

1

Introdução

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A partir da década de 1990, um novo modelo e uma nova estruturação do setor elétrico foram introduzidos no Brasil. Algumas características resultantes deste modelo, que são afetas à qualidade de energia elétrica, são apresentadas a seguir:

- As empresas de energia elétrica foram desverticalizadas, ou seja, foram separadas as funções de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica;
- Muitas empresas foram privatizadas, principalmente as distribuidoras;
- Houve a criação da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica e de algumas Agências Reguladoras Estaduais, como foi o caso da CSPE – Comissão de Serviços Públicos de Energia do Estado de São Paulo, que depois passou a ser a ARSESP – Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo.

Uma função principal das agências reguladoras é a regulamentação e fiscalização dos serviços de energia elétrica, garantindo que os consumidores sejam atendidos com uma tarifa justa e qualidade de energia elétrica adequada.

O que vem a ser um problema de qualidade de energia elétrica? Uma forma simples de se tratar problemas deste tipo, em sintonia com o enfoque deste livro, foi sugerida em [1], e o define como “Qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou na frequência que resulte em falha ou má operação de equipamento do consumidor”.

É comum diferenciar três conceitos muito usados que são afetos à qualidade do fornecimento de energia elétrica, quais sejam a qualidade de atendimento, a qualidade de serviço e a qualidade do produto, conforme ilustrado na Figura 1.1.

A **Qualidade do Atendimento** se concentra no relacionamento comercial entre empresa e cliente. Para ilustrar alguns tópicos afins com a

qualidade do atendimento, podem ser citados os procedimentos para ligação nova de consumidor, para religamento de consumidor, para elaboração de estudos e orçamentos de serviços na rede de distribuição, dentre outros.



Figura 1.1 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica

Uma forma de mensurar estes atributos é através do tempo médio para realização de cada uma destas atividades comerciais. Apesar de importante aspecto da qualidade de fornecimento, a qualidade de atendimento não é considerada neste livro.

A **Qualidade do Serviço** pode ser basicamente entendida como a continuidade de fornecimento, lidando basicamente com as interrupções no sistema elétrico, provocadas por falhas no sistema (manutenção corretiva) e por atividades de manutenção programada (manutenção preventiva), em função de serviços necessários a serem realizados no sistema. São muitos os indicadores ligados à continuidade, e estes serão propriamente definidos e tratados no capítulo 2 deste livro.

A **Qualidade do Produto**, que é caracterizada basicamente pela forma de onda de tensão dos componentes de um sistema trifásico, também é chamada de qualidade da tensão. Contempla principalmente os seguintes fenômenos:

- *Variação de frequência*: a tensão de fornecimento deve operar com frequência em valor pré-determinado, 60Hz no Brasil. Variações na frequência, em relação a este valor, são em geral acarretadas por variações da carga do sistema, que podem afetar o balanço entre a potência mecânica e a potência elétrica dos geradores do sistema. Os controles de velocidade dos geradores agem então de forma a estabelecer este balanço e para manter a

freqüência o mais constante possível. Variações de freqüência podem impactar no funcionamento de determinados equipamentos, em particular na conexão de alguns tipos de geração distribuída.

- *Variações de tensão de longa duração:* em função da variação contínua da carga do sistema elétrico, a tensão em barras de unidades consumidoras geralmente sofre variação ao longo do dia. Alguns tipos de equipamentos apresentam menor rendimento ou diminuição da vida útil quando operam com tensão aplicada inferior ou superior a determinados valores limites.
- *Variações de tensão de curta duração:* são variações nos níveis de tensão acarretadas principalmente por faltas no sistema elétrico ou por outros tipos de eventos, como é o caso, por exemplo, da partida de grandes motores ligados ao sistema de distribuição. As variações de tensão de curta duração (VTCDs) são caracterizadas principalmente por dois parâmetros, quais sejam a sua magnitude e duração. O efeito maior deste fenômeno leva a mau funcionamento de equipamentos sensíveis, principalmente no caso de afundamentos de tensão. No caso de elevações de tensão, podem ser provocados danos ou mesmo queima do equipamento. Valores de magnitude e de duração das VTCDs medem a sua severidade e devem ser confrontados com o nível de sensibilidade (ou susceptibilidade) dos equipamentos. Determinados tipos de processos industriais podem sofrer sérias conseqüências pela ocorrência de VTCDs, quando o mau funcionamento de equipamentos sensíveis provoca a parada de processos, perda de matéria prima, longo tempo para reinicialização do processo, etc., que em suma podem gerar prejuízos para as empresas produtoras.
- *Distorções harmônicas:* são distorções, em regime permanente, ou semi-permanente, da forma de onda de tensão ou de corrente, geralmente causadas por dispositivos (cargas) não lineares existentes no sistema. Em geral, são composição de formas de onda periódicas com freqüência múltipla inteira da fundamental da rede. A utilização de cargas não lineares provoca o aparecimento de correntes harmônicas, que são injetadas no sistema elétrico. Mesmo assumindo o sistema elétrico linear, teremos quedas de tensão em cada uma das freqüências harmônicas, provocando o aparecimento de distorções na forma de onda de tensão. Correntes harmônicas circulando no sistema de distribuição aumentam as perdas elétricas no sistema, e limitam a capacidade de transporte de demanda, além da possibilidade de ocorrência de ressonâncias harmônicas em determinados pontos do sistema, que podem provocar danos às instalações

(sobretensões harmônicas). Distorções harmônicas podem ainda provocar queima de capacitores e fusíveis, sobreaquecimento de transformadores e motores, vibração ou falha de motores, falha ou operação indevida de disjuntores, mau funcionamento de relés de proteção, problemas em controle de equipamentos, interferência telefônica, medições incorretas de energia elétrica, dentre outros efeitos.

- *Desequilíbrios de tensão e corrente:* são fenômenos de longa duração, assim como as variações de tensão de longa duração, e ocorrem em sistemas trifásicos devido a diversos fatores, como o modo de ligação de cargas e a assimetria existente nas redes elétricas. Desequilíbrios ocorrem em corrente e tensão trifásicas, sempre que ocorram diferenças em módulos ou em ângulos entre as componentes de fase. Desequilíbrios de corrente são comumente originados pelas cargas do sistema. Por exemplo, quando são conectados transformadores de distribuição monofásicos em redes trifásicas, obviamente temos cargas desequilibradas para a rede primária, de média tensão. Desequilíbrios de corrente provocam, em função das quedas de tensão na rede, desequilíbrios de tensão. Em redes assimétricas, por exemplo, em linhas de transmissão ou distribuição sem transposição, mesmo quando não há desequilíbrio de corrente, haverá a presença de desequilíbrio de tensão junto a carga. O desequilíbrio de tensão ou corrente é normalmente definido pela relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva. Desequilíbrio de tensão é um indicador muito importante de qualidade de energia, pois pode originar diversos impactos sobre as cargas do sistema: em motores elétricos, provoca redução da potência útil, redução do torque mecânico, redução da vida útil e aumento das vibrações. Nas redes, pode provocar interferências em linhas de telecomunicação e aumento das perdas ôhmicas.
- *Flutuações de tensão:* são oscilações provocadas por cargas variáveis: na baixa tensão podem ser provocadas por eletrodomésticos, bombas d'água e elevadores; na média tensão, podem ser provocadas por fornos a arco, máquinas de solda, laminadoras e grandes motores; em sistemas de alta e extra-alta tensão, são originadas apenas em fornos a arco. O principal efeito destas oscilações de tensão são cintilações em sistemas de iluminação (*flicker*), que provocam uma sensação bastante desagradável a pessoas em ambientes iluminados. As frequências verificadas neste fenômeno são bastante baixas, na ordem de 10Hz, e ocorrem sobre a frequência da rede.

Ainda existem vários outros fenômenos tratados no âmbito da qualidade da energia elétrica, tais como os (i) ruídos, que são componentes não periódicos na forma de onda, as (ii) inter-harmônicas, que são produzidas por equipamentos que absorvem correntes com frequência não múltipla da frequência fundamental e os cortes (*notching*) de tensão, que são produzidos em retificadores trifásicos, na comutação de um diodo ou tiristor para outro, acarretando um curto circuito de baixíssima duração (em torno de 1ms) e uma conseqüente redução da tensão.

A preocupação cada vez mais acentuada por qualidade de energia elétrica, principalmente nos últimos 15 anos, se deve à grande quantidade de equipamentos e processos sensíveis, que são afetados por problemas de qualidade de energia elétrica. Além disso, existe crescimento de cargas não lineares provenientes de novos equipamentos instalados nos consumidores. A busca por sistemas cada vez mais eficientes e processos cada vez mais produtivos demanda equipamentos que se apresentam para o sistema como cargas não lineares.

Problemas causados por qualidade de energia elétrica provocam enormes prejuízos, principalmente aos consumidores industriais e comerciais. Cada um dos fenômenos tratados na qualidade da energia elétrica, sejam classificados como qualidade dos serviços prestados ou qualidade do produto relacionado à forma de onda, provoca efeitos sobre equipamentos e processos dos consumidores.

Com o intuito de equilibrar os custos associados com estes prejuízos, agências reguladoras no mundo inteiro vêm lançando normas e resoluções de forma a regulamentar os indicadores de qualidade de energia elétrica afetos aos pontos de entrega dos consumidores.

Para a qualidade de serviço, a resolução ANEEL 024/2000 [2] estabelece claramente os indicadores correspondentes, os valores limites destes indicadores e como são tratadas as suas transgressões. A resolução ANEEL 505/2001 [3] faz o mesmo papel para as variações de tensão de longa duração, definindo faixas de tensão adequada, precária e crítica para os diferentes níveis de tensão de fornecimento. O PRODIST – Procedimentos de Distribuição [4], da ANEEL, que está em vigência desde 31 de dezembro de 2008, trata da qualidade de energia em seu módulo 8. Quanto à qualidade do produto, este módulo define a metodologia e caracteriza os fenômenos, os parâmetros e os valores de referência relativos às variações de tensão de longa duração e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos para fixar padrões correspondentes. Quanto à qualidade do serviço, o módulo 8

estabelece a metodologia para a apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Com o PRODIST, as concessionárias deverão cada vez mais gerenciar seus indicadores de qualidade de energia, seja do ponto de vista espacial, isto é, ao longo da rede de distribuição e dos pontos de entrega aos consumidores, seja do ponto de vista temporal, isto é, acompanhar a evolução dos indicadores ao longo do tempo.

A monitoração da qualidade da energia elétrica é um assunto bastante amplo. No caso da qualidade de serviço, as concessionárias se baseiam nos registros de ocorrências, cujas informações são provenientes dos telefonemas de consumidores, dos registros da operação, como o SCADA, equipes de manutenção no campo, dentre outros, que são todos direcionados aos Centros de Operação. Estes registros, armazenados em bancos de dados específicos, permitem com que sejam, a posteriori, contabilizados os indicadores relativos às interrupções no fornecimento de energia elétrica, como é o caso da frequência e duração de interrupções por consumidor, ou por grupo de consumidores. Estes processos são auditados pelo órgão regulador, mas não são necessariamente precisos, pois são afetados por vários fatores, como por exemplo o atraso no início dos telefonemas ao Centro de Operações. O ideal seria a contabilização das interrupções em cada consumidor, sem dependência de processos internos da empresa o que, ainda, não é possível do ponto de vista econômico. No caso da qualidade do produto, a dependência de medidores ao longo do sistema é ainda mais marcante. A grande maioria dos fenômenos apontados nesta introdução já é mensurável, e são definidos indicadores que possibilitam análises globais e pontuais da qualidade da energia elétrica. No entanto, os medidores de qualidade de energia, mesmo somente para a detecção e registro de fenômenos relacionados à forma de onda de tensão, ainda são relativamente caros. Com isso, são instalados em alguns poucos locais da rede. No caso dos sistemas de distribuição, em geral ou quando possível, são instalados nas subestações de distribuição.

Este panorama provê um campo fértil para a estimação dos indicadores de qualidade da energia elétrica, que é o interesse maior deste livro.

Para tanto, diversos métodos foram desenvolvidos, que permitem a avaliação dos indicadores baseada em dados históricos de ocorrências na rede e de medições em certos locais da rede que podem ser estendidas para os demais pontos de interesse da rede. A estimação de indicadores de qualidade de serviço parte de modelos clássicos da área de avaliação da confiabilidade de

sistemas elétricos, como os métodos analíticos de cortes mínimos e o método de Monte Carlo, que se baseiam em taxas de falha e tempos médios de restabelecimento, provenientes de dados históricos de ocorrências nas empresas de distribuição. A estimação de indicadores de variação de tensão de longa duração, isto é, em regime permanente, parte de programas convencionais de fluxo de potência, que permitem análise espacial e temporal dos níveis de tensão no sistema de potência. Os indicadores de variações de tensão de curta duração são baseados em modelos estocásticos que se utilizam de programas de curto circuito e de análise da proteção no sistema elétrico. Os indicadores relacionados às distorções harmônicas partem de fluxo de potência harmônico, que é uma extensão dos programas convencionais em regime permanente. Além disso, todos os indicadores podem ter sua estimação refinada a partir de informações provenientes de medidores adequados instalados em locais específicos da rede. Desta forma, locais não monitorados podem ter uma estimativa de indicadores de qualidade baseada em modelos que partem das medições em outros locais da rede, outros dados estatísticos e dados topológicos e elétricos do sistema elétrico.

1.2 ESTRUTURA DO LIVRO

Além deste capítulo introdutório, o livro está estruturado de acordo com os fenômenos de qualidade de energia considerados, com os correspondentes enfoques para estimação dos indicadores relativos à continuidade de fornecimento, variações de tensão de longa duração de regime permanente, variações de tensão de curta duração e distorções harmônicas.

O capítulo 2 trata da qualidade de serviço que considera basicamente os indicadores relativos à continuidade de fornecimento. Apresenta os indicadores mais utilizados, notadamente os definidos pela ANEEL, bem como metodologia para serem fixadas as metas de qualidade de energia, baseadas em comparação de conjuntos de unidades consumidoras similares quanto a atributos impactantes à qualidade do serviço. A estimação dos indicadores de qualidade de energia é inicialmente considerada para as redes radiais, que abrangem a maior parte das redes de distribuição. Exemplos de aplicação mostram como o cálculo é bastante simples, além de apresentar uma análise quantitativa de redes sem chaves de manobra entre circuitos, com chaves de socorro para acionamento manual e com chaves automáticas através de acionamento remoto. O capítulo também fornece uma abordagem para a estimação dos indicadores de qualidade de serviço em redes em malha, utilizando um modelo analítico com o conceito de caminhos e cortes mínimos

e outro, mais genérico, utilizando o método de simulação de Monte Carlo.

O capítulo 3 trata dos indicadores de variação de tensão de longa duração, ou seja, da tensão em regime permanente. Os indicadores de regime permanente, definidos pela Resolução 505/2001 da ANEEL, são apresentados. Mesmo as tensões em regime permanente são dificilmente medidas, principalmente quando da necessidade de se considerar cada consumidor individualmente. O capítulo fornece os subsídios para avaliação dos indicadores, a partir de ferramentas de fluxo de potência e de estimação de estados, para as redes radiais e para as redes em malha. Outro fenômeno de qualidade de energia, fortemente relacionado com as variações de tensão de longa duração, refere-se aos desequilíbrios de tensão. Para a avaliação do indicador correspondente, o capítulo trata de redes radiais em malha, com modelagem trifásica dos componentes da rede e de cargas desequilibradas.

O capítulo 4 trata das variações de tensão de curta duração, ou seja, os afundamentos e elevações de tensão. Previamente à definição dos indicadores correspondentes, são descritas as curvas de sensibilidade de equipamentos sensíveis, a área de vulnerabilidade de um consumidor instalado na rede e os princípios de protocolos de medição. O capítulo mostra como os principais parâmetros relativos às variações de tensão de curta duração, quais sejam, magnitude, duração e frequência, podem ser estimados, utilizando, respectivamente, algoritmos de cálculo de curto circuito em redes, programas de análise da proteção e métodos estocásticos, que partem de dados de taxas de falta na rede como fonte de informação para a localização e quantidade das ocorrências de curto circuito na rede. Para estimação dos indicadores, são apresentados dois métodos, o primeiro baseado em enumeração dos estados possíveis e o segundo que se utiliza do método de simulação de Monte Carlo. Além disso, o capítulo mostra como medições em locais específicos podem ser utilizadas para a estimação das variações de tensão de curta duração em barras específicas.

O capítulo 5 considera as distorções harmônicas de tensão. São definidos os principais indicadores para a avaliação da qualidade do produto, que basicamente afetam a forma de onda da tensão de fornecimento. O capítulo considera distorções harmônicas em sistemas trifásicos, com modelagem adequada. São dados exemplos de ressonância série e paralela. O capítulo ainda fornece os subsídios para a modelagem dos componentes para o fluxo de potência harmônico, bem como idéia básica de um estimador de distorção harmônica, que se baseia em medições localizadas de distorção de harmônicos de tensão e corrente, para estimar os indicadores correspondentes

em outros pontos da rede, não monitorados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty: *Electrical power systems quality*, 2nd edition, McGraw-Hill, 2003.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Resolução ANEEL N° 024, de 27 de janeiro de 2000.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Resolução N° 505, de 26 de novembro de 2001.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Procedimentos de distribuição, PRODIST, 2009.

