monitoração na sala dos computadores e os transitórios lá estavam. Foi constatado que a máquina de refrigerante tinha sido recolocada no corredor. Os usuários não tinham sido informados sobre a causa do problema e, 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.

1.5.2. O VILÃO DA HISTÓRIA

Em outro caso, uma concessionária 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, cuja forma de onda interferia na operação dos sistemas digitais de controle.

Foram feitas medições no local pela concessionária e se constatou que, de fato, os níveis de harmônicos e de flutuação de tensão 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 qualidade da sua energia elétrica.

1.5.3. QUESTÃO DE ECONOMIA

Um terceiro caso se passou em uma indústria que operava uma ponte retificadora de seis pulsos, responsável pela geração de 5º e 7º harmônicos (características nesse tipo de conversor). Devido a reclamações de outros consumidores, foi solicitado à indústria que tomasse providências para reduzir a emissão desses harmônicos 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 a resposta, um técnico da concessionária foi designado para verificar o que estava acontecendo. Em conversa no bar, o técnico soube que a alegação de economia se

devia ao fato de que, quando os filtros eram ligados, o valor da conta de energia aumentava. Por isso, os filtros eram mantidos desligados. Depois de analisar o caso, chegou-se a duas possíveis explicações:

i) com a compensação reativa dos filtros, o componente fundamental da tensão de fato tende a subir e o consumo de energia associado a cargas do tipo impedância constante aumenta proporcionalmente ao quadrado da elevação da tensão;

ii) a presença de harmônicos na corrente pode afetar o medidor de energia, a depender de seu modo de operação. Especialmente em medidores eletromagnéticos, de tecnologia antiga, o efeito do 5º harmônico, de sequência negativa, 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" apresenta seus próprios riscos e é preciso explicar o que pode ocorrer com a presença de harmônicos (por exemplo, a explosão por sobreaquecimento de capacitores em bancos para correção de fator de potência, devido a ressonâncias série ou paralela).

1.5.4. EQUIPAMENTO NOVO PIOR QUE O ANTIGO?

Em uma empresa fabricante de pneus havia um equipamento de grande porte utilizado para processar a borracha, acionado por um motor de corrente contínua de 1,5 MW. O motor era controlado por uma ponte retificadora tiristorizada, 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 equipamento, após alguns dias de uso, teve sua proteção de sobretemperatura ativada, levando à paralisação do processo. A falha inicialmente identificada foi a queima do motor de um dos ventiladores de resfriamento das aletas do transformador. O conjunto motor-ventilador foi substituído. No entanto, após mais alguns dias, a falha se repetiu, levando a reclamações junto ao fabricante do transformador e, deste, junto ao fornecedor do ventilador.

O fabricante do ventilador, após a análise da falha, identificou a ruptura do isolante dos enrolamentos do motor. Dado que não havia registro de redução na qualidade do isolamento dos fios utilizados nas bobinas, a investigação se deslocou para as condições de alimentação no local da aplicação. Constatou-se que o motor do ventilador era alimentado por um transformador cujo primário estava 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 significativos recortes (*notches*). Esse comportamento é típico de retificadores trifásicos em cujas entradas há expressivo efeito indutivo, como no caso. No entanto, isso deveria estar ocorrendo desde sempre e não ser causado pelo novo transformador.

O que se verificou como causa da falha foi fazer a alimentação do ventilador a partir da tensão com recortes. As elevadas taxas de variação da tensão (dv/dt), associadas às capacitâncias entre espiras do enrolamento, provocaram, paulatinamente, a perda de capacidade de isolamento, levando à queima do motor do ventilador. A solução, simples, foi deslocar a alimentação do ventilador para uma rede mais limpa. Apenas como curiosidade, os engenheiros da empresa vieram consultar a universidade sobre o problema, uma vez que a chefia inicialmente não confiara no diagnóstico apresentado, o qual, no entanto, estava absolutamente correto.

1.5.5. VENDENDO ILUSÕES

Não é difícil encontrar na internet ofertas de produtos que prometem economizar energia a partir da instalação de um "filtro de energia", ou qualquer outra denominação semelhante. Antes de tudo, é conveniente reafirmar o princípio de conservação da energia, ou seja, 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 à contaminação harmônica) não deveria ter perdas maiores do que alguns poucos por cento. Uma vez que é impossível ter uma instalação sem perdas, as promessas de economia após a instalação do produto devem ser observadas com muita desconfiança.

Conforme os anúncios apregoam, o "aparelho" é composto por capacitores e, eventualmente, por indutores e até mesmo 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, em princípio, colocar o que quiser em sua própria rede, desde que não afete os demais consumidores. No entanto, esse fato é usado pelos fabricantes como se fosse uma comprovação da eficácia do produto, o que não é verdade. Há afirmações de que a eficácia teria sido atestada até mesmo por entidades de pesquisa. No entanto, tais resultados não são divulgados. Ao contrário, testes realizados em laboratório comprovaram a inutilidade em termos de filtragem (pois as capacitâncias usadas são da ordem de centenas de nano-Farad) que, como pode ser constatado analiticamente, são incapazes de filtrar harmônicos de uma rede elétrica. Também em termos de economia de energia, como esperado, nada foi constatado.

1.6. RESUMO

Neste capítulo foram introduzidos conceitos básicos sobre qualidade da energia elétrica e razões para a sua monitoração em um ambiente de mercado competitivo, no qual prevalecem interesses econômicos das partes envolvidas, desde os agentes geradores, transmissores, distribuidores e, finalmente, os consumidores. Introduzir nessa equação de interesse econômico uma variável como qualidade do produto energia

elétrica, além de levantar questões relativamente novas e de grande importância envolvendo parâmetros que caracterizam tensões e correntes nas redes elétricas, também requer claras definições para os vários tipos de distúrbios observáveis nas redes e das formas para a sua identificação e quantificação. Ou seja, essas definições precisam se basear em normas objetivas e consistentes. Esses problemas envolvendo qualidade da energia elétrica serão abordados mais a fundo nos próximos capítulos. A título de ilustração, foram apresentados no final do capítulo alguns exemplos envolvendo problemas de qualidade da energia elétrica suprida a diferentes tipos de consumidores.

QUESTÕES

1) Quais são as motivações para que se estabeleçam padrões de QEE?
2) A maioria das normas sobre QEE se refere às condições de suprimento de tensão e de absorção de corrente e não da energia elétrica em si. Comente possíveis razões.
3) Tipicamente, qual fato leva à análise de problemas de QEE em uma instalação?
4) Na presença de um problema identificado de QEE, quais são os procedimentos recomendáveis para que o problema seja solucionado ou mitigado de maneira efetiva?
5) Se um dos princípios da operação de SEE é a liberdade dada ao consumidor, regularmente conectado à rede, de poder ligar e desligar sua carga a qualquer momento, dentro das condições contratadas, por que são necessárias as regras de QEE?

REFERÊNCIAS

[1] Fundação Getúlio Vargas – FGV, Centro de Pesquisas e Documentação – CPDOC, disponível em http://www.fgv.br/cpdoc/acervo/dicionarios/verbete-tematico/agencia-nacional-de-energia-eletrica-aneel. Acesso em: 3 out. 2021.

[2] Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, *Lei Complementar 833/1997*, disponível em: https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei.complementar/1997/lei.complementar-833-17.10.1997.html. Acesso em: 3 out. 2021.

[3] Comissão de Serviços Públicos de Energia – CSPE, *Qualidade do fornecimento de energia elétrica – indicadores, padrões e penalidades,* Documento preliminar para discussão. Versão 2, Julho de 1997.

[4] P. F. Ribeiro, "Qualidade de energia elétrica em sistemas elétricos." Workshop no *SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica*, Uberlândia, Junho de 1996.

[5] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução Normativa n. 345/2008, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, vigente de 31/12/2008 a 31/12/2009.

[6] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Padrões de desempenho da rede básica – Submódulo 2.2*, versão aprovada pelo Conselho Administrativo em outubro de 2000.

[7] Union of the Electricity Industry – Eurelectric, *Power quality in European electricity supply networks*, 1st Edition, Feb. 2004.

[8] CIGRÉ, *Power quality indices and objectives,* Final draft WG report for approval cigré C4.07/Cired. Jan 2004.

[9] M. McGranaghan, B. Roettger, "Economic evaluation of power quality", *IEEE Spectrum* v. 22, n. 2, Fev. 2002.

[10] D. Chapman, "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.

[11] C. Patrão, J. Delgado, A. T. de Almeida, P. Fonseca, Power Quality Costs Estimation in Portuguese industry, *11th International conference on electrical power quality and utilization* (EPQU), 2011.

[12] S-A Yin; C-L Su; R-F Chang, Assessment of power quality cost for high-tech industry, *IEEE Power India Conference*, 2006.

[13] M. H. J. Bollen, "*Understanding power quality problems*". IEEE Press/John Wiley Interscience, 2000.

[14] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, *Electrical power systems quality*, 3rd ed. Nova York: McGraw-Hill, 2012.

[15] M. A. S. Masoum, E. F. Fuchs, *Power quality in power systems and electrical machines*, 2nd ed. Cambridge: Academic Press, 2015.

[16] N. Kagan, E. J. Robba, H. P. Schmidt, *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*. São Paulo: Blucher, 2009.

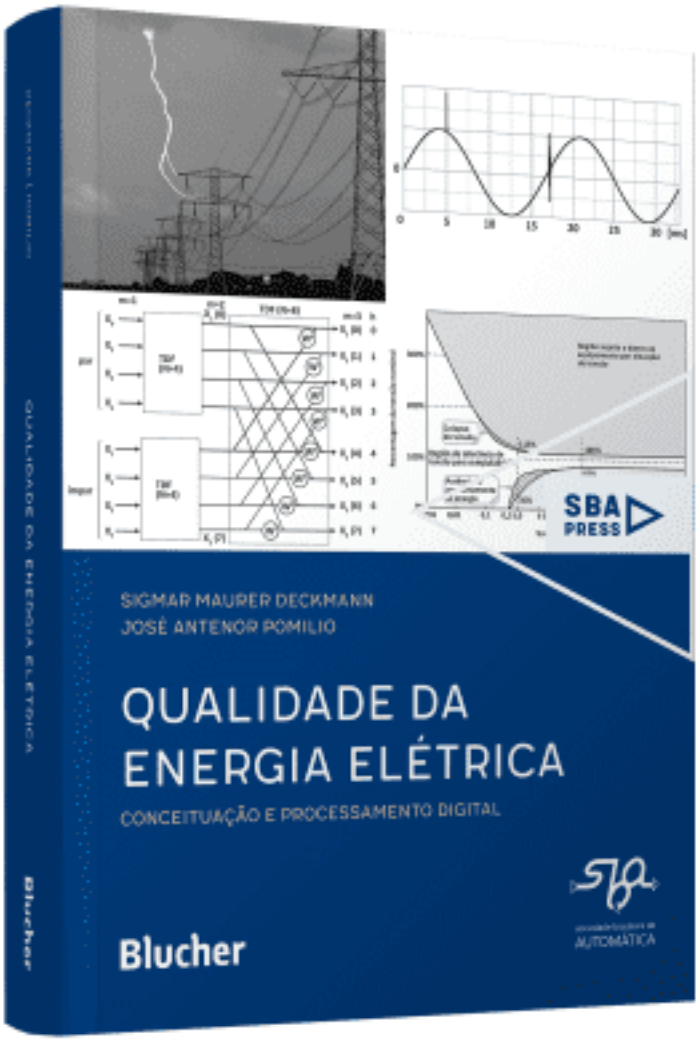
A ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE) DEVE ACOMPANHAR AS TRANSFORMAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO. A DINÂMICA TECNOLÓGICA AVANÇA DE MODO INDEPENDENTE, E MESMO CONSIDERANDO OS ATUAIS LIMITES PREVISTOS PELAS NORMAS DE QEE, NOVOS PROBLEMAS PODEM SURGIR.

A análise da QEE deve atentar para a matriz elétrica e as mudanças decorrentes da transição energética. A presença de fontes renováveis substituindo a geração termoelétrica é crescente, produzindo novos e desafiadores cenários para o sistema elétrico. Em redes com predominância eólica, por exemplo, as variações de frequência têm importância maior que em sistemas hidrelétricos interligados.
O aproveitamento da energia fotovoltaica requer um conversor CC-CA operando em alta frequência, acima da faixa de análise de harmônicos típicos da rede. Além disso, as mudanças tecnológicas na área de iluminação permitem questionar os atuais procedimentos e os limites estabelecidos para flutuações de tensão.
Este livro vai além de um tratado sobre fenômenos de QEE. Possibilita ao leitor uma análise crítica de causas e efeitos, mostrando por que normas são criadas, como se dão os processos digitais de quantificação das grandezas e quais são as limitações inerentes. Em suma, busca preparar o profissional da área de QEE para um futuro de grandes mudanças.

ISBN 978-85-212-2155-5
9 788521 221555

www.blucher.com.br

Blucher



Clique aqui e:

VEJA NA LOJA

Qualidade da energia elétrica

Conceituação e processamento digital

Sigmar Maurer Deckmann, José Antenor Pomilio

ISBN: 9788521221555
Páginas: 384
Formato: 17 x 24 cm
Ano de Publicação: 2024